

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

**Evaluación de la metodología de Ensayo Acelerado de Barras
de Mortero ASTM C 1260 para detectar agregados
potencialmente reactivos y las medidas de mitigación de la
reacción álcali-sílice ASTM C 1567**

Stefanny Bolivar Murcia

Escuela Colombiana de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2017

Evaluación de la metodología de Ensayo Acelerado de Barras de Mortero ASTM C 1260 para detectar agregados potencialmente reactivos y las medidas de mitigación de la reacción álcali-silice ASTM C 1567

Stefanny Bolivar Murcia

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Civil

Ingeniera, Nancy Torres Castellanos, Ph.D.

Directora:

Línea de investigación:

Materiales y estructuras

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2017

A mi familia, ya que, sin el apoyo de ellos, no me hubiera convertido en la persona que soy ahora.

"Es intentando lo imposible como se realiza lo posible"

Anónimo

Agradecimientos

A mis padres y hermana quienes a lo largo de mi vida han contribuido con el ejemplo de trabajo y esfuerzo se logran las metas, por el amor y apoyo en todas las circunstancias.

A los docentes del programa de maestría en ingeniería civil, quienes con integridad aportaron nuevos conocimientos en mi carrera profesional, inspirándome a realizar día a día con amor el desarrollo de la ingeniería.

A mi directora de tesis, gracias a su coordinación, apoyo y dedicación no hubiera sido esto posible.

A los laboratoristas del laboratorio de estructuras y materiales, quienes con su disposición y apoyo se lograron realizar los ensayos.

Resumen

La reacción álcali sílice se define como un fenómeno producido por los álcalis (sodio o potasio) del cemento, los cuales reaccionan con la sílice presente en ciertos agregados, formando un gel que bajo condiciones de humedad genera micro fisuras y esfuerzos internos.

La comunidad internacional resalta el interés de investigar este campo debido a problemas de servicio, riesgos de seguridad, el alto costo de reparaciones y dificultad en reemplazos de elementos estructurales. También la reacción álcali sílice puede acelerar los mecanismos de deterioro como: la entrada de agentes externos agresivos que aumentan la susceptibilidad de las estructuras a los problemas de corrosión de la armadura. De igual forma se ha encontrado que la reacción álcali sílice afecta las propiedades mecánicas del concreto.

En el presente documento se exponen los resultados de un proyecto de investigación donde se evaluó la potencial reactividad de tres agregados del territorio colombiano en combinación con dos tipos de cementos y dos relaciones agua-cemento, bajo el ensayo ASTM C 1260 de barras de mortero. De las muestras reactivas, se evaluó la efectividad de materiales cementantes para mitigar la reacción álcali-sílice, bajo el ensayo ASTM C 1567 de barras de mortero. Finalmente se analizó el comportamiento mecánico de muestras de mortero como: la resistencia a compresión y flexión y propiedades elásticas.

Fueron comparadas las respuestas encontradas, concluyendo que la reacción álcali sílice aumenta a medida que aumenta la relación agregado-cemento y esta depende de la composición mineralógica de cada agregado. Por otro lado, los materiales mitigantes como la ceniza volante F, microsilice y metacaolín son competentes en reducir la reacción álcali sílice en cierta proporción de reemplazo; las propiedades mecánicas más afectadas por la reacción álcali sílice son las propiedades elásticas y la resistencia a flexión, la resistencia a compresión se ve afectada en menor porcentaje a través del tiempo.

Palabras clave: Reacción álcali-sílice, material cementante mitigante, patología.

Abstract

The alkali silica reaction is defined as a phenomenon produced by the alkali (sodium or potassium) of the cement, which react with the silica present in certain aggregates, they're forming a gel, that under conditions of humidity generates micro cracks and internal stresses.

The international community highlights the interest of research this field, due to workability problems, security risks, the high cost of repairs and difficulty in replacing structural members. Also, the alkali silica reaction can accelerate the mechanisms of deterioration as the entrance of aggressive external agents that increase the susceptibility of the structures to the problems of armature corrosion. It has also been found that the alkali silica reaction affects the mechanical properties of the concrete.

This paper presents the results of a research project that evaluated the potential reactivity of three aggregates of the Colombian territory in combination with two cement types and two cement water ratios according with ASTM C 1260 mortar test bars. From the reactive samples, the alkali silica reaction was evaluated through the effectiveness of cementing materials.

Finally, the mechanical behavior was analyzed as: the resistance to compression and flexion and elastic properties. Comparing the answers was concluded: the alkali silica reaction increases as the aggregate-cement ratio increases, and it's depends the mineralogic composition. On the other hand, mitigating materials such as fly ash F, microsilice and metacaolin are competent to reduce the alkali silica reaction due to amount of replacement; The mechanical properties were affected by the alkali silica reaction as: the elastic properties and the flexural strength, the compressive strength is affected to a lesser percentage.

Keywords: alkali silica reaction, cementing materials, pathology.

Contenido

	Pág.
Resumen	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	1
Lista de Símbolos y abreviaturas	¡Error! Marcador no definido.
Introducción	3
1. Marco teórico	9
1.1 Reacción álcali- sílice	9
1.2 Factores que afectan la reacción álcali- sílice	11
1.2.1 Agregado	12
1.2.2 Cemento	17
1.2.3 Humedad	18
1.2.4 Temperatura	19
1.3 EFECTOS DE LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE.....	20
1.4 PREVENCIÓN DE LA REACCIÓN ALCALI SILICE.....	24
1.4.1 Ceniza volante	26
1.4.2 Metacaolín	28
1.4.3 Humo de sílice	30
1.4.4 Uso de litio	31
1.5 MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR LA RAS	33
1.5.1 Petrografía	33
1.5.2 Método químico	35
1.5.3 Métodos expansivos.	37
2. Estado del arte	43
2.1 Experiencia en Estados Unidos ASTM.....	43
2.1.1 Campos de exposición	48
2.2 Resumen de experiencia internacional en la RAS	51
2.2.1 Métodos de ensayo usados en la actualidad en Europa	53
2.2.1.12. Canadá	74

2.3	Reactividad álcali agregado en Colombia	76
3.	Objetivo.....	81
3.1	General	81
3.2.	Específicos	81
4.	Programa experimental	83
4.1	Materiales	84
4.1.1	Agregados.....	84
4.1.2	Cemento.....	87
4.1.3	Adiciones cementantes	89
4.1.4	Solución química.....	90
4.2	Variables del estudio experimental.....	91
4.2.1	Etapa I.....	91
4.2.2	Etapa II.....	93
4.3	Ensayos para evaluar la reactividad de los agregados	95
4.3.1	ASTM C 1260 Método de Ensayo Estándar para la reactividad Alcalina Potencial de los Agregados (Método de la Barra de Mortero).....	95
4.3.2	ASTM C1567 Método de Prueba Estándar para Determinar la Potencial Reactividad Alcalino-Sílice de Combinaciones de Materiales Cementicios y Agregados (Método de Barra de Mortero Acelerado	99
4.3.3	Petrografía	100
4.4	Ensayos para evaluar las propiedades mecánicas	100
4.4.1	Ensayo de compresión de mortero	100
4.4.2	Ensayo de cilindros a compresión	101
4.4.3	Ensayo de módulo de elasticidad.	102
4.4.4	Ensayo de flexión en vigas.	102
5.	Resultados y análisis	105
5.1	Reactividad de los agregados y la influencia de la relación agua-cemento.	105
5.2	Evaluación de la eficiencia de las adiciones cementantes como control de las expansiones.	110
5.2.1	Uso de ceniza volante tipo F.....	110
5.2.2	Uso de Microsilice.	112
5.2.3	Uso de Metacaolin.	114
5.2.4	Efectividad de las alternativas de mitigación.	116
5.3	Análisis del Comportamiento Mecánico.....	120
5.3.1	Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cubos de mortero.	120
5.3.2	Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cilindros de concreto.	122
5.3.3	Efecto del RAS en la resistencia a la flexión.....	123
5.3.4	Efecto del RAS en el módulo elástico.	126
5.4	Análisis petrográfico	129
6.	Resultados y análisis	¡Error! Marcador no definido.
6.1	Conclusiones	134
6.2	Recomendaciones	136
7.	ANEXOS.....	138
8.	Bibliografía	139

Lista de figuras

FIGURA 1-1 THOMAS STANTON JUNTO A UN MURO AFECTADO POR LA REACCIÓN ALKALI-AGREGADO.....	10
FIGURA 1-2 MODELO DE REPRESENTATIVO DEL TETRAEDRO DE SÍLICE.	10
FIGURA 1-3 FACTORES PRIMARIOS QUE INFLUENCIAN LA REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO EN CONCRETO. (ZOLLINGER ET AL., 2009)	12
FIGURA 1-4 ESTRUCTURA ESQUEMÁTICA CRISTALINA DE OPAL Y CUARZO. (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013). ..	13
FIGURA 1-1 SÍLICE SOLUBLE EN AGREGADOS. (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013).....	14
FIGURA 0-2 EFECTO DE DIFERENTES RELACIONES AGUA-CEMENTO PARA ENSAYOS DE BARRAS DE MORTERO ACELERADO, PARA ROCAS INOCUAS (GNEISS Y GRANITO) WIGUM (1995).	16
FIGURA 0-3 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL COMPORTAMIENTO “PESSIUM” . (ADAPTADA DE POOLE, 1992) (MARTINEZ, 2012)	17
FIGURA 0-4 EFECTOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DE DIFERENTES AGREGADOS USANDO ASTM C 1293. (PENDNEAULT, 1996). 19	
FIGURA 0-5 ESQUEMA DE PROGRESIÓN Y CONSECUENCIA DE EXUDACIÓN EN RAS (HOBBS, 1988).....	21
FIGURA 0-6 (A) MAPA DE GRIETAS DE UN PUENTE DE 30 AÑOS DE EDAD (B) GRIETAS ALINEADAS EN UNA COLUMNA AFECTADA RAS (C) PATRÓN DE GRIETAS ASOCIADA AL RAS.	22
FIGURA 0-7 (A) MOVIMIENTO RELATIVO DE ESTRUCTURA DE PUENTE AFECTADO POR RAS (B) EXPANSIÓN CON DESPRENDIMIENTO SEVERO (C) DESCASCARAMIENTO ASOCIADO A RAS.	23
FIGURA 0-8 EXUDACIÓN EN CONCRETO OBSERVADO DENTRO DE UNA GALERÍA DE UNA PRESA. (RUSSELL, 1983; Y FARNY KOSMATKA., 1997; FOURNIER ET AL, 2004).	24
FIGURA 0-9 EXPANSIÓN DEL CONCRETO CON CENIZA VOLANTE CON DIFERENTES CONTENIDOS DE CALCIO. (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013).....	27
FIGURA 0-10 EXPANSIÓN DEL CONCRETO CON CENIZA VOLANTE CON DIFERENTES CONTENIDOS DE CALCIO. (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013).....	27
FIGURA 0-11 EVOLUCIÓN DE EXPANSIÓN DE / CSA BARRAS DE MORTERO A23.2-25A -CAN CONTIENEN HRM. (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013).....	29
FIGURA 0-12 EXPANSIÓN DESPUÉS DE 6 MESES DE ESPECÍMENES HECHOS CON DIFERENTES NIVELES DE REEMPLAZO DE DIFERENTES ADICIONES. (RASHEEDBUZAFAR 1991).	30
FIGURA 0-13 EFECTO DE LA DOSIS DE LITIO EN LA EXPANSIÓN DEL CONCRETO CON DIFERENTES AGREGADOS REACTIVOS. (TREMBLAY ET AL. 2007).....	32
FIGURA 0-14 CONTEO DE PUNTOS SIGUIENDO CUADRICULA ORTOGONAL.(“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012).....	34
FIGURA 0-15 DIVISIÓN ENTRE INOCUOS Y AGREGADOS REACTIVOS EN BASE AL ENSAYO DE ALCALINIDAD. (“MONOGRAPH ON ALKALI AGGREGATE REACTION,” 2008).....	36
FIGURA 0-16 RELACIÓN ENTRE EXPANSIÓN Y EL CONTENIDO DE ÁLCALIS CON ARENA DE SÍLEX EN DIFERENTES CONDICIONES DE ENSAYO (THOMAS ET AL., 2006).....	37

FIGURA 0-17 A) PREPARACIÓN DE BARRAS DE MORTERO. B) ASPECTO FINAL DE LAS BARRAS DE MORTERO DESPUÉS DE DESMOLDAR. (ISABEL & RAMOS, 2013) 38

FIGURA 0-18 COMPARACIÓN ENTRE ASTM C1260 Y ASTM C 1293 RESULTADOS ILUSTRANDO LA SEVERIDAD DE ATM C 1260 (TOUMA, 2000) 39

FIGURA 0-19 LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA UNIVERSIDAD LAVAL PARA EL MÉTODO DE BARRAS DE MORTERO AUTOCLAVE, PARA LOS AGREGADOS DE SILICATOS DE QUEBEC. (BÉRUBÉ & FOURNIER, 1993)..... 40

FIGURA 0-20 PRISMAS DE CONCRETO ALMACENADOS EN UN CONTENEDOR CON AGUA. 41

FIGURA 2-1 VISTA DE UNO DE LOS SITIOS DE EXPOSICIÓN A BRE.(THOMAS ET AL., 2006) 48

FIGURA 2-2 EFECTO DE LAS CENIZAS VOLANTES EN LA EXPANSIÓN DE LOS CUBOS DE CONCRETO DE 900 MM (CON ARENA DE SÍLEX). 49

FIGURA 2-3 FOTOGRAFÍAS DE CUBOS DE CONCRETO CON 90 MM DE LADO, DE 11 AÑOS DE EDAD, CON UN 100% DE OPC (IZQUIERDA) Y CON CENIZAS VOLANTES 25% (DERECHA)..... 49

FIGURA 2-4 CAMPOS DE EXPOSICIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE TEXAS EN AUSTIN (IZQUIERDA) Y CANMET-TL EN OTAWA (DERECHA)..... 50

FIGURA 2-5 METODOLOGÍA PROPUESTA POR RILEM PARA IDENTIFICACIÓN DE AGREGADOS REACTIVOS..... 53

FIGURA 2-6 UTILIZACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO SEGÚN PAÍSES.(“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012) 60

FIGURA 2-7 ENSAYOS UTILIZADOS EN DIFERENTES PAÍSES (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012) 76

FIGURA 2-8 ENSAYOS UTILIZADOS EN DIFERENTES PAÍSES (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012) 76

FIGURA 2-9 MAPA DE COLOMBIA INDICANDO LOS LUGARES CON AGREGADOS REACTIVOS. INGEOMINAS. 77

FIGURA 4-1 PRESENTACIÓN COMERCIAL DEL METACAOLIN, CENIZA VOLANTE TIPO F Y MICROSILICE..... 89

FIGURA 4-2 HIDRÓXIDO DE SODIO. 91

FIGURA 4-3 MEZCLADORA MECÁNICA. 96

FIGURA 4-4 MESA DE FLUJO PARA MEDIR LA FLUIDEZ..... 97

FIGURA 4-5 MOLDES UTILIZADOS. 97

FIGURA 4-6 HORNO..... 98

FIGURA 4-7 COMPARADOR 98

FIGURA 4-8 RECIPIENTES HERMETICOS UTILIZADOS. 99

FIGURA 4-9 MONTAJE DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS DE MORTERO 101

FIGURA 4-10 PROBETAS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN DE CILINDROS 101

FIGURA 4-11 MONTAJE ENSAYO MÓDULO DE ELASTICIDAD..... 102

FIGURA 4-12 MONTAJE DE ENSAYO DE FLEXIÓN DE VIGAS. 103

FIGURA 5-1 EXPANSIÓN SEGÚN ASTM 1260 PARA PROBETAS ELABORADAS CON LAS MEZCLAS DE LA ETAPA 1. 106

FIGURA 5-2 EXPANSIÓN SEGÚN ASTM 1260 PARA LAS DIFERENTES COMBINACIONES EN ESTUDIO PARA MEZCLAS DE LA ETAPA I. 107

FIGURA 5-3 EXPANSIÓN A LOS 14 DÍAS DEL AGREGADO DE TUNJUELO..... 108

FIGURA 5-4 EXPANSIÓN A LOS 14 DÍAS DEL AGREGADO DE TUMACO. 109

FIGURA 5-5 EXPANSIÓN A LOS 14 DÍAS DEL AGREGADO DE CEMEX. 109

FIGURA 5-6 EFECTO DE CENIZA VOLANTE PARA AGREGADO DE TUMACO..... 111

FIGURA 5-7 EFECTO DE CENIZA VOLANTE PARA AGREGADO CEMEX. 112

FIGURA 5-8 EFECTO DE MICROSILICE PARA AGREGADO DE TUMACO. 113

FIGURA 5-9 EFECTO DE MICROSILICE PARA AGREGADO CEMEX. 114

FIGURA 5-10 EFECTO DE METACAOLIN PARA AGREGADO DE TUMACO..... 115

FIGURA 5-11 EFECTO DE METACAOLIN PARA AGREGADO CEMEX..... 116

FIGURA 5-12 COMPARACIÓN DE 28 DÍAS CON DIFERENTES MITIGANTES PARA EL AGREGADO DE TUMACO..... 118

FIGURA 5-13 COMPARACIÓN DE 28 DÍAS CON DIFERENTES MITIGANTES PARA EL AGREGADO DE CEMEX. 119

FIGURA 5-14 COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA AGREGADO DE TUMACO.	121
FIGURA 5-15 COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA AGREGADO DE CEMEX.	121
FIGURA 5-16 GRAFICA DE ESFUERZO A COMPRESIÓN PARA CILINDROS DE MORTERO.	123
FIGURA 5-17 ENSAYO A FLEXIÓN DE VIGAS DE MORTERO.....	124
FIGURA 5-18 LÍNEAS DE FALLA EN VIGAS DE MORTERO.....	124
FIGURA 5-19 FISURACIÓN DE VIGA DE MORTERO DEBIDO A RAS.....	126
FIGURA 5-20 MODULO DE ELASTICIDAD PARA PROBETAS DE LA ETAPA II A 28 Y 90 DÍAS	128
FIGURA 5-21 SECCIONES DELGADAS DE LAS MUESTRAS. INFORME NRBMICROMATCO S.A.S.....	129
FIGURA 5-22 MICROFOTOGRAFÍAS BAJO EL MICROSCOPIO PETROGRÁFICO DE LA MUESTRA TUMACO MOSTRANDO VARIOS VACÍOS (VA) CON PRESENCIA DE GEL PRODUCTO DE REACCIÓN ÁLCALI – SÍLICE (RAS) OBSERVÁNDOSE COMO UN GEL CRISTALINO BIRREFRINGENTE, ADEMÁS DE LA COMPOSICIÓN DE ALGUNOS AGREGADOS COMO TOBAS (TOB) Y CUARZO POLICRISTALINO (Qz) Y LA TEXTURA DE LA PASTA CEMENTANTE (PC), VISTAS CON NICOLES PARALELOS Y NICOLES CRUZADOS, RESPECTIVAMENTE (A, C, E Y B, D, F). INFORME NRBMICROMATCO S.A.S.....	132
FIGURA 5-23 MICROFOTOGRAFÍAS BAJO EL MICROSCOPIO PETROGRÁFICO DE LA MUESTRA CEMEX MOSTRANDO VARIOS VACÍOS (VA) CON PRESENCIA DE GEL PRODUCTO DE REACCIÓN ÁLCALI – SÍLICE (RAS) OBSERVÁNDOSE COMO UN GEL CRISTALINO BIRREFRINGENTE, ADEMÁS DE LA COMPOSICIÓN DE ALGUNOS AGREGADOS COMO CHERTS (CH), ARCILLOLITAS (ARC) Y LA TEXTURA DE LA PASTA CEMENTANTE (PC), VISTAS CON NICOLES PARALELOS Y NICOLES CRUZADOS, RESPECTIVAMENTE (A, C, E Y B, D, F). INFORME NRBMICROMATCO S.A.S	133

Lista de tablas

TABLA 1-1 CONTENIDO ALCALINO MÍNIMO EN EL CONCRETO. TOMADO Y ADAPTADO DE (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013).	26
TABLA 1-2 MUESTREO SEGÚN LA NORMA ASTM C295	35
TABLA 2-1 MÉTODOS DE ENSAYO PARA MEDIR LA POTENCIAL REACTIVIDAD DE LOS AGREGADOS	44
TABLA 2-2 MÉTODOS MÁS USADOS PARA IDENTIFICAR RAS (TOUMA, 2000)	45
TABLA 2-3 MÉTODOS MÁS USADOS PARA EVALUAR LAS MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA RAS (US DEPARTEMENT OF TRANSPORTATION, 2013)	47
TABLA 2-4 RESUMEN SIMPLIFICADO DE RESULTADOS DE LA ENCUESTA (NIXON & SIMS, 1996)	51
TABLA 2-5 NORMAS DE ENSAYOS EN ALGUNOS PAÍSES DEL MUNDO. (AUTOR)	52
TABLA 2-6 MÉTODOS DE ENSAYO Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE RILEM (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)	54
TABLA 2-7 LISTA DE MÉTODOS DE ENSAYOS PARA MEDIR LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE A LO LARGO DE EUROPA.(COMMUNITY & GROWTH, N.D.)	55
TABLA 2-8 METODOLOGÍAS EN PAÍSES EUROPEOS, 1995 (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)	59
TABLA 2-9 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ALEMANIA (WIGUN ET AL., 2006; CHAK ET AL., 2004)	62
TABLA 2-10 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA AUSTRIA ((WIGUN ET AL., 2006)	63
TABLA 2-11 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA DINAMARCA ((WIGUN ET AL., 2006)	65
TABLA 2-12 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA FRANCIA (CHAK ET AL., 2004)	68
TABLA 2-13 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA ISLANDIA (CHAK ET AL., 2004)	70
TABLA 2-14 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA EL SUECIA. ((WIGUN ET AL., 2006)	71
TABLA 2-15 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA EL REINO UNIDO (CHAK ET AL., 2004)	72
TABLA 2-16 MÉTODOS Y CRITERIOS DE ACEPTACIÓN PARA CANADÁ. (CHAK ET AL., 2004)	75
TABLA 2-17 TABLA DE FUENTES DE AGREGADOS REACTIVOS EN COLOMBIA. INGEOMINAS	77
TABLA 4-1 TABLA DE ARENAS USADAS.	84
TABLA 4-2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE AGREGADOS EN ESTUDIO.	86
TABLA 4-3 VALORES DE DENSIDAD Y FINURA DE CEMENTOS EN ESTUDIO.	87
TABLA 4-4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO TIPO III.	88
TABLA 4-5 COMPOSICIÓN QUÍMICA CENIZA VOLANTE TIPO F.	90
TABLA 4-6 MEZCLAS DE MORTERO USADAS PARA ENSAYO ASTM C1260.	92
TABLA 4-7 PROPORCIONES DE MATERIAL CEMENTANTE DE REEMPLAZO.	93
TABLA 4-8 MEZCLAS DE MORTERO USADAS PARA EVALUAR MITIGACIÓN DE RAS. ASTM C1567.	94
TABLA 4-9 RANGO GRANULOMÉTRICO ESPECIFICADO EN ASTM C 1260	95
TABLA 5-1 ASTM C 1260 EXPANSIÓN PARA MEZCLAS DE LA ETAPA I.	105
TABLA 5-2 ASTM C 1567. EXPANSIÓN USANDO CENIZA VOLANTE TIPO F.	111
TABLA 5-3 EXPANSIÓN USANDO MICROSILICE. ASTM C 1567	113
TABLA 5-4 EXPANSIONES USANDO METACAO LIN.	114
TABLA 5-5 EFECTIVIDAD DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN USANDO EL CRITERIO DE 0.10% DE EXPANSIÓN A LOS 14 DÍAS.	117

TABLA 5-6 EXPANSIÓN EN PORCENTAJE PARA EL AGREGADO DE TUMACO CON LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN.	117
TABLA 5-7 EXPANSIÓN EN PORCENTAJE PARA EL AGREGADO DE CEMEX CON LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN. ..	118
TABLA 5-8 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CUBOS DE MORTERO.	120
TABLA 5-9 ESFUERZO A COMPRESIÓN EN CILINDROS DE MORTERO PARA MUESTRAS DE LA ETAPA II.....	122
TABLA 5-10 MODULO DE ROTURA PARA MORTERO A 90 DÍAS.....	127
TABLA 5-11 MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA MUESTRAS DE LA ETAPA 2.	126
TABLA 5-12 CALCULO DE RESULTADO DE CONTEO DE PARTÍCULAS. INFORME NRBMICROMATCO S.A.S.....	130
TABLA 5-13 REACTIVIDAD POTENCIAL DEL AGREGADO. NRBMICROMATCO S.A.S	130

Introducción

Introducción

El concreto, es en la actualidad el material más utilizado para realizar obras de infraestructura, tales como viviendas, túneles, presas, vías, entre otras; se ve atacado por un fenómeno que afecta su durabilidad y se evidencian sus efectos con el tiempo después de años de construcción; llamado reacción álcali-agregado, el cual tiene dos formas: reacción álcali sílice en adelante se denominará bajo la siguiente sigla; (RAS). Osuna (2009), lo define como el fenómeno producido por los álcalis (sodio o potasio) del cemento, los cuales reaccionan con la sílice presente en ciertos agregados, formando un gel que bajo condiciones de humedad genera micro fisuras y esfuerzos internos en el concreto. Y la reacción álcali carbonato (RAC) en la que ciertos agregados de piedra caliza dolomítica reaccionan con los iones hidroxilo del cemento, causando hinchazón de las partículas de piedra caliza haciendo que el concreto se expanda y se agriete. (“Monograph on Alkali Aggregate Reaction,” 2008)

En este proyecto estudiaremos más a fondo la reacción álcali sílice (RAS); y los indicadores típicos de este fenómeno como son los agrietamientos y en casos avanzados grandes fisuras y descascaramiento del concreto; los cuales se localizan con frecuencia en áreas expuestas a la humedad, generalmente en estructuras hidráulicas tales como presas, muelles, puentes, pavimento de carreteras y algunas cimentaciones. Con efectos negativos en las propiedades mecánicas del concreto.

Después de que la reacción álcali sílice fue identificada como la causa de muchas fallas del concreto, se encontró que el uso de adiciones minerales en remplazo parcial del cemento de dosificación del concreto, reduce los efectos de la RAS. Entre las adiciones para prevenir la RAS Marval, Cline, Burke, Rollings, Sherma y Grene, (2002) recomiendan

el uso del reemplazo de ceniza volante tipo F en 40-50% de reemplazo parcial del cemento y humo de sílice en un 10% de reemplazo. En general, estas adiciones mejoran la calidad del concreto y lo hace más económico según su disponibilidad; de otro lado, Murari (2008) enfatiza en el uso combinado en dosificaciones adecuadas de Litio con ceniza volante para agregados muy reactivos. Por lo mismo la correcta proporción de reemplazo del cemento es importante, con el fin de reducir los costos de construcción y poder utilizar efectivamente tanto como sea posible las fuentes de agregados reactivos.

De otro lado, en la industria de producción de concreto hay necesidad de mejorar o modificar los procedimientos de evaluación de los agregados, para una clara y confiable clasificación de los mismos, bajo condiciones controladas, con métodos rápidos y simples. Actualmente existen tres métodos estandarizados para la determinación de la RAS: los petrográficos, químicos y las pruebas de expansión, los cuales han sido estudiados en varios países en el mundo.

El método petrográfico es un procedimiento en el cual se emplea un microscopio que ayuda a detectar los minerales reactivos que podrían causar daño al concreto. Es aceptado universalmente para detectar los agregados susceptibles al RAA; sin embargo, Touma (2000) sugiere que “usando solo la petrografía no se provee información de expansiones de una muestra elaborada a partir de mezcla particular de cemento y agregado”, es decir, este método no es tan eficiente porque no examina al concreto como un conjunto.

En igual forma el método químico consiste en reducir el tamaño del agregado de 150 a 300 μm y luego sumergirlo en una solución de 1M NaOH a 80°C por 24 horas. La solución es filtrada y analizada por el contenido de sílice disuelto y la reducción de la alcalinidad. Esta metodología no es lo suficientemente confiable debido a que ha cambiado varias veces los criterios de interpretación ya que solo es aplicable en ciertas clases de materiales como lo afirma Lanza, Alaejos, Bermudez, (sf) “los ensayos químicos no son precisos sobre el grado de agresividad cuando son utilizados, sobre todo en materiales que se encuentran cercanos a los umbrales de reactividad.”

Por su parte las pruebas de expansión consisten principalmente en medir expansiones después de ser sometidas las barras de concreto o mortero a la acción de un medio

Introducción

agresivo, ciertas condiciones de curado y almacenamiento. Es una prueba aceptada mundialmente, por dar resultados óptimos en periodos de tiempo cortos.

Como se mencionó anteriormente los métodos de expansión han tenido mayor acogida en el mundo, K.K LIU y WHTAM (2002) describen como desde que el National Building Reserch Institute (NBRI) desarrolló el método de barras de mortero acelerado; este fue adaptado en muchos países La American Standard Method ASTM C 1260 y Canadian Standard Method CSA A.23.2.-25^a la adoptaron en 1994. La comunidad británica The British Standards publicó su metodología DD249 en 1999 y International unión of laboratorios and experts in construction materials, systems and structures RILEM publicó su método RILEM AAR-2 en el 2000.

Procedimientos de ensayo entre las metodologías mencionadas anteriormente son similares, aunque hay algunas variaciones en ellas. Se debe preparar al menos 3 especímenes de mortero de tamaño 25x 25 mm de sección transversal y de 250 a 300 mm de largo, el mortero es preparado con un tamaño de agregado máximo de 4-5 mm agua y cemento especificado, el espécimen de mortero es curado por 24 horas. Cuando este ha fraguado se cura en agua a 80°C por 24 horas, se toma la lectura inicial. Después de esto, se sumerge en una solución de hidróxido de sodio de 1N (NaOH) y se mantiene a una temperatura de 80°C y a cierto intervalo de tiempo se toman las lecturas de expansión.

En Colombia, se han encontrado de igual manera estructuras en concreto con posible presencia de reacción álcali sílice, como la presa de “El cercado” sobre el rio Ranchería, la presa de Ituango y la presa del rio Tona, estructuras de grandes volúmenes de concreto en la que los agregados generalmente proceden de zonas próximas a la obra y pueden

ser inadecuados y con el paso del tiempo conducir a expansiones. Aunque en Colombia Ingeominas en el 2009 reveló 16 puntos críticos, donde hay agregados que podrían reaccionar con el concreto, se ve la necesidad de las autoridades competentes de supervisión de obra exigir una caracterización confiable de agregados, para construir obras durables y funcionales. En Colombia actualmente se llevan a cabo la construcción de puentes, vías y presas, por lo que es importante evaluar las características de los agregados, evitando pérdidas millonarias en reparaciones, y tomar medidas de mitigación adecuadas en el momento de la construcción y brindar un uso correcto a los materiales.

El presente trabajo de investigación busca evaluar la metodología de Ensayo Acelerado de Barras de Mortero ASTM C 1260 para detectar agregados potencialmente reactivos de tres zonas de Colombia y las medidas de mitigación de la reacción álcali-agregado evaluado por la ASTM C 1567. La metodología que se utilizó para llevar a cabo el presente proyecto de investigación se compone de dos partes: la primera consistió en una búsqueda bibliográfica y la segunda en la realización de un programa experimental. El documento se compone de siete (7) capítulos.

En el capítulo 1 se presentan los conceptos fundamentales relacionados con el desarrollo del fenómeno de la reacción álcali sílice, sus efectos y los posibles materiales mitigantes y la descripción de las diferentes metodologías de ensayo.

En el capítulo 2 se presenta el estado de arte en Europa y Estados Unidos resaltando las diferentes metodologías de ensayo usadas en varios países, de acuerdo a la experiencia local; debido a la gran variedad de ensayos y criterios para evaluar la RAS.

Con el desarrollo del estado del arte, posteriormente en el capítulo 3 se plantea el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación.

En el capítulo 4 se describe el programa experimental en el que se presentan las variables del estudio experimental, se describe la construcción de los especímenes de prueba según las recomendaciones de la ASTM C 1260, para clasificar las diferentes combinaciones de cemento- agregado en reactivas o no. Posteriormente las muestras que demostraron reactividad, fueron evaluadas con diferentes porcentajes de reemplazo de adiciones cementantes para identificar el material de reemplazo más eficaz y se realizó un análisis petrográfico. Se estudiaron diferentes propiedades mecánicas, a muestras reactivas y no

Introducción

reactivas como: la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad. Además, se presenta una descripción de las características físicas y químicas de los agregados en estudio, el cemento tipo I y tipo III usado en la elaboración de los morteros, así como también de los materiales cementantes suplementarios: Ceniza volante, microsilice y metacaolin.

Los resultados obtenidos del programa experimental se analizan en el capítulo 5. Inicialmente se muestra que combinaciones agregado cemento son reactivas, analizando las expansiones a 14 y 28 días. Se comparan las diferentes expansiones de las muestras reactivas con su respectivo material cementante en diferentes proporciones. Adicionalmente se compararon propiedades mecánicas con muestras inocuas, en cuanto a la resistencia a la compresión y flexión.

Por último, el capítulo 6 presenta las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la investigación y se plantean recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el tema en estudio; en el capítulo 7 se presentan los anexos de ensayos de laboratorio y normativa utilizada y finalmente la bibliografía.

1. Marco teórico

En el presente capítulo, se presentan los principales conceptos fundamentales, en lo relacionado al fenómeno de la reacción álcali sílice. Se inicia describiendo cómo se desarrolla el fenómeno de la RAS, los factores que lo afectan y los efectos en las estructuras. Posteriormente se describen las maneras de prevenir la reacción y las diferentes metodologías usadas para su evaluación.

1.1 Reacción álcali- sílice

La reacción álcali sílice (RAS), es una reacción química entre los hidróxidos alcalinos en solución en los poros del concreto y determinados minerales de sílice reactivos que se encuentran en algunos agregados. Formando un gel que toma agua, hinchándose e induciendo presiones que dañan el concreto. El agua puede provenir de agua que no se usó en la hidratación del cemento, el agua de lluvia, ríos o agua condensada del aire. (Field, n.d.)

Este fenómeno fue observado por primera vez en 1930 en California (USA) y luego documentado por Stanton (1940), Figura 1-1. Desde entonces, muchos casos fueron apreciados en varios tipos de estructuras, como presas, puentes, pavimentos, los cuales han sido reportados a lo largo del mundo.(Isabel & Ramos, 2013)



Figura 1-1 Thomas Stanton junto a un muro afectado por la reacción alkali-agregado.

Fuente: Tomado de <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/reactive/issue01.cfm>: Consultado 16/Feb./2015

El mecanismo químico detrás de la reacción álcali sílice (RAS) a pesar de haber sido estudiado por décadas es muy complejo y todavía no ha sido completamente entendido. Para una comprensión satisfactoria de la química involucrada en el desarrollo de productos de la RAS es importante estar familiarizado con la unidad básica de silicatos y por consecuencia con los minerales de sílice reactiva - el tetraedro de sílice; el cual consiste en un catión de silicio central (Si^{4+}) rodeado por cuatro aniones de oxígeno (O^{2-}) en las esquinas como se muestra en la Figura 1-2. Esta estructura es una combinación muy fuerte y estable que permite fácilmente el intercambio de oxígeno en sus esquinas. (Isabel & Ramos, 2013)

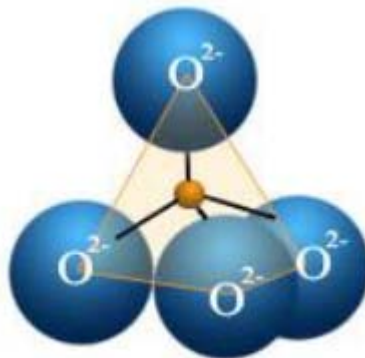


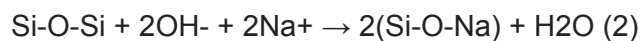
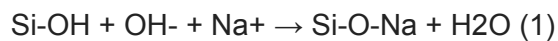
Figura 1-2 Modelo de representativo del tetraedro de sílice.

Fuente: http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=140). Consultado: 16/Feb./2015

Los tetraedros de sílice se unen a través de sus vértices por oxígenos, cada uno de ellos vinculados a dos silicios que confieren una red tridimensional con una superficie baja. Sin embargo, en la forma, los tetraedros se presentan con una superficie incompleta, es decir que un ion de oxígeno queda delimitado a un solo ion de silicio con una sola carga negativa, y un ion de silicio que carece de un ion oxígeno para completar el tetraedro de sílice, queda insatisfechamente cargado; con una carga positiva. (Carman, 1940).

Con el fin de neutralizar las cargas en la superficie de sílice en los agujeros, y lograr el equilibrio, los iones de silicio de la superficie intentarán completar el tetraedro. Tomando los iones OH⁻ y H⁺, cuando el agua está presente, conduciendo a la despolimerización de la sílice.

En general la reacción puede ser vista como un proceso representada por las siguientes ecuaciones (1) y (2)



- (1) Neutralización de los radicales de Si-OH a través de una reacción tipo ácido-base, donde las cargas terminales son equilibradas por iones Na⁺, la accesibilidad de estos se ve limitada por el tamaño y la separación de la partícula.
- (2) Ataque de los puentes de siloxano (Si-O-Si) por parte de los iones OH⁻. Reacción que implícita lleva una progresiva desintegración de la estructura

1.2 Factores que afectan la reacción álcali- sílice

Para que se presente la reacción álcali sílice hay varios factores que influyen simultáneamente como se muestra esquemáticamente en la figura 1-3, los cuales seguidamente se describen en detalle

- Agregado
- Cemento.
- Influencias externas: humedad y temperatura.

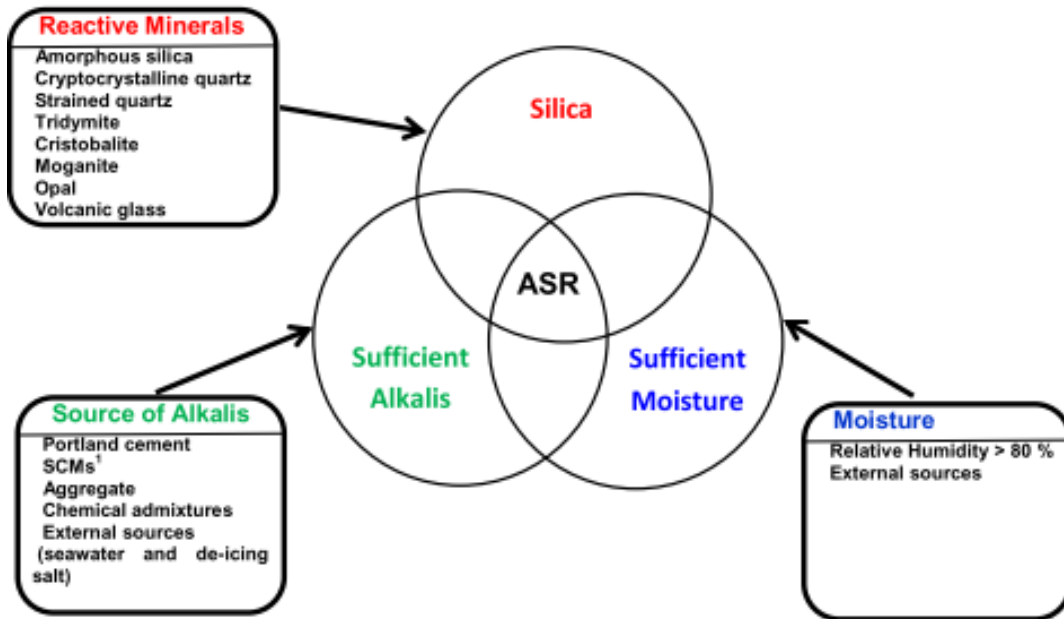


Figura 1-3 Factores primarios que influyen la reacción álcali agregado en concreto. (Zollinger et al., 2009)

1.2.1 Agregado

Los agregados que frecuentemente se usan para el concreto, se encuentran en su estado natural. Lentamente desde su formación tienen una alteración química y se van deteriorando hasta que alcanzan un equilibrio. Cuando el valor del pH en promedio alcanza un valor de 12.6 a 13.6, el cual ocurre en el agua de los poros del concreto. Los minerales empiezan a evolucionar hasta encontrar un nuevo equilibrio, produciendo un gel que podría ser expansivo. Esto se conoce como reactividad.

Desde el punto de vista químico varias formas de sílice o tetraedro de óxido de sílice se encuentran en estado natural en el agregado. El tetraedro no puede formar en superficie una estructura cristalina. Los vínculos entre el oxígeno y la sílice se rompen en la superficie, quedando cargas negativas insatisfechas. Los iones son mecánicamente estables, impermeables y reaccionan solo en la superficie. Mientras que la sílice amorfa, es formada por una combinación de tetraedros de sílice sin formar una estructura regular, siendo más porosa, teniendo una gran superficie y siendo reactiva.

De lo dicho anteriormente el cuarzo, es un ejemplo de un mineral inestable, mientras que el ópalo (sílice amorfa) se hace inestable a un pH alto, esperando para reaccionar bajo una condición en la que haya suficiente álcali presente. Como se representa esquemáticamente la estructura de dichos componentes en la figura 1-4. (US Department of Transportation, 2013)

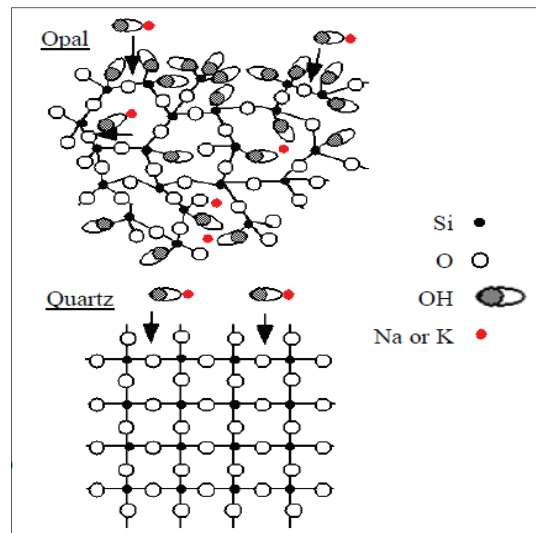


Figura 1-4 Estructura esquemática cristalina de Opal Y Cuarzo. (US Departement of Transportation, 2013).

Los siguientes minerales se consideran reactivos: ópalo, tridimia, cristobalita, vidrio volcánico, sílex y cuarzo micro cristalino. Estos minerales, se pueden encontrar en los siguientes tipos de roca: pizarra, arenisca, rocas carbonatadas, pedernal, cuarcita, cuarzo-arenita, gneis, argilita, granito, granito, grauvaca, limonita, arenita, arcosa. La figura 1-5 muestra el contenido de sílice en los minerales mencionados anteriormente. Tales fuentes producirán una reacción perjudicial en el concreto, dependiendo del tipo y cantidad de minerales reactivos.

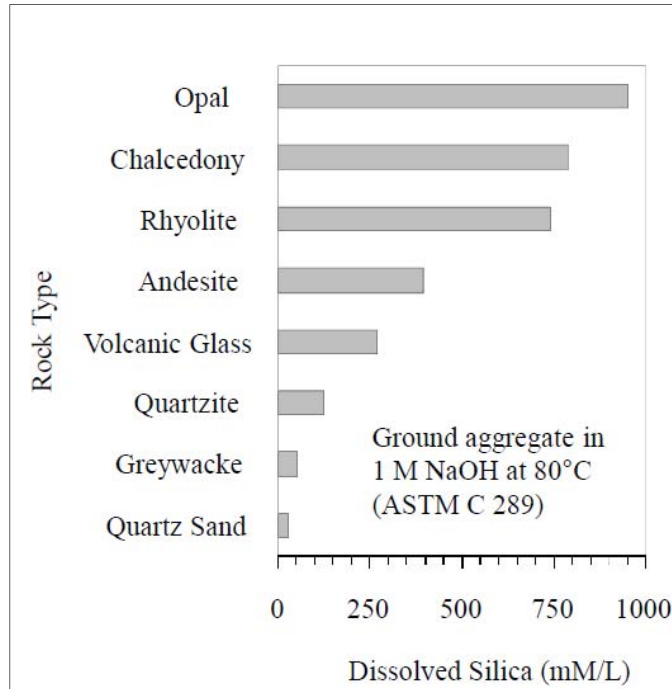


Figura 1-5 Sílice soluble en agregados. (US Departement of Transportation, 2013)

Otros factores influyentes sobre el fenómeno de la RAS tienen que ver con el tamaño de la partícula, la inclusión de aire, la porosidad de la pasta y la relación agua-cemento (a/c).

Un trabajo realizado por Hobbs y Gutteridge (1979, citado en Wigum et al., 2006) mostró una velocidad de reacción superior y expansiones más grandes en relación con la disminución del tamaño de las partículas. Esto podría ser, debido al hecho de que la partícula proporciona una mayor área de superficie para que la reacción tenga lugar. Sin embargo, se ha determinado que la afirmación anterior es cierta, por encima de un cierto tamaño de grano. Cuando las partículas reactivas, son más pequeñas de un límite de tamaño dado, la expansión disminuye debido a un efecto puzolánico. (Wigum et al., 2006).

Stanton discutió por primera vez la importancia del tamaño de las partículas en el año 1940, donde demostró que la cantidad de expansión se relaciona con el tamaño de partícula (Diamond & Thaulow 1974). Agregados reactivos, en el intervalo de aproximadamente 0,17 a 0,6 mm dieron una mayor expansión que los tamaños más gruesos. El agregado en este caso era una piedra caliza de magnesio silíceo, que contenía ópalo y calcedonia (Diamond & Thaulow 1974). Sin embargo, se encontró que los tamaños

de agregados menores de 50 micras presentaron expansión, mientras que la fracción entre 50 y 70 micras causó una expansión retardada.

De la misma forma, varias investigaciones han encontrado que la incorporación de aire reduce la expansión causada por la RAS. A pesar de que la velocidad de la reacción es independiente del contenido de aire en el concreto, este reduce el daño debido a que los vacíos proporcionan el espacio necesario para soportar la presión causada por el gel de la RAS (DW Hobbs, 2002). El uso de inclusores de aire no detiene la reacción, sino que más bien reduce la expansión causada por la RAS y retrasa el inicio de la expansión.

Adicionalmente, otro factor importante a considerar es la relacionada con la variación de la relación agua- cemento (a / c). Esta afecta tanto a la concentración de álcalis en la solución de poro (contenido de agua constante, variando la cantidad de cemento) como la porosidad de la pasta (contenido de cemento constante, variando la cantidad de agua). La disminución de la porosidad de la pasta reduce el espacio disponible para aliviar la presión causada por el gel de la RAS; pero al mismo tiempo, disminuye la velocidad de la reacción mediante la reducción de la velocidad a la que el agua y los álcalis alcanzan las partículas de agregado reactivos. Parece haber consenso sobre el efecto global de la relación a / c en la expansión RAS (Wigum et al., 2006).

Según Wiggum (1995) quien investigó el efecto de diferentes relaciones agua cemento (a/c 0,45 y 0,50) en barras de mortero elaboradas con agregados inocuos y cuyos resultados se presentan en la figura 1-6 evidenciando que un aumento de la relación a/c , aumenta la expansión a través del tiempo.

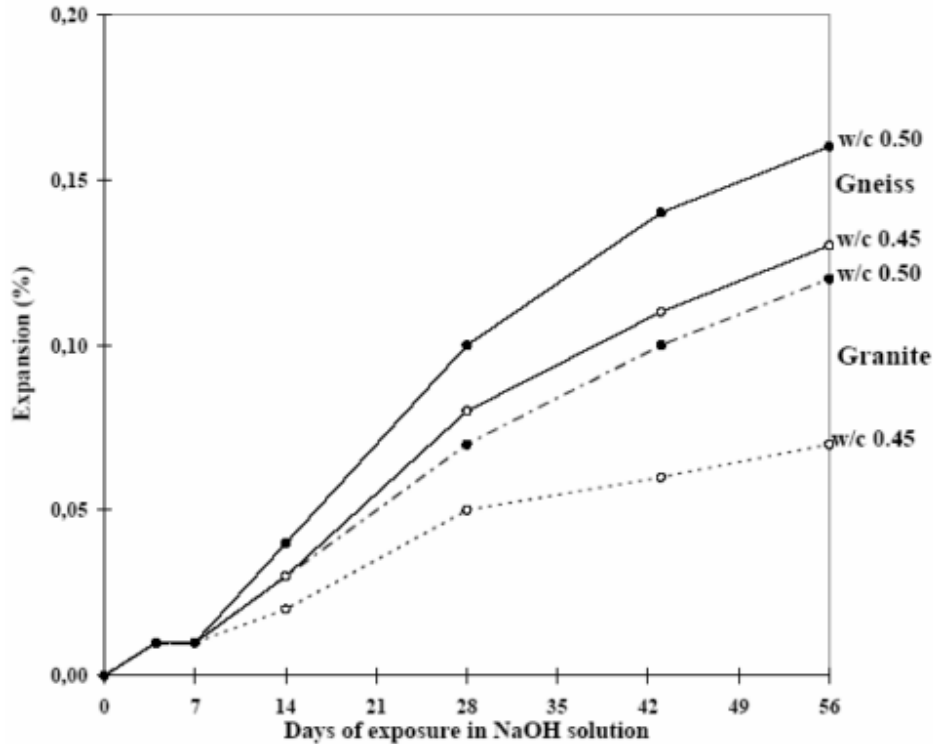


Figura 1-6 Efecto de diferentes relaciones agua-cemento para ensayos de barras de mortero acelerado, para rocas inocuas (gneiss y granito) Wigum (1995).

La máxima expansión debido a la RAS se presentará si una cierta cantidad de álcalis está presente por todo el material reactivo que pueda reaccionar, este comportamiento es conocido como comportamiento pésimo. Este problema fue descubierto por primera vez por Stanton (1940), al combinar varios porcentajes de triturado de piedra caliza de magnesio con arena de río silíceo natural. Él observó las expansiones de barras de mortero (almacenadas en recipientes sellados a temperatura ambiente y 100% de humedad) las cuales incrementaron hasta una cierta cantidad de agregado reactivo, y para los contenidos más altos de agregado reactivo la expansión comenzó a disminuir. Después de estos hallazgos, se introdujo el término 'pésimo' para referirse al contenido de agregado que genera la mayor expansión.

El concepto de comportamiento 'pésimo' de agregados con respecto a la RAS se puede ilustrar gráficamente. Para una cantidad dada de álcalis, existe una cantidad específica de agregado reactivo que genera la expansión máxima en el concreto. Esto explica la forma de la curva mostrada en la Figura 1-7. (Martinez, 2012).

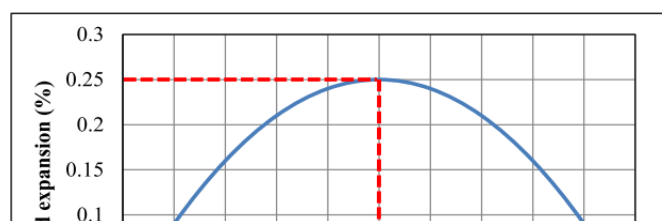


Figura 1-7 Representación gráfica del comportamiento “pessium” . (Adaptada de Poole, 1992) (Martinez, 2012)

El comportamiento 'pésimo' ha sido explicado por Poole (1992) y Wigum et al. (2006), basado en el concepto que la reacción cesará cuando cualquiera de los álcalis en la solución de los poros o de los componentes reactivos dentro de las partículas de agregado se agote. Si el contenido de agregado reactivo es demasiado bajo, a pesar de que todo va a reaccionar, la cantidad de gel RAS producido no será suficiente para provocar una expansión significativa. Por otro lado, si hay demasiado material reactivo, los álcalis se utilizan rápidamente y por lo tanto sólo una pequeña porción del agregado va a reaccionar y se generará poca expansión. En la 'proporción pésima', la cantidad de álcalis será sólo suficiente para hacer que el 100% del material se expanda, causando la expansión máxima.

1.2.2 Cemento

El cemento portland es considerado el principal aportante de álcalis. La cantidad de álcalis en el cemento portland es expresado en términos de equivalentes de sodio el cual es expresado y calculado con la siguiente ecuación:

$$Na_2O_e = Na_2O + 0.658 \times K_2O \quad (3)$$

Donde Na_2 y K_2O son los porcentajes de masa de óxido de sodio y potasio presentes en el cemento. El porcentaje de álcalis en el cemento portland es relativamente baja en un intervalo de 0,2 a 1,3% de Na_2O_e .

Durante las primeras horas la solución esta principalmente compuesta por sulfatos alcalinos (Na^+ , K^+ , y SO_4^{2-}). Pero más allá de este tiempo la formación de fases de sulfato sólido (calcio mono-sulfo- aluminato y etringita) resulta en una reducción de la

concentración SO_4^{2-} en solución, y los iones hidroxilo (OH^-) entran en solución para mantener el equilibrio con los cationes alcalinos cargados positivamente. Más allá de los primeros días, la solución de poros se compone casi en su totalidad de Na^+ , K^+ y OH^- (“Monograph on Alkali Aggregate Reaction,” 2008)

Se dedujo desde hace muchos años que la reacción álcali sílice era poco probable cuando el contenido de álcali estaba debajo de 0,6% Na_2O_e . Muchas especificaciones permiten el uso de agregados potencialmente reactivos, limitando el álcali del cemento. No es por sí mismo una forma efectiva de prevenir el control de álcali a la mezcla total del concreto, ya que la disposición de álcalis puede provenir de materiales cementantes, agregados, fuentes externas (agua de mar) o aditivos químicos.

1.2.3 Humedad

El agua desempeña dos papeles importantes y distintos en la RAS: como medio de transporte para los iones en la solución de los poros; y como un elemento esencial para el desarrollo del gel. (Poole, 1992;. Poyet et al, 2006;. Zollinger et al, 2009;. Lindgård et al, 2012a). Por lo tanto, se puede establecer una relación lineal. Entre más agua, la degradación es más fuerte.

La disponibilidad de humedad externa se rige por el medio ambiente al que las estructuras están expuestas. La humedad ambiental puede ser suministrada a partir de diferentes fuentes tales como: lluvia, nieve, agua de mar, humedad atmosférica, la humedad del suelo subyacente, entre otros. En climas más secos, donde la humedad exterior es limitada, la humedad puede derivar, no directamente de los alrededores, pero si a partir de fuentes tales como drenajes deficientes (por ejemplo, encharcamiento sobre las estructuras debido a fugas), o de condensación. Estas fuentes pueden ser intermitentes, pero pueden resultar en una reserva de humedad que se acumula en la estructura, y causa RAS (Tizón y Alexander, 2011).

El contenido de agua en las estructuras afectadas por RAS se expresa normalmente como la humedad relativa (RH), que es una medida del estado termodinámico del agua de los poros. Sin embargo, su medición es muy difícil e incierta, particularmente en el campo. (Lindgård et al., 2012a).

Se ha establecido a través de un gran número de pruebas de laboratorio que hay un límite crítico para que se desarrolle la RAS, entre 80% y 90% (Olafsson, 1986; Stark, 1991; Kurihara y Katawaki, 1989; Larive et al., 2000). Este hecho está bien documentado en una investigación en la que se quería evaluar el efecto de la humedad por medio del ensayo del prisma de concreto acelerado ASTM C 1293. En la Figura 1-8, se observa que los agregados muestran muy pequeña expansión a una humedad relativa por debajo del 80%. Sin embargo, por encima del 80% de humedad relativa, se observa un aumento exponencial. Se concluyó en ese estudio el enorme efecto de la humedad en la expansión (Zollinger et al., 2009).

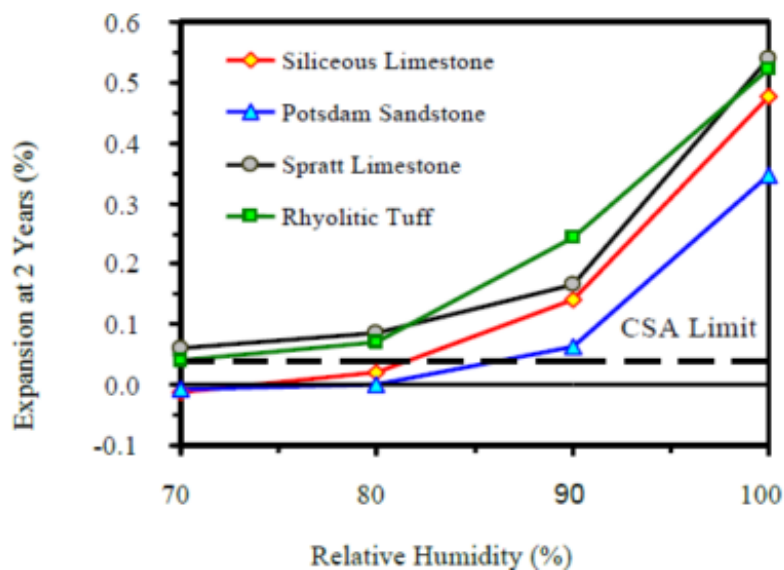


Figura 1-8 Efectos de la humedad relativa de diferentes agregados usando ASTM C 1293. (Pendneault, 1996).

1.2.4 Temperatura

La temperatura del concreto es controlada por las condiciones ambientales una vez el calor de hidratación ha terminado. En general existe una relación directa entre incremento de temperatura y velocidad de la reacción, dado que las altas temperaturas permiten que se exacerbén las reacciones

1.3 EFECTOS DE LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE

Las estructuras de concreto afectadas por la reacción álcali sílice responden de manera diferente unas de otras, dependiendo de las características de sus agregados y la combinación con los álcalis del cemento u otras fuentes; reflejando una variabilidad de condiciones de reacción. Los síntomas más comunes que se pueden observar en las estructuras de concreto son las siguientes:

- **Agrietamiento:** es la principal evidencia externa de la RAS en el concreto; comienza con la formación de gel, ya sea en o alrededor de una partícula de agregado reactivo dentro del concreto. Donde el gel produce una presión que excede la resistencia a la tracción del concreto, estas grietas forman un patrón de estrella 3- o 4-puntas, Figura 1-9, y son generalmente suficientes para aliviar la acumulación de presión y acomodar el aumento del volumen resultante. A medida que más partículas reaccionan, las grietas que irradian de estas "estrellas" se unen para formar una red, asemejándose a un mapa geográfico, normalmente conocido como mapa de craqueo o "piel de cocodrilo".

En las etapas finales, las nuevas grietas continúan desarrollándose, la subdivisión de las áreas poligonales originales entre grietas se vuelven polígonos más pequeños, y las grietas existentes se ensanchan y se alargan (> 10 mm en casos extremos (Hobbs, 1988)) como se muestra en la Figura 1-9. Los sitios donde la grieta se desarrolló estuvieron determinados por la localización de la sílice a reaccionar en los agregados y por la disponibilidad de OH⁻ y humedad (Gillot, 1975; Ferraris, 1995). Normalmente las grietas presentaron decoloración donde los márgenes blanqueados, rosáceo o pardusco pudieron extenderse hasta varios milímetros en cada lado de la grieta (Poole, 1992), sin embargo, esto no fue necesariamente un indicativo de RAS.

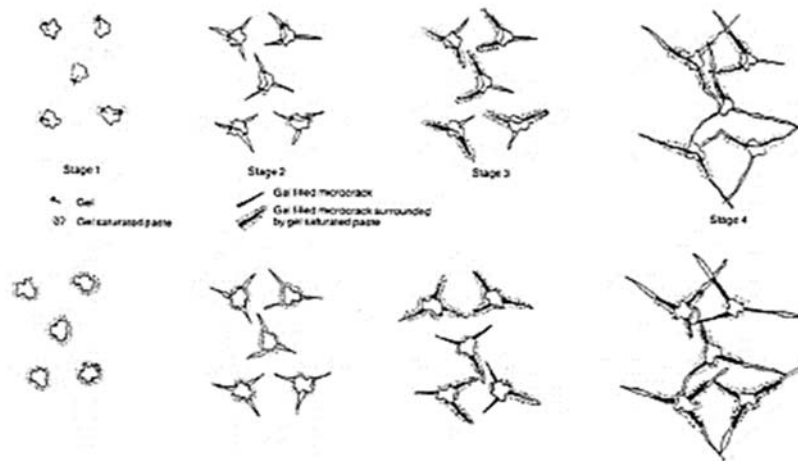


Figura 1-9 Esquema de progresión y consecuencia de exudación en RAS (Hobbs, 1988)

A continuación, se observa un patrón uniforme de grietas en concreto no reforzado o ligeramente reforzado; cuando hay una cantidad de acero de refuerzo, el agrietamiento tiende a ser marcado en dirección paralela a la del refuerzo. Este patrón de fisuración, no debe ser confundido con el de secado plástico que aparece en términos de horas o días, el agrietamiento debido a la reacción álcali sílice se evidencia después de 5 a 10 años. Como se observa en las figuras 1-10a a 1-10c.

(a)



(b)



(c)



Figura 1-10 (a) Mapa de grietas de un puente de 30 años de edad (b) Grietas alineadas en una columna afectada RAS (c) Patrón de grietas asociada al RAS.

Fuente. Alkali-aggregate reactivity (aar) Workshops for engineers and practitioners

- Expansión y deformaciones: el impacto de la reacción álcali sílice se extiende desde movimientos relativos de los elementos de concreto adyacentes, causando deformaciones y finalmente el desprendimiento del concreto, principalmente en secciones donde se inducen las juntas. Como se ilustra en las figuras 1-11a a 1-11c.

(a)



(b)



(c)



Figura 1-11 (a) Movimiento relativo de estructura de puente afectado por RAS (b) Expansión con desprendimiento severo (c) Descascaramiento asociado a RAS.

Fuente. Alkali-aggregate reactivity (AAR) Workshops for engineers and practitioners- Monograph on alkali aggregate reaction in concrete. 2008

Exudaciones: son depósitos superficiales de gel de RAS a veces observado por el movimiento de la humedad a través de los poros y grietas en el concreto que transporta el gel de la RAS a la superficie, donde se segrega. Cuando está presente, las exudaciones son indicativas de que no ha habido suficiente humedad para llevar el gel a la superficie. El gel exudado es generalmente de color blanco debido a la carbonatación del gel originalmente incoloro en contacto con el aire (St John et al, 1998; Sarkar et al, 2004) como se ve en la Figura 1-12. En cuanto a la textura, es similar a la de la gelatina. Knudsen y Thalow (1975), Fernández et al. (2007). Fernández (2009) observó que el gel en exudaciones se compone de silicio y álcalis mientras que el calcio está ausente, de acuerdo con lo mencionado por Taylor (1998)

La eflorescencia son depósitos blancos con el aspecto del azúcar en la superficie del concreto, pero de sales minerales derivados de la solución de los poros, que varían de carbonato de calcio, sulfuros, sulfatos, cloruros y otras sales de calcio y sodio. Cabe destacar que la presencia de depósitos en la superficie necesariamente no es indicativa de la RAS, otros mecanismos, tales como acción de las heladas o la transmisión de agua

a través del concreto, puede también causar eflorescencias (sin la presencia de gel RAS) (Russell, 1983; y Farny Kosmatka., 1997; Fournier et al, 2004).



Figura 1-12 Exudación en concreto observado dentro de una galería de una presa.
(Russell, 1983; y Farny Kosmatka., 1997; Fournier et al, 2004).

1.4 PREVENCIÓN DE LA REACCIÓN ALCALI SÍLICE

Una de las estrategias para minimizar o prevenir la reacción álcali sílice en el concreto, incluye; evitar los agregados reactivos, controlar el contenido de álcalis, limitar la humedad, y usar materiales cementantes suplementarios.

- Evitar agregados reactivos: desde una perspectiva económica no es factible en algunas regiones en la que se encuentran algunos agregados que se consideran reactivos, por lo que se deben refinar los métodos de evaluación de la reactividad de los agregados.
- Minimizar los álcalis: es el método más común para mitigar este fenómeno, el cemento es quien aporta la mayor parte de los álcalis en la reacción. El contenido de álcalis es normalmente medido como óxidos de sodio y potasio (Na_2O y K_2O) y es expresado en contenido de sodio equivalente.

El cemento portland contiene menos de 0.60% equivalente de sodio. Investigaciones realizadas en USA han revelado que la reacción álcali sílice no ocurre si no se excede este límite. Por otro lado, la expansión es función directa de los álcalis reactivos por metro cúbico de concreto. La alcalinidad en los poros de concreto está controlada por el nivel alcalino del

cemento y la cantidad del mismo. Cuando las fuentes de álcalis no están presentes, los reactivos disponibles en el cemento portland se calculan mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{C \cdot a}{100} \quad (4)$$

Donde:

A=álcali contenido en concreto (kg/m³)

C=Contenido de cemento portland del concreto (kg/m³)

a=contenido de álcalis en el cemento expresada en porcentaje de peso de Na₂O

Los álcalis también pueden provenir de otras fuentes como aditivos, agua, los agregados también son responsables ya sea por sal alcalina, contaminación o mediante liberación de álcalis solubles, aunque este caso es poco frecuente.

Si el contenido de álcali está por debajo de cierto valor umbral, se evita la expansión perjudicial. Este valor umbral es probable que varíe entre agregados de diferente reactividad, pero lamentablemente, actualmente no existe un método de ensayo adecuado para determinar el umbral.

Un número de especificaciones han empleado un contenido máximo de álcali de concreto como una opción para controlar la expansión en el concreto que contiene agregados reactivos. Nixon y Sims (1992) informaron que en varios países y agencias se han especificado contenidos máximos permisibles de álcali entre 2,5 y 4,5 kg / m³ (4,2 a 7,5 lb / yd³) de Na₂O_e, pudiendo variar el contenido de álcali permisible en función de la reactividad agregada. En la tabla 1-1 se muestran algunos niveles seguros de contenido alcalino.

Tabla 1-1 Contenido alcalino mínimo en el concreto. Tomado y adaptado de (US Department of Transportation, 2013).

Países	Contenido alcalino
Reino Unido	Menos de 4 kg/m ³
Nueva Zelanda	3.5 kg/m ³
Irlanda Japón Canadá	3.0 kg/m ³

- Efectividad de material cementante suplementario: uno de los principales medios para controlar la RAS en concreto que contiene agregados reactivos, es mediante el uso apropiado de materiales cementantes suplementarios. Entre estos materiales se encuentran las puzolanas (ceniza volante, humo de sílice, metacaolin, entre otros). El uso de puzolanas para controlar la RAS data desde que fue reportada por primera vez en la publicación de Stanton 1940.(US Department of Transportation, 2013).

A continuación, se hace una breve descripción de los tipos de materiales cementantes más comunes que ayudan a mitigar la RAS.

1.4.1 Ceniza volante

Es un subproducto de la combustión de carbón pulverizado en las centrales térmicas. Sus partículas son generalmente esféricas y con tamaño de partícula inferior a 45 micras. La composición química de la ceniza volante es determinada por el tipo y la cantidad de material mineral en el carbón. Más del 85% de la ceniza volante está compuesta de sustancias tales como: cristales de sílice, aluminio, hierro, calcio magnesio y álcali. ("Monograph on Alkali Aggregate Reaction," 2008).

Existen dos tipos de cenizas volantes, el tipo F con bajo contenido de calcio la cual es generalmente más eficiente para controlar RAS, porque para otras propiedades es mejor la de clase C. El rol del calcio en la ceniza volante es mostrado en la figura 1-13 y 1-14, la

cual muestra la expansión del concreto a dos años, el cual contenía un agregado altamente reactivo (Spratt) y 25% de contenido de ceniza volante de varias composiciones. La mayoría de las cenizas volantes con contenido de calcio (CaO) menores del 20% son efectivas controlando la expansión; esta aumenta, si el contenido de calcio en la ceniza volante aumenta sobre 20%. Cabe notar que la ceniza volante con contenido de álcali ($\geq 5\%$ Na_2Oe) no era efectiva al reemplazo del 25% del contenido de calcio.

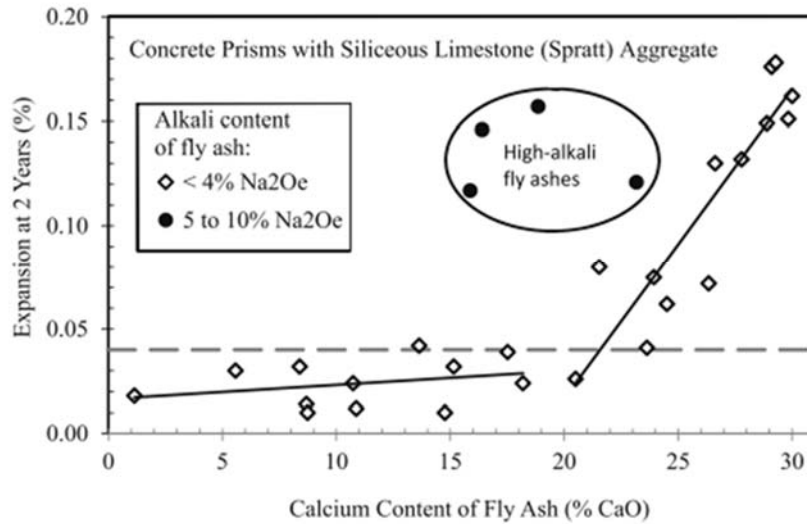


Figura 1-13 Expansión del concreto con ceniza volante con diferentes contenidos de calcio. (US Department of Transportation, 2013)

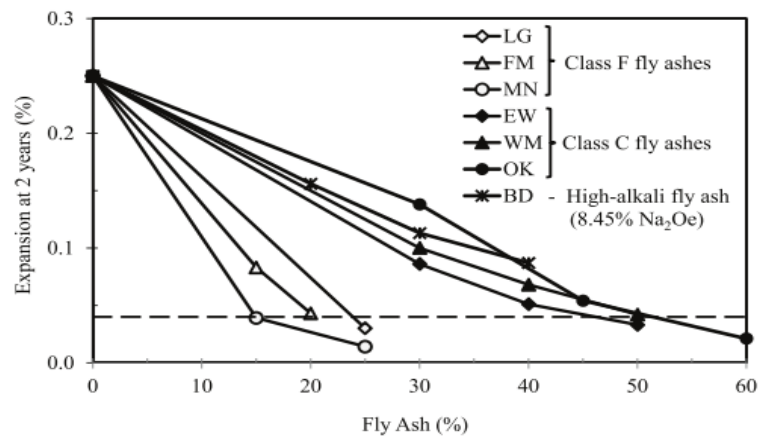


Figura 1-14 Expansión del concreto diferentes contenidos de ceniza volante y de calcio. (US Department of Transportation, 2013)

Un remplazo del 25% de ceniza volante tipo F demuestra una significativa mitigación de la RAS, incluso en ambientes marinos (para relaciones agua cemento a/c debajo de 0.5)

(Malvar et al., 2002). En un estudio de Touma et al. (2000) en agregados reactivos, encontraron que un 25% de ceniza volante tipo F según lo recomendado por el ASTM 1260 reducen una expansión del 0.9 al 0.12%.

Además de mitigar la RAS, la ceniza volante tipo F tiene las siguientes ventajas:

- Reduce el costo de la construcción: el cemento es el material más costoso del concreto.
- Ahorro en la producción de cemento portland.
- Reduce el calor de hidratación, reduce la permeabilidad y aumenta la durabilidad.
- Aumento de resistencias a largo plazo. Para ceniza volante clase F, la resistencia a edad temprana es usualmente bajo. Este puede ser compensado reduciendo la relación a/c o el remplazo.

Reduce la generación de CO₂: expertos en calentamiento global enuncian que el 7% de las emisiones de dióxido de carbono proviene de la producción de cemento portland. Cada tonelada de cemento que no se produce, reduce aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono. Si todos los proyectos en concreto a lo largo del mundo fueran incorporados con un reemplazo del 25 o 30% de ceniza volante, las emisiones totales en el mundo podría disminuir el 2%. (Malvar et al., 2002)

1.4.2 Metacaolín

Se deriva de uno de los minerales de arcilla. Se utiliza, en aplicaciones limitadas, como una adición puzolánica, en concreto de cemento portland, mejorando el rendimiento y durabilidad del concreto.

El uso de metacaolín ha demostrado que aumenta la resistencia la compresión, reduce la permeabilidad (mayor resistencia a la penetración de iones cloruro) aumenta la resistencia al ataque de RAS y sulfatos, con un reemplazo del 10% aproximadamente. (Garber et al., 2006) .Se acepta generalmente que la reacción entre metacaolín y el hidróxido de calcio Ca(OH)₂ es un factor significativo en la mejora del concreto del cemento portland (Barnes y Bensted 2002).

El metacaolín de alta reactividad (HRM) es un aditivo mineral, relativamente nuevo en la industria del concreto, tiene el potencial para mejorar la durabilidad del concreto. HRM difiere de las adiciones minerales más comúnmente utilizadas, tales como cenizas volantes

y humo de sílice, debido a que no es un subproducto, sino que está fabricado bajo un proceso cuidadosamente controlado; activando térmicamente una arcilla caolinita purificada dentro de un rango específico de temperatura (650-800 °C). El aluminosilicato anhidro resultante ($Al_2Si_2O_7$) es principalmente material amorfo, que se comporta como una puzolana artificial altamente reactiva. (Ramlochan, Thomas, & Gruber, 2000)

La reducción de la alcalinidad (pH asociado) en la solución de los poros y el agotamiento de portlandita se consideran los efectos más beneficiosos de las puzolanas en la reducción de la expansión debido a la reacción álcali-sílice (RAS). A la luz de estos resultados, se ha justificado la posibilidad de utilizar metacaolín para controlar la expansión álcali-sílice en el concreto.

En la figura 1-15 se muestra un estudio acerca de la evolución de la expansión de barras de mortero, almacenadas a 80 ° C en 1 M NaOH solución que contiene HRM en diferentes niveles de reemplazo, la misma cantidad de cemento bajo la prueba de prisma de concreto. Llegando a la conclusión que la incorporación de HRM como un reemplazo parcial de cemento entre 10% y 15% puede ser suficiente para controlar la expansión perjudicial debido a la reacción álcali-sílice en el concreto, dependiendo de la naturaleza del agregado. (US Department of Transportation, 2013)

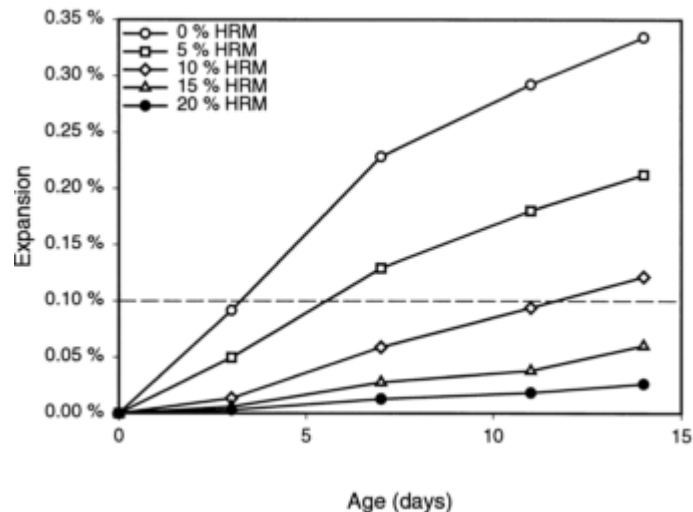


Figura 1-15 Evolución de expansión de / CSA barras de mortero A23.2-25A - CAN contienen HRM. (US Department of Transportation, 2013)

1.4.3 Humo de sílice

Conocido como microsílíce, es un subproducto de la reducción de cuarzo de alta pureza con el carbón de hornos eléctricos. Antes de mediados de 1970, casi todo el humo de sílice era expulsado a la atmosfera; después de las preocupaciones ambientales, se hizo necesaria la recolección y el vertimiento del humo de sílice, dándole diversas aplicaciones. ("Monograph on Alkali Aggregate Reaction," 2008).

Un estudio hecho en Arabia Saudita en Dhahran en la universidad King Fahd de minerales y petróleo. Usando ASTM C 441 y ASTM C 227 concluyeron lo siguiente citado por Rasheedbuzafar 1991 (Touma, 2000)

1. Un reemplazo del 10 al 20 % de humo de sílice o de 60 o 70% de escoria reduce en observaciones de 6 meses expansiones por debajo del límite de 0.10%, como se ilustra en la figura 1-16.
2. Hay un fuerte indicador por el cual el humo de sílice y la escoria reduce la expansión producida por la RAS, debido a una reducción de la concentración de iones de hidróxido en la solución de los poros.
3. Cuando se usa cementos con bajas concentraciones de álcalis, un reemplazo del 60% de escoria es muy eficaz en la eliminación de los álcalis de la solución de los poros, reduciendo las expansiones producidos por el RAS.
4. Una sustitución de cemento con un 10% de humo de sílice es adecuada para el control de las expansiones de RAS.

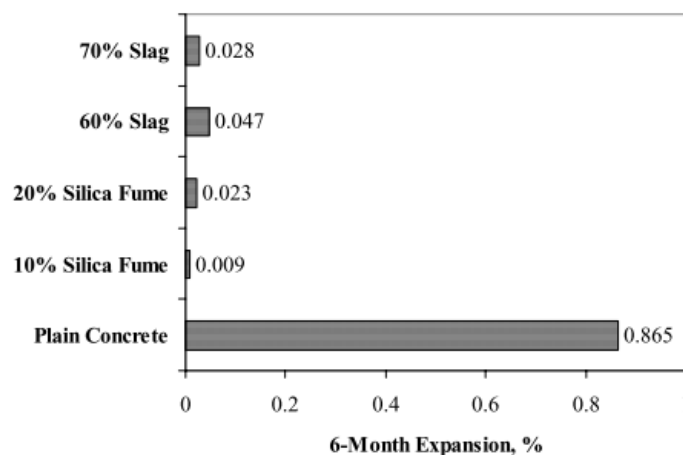


Figura 1-16 Expansión después de 6 meses de especímenes hechos con diferentes niveles de reemplazo de diferentes adiciones. (Rasheedbuzafar 1991).

Ventajas y desventajas del humo de sílice:

- El humo de sílice ha sido usado para mitigar la expansión debida a la RAS, por ejemplo, con un 10% de humo de sílice en reemplazo parcial de cemento se ha encontrado que reduce la expansión a un nivel cercano a un reemplazo de 20% de ceniza volante clase F.
- El humo de sílice incrementa los esfuerzos resistentes y la impermeabilidad, sin embargo, como fue indicado en el comité 221 de la ACI de 1998 “El humo de sílice puede inducir expansiones debidas a RAS en cambio de mitigarla”. Lo anterior debido a que el humo de sílice es propenso a la formación de grumos (Comité ACI 234 1996) y los granos dispersados en tamaños de partículas de 40 a 800 micras, puede reaccionar con los álcalis de cemento exactamente como agregados reactivos.
- Se deben tener en cuenta las siguientes precauciones al utilizar el humo de sílice (Comité ACI 234R 1996): usar en forma de suspensión para facilitar la dispersión (tener en cuenta que el humo de sílice en agua es propenso a la sedimentación), se debe evitar el uso de bolsas triturables, humo de sílice de mezcla extra es recomendada y se debe seguir un curado adecuado. (Malvar et al., 2002).

1.4.4 Uso de litio

El uso de componentes de litio ha sido efectivo para controlar la expansión de RAS por cerca de 50 años. El litio ha sido limitado en algunos campos de aplicación, sin embargo, en los últimos 10 años, se ha renovado el uso del litio. Además de ser un aditivo en el concreto también es usado como tratamiento para las estructuras existentes. Los componentes de litio incluyen: Carbonato de Litio (Li_2CO_3), Hidróxido de Litio (LiOH), Clorido de litio (LiCl), Nitrato de Litio (LiNO_3), Sulfato de Litio (Li_2SO_4). (“Monograph on Alkali Aggregate Reaction,” 2008)

Se han llevado a cabo estudios, mediante el uso de sales de Litio, el más popular en los últimos años es el LiNO_3 , Nitrato de Litio, el cual no aumenta el pH en la solución de poros. (“Monograph on Alkali Aggregate Reaction,” 2008).

Una solución de nitrato de litio está disponible comercialmente en algunas empresas de Norte América, donde se está comercializado como una "mezcla RAS-supresora". Actualmente el producto se vende como una solución al 30% de LiNO_3 . Para lograr una relación molar de litio-a-plus de sodio-potasio de $[\text{Li}] / [\text{Na} + \text{K}] = 0,74$ usando una solución

de 30% de LiNO_3 se requiere una dosis de 4,6 galones de solución LiNO_3 por 1 kg de Na_2O_e (0,55 galones de solución por 1 libra Na_2O_e). Esto ha sido referido como la "dosis estándar" de solución de nitrato de litio. (US Department of Transportation, 2013)

Recientemente (Tremblay et al. 2007) ha resaltado la influencia del tipo de agregado en la cantidad de Litio requerido para suprimir la expansión debido a la RAS. Se muestra a continuación un estudio de 2 años, a prismas de concreto con 12 agregados reactivos y uno no reactivo y varios niveles de Litio. Para 6 de 12 agregados el 75% a 100% de la dosis estándar era suficiente para controlar la expansión ($\leq 0,040\%$ a los 2 años). Para 3 de los agregados se requirió 125% a 150% de la dosis estándar; sin embargo, para los restantes 3 agregados no podían ser controlados incluso a 150% de la dosis estándar. Ilustrado en la figura 1-17.

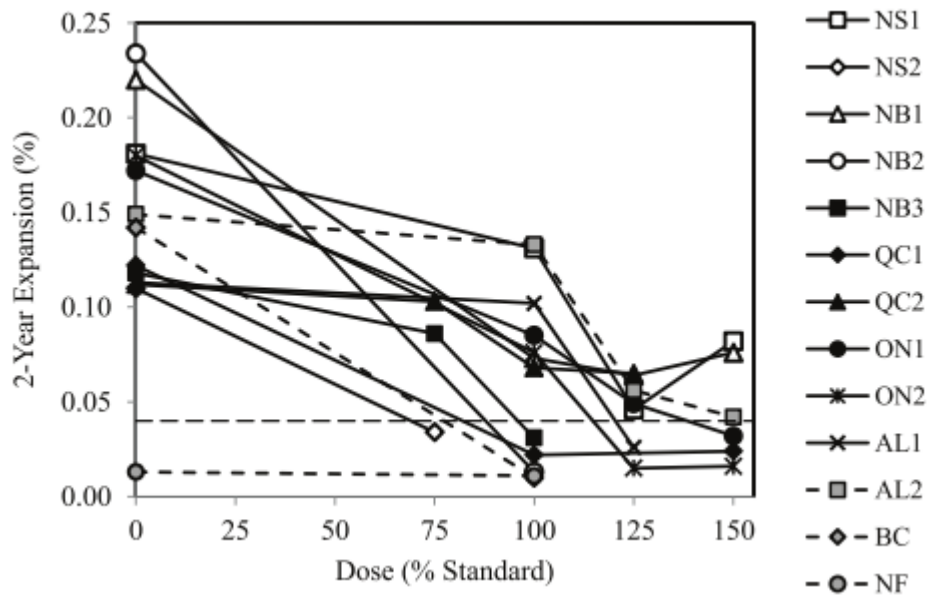


Figura 1-17 Efecto de la dosis de Litio en la expansión del concreto con diferentes agregados reactivos. (Tremblay et al. 2007)

La efectividad del litio depende del tipo de agregado, no es posible prescribir una única dosis para controlar la RAS y la dosis mínima debe ser determinada realizando pruebas con los agregados particulares a usar.

1.5 MÉTODOS DE ENSAYO PARA EVALUAR LA RAS

Desde que se descubrió el fenómeno de RAS una amplia variedad de métodos y ensayos han sido desarrollados e implantados, algunos han tenido éxito y otros han fracasado, por lo que no se ha llegado a un acuerdo de si es buena o mala una determinada metodología. Por lo que en esta sección se describirán varios métodos de ensayo que se usan actualmente, discutiendo para cada uno de ellos sus aspectos positivos y negativos.

1.5.1 Petrografía

Consiste en examinar los agregados en secciones finas bajo el microscopio óptico, por lo general permite el reconocimiento de agregados potencialmente reactivos en minerales como el ópalo, cristobalita, vidrio volcánico, sílex, calcedonia y cuarzo micro-cristalino.

Además, es necesario que la petrografía se pueda completar utilizando otras técnicas tales como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido o espectroscopia IR. “El examen petrográfico por sí solo no puede suministrar información sobre la expansión de una combinación de cemento-agregado en particular; Sin embargo, petrógrafos experimentados pueden predecir el probable comportamiento de los agregados” (Grattan-Bellew 1986. De hecho, cuando un petrógrafo con experiencia en RAS lleva a cabo un ensayo, el examen petrográfico a veces puede ser suficiente para aceptar o rechazar los agregados en estudio, de acuerdo con el último ámbito de actuación de agregados similares, no hay duda, que la petrografía ayudará a determinar qué pruebas se deben realizar; teniendo en cuenta la naturaleza de los agregados en estudio (Grattan-Bellew 1986). De hecho, el examen petrográfico siempre debe realizarse antes de cualquier otra prueba. Esta observación es válida especialmente en los métodos de prueba rápida. (Bérubé & Fournier, 1993)

Alan D. Buck, en su trabajo de investigación, estableció mediante prueba petrográfica que los agregados que contienen más de un 20% de cuarzo tensado con ángulo de extinción ondulatoria mayor que 150 son reactivos. (“Monograph on Alkali Aggregate Reaction,” 2008).

En la normativa internacional se utilizan dos métodos petrográficos para el estudio de la reactividad de los agregados:

- **Conteo de granos:** Las principales normas para la realización del ensayo son la norma americana ASTM C295; la norma británica BS-812 general para estudio petrográfico, y BS-7943 de interpretación de los resultados para la reactividad álcali-sílice.

- **Conteo de puntos:** Ensayo empleado principalmente en algunos países europeos según métodos o normativa propia (Noruega, Dinamarca, Holanda, Bélgica y Suecia). Como se observa en la figura 1-18

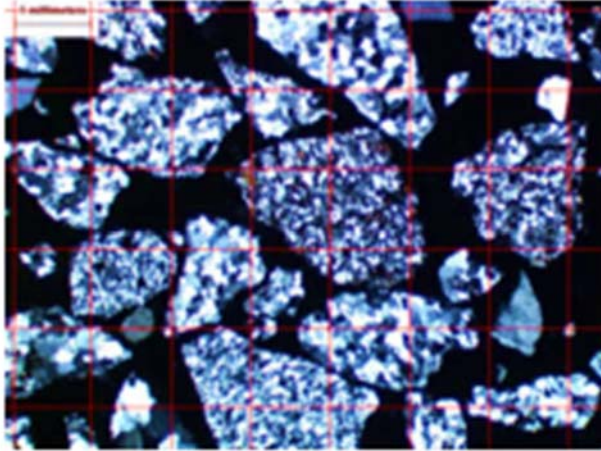


Figura 1-18 Conteo de puntos siguiendo cuadrícula ortogonal. (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

• Petrografía ASTM C295:

En la mayoría de los casos el examen requerirá el empleo del microscopio óptico. En casos especiales y para la investigación de problemas particulares se puede exigir el estudio del agregado por técnicas como la difracción de rayos X, análisis térmico diferencial, espectroscopia infrarroja y microscopía electrónica de barrido. En algunas ocasiones son más efectivos estos métodos alternativos que el análisis microscópico.

Para el estudio de gravas naturales se debe examinar el número mínimo de partículas por fracción granulométrica tal como se muestra en la tabla 1-2.

Tabla 1-2 Muestreo según la norma ASTM C295

Fracción granulométrica	Cantidad	
	Kg	Partículas
Mayor de 150 mm	---	Nunca menos de una partícula de cada tipo de roca clasificada por inspección visual
75-150 mm	---	300 (Nunca menos de una partícula de cada tipo de roca clasificada por inspección visual)
37.5-75 mm	180	---
19.0-37.5 mm	90	---
4.75-19.0 mm	45	---
< 7.75 mm	23	---

La cantidad mínima de partículas, están basadas en la experiencia y en consideraciones estadísticas. Se cree que al menos 150 partículas de cada fracción tienen que ser contadas e identificadas para que los resultados obtenidos sean fiables. Cada fracción debe ser clasificada a través de una inspección visual. Si la mayoría de las partículas son fácilmente identificables de forma visual, es suficiente con realizar la clasificación basándose en el examen de superficies de fractura, resistencia de las partículas al rayado o el comportamiento frente a ácidos débiles. Si no se puede realizar la identificación de forma macroscópica, es posible que el agregado contenga elementos que puedan causar deterioro en el concreto, el estudio se realizará por un estereomicroscopio o, si es necesaria más información, por microscopio petrográfico. (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

El informe del examen petrográfico debe incluir los datos fundamentales de composición y propiedades del material revelados por el examen; también debe reflejar los métodos de ensayo empleados, la naturaleza y características de cada constituyente importante de la muestra. Los constituyentes reactivos deben ser descritos cualitativamente y, en la medida de lo posible, cuantitativamente.

1.5.2 Método químico

Este método consiste en la reducción de los agregados a partículas de 150 a 300 micras, posteriormente, se sumergen en una solución de NaOH 1 M a 80 °C durante 24 h. A

continuación, se filtra la solución y se analiza para el contenido de sílice disuelta (S_c) y la reducción de la alcalinidad (R_c). Ambos se trazan en un gráfico estándar que define áreas de agregados inocuos, deletéreos, y potencialmente reactivos.

Muchos agregados no se identifican adecuadamente al usar esta prueba. Un significativo número de agregados reactivos álcali-sílice conocidos pasan la prueba, mientras que muchos agregados inocuos se identifican como perjudiciales. Los malos resultados de este método de prueba se pueden dar debido a la interferencia de minerales como el calcio, magnesio, silicatos, gipson, zeolitas, minerales de arcilla, materia orgánica, o los óxidos de hierro y la trituración y preparación de los agregados especialmente con agregados que contienen cuarzo microcristalino. (Bérubé & Fournier, 1993)

Los resultados que caen en el lado derecho de la línea de límite dado en la figura 1-19 indican agregado perjudicial. Esta prueba y los valores umbrales se establecieron con los resultados de las pruebas de barras de mortero sobre los agregados que eran ejemplos clásicos de agregados reactivos. ("Monograph on Alkali Aggregate Reaction," 2008)

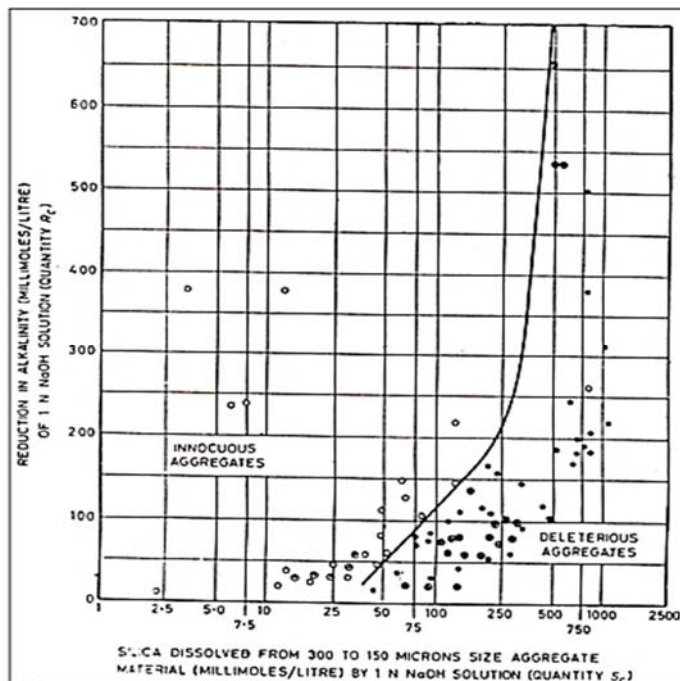


Figura 1-19 Calificación de agregados entre inocuos y agregados reactivos en base al ensayo de alcalinidad. ("Monograph on Alkali Aggregate Reaction," 2008).

1.5.3 Métodos que valoran la expansión.

1.5.3.1. ASTM C 227 Método de prueba estándar para identificar la potencial reacción álcali-agregado (Mortero Bar Method).

Las barras de mortero se elaboran con el agregado y el cemento en estudio. Las barras se almacenan en agua a temperatura ambiente y luego 100% de humedad relativa en contenedores sellados y su longitud se mide periódicamente. Los límites de expansión son de 0-1% a los 6 meses, o un 0,05% a los 3 meses de acuerdo a Grattan-Bellew, deben ser reportados a los 6 y 12 meses, respectivamente.

La prueba está en gran medida afectada por la condición de almacenamiento (el recipiente), que difieren de un laboratorio a otro, y en particular por la presencia o la ausencia de pábilos en el interior del recipiente utilizado. (Bérubé & Fournier, 1993) Además se han reportado problemas de lixiviación de los álcalis de los especímenes en estudio. (US Department of Transportation, 2013)

Esta prueba no es adecuada para determinar el nivel del umbral de álcali necesario para iniciar la expansión con un agregado especial. La figura 1-20 muestra el contenido de álcali necesario para producir la expansión en esta prueba es mucho mayor que la requerida en la prueba de prisma de concreto o bloques de concreto expuestos en campo. Como resultado de los muchos defectos de este ensayo, no se recomienda para su uso como un método para la identificación de la reactividad de un agregado. (Thomas, Fournier, Folliard, Ideker, & Shehata, 2006)

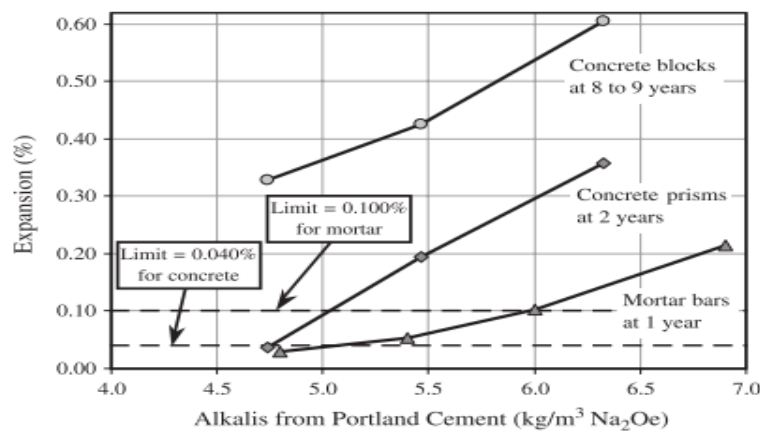


Figura 1-20 Relación entre expansión y el contenido de álcalis con arena de sílex en diferentes condiciones de ensayo (Thomas et al., 2006)

1.5.3.2. ASTM C 1260 barras de mortero acelerado

La prueba de barra de mortero acelerado (AMBT) fue desarrollado por Oberholster y Davies en el Instituto Nacional de Investigación de Construcción (NBRI) en la República de Sudáfrica hace unos 20 años. La prueba consiste en la inmersión de barras de mortero en una solución de NaOH 1 M a 80 °C (176 ° F) durante 14 días y produce resultados en 16 días. La prueba fue desarrollada originalmente para la identificación de los agregados reactivos y se adoptó para este fin en 1994 tanto por la ASTM (como C 1260 - anteriormente P 214) y CSA (como A23.2-25A). En la figura 1-21 se muestra la preparación de las barras de mortero y el aspecto de las barras después del ensayo.



Figura 1-21 A) Preparación de barras de mortero. B) Aspecto final de las barras de mortero después de desmoldar. (Isabel & Ramos, 2013)

Aunque la prueba es ahora ampliamente utilizada en América del Norte, se considera generalmente demasiado agresiva, ya que identifica muchos agregados como reactivos a pesar del buen rendimiento en el campo y en las pruebas de expansión del prisma de concreto.

En consecuencia, la prueba sólo debe utilizarse para aceptar y no rechazar agregados. Además, si un agregado no pasa la prueba, la prueba de prisma de concreto debe utilizarse para confirmar los resultados antes de que el agregado sea rechazado o sea usado. (Thomas et al., 2006) En particular, estos agregados incluyen areniscas, gravas líticas, algunas corneanas, gabros, o andesitas como se muestra en la figura 1-22. (Touma, 2000)

Esta prueba está siendo investigada a fondo a nivel mundial. En contraste con los resultados del método de ensayo C 227, se encontró que las expansiones de 14 días disminuyen con la disminución de la relación agua-cemento. Dado que, en esta prueba, las barras de mortero se sumergen en una solución de 1 M NaOH, la solución de los poros de las barras se controla por la concentración de la solución y la migración de los iones alcalinos, es probable que disminuya con la disminución de relación agua-cemento.

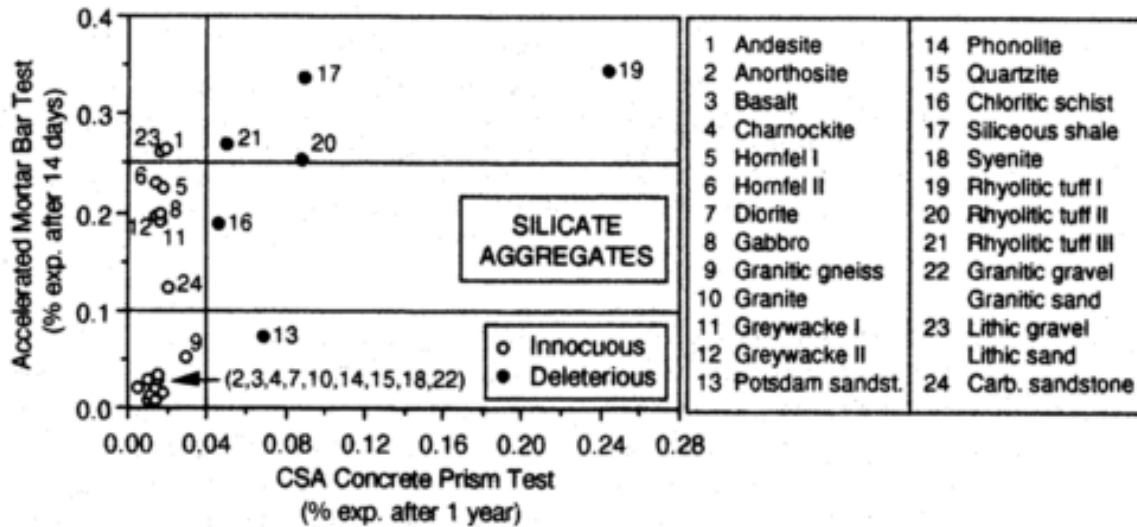


Figura 1-22 Comparación entre ASTM C1260 y ASTM C 1293 resultados ilustrando la severidad de ATM C 1260 (Touma, 2000)

1.5.3.3. Autoclave

Se han propuesto en la literatura, muchos métodos de prueba utilizando el método de autoclave, en su mayoría de autores chinos y japoneses. Los métodos propuestos por (Nish- ibayashi et al., 1987) y (Tang et al., 1983) se han aplicado a barras de mortero elaboradas con 12 agregados canadienses de acuerdo con ASTM C 227.

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. Sin embargo, al evaluar los agregados canadienses por el método chino, de 54 años utilizando las especificaciones propuestas originalmente para proporciones de la mezcla y el tamaño de la muestra, Grattan-Bellew (NRC, com. Pers., 1990) obtuvieron buenos resultados, lo que sugiere que las proporciones de la mezcla, son críticos en las pruebas de autoclave, como ha señalado (Nishibayashi et al., 1987)

En el método desarrollado en la Universidad Laval por Fournier, las barras de mortero de prueba se evalúan de acuerdo con la norma ASTM C 227, pero con una relación a / c constante de 0-50 y un contenido en álcali de 3,5% (equiv Na_2O .) de la masa de cemento se adiciona NaOH al agua de la mezcla. Las barras se colocan en la autoclave comúnmente utilizado para pruebas de cemento, bajo presiones de 0-17 MPa o 25 psi (aproximadamente a 130 °C) durante 5 h. Las pruebas preliminares con algunos agregados de silicato y carbonato se habían realizado primero para determinar las condiciones experimentales que permitieran una mejor diferenciación entre muestras inocuas y nocivas. (Bérubé & Fournier, 1993). Los resultados de dicho estudio se muestran en la figura 1-23.

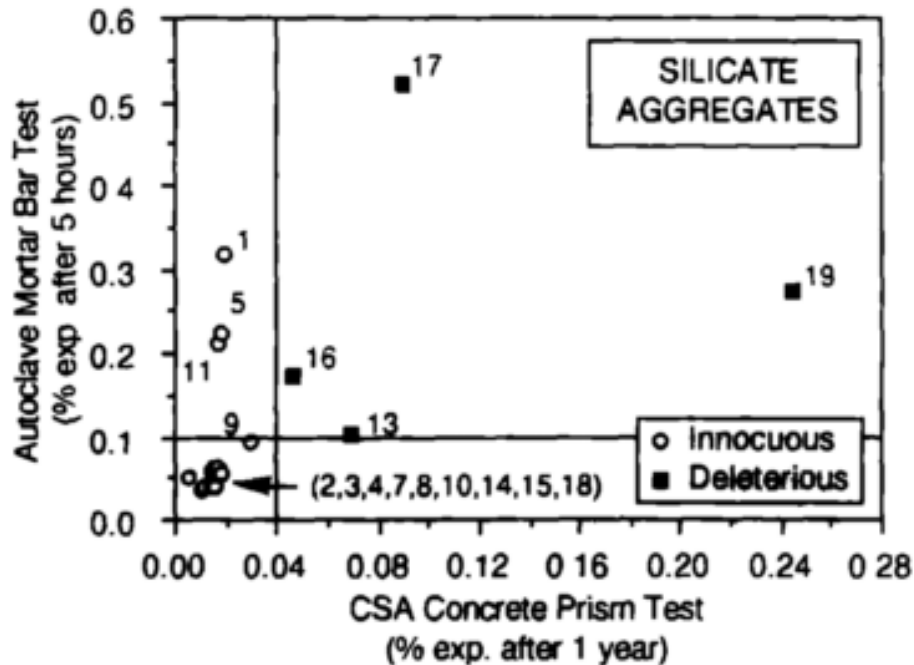


Figura 1-23 Los resultados obtenidos en la Universidad Laval para el método de barras de mortero autoclave, para los agregados de silicatos de Quebec. (Bérubé & Fournier, 1993)

1.5.3.4. ASTM 1293 C MÉTODO DE BARRAS DE CONCRETO

Consiste en realizar prismas de concreto con dimensiones no inferiores a 75 mm x 75 mm x 300 mm y no más de 120 mm x 120 mm x 450 mm, se elaboran los prismas con los agregados grueso en estudio, una arena no reactiva, y un cemento normal que contiene entre 0,8 y 1,2% álcalis (Na_2O equiv.), cómo se ilustra en la figura 1-24.



Figura 1-24 Prismas de concreto almacenados en un contenedor con agua.

La prueba se recomienda para todos los tipos de agregados; una temperatura de 38°C particularmente para agregados reactivos lentos con silicatos o sílice, para los que aún el límite 0,04% sigue siendo razonable.

En los últimos años, más países y organismos han aprobado la prueba del prisma de concreto como un método estándar. Normalmente se especifica un límite de expansión de 0,04% (al final de la prueba de uno o dos años); ya que este valor ha reportado una buena correlación con el agrietamiento de los prismas de prueba.

Este límite de expansión (0,04%) se establece en el apéndice de la norma ASTM C 1293 y en AASHTO PP-65. Aunque la norma ASTM C 1293 es generalmente considerada como la prueba más precisa para evaluar la reactividad global. Thomas et al. (2006) reportaron que aproximadamente el 35 por ciento de los álcalis internos dentro de los prismas de concreto puede filtrarse durante el transcurso de una prueba de un año. (US Department of Transportation, 2013).

2. Estado del arte

En este capítulo se expone una recopilación de las metodologías y criterios utilizados en varios países de América, Europa, Asia y Oceanía, para la evaluación de la reacción álcali sílice adaptándolas a la experiencia local de los lugares mencionados.

2.1 Experiencia en Estados Unidos ASTM

Del estudio realizado por Fournier y Bérubé sobre las diferentes metodologías de evaluación de la reactividad, estas se resumen en la Tabla 2-1, la cual incluye una lista de todos los procedimientos para evaluar la RAS. Se recomiendan tres pruebas: 1) el examen petrográfico, 2) ASTM C 1260 porque era el único método rápido estadísticamente confiable, y 3) la norma ASTM C 1293 que se requiere si el agregado evaluado fracasa el examen petrográfico y presenta expansiones excesivas utilizando ASTM C 1260.

Tabla 2-1 Métodos de ensayo para medir la potencial reactividad de los agregados

<ul style="list-style-type: none"> • Petrographic Method <ul style="list-style-type: none"> - ASTM C295 (≥ 1 day)
<ul style="list-style-type: none"> • Chemical Methods <ul style="list-style-type: none"> - ASTM C 289 chemical Method (2-3 days) - Modified Chemical Method (ASTM C 289 on insoluble residues) (2-3 days) - German Dissolution Test (1 day) - Osmotic Cell Test (< 40 days) - Gel Pat Test (≥ 1 week) - Chemical Shrinkage Method (1 days)
<ul style="list-style-type: none"> • Mortar Bar Methods <ul style="list-style-type: none"> - ASTM C 227 Method (6 months) - AFNOR P 18-585 Method (6 months) - CCA Method (6 months) - Danish Accelerated Method (5 months) - NBRI or ASTM C 1260 Accelerated Method (2 weeks) - Autoclave Methods (Chinese, Japanese, Canadian) (≥ 3 days)
<ul style="list-style-type: none"> • Concrete Prism Methods <ul style="list-style-type: none"> - CAN/CSA A 23.2-14A or ASTM C 1293 (1 year) - AFNOR P 18-587 Method (8 months) - South African Method (21-24 days) - BSI 812 Method (1 year) - CCA Method (6 months) - Accelerated Method (used in Quebec) (1 month) - Autoclave Methods

De otro lado, se resume la metodología desarrollada por la American Society for Testing and Materials (ASTM) para la detección de la reactividad, en la que se muestra en la Tabla 2-2, los diferentes ensayos, el procedimiento a realizar, criterio de evaluación y algunas características relevantes del ensayo.

Tabla 2-2 Métodos más usados para identificar RAS (Touma, 2000)

Método de ensayo	Procedimiento	Tipo de muestra	Criterio	Significado
<p>ASTM C 227</p> <p>Potencial reacción álcali cemento agregado</p> <p>(Método de las barras de mortero)</p>	<p>Las barras de mortero se almacenan en agua a alta humedad relativa y 38°C (100°F).</p> <p>Expansiones se miden a los 14 días, 1, 2, 3, 4, 6, 8 y 12 meses y cada 6 meses después en caso de necesidad</p>	<p>Al menos 2 barras de mortero con dimensiones estándar 25x25x285 mm.</p>	<p>- Expansión 6 meses >0.10% = Reactiva</p> <p>- Expansión 1 año <0,10% = Inocuo</p> <p>- La expansión de 3 meses > 0,05% = Reactiva</p> <p>- Si la expansión de 3 meses <0,05% espera para la expansión de 1 año</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo 2. Prueba lenta (6 meses) 3. No logra detectar agregados lentamente reactivos (expansión es demasiado pequeño). 4. Mechales crean lixiviación excesiva de álcalis de mortero resultante en la reducción de la expansión. 5. Hay una reducción de tamaño de los agregados (no realista). 6. La superficie total no es la misma que la del agregado en las estructuras de campo. 7. Todos los documentos relativos C 227 indicaron que es demasiado leve 8. Fournier, Bérubé (1992) modificaron la prueba aumentando el contenido de álcali a 1,25% Na₂Oequiv. y el uso de cubos de plástico en lugar de mechales
<p>ASTM C 289</p> <p>Potencial reactividad álcali-sílice de los agregados (método químico)</p>	<p>Los agregados son triturados, se hacen reaccionar con una solución alcalina a 80°C (176°F) durante 24 horas. La cantidad de sílice disuelta y la reducción de la alcalinidad se miden.</p>	<p>Tres muestras de agregado triturado y tamizado de 25 g.</p>	<p>Trazar Sc y Rc en un gráfico y localizar los agregados en zonas potencialmente nocivos o inocuos predeterminados.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rápida 2. Bueno para los agregados rápidamente reactivos. 3. Falla por agregados lentamente reactivos como el gneis, cuarcita esquisto. 4. Complicado. 5. Cuesta más que C 1293 y C 1260 6. Una considerable cantidad de carbonato en los agregados de silicatos podría alterar los resultados y subestimar el valor Sc
<p>ASTM C 1260</p> <p>Potencial reactividad álcali de los agregados</p>	<p>Las barras de mortero se sumergen en una solución de NaOH 1 N a 80°C (176°F) y las</p>	<p>Al menos 3 barras de mortero con dimensiones estándar 25x25x285 mm (1/4 pulg) 1x1x11-</p>	<p>Expansión de 14 días <0,10% = Inocuo</p> <p>0.10% < expansión de</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Demasiado agresivo, agregados con un buen rendimiento en el campo pueden dar reactivos. 2. Puede detectar agregados lentamente reactivos 3. No logra detectar granitos, gneises reactivos que tienen cuarzo microcristalino asociado con cuarzo tensa.

(método de barras acelerado de mortero)	expansiones se miden a 4, 7, 11 y 14 días		14 días <0.20% = inconcluso Expansión de 14 días > 0,20% = Reactiva	4. El aumento en el contenido alcalino del cemento causa sólo un pequeño cambio 5. Fiable para evaluar la eficacia de los materiales cementosos. 6. Si la prueba de expansión > 0,10%, prisma de concreto debe llevar a cabo para confirmar
ASTM C 1293 Método de prueba concreto mediante la determinación de cambio en la longitud de concreto debido a ASR	Prismas de concreto se almacenan sobre el agua a 38°C (100.4°F). Expansiones se miden a los 7, 28, 56 días, y 3, 6, 9, 12 meses y cada 6 meses después si es necesario.	3 prismas por agregado/ cemento con dimensiones estándar: 75x75x285 mm	La expansión de 0.04% o más en un año indica potencialmente perjudicial reactiva	1. Más realista 2. Bajo costo 3. Prueba lenta (1 año) 4. Es muy confiable en condiciones de almacenamiento 5. El uso de tejido húmedo para envolver cada prisma colocado en bolsas de plástico selladas dio buenos resultados. 6. Pruebas en NaOH 1 M a 80°C dio la más rápida expansión, pero no es fiable. 7. Pruebas en 1M NaCl causó una combinación de al menos dos mecanismos de expansión 8. Se recomienda realizar pruebas en NaOH 1 M a 38°C
ASTM C 295 Examen petrográfico de agregados para concreto	El examen es visual. el análisis de la muestra se hace por medio de microscopía u otros métodos tales como la difracción de rayos X, análisis térmico diferencial o microscopía electrónica	Muestra Core, secciones delgadas, o piezas de agregados	Aspecto del borde oscuro en la superficie del agregado. Cierta cantidad de componentes reactivos	1. La fiabilidad depende de la experiencia del petrógrafo 2. Análisis de los agregados antes de la fundición es útil 3. Se recomienda la realización de pruebas adicionales

Capítulo 2

Tabla 2-3 Métodos más usados para evaluar las medidas preventivas contra RAS (US Department of Transportation, 2013)

MÉTODO DE ENSAYO	COMENTARIOS
<p>ASTM C 441: Método de prueba estándar para la eficacia de los minerales o aditivos, escoria de alto horno en la prevención de la expansión excesiva del concreto debido a la reacción álcali-sílice</p>	<p>Prueba de barras de mortero, la intención es evaluar la eficacia de los materiales cementantes en la reducción de la expansión de RAS. La prueba emplea cemento con alto contenido de álcalis y vidrio pyrex. Prueba no muy fiable debido al uso de vidrio pyrex, que es sensible a las condiciones de prueba y contiene álcalis que pueden ser liberados durante la prueba. Prueba no se correlaciona bien con los datos a partir de mezclas de concreto que contienen agregados naturales (bérubé y duchesne 1992).</p>
<p>ASTM C 1567: Método de prueba estándar para determinar el potencial álcali-sílice reactividad de combinaciones de materiales cementicios y agregados (accelerated mortero-bar method)</p>	<p>Prueba de barras de mortero, originalmente diseñado para evaluar la reactividad agregado. Las barras se sumergen en una solución de NaOH 1N durante 14 días. Sólo se debe utilizar para los agregados para el que se ha establecido una correlación razonable entre AASHTO T 303 (ASTM C 1260) y ASTM C 1293 ASTM C 1567 puede ser modificado según AASHTO PP65-11 para evaluar las mezclas a base de nitrato de litio, aunque la norma ASTM C 1293 se considera que es un método de prueba más eficaz para determinar las dosis de nitrato de litio necesarias para el concreto.</p>
<p>ASTM C 1293: Método de prueba estándar para hacer concreto mediante la determinación de cambio en la longitud de concreto debido a la reacción álcali-sílice</p>	<p>Versión modificada de prueba prisma de concreto, permite realizar pruebas a materiales cementantes, mezclas de cemento y aditivos de litio. Duración de la prueba es de dos años, con un límite de expansión de 0,04 por ciento.</p>

2.1.1. Campos de exposición

Un ejemplo de los estudios de la RAS en campo, es el proyecto que se adelanta en el Building Research Establishment (BRE) Reino Unido, donde se construyeron grandes elementos cúbicos, que varían en tamaño desde 350 mm a 900 mm (13,8 pulg. a 35,4 pulg.). Los cuales se disponen en el suelo, dentro de agua estancada con una lámina de agua 25 a 50mm (1 a 2 in.), como se observa en la figura 2-1.



Figura 2-1 Vista de uno de los sitios de exposición a BRE.(Thomas et al., 2006)

El campo de exposición de grandes bloques se ha utilizado para complementar los estudios de laboratorio en el uso de las cenizas volantes, escoria, metacaolín y compuestos de litio como medida para controlar RAS. Mediciones de expansión se pueden hacer fácilmente utilizando medidores de cambio de longitud de tipo DEMEC en puntos de referencia incorporados. Este concreto contiene 475 kg / m³ (801 libras / yarda³) de un cemento altamente alcalino (1.15% Na₂O_e) con una arena de sílex reactiva que representa 25% de la suma total, el cual se considera como el nivel pésimo para esta arena. (Thomas et al., 2006)

En la figura 2-2 se observa, el impacto del uso de una ceniza volante con un contenido bajo de calcio a 25% en masa del material total de cementación, en una reducción significativa de la expansión y en figura 2-3, se presenta el monitoreo de especímenes de 11 años de edad, se observa un panorama de fisuras por el efecto de la RAS (Thomas et al., 2006)

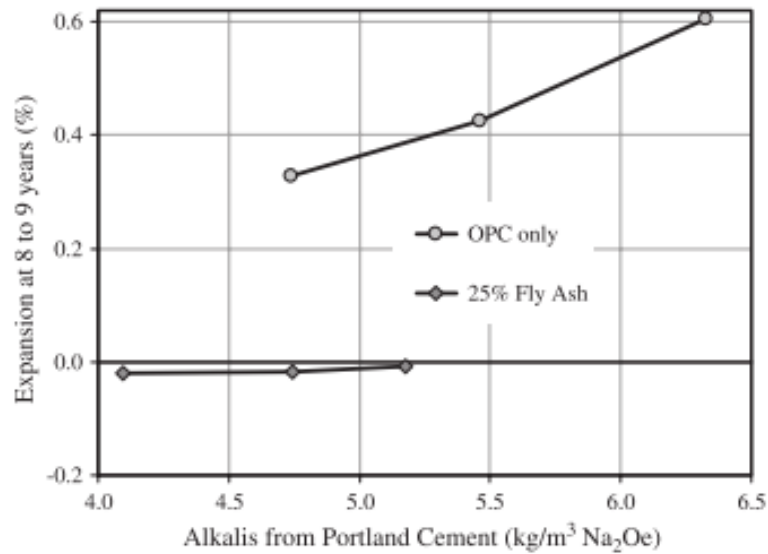


Figura 2-2 Efecto de las cenizas volantes en la expansión de los cubos de concreto de 900 mm (con arena silicea).

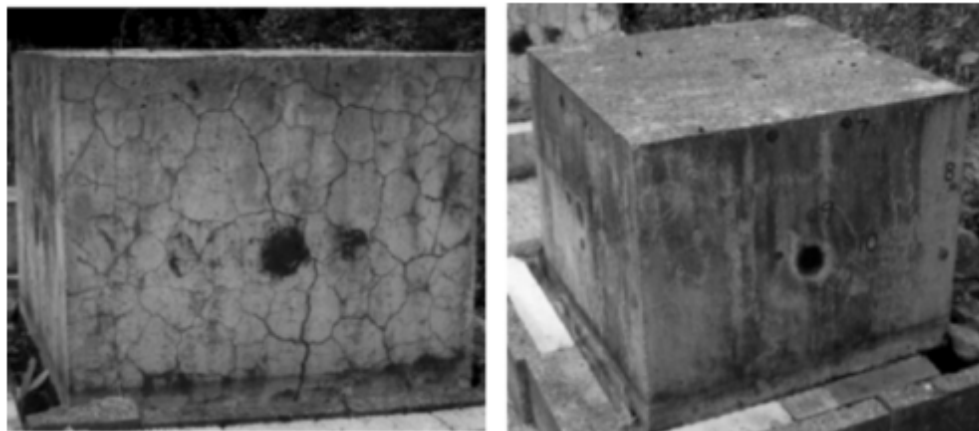


Figura 2-3 Fotografías de cubos de concreto con 90 mm de lado, de 11 años de edad, con un 100% de OPC (izquierda) y con cenizas volantes 25% (derecha).

Estudios de exposición en campo integrales están siendo actualmente realizados en la Universidad de Texas en Austin y CANMET en Ottawa; estos sitios se muestran en la Figura 2-4 los cuales incluyen la evaluación de las medidas preventivas basadas en materiales cementantes suplementarios y compuestos a base de litio, al igual que el uso de cementos de bajo contenido de álcalis, y los efectos combinados de la RAS y el retraso en la formación de etringita (DEF) en el concreto. En el proyecto de investigación grandes bloques de concreto de mezclas paralelas, han sido colocados en ambos sitios, en campo

y en zonas de exposición marina en Treat Island, Maine, para examinar la influencia del clima y condiciones de exposición.



Figura 2-4 Campos de exposición de la universidad de Texas en Austin (Izquierda) y CANMET-TL en Ottawa (derecha).

2.2 Resumen de experiencia internacional en la RAS

Una encuesta internacional se llevó a cabo con el fin de determinar el estado de las técnicas de evaluación y control de la reacción álcali-sílice. La encuesta se concentró en dos grandes áreas:

1. Métodos de prueba utilizados para predecir la reactividad del agregado.
2. Alternativas utilizadas para mitigar la reacción.

El siguiente es un breve resumen de los resultados de la encuesta sobre las prácticas que se llevan a cabo en todo el mundo para hacer frente a la reacción álcali-sílice en el concreto. (Nixon & Sims, 1996) como se muestra en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Resumen simplificado de resultados de la encuesta (Nixon & Sims, 1996)

Country	Petrography	Chemical	Expansion mortar	Expansion concrete	Expansion ultra-accel'd	Other
Australia	○	●	●	○	●	
Belgium	●				●	
Denmark	○	●				●
France	●	●	●	●		●
Germany	○	●				●
Hong Kong	●	○	○		●	
Iceland	●	●	●			
Italy	●	●	○		●	
Japan	○	●	●		●	●
Netherlands	●	○	○	●		○
N Zealand	●	●	●		○	
Norway	●			●	●	○
Romania	●	●	●			●
Russia	●	●	●			●
S Africa	●	●	○	●	●	
UK	●			●	○	
USA	●	●	●	○	●	

● Important method ○ Method sometimes used or being developed.

Los resultados de la encuesta, indican que existe un interés general en cada uno de los ensayos petrográficos, químicos y pruebas de expansión; con más énfasis y

reconocimiento se concentran en los métodos acelerados de pruebas de expansión tales como los especificados en la ASTM C 1260.

Sin embargo, distintos países prefieren diferentes pruebas, y no fue posible encontrar una sola prueba o una serie de pruebas que hayan sido adoptadas por la mayoría de los países. Además, no fue posible encontrar una "fuerte relación entre los agregados reactivos identificados y los métodos preferidos para la evaluación (Nixon & Sims, 1996)". También se encontró que hay un interés creciente en el desarrollo de métodos de ensayo que sean capaces de producir resultados fiables en un corto período de tiempo. Aunque la ASTM C 1260 está ganando aceptación en varios países, otros métodos de prueba están siendo desarrollados e investigados.

No es claro en la encuesta si la aceptación de un método de ensayo determinado en un país se basa en la capacidad de un método de prueba para predecir el comportamiento de los agregados en las estructuras actuales o en los registros de servicio. La impresión general era que los métodos de prueba han sido adoptados de otros lugares y los criterios interpretativos de la prueba han sido modificados con base en las experiencias locales. (Nixon & Sims, 1996)

A continuación, se enuncian en la Tabla 2-5, las diferentes normas que cubren los ensayos mencionados anteriormente.

Tabla 2-5 Normas de ensayos en algunos países del mundo. (Autor)

Método de ensayo	RILEM	Normas ASTM	Normas de Canadá	Normas Británicas
Petrografía	AAR-1	ASTM C 295	---	BS 812: Part 104
Método químico		ASTM C 289	---	
Ensayo de barras de mortero acelerado	AAR-2	ASTM C 1260	CSA A 23.2-25A	DD 249: 1999
Ensayo de prismas de concreto	AAR-3	ASTM C 1293	CSA A 23.2-14A	BS 812: Part 123
Ensayo de prismas de concreto acelerado	AAR-4	---	---	---

2.2.1 Métodos de ensayo usados en la actualidad en Europa

Diferentes métodos de prueba se utilizan en Europa actualmente, y en el último par de años, un nuevo conjunto de métodos estandarizados RILEM en el año 2004 han cobrado gran importancia; en ellos se expone la metodología que se presenta en la figura 2-5, para la identificación de componentes reactivos, estos métodos se han basado principalmente en los métodos utilizados en la actualidad y en el avance del estado del arte sobre RAS.

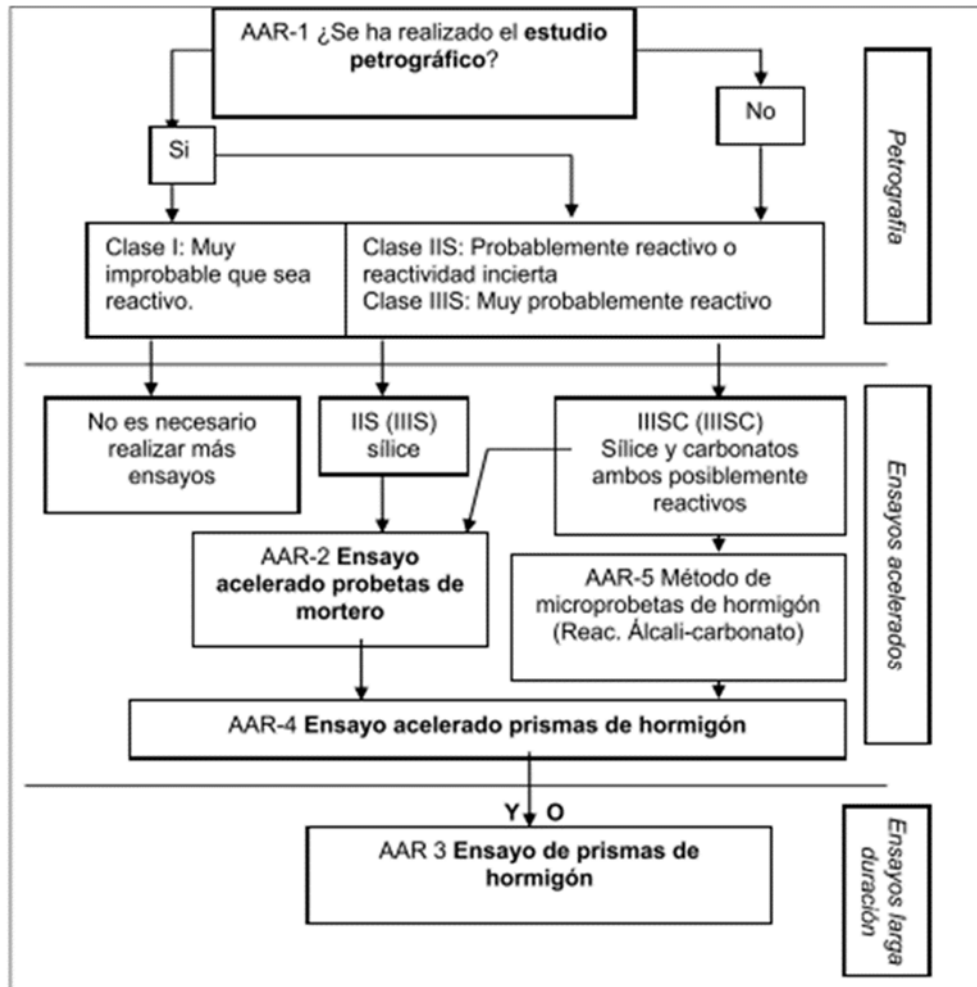


Figura 2-5 Metodología propuesta por RILEM para identificación de agregados reactivos.

En la tabla 2-6 se citan la metodología a seguir en barras de mortero y concreto y los criterios de evaluación de la reactividad, según el RILEM.

Tabla 2-6 Métodos de ensayo y criterios de aceptación de RILEM (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

RILEM	
Clasificación	Métodos de ensayo y límites recomendados
3 clases: - Clase I: muy improbable de sufrir reacción álcali-sílice - Clase II: Potencialmente reactivo o reactividad incierta - Clase III: Muy posible su reactividad	Ensayo acelerado de barras de mortero. Criterio de interpretación (14 días): <0,10%: no reactivo >0,20%: reactivo 0,10-0,20%: en ausencia de conocimiento del comportamiento real del árido en obra, se clasificará como potencialmente reactivo Ensayo de prismas de hormigón. Criterio de interpretación (1 año): <0,05%: no reactivo >0,10%: reactivo 0,05-0,10%: en ausencia de conocimiento del comportamiento real del árido en obra, se clasificará como potencialmente reactivo. Ensayo acelerado de prismas de hormigón. Criterio de interpretación (20 semanas): <0,03%: no reactivo.

En la tabla 2-7, se describen una lista de métodos de ensayos usados en el continente europeo, para medir la reacción álcali sílice, se describe el ensayo, la gradación del material a utilizar, el tamaño de la muestra, el criterio de evaluación y el tiempo que conlleva el ensayo.

Tabla 2-7 Lista de métodos de ensayos para medir la reacción álcali sílice a lo largo de Europa.(Community & Growth, n.d.)

Nombre	Tipo de ensayo	Elemento de Ensayo	Tipo de partículas	Tamaño de muestra o espécimen (mm)	Temperatura (°C)	Contenido de álcali (% Na ₂ O _{eq}) L= limitada UL=ilimitada	Humedad	Criterio	Tiempo
RILEM AAR-1	Petrografía	Agregado	Fino y cuarzo	---	---	---	---	El agregado se clasifica como: Clase I: Muy poco probable que sea alcalino-reactiva Segunda Clase: Álcali reactividad incierta Clase III: Muy probable que sea alcalino-reactivo.	3 horas
Chatterji	Químico	Agregado	Fino y cuarzo triturado	100 g	70	---	---	No se ha establecido un criterio, se ha sido calibrado observando las expansiones	2 días
RILEM AAR-2	Barra de mortero	Expansión	Fino (125 µm < x < 4 mm) natural o triturado	3 barras de 285x25x25 o 160 x40x40	80 ± 2	UL: inmerso en una solución 1M de NaOH	---	Varia en rangos de 0.08 – 0.20%	14 días
TI-B51	Barra de mortero	Expansión	Fino y cuarzo triturado	160x40x40	50 ± 2	UL: inmerso en una solución NaCl	---	Para agregados daneses:	20 semanas

								Reactivos si la expansión > 0.01% después de 8 semanas	
RILEM AAR-3	Prisma de concreto	Expansión	Fino o cuarzo	3 barras de (250 ± 50) × (75 ± 5) × (75 ± 5)	38 ± 2	0.9-1.2 L: (+ NaOH ~ 1.25%)	100%	Reactivo si la tasa de expansión es >0.05%	52 semanas
RILEM AAR-4	Prisma de concreto	Expansión	Fino o cuarzo	3 barras de (250 ± 50) × (75 ± 5) × (75 ± 5)	60 ± 2	0.9-1.2 L: (+ NaOH ~ 1.25%)	Lo más cercano al 100%	Reactivo si la tasa de expansión es >0.03%	20 semanas
RILEM AAR-4 Alternativo	Prisma de concreto	Expansión	Fino o cuarzo	3 barras de (250 ± 50) × (75 ± 5) × (75 ± 5)	60 ± 2	0.9-1.2 L: (+ NaOH ~ 1.25%)	Envuelto en una tela de algodón húmedo y más doble envuelta en polietileno	Reactivo si la tasa de expansión es >0.03%	20 semanas
Noruego	Prisma de concreto	Expansión	Fino o cuarzo	3 barras de 100x100x450	38 ± 2	1.0 ± 0.2 L: (+ NaOH ~ 1.25%)	100%	Reactiva si: Expansión > 0,04% después de 12 meses sin pozolanas, > 0,03% después de 12 meses o > 0,04% después de 24 meses con pozolanas	52 semanas
Alemania	Prisma de concreto	Expansión	Fino o cuarzo	3 barras de 100x100x500	40 ± 2	L: 1.3 ± 0.1	99% cámara de niebla	No reactivo si: expansiones <0,6 mm / m (‰) después de 9 meses	9 meses
Sur África	Barra de mortero	Expansión	Fino o cuarzo triturado	160x40x40	80	UL: inmerso en una solución 1M NaOH		Inocuo si expansiones después de 14 días ≤ 0,1%, lentamente expansiva si ≤ 0,1% de expansión después de	14 días

								14 días <0,25% y rápidamente expansiva si la expansión ≥ 0,25% después de 14 días.	
TI-B52	Petrografía	Agregado	Fino o cuarzo	---	---	---	---	---	3 horas
Método chino	Barra de mortero	Expansión	Fino o cuarzo triturado	10x10x40	---	---	---	---	

Por otra parte, en 1995 el comité técnico CEN/TC 104 redactó, a petición del Comité Europeo de Normalización, un documento que recoge las especificaciones y recomendaciones sobre RAS de los distintos países europeos (Cen., 1995). A continuación, se exponen los ensayos considerados óptimos por los distintos países para evaluar la reactividad del agregado, resumidas en la tabla 2-8.

Tabla 2-8 Metodologías en países Europeos, 1995 (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

Dinamarca Normativa propia	- Estudio petrográfico por lámina delgada - Ensayo acelerado de probetas de mortero.
Francia Normativa propia	- Ensayos químicos (limitar contenido de $\text{SiO}_2 < 4\%$) - Ensayo químico + DRX (Limitar contenido cuarzo $< 3\%$) - Microscopía óptica (ángulo extinción ondulante) - Ensayo químico - Expansión acelerada en probetas de mortero - Expansión de prismas de hormigón
Islandia Normas ASTM	- Expansión en probetas de mortero - Ensayo químico - Estudio petrográfico
Irlanda Normas ASTM	- Expansión en probetas de mortero - Ensayo químico - Estudio petrográfico
Italia Normativa propia	- Expansión en probetas de mortero - Ensayo químico - Estudio petrográfico
Holanda	- Estudio petrográfico (limitar contenido de $\text{SiO}_2 < 2\%$). - Expansión de prismas de hormigón - Ensayo químico
Noruega Normas NBRI	- Estudio petrográfico. Si se considera potencialmente reactivo: - Ensayo acelerado de probetas de mortero.
Portugal Normativa propia	- Expansión de probetas de mortero (normativa propia, basada en ASTM) - Ensayo químico (ASTM) - Se recomienda realizar estudio petrográfico.
Suecia Normativa propia	- Expansión de prismas de hormigón.
Reino unido Normativa propia.	- Expansión prismas de hormigón (estudio de dosificaciones) - Estudio petrográfico

En los países en los que se indica que la normativa es propia, el fundamento del ensayo es igual que el de los mismos ensayos normalizados por norma UNE-EN, ASTM o RILEM, pero pueden variar en la realización.

La tabla anterior de países europeos se puede completar con la desarrollada en 1996 por RILEM. En la Figura 2-6 se muestra el resultado de unificar los dos estudios internacionales. Indicando el grado de importancia del método de ensayo para cada país.

Dinamarca (*)					
Francia (*)					
Islandia (*)					
Irlanda (*)					
Italia (*)					
Holanda (*)	Islandia (*)				
Noruega (*)	Irlanda (*)	Francia (*)			
Portugal (-)	Italia (*)	Islandia (*)			
Reino Unido (*)	Portugal (*)	Irlanda (*)	Dinamarca (*)		
Australia (*)	Australia (*)	Italia (*)	Francia (*)	Francia (*)	
Canadá (*)	Canadá (*)	Holanda (*)	Noruega (*)	Holanda (+)	
EEUU (*)	EEUU (*)	Portugal (*)	Australia (*)	Noruega	
Hong Kong (*)	Hong Kong (*)	Hong Kong (-)	Canadá (*)	Suecia (*)	
Japón (*)	Japón (*)	Japón (*)	EEUU (*)	Reino Unido (*)	Rumania (*)
N. Zelanda(*)	N. Zelanda (*)	N. ZELANDA (*)	Hong Kong (*)	Australia (-)	Rusia (*)
Rumania (*)	Rumania (*)	Rumania (*)	Japón (*)	Canadá (*)	Canadá (*)
Rusia (*)	Rusia (*)	Rusia (*)	N. Zelanda (-)	EEUU (*)	EEUU (*)
Sudáfrica (*)	Sudáfrica (-)	Sudáfrica (*)	Sudáfrica (+)	Sudáfrica (*)	Japón (*)
Estudio petrográfico	Ensayo de probetas de mortero	Ensayo químico	Ensayo acelerado de probetas de mortero	Ensayo de prismas de Hormigón	Otros
-Importante	*Muy importante				

Figura 2-6 Utilización de diferentes métodos de ensayo para la evaluación de la reacción álcali-agregado según países. (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

A continuación, se muestra un breve resumen de la publicación de SINTEF Building and Infrastructure, sobre un reporte del estado del arte acerca de la RAS en Europa, los ensayos realizados por cada país, el establecimiento de normatividad y los criterios de evaluación de cada país. (Community & Growth, n.d.):

2.2.1.1 Alemania

En los últimos años, se produjo entre 10 y 12 años después de la construcción un daño en unos pavimentos de concreto en las autopistas; por lo que el Comité Alemán para Concreto Estructural (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb), dio orientaciones detalladas acerca del tratamiento de la RAS en su país. Las directrices incluyen aspectos generales como el alcance, los tipos de agregados que deben ser evaluados y las condiciones ambientales. También describe las pruebas de los agregados con piedra arenisca opalina incluyendo el pedernal. Además, la evaluación y las medidas mitigantes mencionados anteriormente.

MÉTODOS DE ENSAYO

Ensayo acelerado barra de mortero a 80 ° C (Método de referencia)

- La prueba se realiza siguiendo los requisitos estipulados en la RILEM AAR-2.
- Se realiza una evaluación de la reactividad álcali después de 14 días de almacenamiento en 1M NaOH.

Ensayo acelerado barra de mortero a 70 ° C (método alternativo)

- La preparación de barras de mortero es similar a la que se recomienda en RILEM AAR-2.
- Se tritura y tamiza el agregado a evaluar (0,5 / 1 mm y 1/2 mm) y arena de cuarzo no reactiva (0,1 / 0,5 mm).
- Se adiciona la solución de NaOH al agua de la mezcla de concreto para aumentar el contenido de álcali del aglutinante a 2,5 wt.-% de equivalente de óxido de sodio.
- Se almacenan los prismas de mortero (40 mm x 40 mm x 160 mm) a 70 ° C por encima del agua.
- Se determina el cambio de longitud de los prismas a 20 ° C. Con lecturas después de 28 días.

Prueba de prisma de concreto en la cámara C-niebla 40 ° (Método de referencia)

- Se elaboran 3 prismas (100 mm × 100 mm × 50 cm) y un cubo de 300 mm. Se almacenan en una cámara de niebla a 40 ° C durante nueve meses. La cámara de niebla, es un recipiente cerrado que tiene vapor de agua enfriado y saturado.
- Se determina el cambio de longitud de las vigas y el agrietamiento del cubo.
- Se evalúa la reactividad después de nueve meses.

Adicionalmente se llevan a cabo investigaciones petrográficas de secciones delgadas, especialmente a agregados que no son reactivos.

Ensayo acelerado prisma de concreto a 60 ° C

- La prueba es similar a la establecida en RILEM AAR-4 con una composición de concreto diferente.

En la tabla 2-9 se muestra los métodos y criterios de aceptación de los agregados en Alemania.

Tabla 2-9 Métodos y criterios de aceptación para Alemania (Wigun et al., 2006; Chak et al., 2004)

Clasificación	Métodos de ensayo y límites recomendados
- E1: Inerte - EII: utilización limitada - EIII: Reactivo	<p>La clasificación se basa en el contenido de ópalo en areniscas y flint reactivo obtenido.</p> <p>Dependiendo del componente reactivo se emplearán los siguientes ensayos para clarificar la reactividad potencial del árido:</p> <p><u>Gravera con arenisca opalina y flint:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Estudio petrográfico - Determinación de la densidad del flint - Atacar arenisca opalina con disolución NaOH a 90°C 1 hora y determinar la pérdida de masa. <p><u>Grauwacas (especialmente precámbricas), graveras con caliza silicificada y chert:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Prismas de hormigón (9 meses) (Normativa alemana)

2.2.1.2. Austria

Como resultado de la posible presencia de reactividad álcali-sílice en depósitos de agregados austriacos, era necesaria una norma para minimizar el riesgo residual y para prevenir posibles daños por el RAS. Debido a la variedad geológica de los agregados austriacos no era predecible que tipo de agregado causaría RAS.

Esta norma (ÖNORM B 3100) es particularmente adaptada a los agregados austriacos que posiblemente podrían contener una pequeña cantidad de agregados reactivos.

MÉTODOS DE ENSAYO

Prismas de prueba de mortero de barras acelerado

- Se elaboran barras de (40 mm x 40 mm x 160 mm) con el agregado de prueba y CEM I "unidad cemento" (mezcla de todos cementos austriacos CEM I).
- Después de 24 horas, los prismas se calientan en agua de 20 ° C a 80 ° C.
- Se almacenan los prismas durante 13 días en solución NaOH- a 80 ° C. La cual se utiliza para la evaluación del agregado. Este principio de medición se realiza de acuerdo con el método de ensayo RILEM AAR-2.

Prueba de concreto en elementos prismáticos

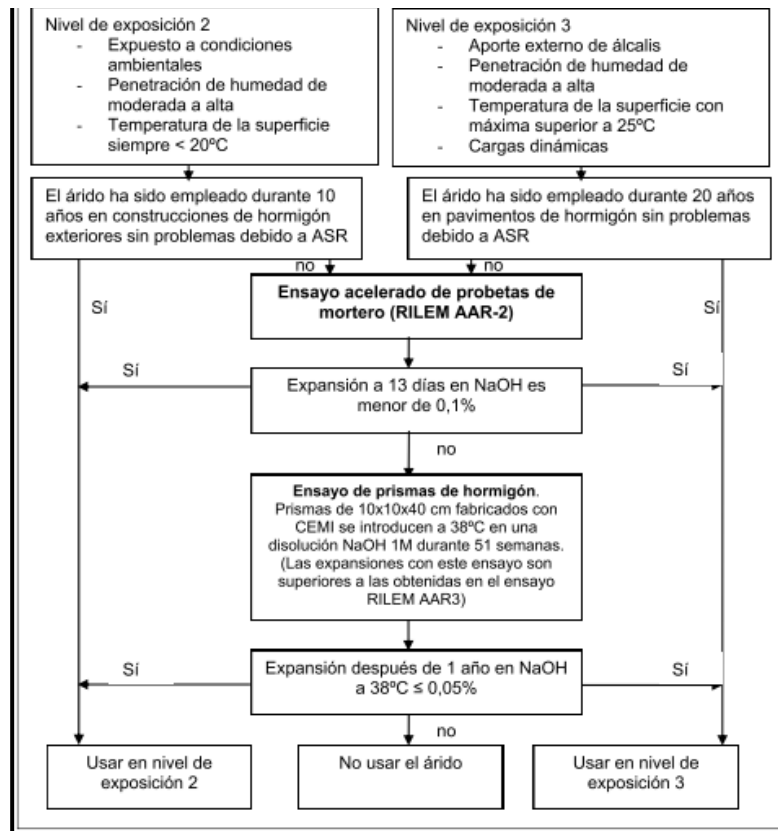
- Se elaboran barras de (100 mm x 100 mm x 400 ± 40 mm) con el agregado de pruebas y CEM I (mezcla cementos CEM I de Austria).
- Se colocan tornillos de referencia en las caras extremas de los moldes. Después de 24 horas se desencofran.

- Se almacenan los prismas durante 6 días a 20 ° C y min. 90% HR. Y posteriormente durante 51 semanas en una solución de NaOH a 38 ° C.

La expansión se produce en los prismas al estar en la solución de NaOH. la cual simula la absorción de los álcalis procedentes del servicio de invierno (agentes de deshielo) en pavimentos de concreto y produce expansiones superiores significativas en comparación con los resultados de las pruebas de acuerdo a lo estipulado en RILEM AAR-3.

En la tabla 2-10 se resume la metodología usada en Austria

Tabla 2-10 Métodos y criterios de aceptación para Austria ((Wigun et al., 2006)



2.2.1.3. Bélgica

La norma belga de concreto (NBN B 15-001 (2204)), que es la adaptación nacional de ENV 206, da la siguiente orientación:

- Limitar el contenido de álcali total de la mezcla de concreto, dependiendo del tipo de cemento utilizado. Utilizar un cemento alcalino bajo (según NBN B 12-109),
- Cambiar los agregados.
- Limitar el grado de saturación del concreto, por ejemplo, mediante el uso de una membrana impermeable.

MÉTODOS DE ENSAYO

Pueden llevarse a cabo ensayos de expansión para obtener una mezcla con una expansión menor que un valor límite definido, (de acuerdo con la prueba utilizada):

- Prueba NBRI modificado (prueba sudafricana)
- Prueba NFP 18 587 modificado (Test Francés)
- Prueba de TI - B5I (prueba danesa).

2.2.1.4. Dinamarca

En Dinamarca, el Comité danés ha estudiado la reacción álcali en concreto desde la década de 1960. Sobre la base de una gran cantidad de experimentos sugirieron medidas preventivas; entre ellas el uso de cemento de baja alcalinidad y / o el uso de agregados que contengan menos de 2% de componente reactivo. En esta etapa el supuesto básico es que el contenido de álcali del concreto se determina por la del elemento y los álcalis se distribuyen uniformemente.

La segunda fase de la investigación álcali-sílice comenzó con una investigación de las carreteras de concreto, que se habían deteriorado a 4 años de su construcción. Esta investigación mostró que una amplia RAS había tenido lugar, aunque el agregado grueso era de granito no reactivo y el cemento contenía aproximadamente un 0,6% Na₂O_{epv}. La causa de este fenómeno fue una interacción entre la sal de deshielo y la sílice reactiva presente en la arena. La suposición explícita de esta fase de la investigación era que las estructuras a menudo reciben álcalis de fuentes externas y que casi siempre hay un gradiente de concentración de álcalis en cualquier estructura.

MÉTODOS DE ENSAYO

En Dinamarca todas las estructuras de concreto se deben considerar con respecto a la EN206 estándares daneses DS, DS 2426, DS / EN 12620 y DS427 (2000). Y los principales ensayos para determinar la reactividad son:

- Reactividad álcali sílice de arena T1B51
- Petrografía de arena T1-B-52
- Expansión de barra de mortero acelerado ASTM C1260 (DS405.16)
- Contracción química TK-84

Tabla 2-11 Métodos y criterios de aceptación para Dinamarca ((Wigun et al., 2006)

Clasificación	Metodos de ensayo y limites recomendados
<p>4 Clases*: Clase P: para empleo de ambientes no agresivos Clase M: para utilizacion en ambiente moderado Clase A: para empleo en ambientes agresivos Clase E: para empleo en ambiente muy agresivo</p>	<p>Clasificacion de la arena Estudio petrografico: (T1-B 52) se emplea el metodode conteo de puntos sobre laminas delgadas. Volumn maxi o del Flint reactivo Clase P: sin limite Clase M : máx 2% Clase A: máx 2% Clase E: máx 1% Expansión de barras de mortero (T1-B 51) Clase P: sin limite Clase M : máx 0.1% Clase A: máx 0.1% Clase E: máx 0.1% Para clase M y A: 8 semanas; Para clase E:20 semanas Ensayo de reduccion quimica (TK-84) Ensayo acelerado de probetas de mortero* (ASTM C1260) Clase P: sin limite Clase M : máx 0.1% Clase A: máx 0.1% Clase E: máx 0.1% (Expansión a 14 dias) * El ensayo acelerado de probetas de mortero se emplea como ensayo adicional cuando el componente reactivo no es flint poroso. En el caso que no lo sea, no es necesario este ensayo. Clasificacion grava Estudio petrografico: (T1-B 52) se emplea el metodode conteo de puntos sobre laminas delgadas. Volumn maxi o del Flint reactivo Clase P: sin limite Clase M : máx 5% Clase A: máx 2% Densidad (DS 405.4) Clase M y A: 10% particulas con densidad <2.4 g/cm3 Clase E:10% particulas con desidad <2.5 g/cm3 Ensayo acelerado de probetas de mortero* (ASTM C1260) Clase P: sin limite Clase M : máx 0.1% Clase A: máx 0.1% Clase E: máx 0.1% (Expansión a 14 dias) Absorcion * (DS405.12): Clase P: sin limite Clase M: máx 2.5% Clase A: max 1.1% Clase E: máx 1.1% (La absorción se determina del % con densidad menor de 2.4 g/cm3). El ensayo de absorcion se emplea para grava delpais y el ensayode probetas de mortero para gravas extranjeras.</p>
<p>Ambientes: P: Ambiente seco, sin agentes agresivos externos M: ambiente humedo, interior, exterior o en contacto con agua limpia (almacenada o en circulacion) A: presienca de sales o gases de chimenea, agua de mar o salobre, o ambiets donde se estan empleando sales de deshielo. E: ambientes con jumedad alta y contenidoselevados de cloruros o alcalinos que se pueden acumular en la superficie del concreto</p>	

2.2.1.5. España

En los años 70, después de no encontrar agregados reactivos, el informe RC-75 no mencionó ninguna prueba para evaluar la RAS. Durante este período, España tuvo un auge en el sector de la construcción en el aumento de las áreas residenciales exigido para hacer frente al enorme crecimiento turístico. Este crecimiento no sólo afectó a las empresas de la construcción, sino también a los proveedores de materiales de construcción, los cuales tuvieron que resolver la demanda del mercado. Como

consecuencia de ello, se abrieron nuevas explotaciones de agregados en diversos lugares geográficos, cerca de las zonas donde se llevaron a cabo las obras de construcción, para abastecer a las empresas de construcción.

Pocos años más tarde, nuevas patologías en edificios fueron encontradas en la parte occidental de España. Las conclusiones finales de esos estudios, establecieron la reactividad alcalina de los agregados como la causa responsable de los daños en varios edificios.

En 1998, se incluyeron pruebas de reactividad alcalina para agregados. Siguiendo la norma española, los agregados de sílice, silicatos y carbonatos tienen que ser evaluados química y físicamente siguiendo los procedimientos de la norma UNE 146507EX, UNE y UNE 146508EX 146509EX, respectivamente.

Por un lado, los resultados obtenidos por las pruebas químicas han demostrado no ser decisivas; algunos de los agregados que han dado resultados positivos a través de las pruebas químicas, y no han mostrado ninguna reacción expansiva por las pruebas físicas, han sido clasificados como agregados no reactivos. Debido a estos resultados se concluyó que se necesitaba otro método para estimar la reactividad de las muestras.

Las normas españolas establecen varias pruebas, que se describen en la norma UNE 146507 EX (prueba química para una rápida respuesta de los agregados propios), UNE 146508 EX (prueba física de aceleración en el mortero) y UNE 146509 EX (prueba física de aceleración en el concreto).

La aplicación del método descrito en la norma UNE 146507 EX ofrece resultados equivocados de agregados reactivos, que clasifican los agregados inertes como "agregados potencialmente activos". Este punto se manifiesta aplicando las normas UNE 146508 EX y UNE 146509 EX.

El no cumplimiento de la norma UNE 146507 EX niega automáticamente el uso de los agregados para la elaboración de concreto estructural, incluso cuando los agregados alcanzan las normas UNE 146508 EX y UNE 146509 EX. Este resultado es determinante de la interrupción de la explotación o incluso el abandono de las canteras.

2.2.1.6. Francia

En 1989, el Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports, frente a un número significativo de estructuras afectadas por la reacción álcali-agregado, decidió tomar medidas preventivas en la construcción de estructuras. El Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC) fue puesto a cargo de un comité técnico que reunía a representantes de las distintas organizaciones que participaban en el proceso de construcción (proveedores de materiales, contratistas, operadores y supervisores de proyectos, laboratorios, empresas de ingeniería, entre otros.) para redactar un documento que se aplicaría a la brevedad posible. Este documento fue publicado en enero de 1991 bajo el título "Recommandations provisoires pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction" ("recomendaciones provisionales para la prevención de daños debidos a la reacción álcali-agregado"). Posteriormente, este documento se transformó en 1994 para una orientación oficial de LCPC.

Las recomendaciones explican los medios convencionalmente utilizados para clasificar un agregado ya sea como no reactivo (NR), como potencialmente reactiva (PR) con respecto a la RAS o como potencialmente reactivo con efecto pessimum (PRP) con respecto a la RAS.

Métodos de ensayo

El Standard XP P 18-594 francés (febrero de 2004), menciona cuatro métodos diferentes utilizados para evaluar la reactividad de los agregados a los álcalis.

1 - Pruebas a corto plazo

- Se realizan especímenes de mortero, se realiza la prueba de autoclave sujeta a 0.15 MPa, 127 ° C, 3 días (método de referencia)
- Se realiza el ensayo químico, se sumergen los especímenes en solución de NaOH a 80 ° C de 4 días (método alternativo)

2 - Pruebas a largo plazo:

- Se realizan especímenes de concreto 70x70x282 mm se sumergen en agua a 38 ° C, 100% HR, en contenedores durante 8 meses.

En la tabla 2-12 se resume la metodología usada en Francia.

Tabla 2-12 Métodos y criterios de aceptación para Francia (Chak et al., 2004)

Clasificación+B49:H72	Metodos de ensayo y limites recomendados
3 Clases: No reactivo Potencialmente reactivo Potencialmente reactivo con efecto pesimo	<p>Estudio petrografico: la metodologia de clasificacion pasa por el estudio petrografico, que realiza una evaluacion previa en funcion del contenido del componente reactivo. Esta primera evaluación se comprueba a continuacion con uno de los siguientes 4 ensayos, excepto si el contenido de flint supera el 50%. En este caso particular deben ser empleados los dos primeros ensayos, ya que son los unicos que detectan el efecto pesimo.</p> <p>Ensayo quimico cinetico (xp p18-594) Ensayo de microbarras (xp p 18-594) Medidas de expansion relativa de un microprisma de mortero de (10x10x40mm) con tres relaciones de agua cemento 2,5 y 10. Se clasifica como potencialmene reactivo si la expansion es >0.11% en 360 minutos. Se clasifica como potencilmete reactivo con efecto pesimo cuando la expansion para $a/c=5 >a/c=2$</p> <p>Ensayo de acutoclave (xp p 18-594) Medida de expansion relativa de prismas de mortero (40x40x160mm) a 18 horas Se clasifica como potencialmente reactivo si la expansion es >0.15%</p> <p>Los tres ensayos anteriores son rapidos, usados como ensayos de criba. Si el agregado se clasifica como potencialmente reactivo, se debe realizar el siguiente ensayo.</p> <p>Ensayo de prismas de hormigon (xp p 15-594) Muestra de arena >0.1% a 6 meses : potencialmente reactivo Muestra de grava >0.1% a 8 meses; potencialmente reactivo.</p>

2.2.1.7. Islandia

A finales de los sesenta y setenta, en el Instituto de Investigación de Islandia, se llevó a cabo una investigación, para proponer las medidas preventivas contra los daños debido a RAS; las Puzolanas naturales y el humo de sílice, que se encuentran en Islandia demostraron ser eficaces para prevenir el RAS.

El interés por el humo de sílice en Islandia se remonta a 1972, cuando las primeras muestras del material fueron probadas en una fábrica de ferrosilicio en el país. El humo de sílice resultó ser un supresor de expansión muy eficaz de la reacción álcali-sílice. En consecuencia, la fábrica de cemento del Estado tiene desde 1979 sólo cemento producido entremezclado con humo de sílice inicialmente un 5%, pero desde el año 1983 se incrementó al 7,5%. La investigación en IBRI ha mostrado que incluso una cantidad tan pequeña es altamente eficaz en la prevención de la expansión perjudicial. A tal nivel de reemplazo de humo de sílice no se tienen efectos secundarios negativos, como una mayor

necesidad de agua o aumento de secado, contracción, asociada con niveles más altos de humo de sílice.

Metodología de ensayo

El método que se utiliza para evaluar la reacción álcali-sílice ha sido la norma ASTM - C227 método de barras de mortero. En un principio, el criterio de 6 meses de 0,1% de expansión fue utilizado. Sin embargo, en 1979, el Código de Construcción de Islandia exigió un criterio más estricto de 0,05% en 6 meses y el 0,1% en 12 meses. Otros métodos como la prueba química rápida, ASTM C289, y los análisis petrográficos no se han encontrado adecuados para los agregados de Islandia. Estos métodos fueron sin embargo anteriormente utilizados para obtener información preliminar antes de implementarse la medición de barras de mortero.

Los reglamentos de construcción solicitan desde 1998 que todo el agregado para el concreto debe ser evaluado con respecto al RAS. El contratista deberá evaluar sus agregados sobre una base regular, y obtener un certificado de un laboratorio independiente, clasificando el agregado como reactivo o inocuo. La prueba debe llevarse a cabo de acuerdo con lo estipulado en la norma ASTM C-227 y o ASTM C-1260. En los casos en que los agregados se clasifican como reactivos, es responsabilidad de la empresa de agregados demostrar que la mezcla prospectada de agregados y cemento no es perjudicial. Esto ha sido recientemente criticado, porque no hay pruebas de rendimiento disponibles en Islandia, y están dando esta responsabilidad al productor de concreto.

Con el fin de mantener la seguridad contra la RAS se ha determinado retomar la investigación en Islandia, en particular con el fin de evaluar los nuevos métodos de prueba desarrollados internacionalmente. Se ha prestado especial atención a los dos métodos de barras de concreto (RILEM AAR-3 y AAR-4) y a las pruebas de barras de mortero acelerados (ASTM 1260 y RILEM AAR-2) para reflejar los efectos de diversos tipos de cementos y puzolanas, particularmente humo de sílice. En la tabla 2-13 se resume la metodología y criterios usados en Islandia.

Tabla 2-13 Métodos y criterios de aceptación para Islandia (Chak et al., 2004)

Todos los agregados para concreto deben ser ensayados con respecto a su reactividad con los alcalis. Los ensayos a realizar son el ensayo de probetas de mortero (ASTM C227) y/o el ensayo de probetas de mortero (ASTM C1260). Los límites admitidos

Ensayo	Tipo de cemento	Límites de expansión crítico		
		14 días	6 meses	1 año
ASTM C227	Cemento portland sin adición puzolánica	---	<0.05%	<0.1%
ASTM C 1260	Cemento portland sin adición puzolánica	<0.2%	---	---
ASTM C C227	Cemento empleado en concreto proyectado	---	---	<0.1%
ASTM C 227	Cemento con humo de sílice	---	---	<0.06%
ASTM C 1260	Cemento empleado en concreto proyectado o cemento con humo de sílice	<0.1%	---	---

2.2.1.8. Suecia

Hay muchos tipos de rocas diferentes en Suecia. Algunas de estas son muy reactivas, por ejemplo, aquellas que se encuentran en la parte sur-occidental de Suecia, Scania. Donde muchas partes del lecho de roca son del mismo tipo que en Dinamarca y en el norte de Alemania, encontrándose caliza con pedernal (chert).

Es sólo recientemente que la RAS ha sido reconocida como un mecanismo de deterioro en Suecia. Esto se debe al hecho de que la mayoría de concreto hasta hace unos 30 años se hizo con cemento de baja alcalinidad. En este momento, se ha introducido un cemento altamente alcalino. Hoy en día la RAS se reconoce como un fenómeno bastante común. También se ha reconocido esta patología en algunos puentes viejos en el que la reacción es probablemente el resultado de sales de deshielo en combinación con la acción de las heladas y RAS.

Metodologías de ensayo.

Actualmente, se lleva a cabo la mayoría de los ensayos, sin embargo, el ensayo petrográfico, es el más usado en Suecia. El principal método utilizado es el RILEM AAR 1 (con la adición de que las secciones delgadas fluorescentes deben ser preparadas con el fin de detectar cualquier pedernal poroso). La recomendación es que si la cantidad de material lentamente reactivo es inferior al 15% se está en el lado seguro. Si la cantidad está por encima de 20% y el agregado, es reactivo se someterá al ensayo, RILEM-2 AAR

(método barra de mortero ultra acelerado, continuado durante al menos 28 días) o el RILEM 3 (método de prisma de concreto, 38 C° un año de almacenamiento húmedo). Los mismos límites que se recomiendan en la norma ASTM C 1260 y CSA A.23.2- 14A se han utilizado. En la tabla 2-14 se resume lo mencionado anteriormente.

Tabla 2-14 Métodos y criterios de aceptación para el Suecia. ((Wigun et al., 2006)

Tres ensayos diferentes en función del tipo de agregado:			
1. Arenas de origen glaciofluvial: Ensayo de expansión acelerado en disolución saturada de C1Na a 50°C			
Expansión máxima 0.7%, para las clases ambientales más agresivas (B4 y B5) a las 20 semanas			
1% para la clase ambiental B3			
2. Agregado de machaqueo: Ensayo de prismas de concreto (CSA A-23.2-14A) y ensayo acelerado de probetas de mortero (ASTM C 1260) Para areniscas y filitas, se recomienda el ensayo ASTM C 1260. Límites:			
	Ambiente B4-B5	Ambiente B3: usar cemento bajo contenido en alcalis si expansión supera:	
CSA A.23.2-14A	0.40%		0.40%
ASTM C 1260	0.10%		0.10%
3. Estudio petrográfico (RILEM AAR-1). Límites			
Componentes de reacción lenta <15%: no reactivo			
Componentes de reacción lenta >20%: reactivo. Si se emplea el agregado realizar los ensayos AAR-2 (Ensayo de probetas de mortero) o AAR-3 (ensayos prismas de concreto) con los mismos límites que los expuestos en el punto 1.			
Componentes de reacción lenta entre 15-20%: resultado no concluyente			
Componentes de reacción rápida (flint poroso y flint opalino) cuando contenido superior al 1% en volumen, realizar el ensayo NT BUILT 295			

2.2.1.9. Reino Unido

El daño atribuido a reacciones de agregados alcalinos fue identificado por primera vez en Reino Unido en 1976 en el suroeste de Inglaterra, aunque el agrietamiento en una presa en Jersey había sido previamente diagnosticado causada por la RAS en 1971. Desde entonces se ha encontrado un daño imputable debido a la RAS en 100- 200 estructuras, principalmente en el suroeste y Midlands de Inglaterra, con casos aislados en otras partes.

Las especificaciones para el concreto en British Standards Institution, BS 5328: 1990 y en el British Standard complementaria a EN206-1, BS 8500 que sustituye a BS 5328 a finales de 2003. Recomienda una concentración limitada en los niveles alcalinos en cementos y concretos. Esto, es debido a una alta proporción de agregados que contienen rocas silíceas potencialmente reactivas y no es práctico evitar su uso. En la tabla 2-15 se resume las diferentes metodologías y criterios usados en la evaluación de la reactividad.

Tabla 2-15 Métodos y criterios de aceptación para el Reino Unido (Chak et al., 2004)

Clasificación	Metodos de ensayo y limites recomendados
Baja reactividad	Estudio petrografico (BS 7943:1999)
Reactividad normal	Ensayo de prismas de hormigon (BS 812-123.1999)
Alta reactividad	Posiblemente expansivo si la expansion queda entre 0.1% y 0.2%
	Probablemente no-expansivo entre 0.05% y 0.1%
	No expansivo si la expansión es menor de 0.05%

2.2.1.10. Australia

Siguiendo las tendencias actuales, investigaciones y recomendaciones, varios procedimientos de pruebas aceleradas fueron investigados en Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), las cuales incluyen el almacenamiento de prismas de concreto y barras de mortero en soluciones de NaCl saturado y NaOH 1 M a 50 y 80°C. Los resultados obtenidos mediante los prismas de concreto estaban mostrando expansiones erráticas. Los resultados de las barras de mortero en las soluciones de NaOH 1M fueron más consistentes y más fiables. Cuando se añadieron álcalis a los prismas de concreto, se obtuvieron resultados más consistentes, pero una reducción significativa en la resistencia del concreto fue evidente (Shayan, Verde, y Collins 1996).

Basado en el rendimiento en el campo de varios agregados australianos en estructuras de concreto y los resultados de la prueba de barra de mortero acelerado (similar a ASTM C 1260), se establecieron los criterios de evaluación de la siguiente forma: expansiones a 10 días de 0.10% o más califica a los agregados como reactivos y expansiones a 21 días de 0,10% o mayores califica agregados lentamente reactivos. Se señaló que esta prueba de barras de mortero acelerada resultó ser más confiable que la prueba de autoclave. A través de una serie de estudios de investigación, Shayan mostró que la barra de mortero acelerado (o ASTM C 1260) podría ser utilizada para evaluar la eficacia de las cenizas volantes y escorias en la mitigación de las expansiones RAS (Shayan 1990, 1992).

Varios agregados con diferentes exposiciones de campo fueron probados mediante el método químico (ASTM C 289), la barra de mortero estándar (ASTM C 227), el prisma de concreto (similar a ASTM C 1293), y la barra de mortero acelerado (similar a ASTM C 1260). Donde se pudieron observar que la prueba de prisma de concreto y la barra de mortero acelerado son los métodos de ensayo más fiables (Shayan, verdes, y Collins 1996).

2.2.1.11. Hong Kong

Aunque la RAS ha sido conocida por ser un problema en muchas partes del mundo, no fue diagnosticado en Hong Kong hasta 1991 (Wong y Koirala, 1992; Irfan, 1994). El Comité Permanente de Tecnología del Concreto (SCCT), se formó para coordinar esfuerzos entre departamentos en la resolución de problemas relacionados con la tecnología del concreto. Este notó una serie de estructuras de concreto en Hong Kong que mostraba signos de mapas de agrietamiento en forma de “piel de cocodrilo” o “mapeo”.

En consecuencia, un subcomité de AAR SCCT se creó en 1991, para coordinar todos los esfuerzos de investigación relacionados con la RAS en el concreto. El subcomité emitió una circular técnica (Obras Subdirección Técnica Circular N° 5/94 (Obras Broche, 1994)), que recomienda limitar el contenido de álcalis en el concreto a 3 kg / m³ para limitar el RAS en el concreto.

A petición de la SCCT, la PWCL, con la asistencia de la oficina de Planeación, se ha investigado una serie de casos sospechosos de RAS en Hong Kong. La investigación también abarcó la evaluación de la RAS de una serie de canteras en Hong Kong y China continental utilizando los métodos AMBT.

Desde 1996, el PWCL ha llevado a cabo una serie de AMBT para evaluar la potencial reactividad de una amplia gama del agregado local, así como el agregado importado de China continental. El agregado evaluado incluyó agregado de granito, agregado de toba ceniza volcánica y el agregado que ha sido conocido por ser altamente reactivo. El agregado de la SPRATT Quarry en Canadá (un agregado de referencia) también se incluyó en el programa de pruebas para fines de referencia. La prueba del agregado se repitió utilizando diferentes métodos AMBT, a saber, la norma ASTM C 1260, CSA A23.2- 25a, CON PWL 5,5 y RILEM AAR-2. Además de evaluar la RAS del agregado de diferentes orígenes, el programa de pruebas también tuvo como objetivo comparar los resultados obtenidos utilizando diferentes métodos AMBT. (Tam & Division, 2002)

Basado en los resultados de la serie de la metodología de barras de mortero acelerado realizado por el PWCL como se describe en este a continuación (Tam & Division, 2002):

- Las expansiones de casi todos los agregados comúnmente adoptados para su uso en la producción de concreto en Hong Kong se encontraron por debajo de 0,1%.

- Cuando el método de barras de mortero acelerado se adoptó para evaluar la RAS de agregados incluidos en la producción de concreto en Hong Kong, se recomienda el método la RILEM AAR-2 para ser adoptado como el método estándar, se especifican una serie de condiciones claras y coherentes para la prueba utilizando este método (por ejemplo, el uso de cemento de área de superficie específica mínima y contenido de álcali).
- Los métodos RILEM para el examen petrográfico, AMBT, CPT y ACPT (es decir RILEM AAR-1 a la 4) es la única serie completa de los métodos de prueba producidos por los mismos estándares que presenta un enfoque integral para la evaluación del potencial de RAS. Por lo tanto, deben ser considerados para su uso como la base de un marco para la selección de agregado de potencial AAR en Hong Kong.

2.2.1.12. Canadá

En Canadá la reacción álcali-sílice se ha dividido en dos grupos (CSA 1994):

- La reacción álcali-sílice con calcedonia, ópalo, cristobalita, vidrio, entre otros., pueden ser por lo general identificada usando ASTM C 227, prismas de concreto a 38°C usando alto contenido de cemento con alto contenido alcalino (ASTM C 1293) también puede ser utilizado para evaluar este tipo de reacción. ASTM C 289; Sin embargo, esta prueba puede dar resultados engañosos cuando están presentes carbonatos (Rogers 1993).
- La reacción álcali-sílice asociado con areniscas, granitos contienen cuarzo, y sedimentos metamorfosis como la filita, argilita y grauvaca. Pueden ser evaluadas por el ensayo ASTM C 1293, el cual se utiliza para identificar estas reacciones lentas (Rogers 1993).

En muchas ocasiones, los agregados deben ser evaluados muy rápidamente antes de la construcción por lo que se requieren métodos de ensayo que sean rápidos, fiables, simples y reproducibles. La metodología y criterios usados en Canadá principalmente se resume en la tabla 2-16.

Tabla 2-16 Métodos y criterios de aceptación para Canadá. (Chak et al., 2004)

Clasificación	Metodos de ensayo y limites recomendados
3 clases	Estudio petrografico (ASTM C289)
No reactivo	No propone limites. Se considera imprescindible para la interpretacion de otros ensayos
Moderadamente reactivo	Ensayo acelerado de probetas de mortero (CSA A23.2-25A)
Altamente reactivo	Expansión <0.15%: No reactivo (0.1% para calizas y algunos otros agregados) Expansion >0.15% altamente reactivo Este ensayo no se considera viable para distinguir entre agregados moderadamente reactivos y altamente reactivos. En ausencia de ensayo de prismas de concreto, todos los agregados reactivos se clasificaran como altamente reactivos. Ensayo de prismas de hormigon Empleado como ensayo definitivo Expansión <0.04% no reactivo Expansión 0.04-0.12% moderadamente reactivo Expansión>0.12% altamente reactivo

Comparando los distintos documentos que se han expuesto anteriormente, se puede analizar la evolución que han sufrido las metodologías que se proponen en los distintos países en los últimos años para evaluar la RAS.

El ensayo de probetas de mortero y el ensayo químico han pasado de ser los ensayos más empleados tras el estudio petrográfico para determinar la potencial reactividad del agregado, a mantenerse en muy pocos países. Éstos han sido sustituidos por el ensayo de prismas de concreto, el ensayo acelerado de probetas de mortero o por ensayos particulares propuestos por cada país. En la figura 2-7 se puede ver las diferentes metodologías de ensayo para la evaluación de la potencial reactividad del agregado en cada país.

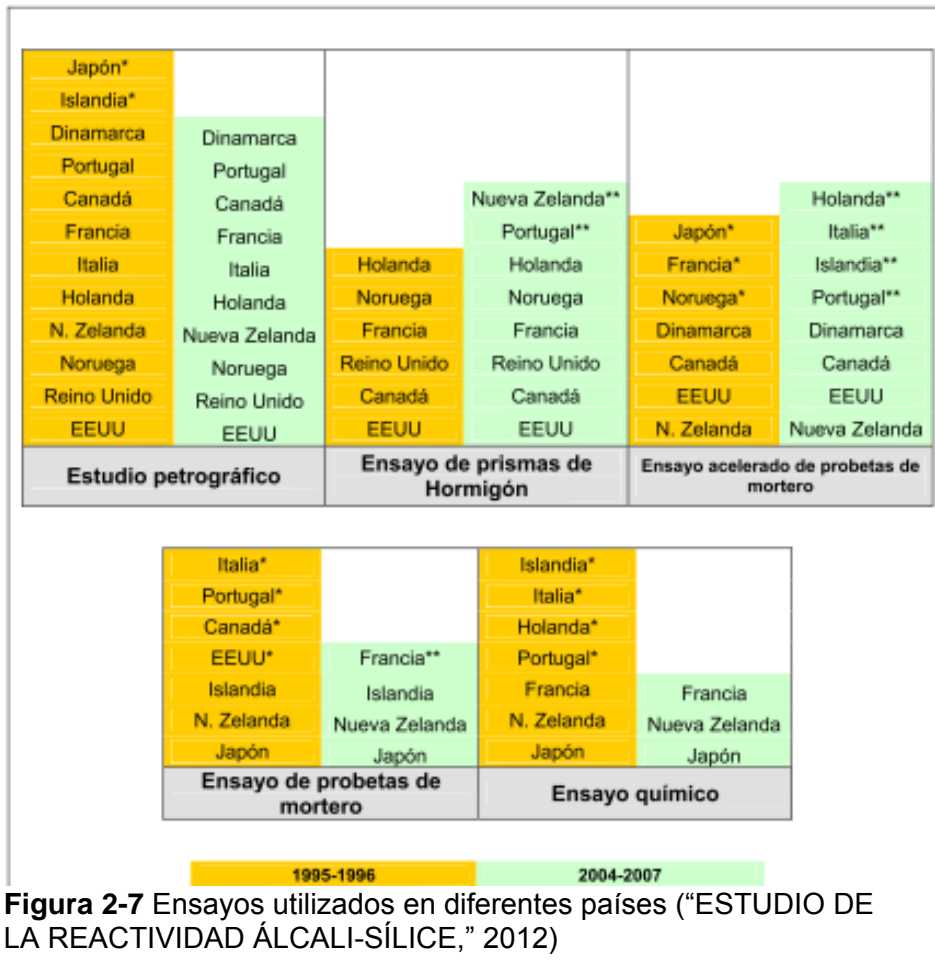


Figura 2-7 Ensayos utilizados en diferentes países (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

Figura 2-8 Ensayos utilizados en diferentes países (“ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE,” 2012)

2.3 Reactividad álcali agregado en Colombia

En Colombia, se han encontrado de igual manera estructuras en concreto con posible presencia de reacción álcali agregado, como la presa de “El cercado” sobre el río Ranchería, la presa de Ituango y la presa del río Tona. Estructuras de grandes volúmenes de concreto en la que los agregados generalmente proceden de zonas próximas a la obra, lo que puede implicar el uso de agregados inadecuados; que con el paso del tiempo conducen a expansiones. Aunque en Colombia el Ingeominas en el 2009 reveló 16 puntos críticos donde hay agregados que podrían reaccionar con el concreto, como se muestra en la figura 2-8 y se resume en la tabla 2-17. Se ve la necesidad de que las autoridades competentes de supervisión de obra exijan una caracterización confiable de agregados, para construir obras durables y funcionales.

Tabla 2-17 Tabla de fuentes de agregados reactivos en Colombia. Ingeominas

Norma Técnica Colombiana NTC 174 (Quinta actualización)		
N°	Terreno	Rocas fuente de agregados
1	Garzón	Intrusivos granitoides, chamoquitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos.
2	Payandé	Intrusivos granitoides, riolitas, traquitas, andesitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas.
3	Cajamarca	Intrusivos granitoides, neises, cuarcitas, mármoles.
4	Cauca Romeral	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos toleiticos, neises, esquistos, liditas o cherts
5	Dagua	Plutones calcoalcalinos, basaltos toleiticos, calizas, liditas o cherts
6	Cañas gordas	Basaltos pobres en k, liditas, calizas.
7	Baudó	Liditas y calizas.
8	Sinú	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos, tobas, liditas.
9	Buritacá	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos, tobas, liditas.
10	San Jacinto	calizas, liditas, areniscas calcareas
11	San Lucas	Granitoides, lavas riolíticas y riolitas, tobas, neises cuarzos fedesplaticos
12	Santander	Granitoides, riolitas, andesitas neises felsicos, marmolesm calizas
13	Perijá	Granitoide, riolitas, tobasriolíticas, calizas
14	Sierra Nevada	Granitoides, riolitas, andesitas, neises felsicos, calizas
15	Baja Guajira	Riolitas, espilitas de abajo Al, esquistos felsicos, marmoles, calizas
16	Cosinas	Granitoides, flujos rioliticicos, neises felsicos, marmoles, calizas.



Figura 2-9 Mapa de Colombia indicando los lugares con agregados reactivos. Ingeominas.

Métodos de Ensayo usados en Colombia

Los ensayos necesarios para identificar y prevenir los ataques por reacción álcali – agregado en el concreto usados en Colombia son:

- Método de la barra de mortero (ASTM C 227, NTC 3828, NTP 334.113, NTP 334.067)
- Método químico (ASTM C 289, NTC 175)
- Examen petrográfico (ASTM C 295, NTC 3773)
- Ensayo rápido de la barra de mortero (ASTM C 1260 (AASHTO T 303)

Formas de Controlar y Mitigar la RAS

Igualmente, en el medio colombiano se especifican acciones que permitan prevenir las reacciones álcali-agregado, donde se propone adoptar una de las siguientes medidas:

- Empleo de agregados no reactivos: Se determina mediante los métodos descritos en el Anexo A de la NTC 174.
- Empleo de cementos con un contenido de alcalinos, expresados como óxido de sodio equivalente ($0,658 K_2O + Na_2O$) inferior al 0,60% del peso de cemento, de acuerdo con los términos de la NTC 321.

Al analizar una panorámica nacional e internacional basados en el estado del arte, el fenómeno de la reacción álcali sílice, como un agente que afecta la durabilidad y la funcionalidad de las estructuras de concreto, es importante ahondar en la identificación de agregados reactivos y mitigación de la RAS, debido principalmente a la fisuración causada por sobreesfuerzos internos del concreto resultado de filtraciones, cambios de volumen, deformaciones relativas y en casos extremos colapso de miembros estructurales. Por otro lado, otra consecuencia del efecto de la reacción álcali sílice corresponde al debilitamiento de las características mecánicas, como: la reducción de la capacidad a flexión y compresión de igual forma la disminución en el módulo de elasticidad.

La gran variedad de criterios y metodologías para evaluar la probable reactividad de los agregados, hace pertinente el desarrollo del presente proyecto, con el fin de realizar una evaluación de la metodología con más acogida actualmente, el método acelerado de barras de mortero ASTM C 1260, con el fin de caracterizar tres agregados del territorio colombiano. De la misma forma evaluar el material cementante (ceniza volante, microsíllice y metacaolín) más eficaz para mitigar la reacción álcali sílice y analizar las características mecánicas de las combinaciones reactivas.

3. Objetivos

3.1 General

Determinar la reactividad potencial de tres clases de agregados de Colombia (Tumaco, Tunjuelo, Cemex), mediante la metodología de ensayo de mortero acelerado (ASTM C1260; además valorar la efectividad de la mitigación de la RAS empleando materiales cementantes como: Ceniza volante, Metacaolin y Microsilice (ASTM C 1567).

3.2. Específicos

- Elaborar el estado del arte relacionado al fenómeno de la RAS, las metodologías de ensayo y las medidas para mitigarlo.
- Evaluar la reactividad potencial de tres clases de agregados de diferentes procedencias de Colombia (Tumaco, Tunjuelo, Cemex), con la metodología de ensayo ASTM C 1260, dos tipos de cementos (tipo I y tipo III) y dos relaciones agua-cemento (a/c) 0.60 y 0.47, mediante el montaje de las pruebas en laboratorio.
- Comparar las diferentes combinaciones de mitigación usando adiciones minerales como: ceniza volante, metacaolin y micro sílice.
- Verificar la correspondencia del ensayo de expansión ASTM C 1260 y el ensayo petrográfico.
- Analizar el comportamiento mecánico del mortero como: la resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad bajo la reacción álcali-sílice.

4. Programa experimental

Utilizando los equipos disponibles en el laboratorio de materiales de la Escuela Colombiana Julio Garavito, en la ciudad de Bogotá, se dispuso la implementación del ensayo ASTM C 1260. Seleccionado como el idóneo para evaluar la potencial reactividad, después de analizar las metodologías usadas actualmente a nivel mundial.

Para alcanzar el desarrollo de los objetivos propuestos y cubrir el alcance de la presente investigación fue necesario desarrollar un programa experimental que consistió en dos fases: La primera consistió en la puesta en marcha de los ensayos especificados en las normas: ASTM C 1260 y ASTM C 109. Con estos ensayos se estudió la reactividad mediante la medición de la expansión de barras de mortero usando tres tipos de agregados (Tunjuelo, Cemex y Tumaco) en combinación con los cementos (tipo I y III) bajo dos relaciones agua cemento (A/C) 0.47 y 0.60 respectivamente, De la misma forma se realizaron ensayos a compresión a cubos de mortero ASTM C 109 en un curado normal y otro bajo la influencia del hidróxido de sodio, para estudiar la resistencia a la compresión de los mismos.

La segunda fase consistió en evaluar las combinaciones agregado- cemento que mostraron ser reactivos y se procedió a realizar el ensayo ASTM C 1567, con dos diferentes porcentajes de reemplazo de los siguientes materiales mitigantes: ceniza volante, metacaolín y microsilice, midiendo la expansión de las barras de mortero a 14 días.

Realizando ensayos de compresión y de módulo elástico a cilindros de mortero, e igualmente ensayos de flexión a vigas de mortero por medio del cual se calculó el módulo de rotura a las muestras reactivas, y a las muestras que contenían el mitigante más eficiente de los nombrados anteriormente.

4.1 Materiales

Se presenta a continuación una descripción general de las propiedades físicas y químicas de los materiales que se utilizaron en la presente investigación. Estos incluyen agregados finos procedentes de (Tumaco, Tunjuelo y Cemex), cemento tipo I y tipo III y materiales cementantes mitigantes (Metacaolin, Ceniza volante, Microsilice).

4.1.1 Agregados

Los agregados usados en esta investigación, mostrados en la tabla 4-1; poseen diferentes características físicas y químicas, representando diferentes regiones de Colombia. Dos de ellos con un comportamiento potencial reactivo y uno inocuo.

Tabla 4-1 Tabla de arenas usadas.

	Identificación de agregado	Lugar de origen
1	Tumaco (TU)	Nariño
2	Tunjuelo (BO)	Bogotá
3	Cemex (CE)	Desconocido

- **Agregado Tumaco**

Según la quinta actualización de la NTC 174, Especificaciones de los agregados para concreto, el agregado de Tumaco es extraído del terreno de Dagua (Región 5 en mapa de los terrenos geológicos potencialmente reactivos de Colombia), en la que las rocas fuentes son principalmente: Plutónicas, calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts.

- Agregado Tunjuelo

Según la quinta actualización de la NTC 174, Especificaciones de los agregados para concreto; los agregados pertenecientes a Bogotá no se han reportado como agregados potencialmente reactivos.

- Agregado Cemex

El lugar de origen del agregado de Cemex es desconocido.

Se realizó la caracterización química de estos agregados en el laboratorio interfacultades de fluorescencia de rayos X de la Universidad Nacional de Colombia por medio del ensayo de fluorescencia de rayos X los resultados se muestran en la tabla 4-2

Tabla 4-2 Composición química de agregados en estudio.

Elemento y/o compuesto	XRF-5534 M-Tumaco - Escuela- (% en peso)	XRF-5534 M-Tunjuelo -Escuela- (% en peso)	XRF-5534 M-Cemex - Escuela- (% en peso)
SiO ₂	61.98%	91.05%	75.56%
Al ₂ O ₃	16.36%	6.44%	11.96%
Fe ₂ O ₃	7.08%	0.57%	2.75%
CaO	6.00%	0.25%	2.24%
Na ₂ O	3.77%	0.14%	3.10%
MgO	2.30%	0.15%	0.99%
K ₂ O	1.18%	0.53%	2.39%
TiO ₂	0.69%	0.23%	0.31%
P ₂ O ₅	0.18%	0.17%	0.15%
MnO	0.12%	170 ppm	0.15%
Ba	0.12%	0.06%	0.10%
So ₃	0.07%	0.30%	0.11%
Sr	0.05%	71 ppm	0.04%
Cl	0.03%	0.05%	0.05%
V	0.02%	122 ppm	--
Zr	136 ppm	0.03%	172 ppm
Cu	107 ppm	--	--
Zn	103 ppm	38 ppm	194 ppm
Cr	73 ppm	138 ppm	92 ppm
Rb	35 ppm	26 ppm	75 ppm
Y	19ppm	--	41 ppm
Ce	--	--	0.03%

Al comparar los componentes químicos de cada agregado se puede observar que el agregado de Tunjuelo es el que contiene más dióxido de silicio SiO₂; seguido del agregado de Cemex y Tumaco. El dióxido de silicio es el mineral más abundante en las arenas, llamado sílice y por lo general en algunas de sus formas puede ser reactivo. En contraste con el contenido de Oxido de Calcio el agregado de Tumaco es el que contiene mayor cantidad de este compuesto seguido del agregado de Cemex y Tunjuelo.

4.1.2 Cemento

Se escogieron dos tipos de cemento: tipo I y tipo III. El cemento tipo I corresponde a un cemento comercial de bolsa del interior del país, de uso general y el cemento tipo III corresponde a un tipo concretero de la misma cementera. Su caracterización física se presenta en la tabla 4-3.

- Densidad: En la práctica se considera que los cementos con densidades inferiores a 3.0 g/cm³ tiene adiciones, por lo general sin tratamientos adicionales, las cuales se integran a las partículas de cemento durante el proceso de molienda del Clinker.
- Superficie específica: esta medida se expresa en (cm²/g), siguiendo la normativa colombiana NTC 33.

Tabla 4-3 Valores de densidad y finura de cementos en estudio.

Ensayo	Cemento tipo I	Cemento tipo III
Densidad	3.08 g/cm ³	2.88 g/cm ³
Finura	4252 cm ² /g	4963 cm ² /g

Se evaluó la composición química al cemento tipo III y cemento tipo I, en un equipo de fluorescencia de rayos x en el laboratorio de la universidad Nacional de Colombia, los resultados se presentan en la tabla 4-4.

Tabla 4-4 Composición química del cemento tipo III y tipo I.

Elemento y/o compuesto	XRF-5214 Cemento tipo III - Escuela- (% en peso)	XRF-5853 Cemento tipo I - Escuela- (% en peso)
CaO	61.015	64.1
SiO ₂	20.906	19.37
SO ₃	5.868	4.13
Al ₂ O ₃	4.783	5.21
Fe ₂ O ₃	3.632	2.79
K ₂ O	1.047	0.25
MgO	0.911	3.19
Na ₂ O	0.68	0.14
TiO ₂	0.311	0.47
P ₂ O ₅	0.298	0.06
Mn ₂ O ₃	0.271	--
Ba	0.087	0.07
SrO	0.084	0.08
Cl	0.07	0.01
ZnO	0.021	86ppm
Pb	0.006	--
Rb	0.005	29ppm
Y	0.005	41ppm
Zr	--	0.01

De acuerdo con lo revisado en el estado del arte y la bibliografía consultada se ha considerado hasta ahora un contenido total de álcalis de 0.6% como límite superior aceptable para cemento que se utilice en la fabricación de concreto de agregados considerados como reactivos.

La cantidad de álcalis en el cemento portland es expresado en términos de equivalentes de sodio el cual es expresado y calculado con la siguiente ecuación:

$$Na_2O_e = Na_2O + 0.658 \times K_2O \quad (3)$$

Donde Na_2 y K_2O son los porcentajes de masa de óxido de sodio y potasio presentes en el cemento.

- Para el cemento tipo III el contenido de álcalis corresponde a 1.36% en peso, valor que es 2.27 veces el máximo recomendado por la mayoría de la bibliografía para evitar el desarrollo de la reacción álcali sílice, y al combinarlo con un agregado altamente reactivo, se crea el escenario ideal para generar la RAS.
- Para el cemento tipo I el contenido de álcalis corresponde a 0.30% en peso, un valor menor al recomendado en la bibliografía.

4.1.3 Adiciones cementantes

De acuerdo con lo estipulado en el estado del arte se seleccionaron tres materiales cementantes con el objetivo de evaluar su eficiencia en la mitigación de la RAS y evaluar su aporte en las propiedades mecánicas de estudio.

A continuación, en la figura 4-1 se muestra la presentación comercial de las adiciones cementantes utilizadas: metacaolin de marca Corona, ceniza volante de Termozipa con un porcentaje de pérdida de inquemados del 7.3% y microsíllice de Toxement, en la tabla 4-5. tabla la composición química de las mismas



Figura 4-1 Presentación comercial del metacaolin, ceniza volante tipo F y microsíllice.

Tabla 4-5 Composición química de Adiciones cementantes.

Elemento y/o compuesto	XRF-5313 Ceniza volante -Escuela- (% en peso)	XRF-5854 Metacaolin -Escuela- (% en peso)	XRF-5854 Microsilice -Escuela- (% en peso)
SiO ₂	62.75	57.48	88.63
Al ₂ O ₃	24.392	38.53	0.53
Fe ₂ O ₃	5.028	1.36	3.26
CaO	1.714	0.17	0.4
K ₂ O	1.431	0.63	3.11
SO ₃	1.301	0.05	0.98
TiO ₂	1.147	1.28	0.01
P ₂ O ₅	0.79	0.03	0.09
MgO	0.588	0.22	1.67
Na ₂ O	0.425	0.1	0.96
Ba	0.121	--	--
Sr	0.091	22ppm	68ppm
Ce	0.044	--	--
Zr	0.036	--	--
MnO	0.027	0.02	0.13
V	0.019	0.02	--
Zn	0.019	33ppm	0.04
Ni	0.015	--	--
Pb	0.013	--	0.02
Cr	0.012	0.01	0.03
Co	0.011	--	--
Cu	0.009	--	--
Rb	0.009	25ppm	0.01
Y	0.007	12ppm	--
Ga	0.004	54ppm	25ppm
Nb	--	20ppm	--

4.1.4 Solución química.

El hidróxido de sodio se usa principalmente en el curado de las probetas de mortero como un catalizador que actúa en la velocidad de la reacción de la hidratación del cemento. Para el estudio se utilizó hidróxido de la casa MERCK, también se conoce como soda caustica e hidrato de sodio, en la figura 4-2, se observa el producto, el cual es soluble en agua. Se usó en la preparación de la solución alcalina siguiendo las recomendaciones de la ASTM C1260.



Figura 4-2 Hidróxido de sodio.

4.2 Variables del estudio experimental

Para el desarrollo del estudio se consideraron dos etapas como se describe a continuación:

4.2.1 Etapa I

Se trabajó con dos relaciones de agua-cemento la estándar de 0.47 y de 0.60 que se usa con fines comparativos, donde se elaboraron 12 mezclas de mortero con la combinación de las variables mencionadas; cuyo objetivo inicial era evaluar las expansiones mediante barras prismáticas, de acuerdo a lo establecido en la ASTM C 1260 con el fin de clasificarlas como reactiva o no. Por otro lado, se valoró la resistencia a compresión de cubos elaborados con estas mezclas, basados en la ASTM C 109

Nomenclatura utilizada

Para la identificación de los diferentes especímenes de cada una de las mezclas se definió la siguiente nomenclatura.



1: Hace referencia al agregado utilizado Tumaco (TU), Tunjuelo (BO) y Cemex (CE).

2: Hace referencia a I tipo de cemento tipo I (CCOM), cemento tipo III (CCON)

3: Hace referencia a la relación agua cemento usada 0.47 ó 0.60

En la tabla 4-6 se muestran las diferentes proporciones de los materiales usados en las mezclas utilizadas para la primera etapa del estudio, siguiendo la gradación descrita en la norma ASTM C 1260. Todos los pesos mostrados fueron calculados para una base de tres barras de mortero, de la misma forma estas cantidades son equivalentes a 6 cubos de mortero.

Tabla 4-6 Mezclas de mortero usadas para ensayo ASTM C1260.

Muestra	Ag. Id	Cemento (Kg)	Agregado seco (Kg)	Agua (Kg)	A/C
1	BO-COM-47	0.44	0.99	0.207	0.47
2	TU-COM-47	0.44	0.99	0.207	0.47
3	TU-CON-47	0.44	0.99	0.207	0.47
4	BO-CON-47	0.44	0.99	0.207	0.47
5	BO-COM-60	0.44	0.99	0.264	0.60
6	TU-COM-60	0.44	0.99	0.264	0.60
7	BO-CON-60	0.44	0.99	0.264	0.60
8	TU-CON-60	0.44	0.99	0.264	0.60
9	CE-COM-60	0.44	0.99	0.264	0.60
10	CE-CON-47	0.44	0.99	0.207	0.47
11	CE-COM-47	0.44	0.99	0.207	0.47
12	CE-CON-60	0.44	0.99	0.264	0.60

4.2.2 Etapa II

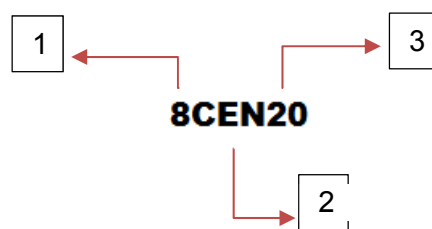
Para evaluar la eficiencia de las adiciones cementantes se siguieron los procedimientos estipulados en la norma ASTM C1567 para medir expansiones sobre barras estandarizadas de mortero. Se utilizaron los siguiente materiales cementantes en reemplazo parcial de cemento: ceniza volante tipo F (CEN), metacaolin (MET) y microsilice (MIC). De las mezclas de la etapa 1 que presentaron reactividad, se seleccionaron dos combinaciones de mortero en las que se utilizaron las proporciones de reemplazo mostradas en la tabla 4-7 dando como resultado las combinaciones de mezcla mostradas en la tabla 4-8.

Tabla 4-7 Proporciones de material cementante de reemplazo.

Cementante	Proporción
Ceniza volante	15%
	20%
Microsilice	5%
	10%
Metacaolin	10%
	20%

Nomenclatura utilizada

Las probetas con adiciones mitigantes se identificaron mediante la siguiente nomenclatura:



- 1: Hace referencia al tipo de mezcla usada del 1-12
- 2: Hace referencia al tipo de material cementante mitigante Ceniza Volante tipo F (CEN), metacaolin (MET), microsilice (MIC).
- 3: Hace referencia a la proporción utilizada de reemplazo 20%, 10% ó 5%.

Tabla 4-8 Mezclas de mortero usadas para evaluar mitigación de RAS. ASTM C1567.

	Ag. Id	Cemento (Kg)	Agregado seco (Kg)	Agua (Kg)	Material cementante (Kg)	A/C
1	8CEN20	0.44	0.99	0.264	0.088	0.60
2	8CEN15	0.44	0.99	0.264	0.066	0.60
3	10CEN15	0.44	0.99	0.207	0.066	0.47
4	8MIC5	0.44	0.99	0.264	0.022	0.60
5	10MIC10	0.44	0.99	0.207	0.044	0.47
6	10CEN20	0.44	0.99	0.207	0.088	0.47
7	8MIC10	0.44	0.99	0.264	0.044	0.60
8	10MIC5	0.44	0.99	0.207	0.022	0.47
9	8MET10	0.44	0.99	0.264	0.044	0.60
10	8MET20	0.44	0.99	0.264	0.088	0.60
11	10MET10	0.44	0.99	0.207	0.044	0.47
12	10MET20	0.44	0.99	0.207	0.088	0.47

*Las cantidades mostradas corresponden a tres barras de mortero según ensayo ASTM C 1260.

Para evaluar las propiedades mecánicas, se elaboraron cilindros de 45mm de diámetro por 90mm de altura y vigas de 50mm de sección transversal y 150mm de longitud, con el mortero de las dos combinaciones que dieron reactivas en la etapa I, haciendo reemplazo parcial de cemento por uno de los materiales mitigantes que presentaron menores expansiones según el ensayo ASTM C 1567; con el fin de compararlos con especímenes elaborados con dos mezclas que contenían agregados inocuos.

Adicionalmente, con el fin de complementar el estudio, se realizó el ensayo de petrografía a muestras de extraídas de dos probetas de las mezclas que dieron reactivas en la etapa I; estos ensayos especializados se llevaron a cabo en el laboratorio NRBMICROMATCO S.A.S

A continuación, se realiza una breve descripción de los ensayos realizados en el presente proyecto de investigación, los cuales se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales y estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

4.3 Ensayos para evaluar la reactividad de los agregados

4.3.1 ASTM C 1260 Método de Ensayo Estándar para la reactividad Alcalina Potencial de los Agregados (Método de la Barra de Mortero)

Basados en el estado del arte, se determinó implementar el ensayo ASTM C 1260, para evaluar la reactividad de los agregados en estudio. Inicialmente, el material se lava y se coloca en un horno a 80°C por dos días para secarlo, se deja enfriar a temperatura ambiente y se somete al proceso de tamizaje; seleccionándose los porcentajes de masa indicados en la tabla 4-9. En el rango de tamaño de 4.76mm (Pasa Tamiz N°4) a 0.149 mm (Tamiz N° 100).

Tabla 4-9 Rango granulométrico especificado en ASTM C 1260

Pasa el Tamiz	Retiene el Tamiz	% en masa
4,75 mm	2,40 mm	10
2,40 mm	1,20 mm	25
1,20 mm	0,60 mm	25
0,60 mm	0,30 mm	25
0,30 mm	0,15 mm	15

Después de fraccionar el agregado según las proporciones mencionadas, se sigue el procedimiento de mezclado con una mezcladora mecánica, de acuerdo con lo especificado en ASTM C 305, como se ilustra en la figura 4-3.



Figura 4-3 Mezcladora mecánica.

Se realizó el ensayo de fluidez según lo especificado en la ASTM 1437. La fluidez de una mezcla de mortero está relacionada con la manejabilidad y trabajabilidad del mismo. Esta manejabilidad depende entre otros factores también de granulometría y el contenido de fracción fina de arena, finura del cemento. La fluidez del mortero en el ensayo del laboratorio debe estar entre 105% y 125%. El ensayo se hace midiendo el aumento porcentual del diámetro de un tronco de cono de mortero en estado fresco que se ubica en una superficie llamada mesa de flujo, la cual se levanta y luego deja caer el tronco de cono desde una altura de 13 mm durante 25 veces en 15 segundos, como se muestra en la figura 4-4. Se reporta que las mezclas de ensayo estaban dentro de los rangos normales de fluidez, es decir bien compactadas.



Figura 4-4 Mesa de flujo para medir la fluidez.

Los moldes utilizados para la elaboración de las probetas cumplían las dimensiones estipuladas en ASTM C 1260, (25.4 x 25.4 x 285mm). Ver figura 4-5. En los extremos de los moldes se instalaron dos topes metálicos de material no corroíble (tornillos) a una distancia libre entre ellos de 254mm. Los moldes se impregnaron con desmoldante para facilitar el desencofrado.

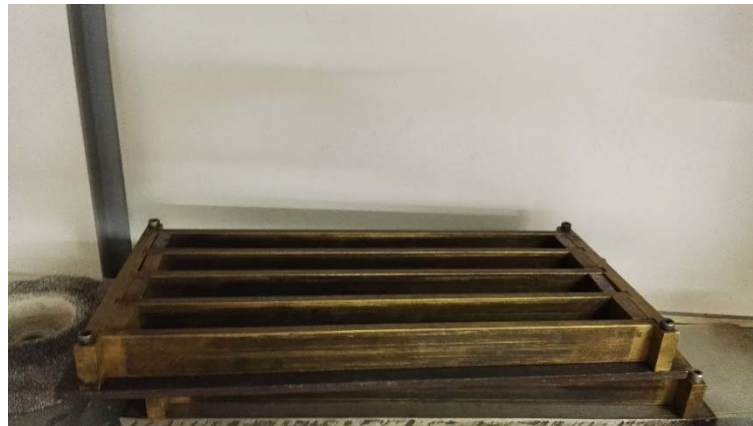


Figura 4-5 Moldes utilizados.

Se desencofran las muestras después de 24 horas de fundidas y se colocan en un horno hermético con control de temperatura, ver figura 4-6 a una temperatura de 80°C en agua que esta previamente calentada durante 24 horas a esta temperatura; posteriormente, a las muestras se toma la lectura inicial L_0 , en un tiempo transcurrido de aproximadamente $15 \pm 5s$, haciendo uso de un comparador como el mostrado en la figura 4-7.



Figura 4-6 Horno.



Figura 4-7 Comparador

Después de 24 horas en agua a 80°C y de tomada la lectura inicial; se sumergen las probetas en una solución alcalina de 1N de NaOH en el horno a 80± 2°C durante 14 días. Dado que en esta etapa es muy importante conservar la concentración, se debe usar un recipiente hermético como se muestra en la figura 4-6, el cual permite verter cuatro veces la solución de NaOH respecto al volumen de las probetas.



Figura 4-8 Recipientes hermeticos utilizados.

Las variaciones en longitud de las probetas se midieron a las edades de 3,7,14 y 28 días. Los porcentajes de expansión se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{254mm} * 100 \quad (4)$$

Donde,

Lf lectura actual.

Lo Lectura inicial.

4.3.2 ASTM C1567 Método de Prueba Estándar para Determinar la Potencial Reactividad Alcalino-Sílice de Combinaciones de Materiales Cementicios y Agregados (Método de Barra de Mortero Acelerado

Gran parte del procedimiento descrito en la norma ASTM C 1567 es idéntico al de la norma ASTM C 1260, su única variación corresponde al reemplazo del cemento por las proporciones de material cementante mencionadas anteriormente. Mediante dicho procedimiento, se evaluó la variación en longitud de las probetas elaboradas con las

mezclas que contenían reemplazo parcial de cemento por las adiciones usadas en este estudio. Las probetas adicionadas se compararon frente a una mezcla patrón, la cual se diagnosticó previamente como inocua en la etapa I

4.3.3 Petrografía

Tal como se mencionó, el análisis petrográfico se realizó a dos de las muestras que mostraron reactividad en la etapa I, siguiendo los procedimientos propuestos en la norma ASTM C-856 para la inspección petrográfica de mortero endurecido. El análisis petrográfico se llevó a cabo sobre las muestras, con microscopio de luz transmitida, determinando todos los rasgos importantes de cada sección, mediante un conteo de aproximadamente 300 puntos sobre líneas horizontales y verticales espaciadas 1 mm. Para la toma de imágenes se empleó una cámara marca Olympus modelo DP-12 adaptada al microscopio. Estos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio NRB MICROMATCO SAS externo a las instalaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

4.4 Ensayos para evaluar las propiedades mecánicas

4.4.1 Ensayo de compresión de mortero

Simultáneamente a los registros de variación de longitud en barras de mortero, se elaboraron cubos de 50mm de arista para cada mezcla y se realizaron pruebas de resistencia a las mezclas de la etapa I, cada una con tres especímenes, según la norma ASTM C109 (Ver figura 4-9). Las muestras se sometieron a dos ambientes; el primero un curado estandarizado a temperatura ambiente 27°C, y el segundo, manteniéndolas inmersas en una solución de hidróxido de sodio a una temperatura de 80°C; hasta el día del ensayo. Los cubos se ensayaron saturados.

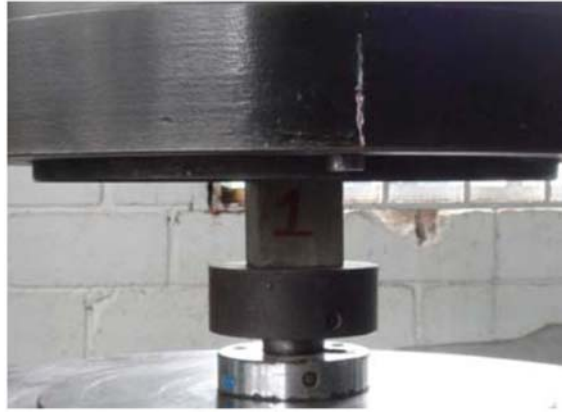


Figura 4-9 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero

4.4.2 Ensayo de cilindros a compresión

El objetivo del ensayo consiste en determinar la máxima resistencia a la compresión para las dos mezclas de la etapa 2, comparándola contra su respectiva muestra inocua y una probeta con el material mitigante más eficaz para ese agregado, evaluado en la etapa 2. Siguiendo las recomendaciones de la ASTM C 39, para cilindros de 45 x90 mm, cada una con dos especímenes por mezcla. Se realizó el ensayo a la resistencia a 28 y 90 días como se ilustra en la figura 4-10.



Figura 4-10 Probetas de ensayo de compresión de cilindros

4.4.3 Ensayo de módulo de elasticidad.

Se siguieron las recomendaciones descritas en la ASTM C 469, este método proporciona una relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria longitudinal; el módulo se midió en los mismos cilindros usados para el ensayo de compresión de la etapa 2, en la figura 4-11, se presenta el montaje utilizado para el registro de las deformaciones unitarias.



Figura 4-11 Montaje ensayo módulo de elasticidad.

4.4.4 Ensayo de flexión en vigas.

Con dos de las mezclas que presentaron reactividad en la etapa I, se elaboraron probetas de sección transversal de 50x50 mm y 150mm de longitud, se realizaron ensayos de flexión, de la misma forma se ensayaron probetas elaboradas con su respectivo material cementante más eficaz y probetas inocuas (no reactivas) para el mismo tipo de agregado. Para el ensayo se siguieron las recomendaciones especificadas en la ASTM C78. Se utilizó el montaje mostrado en la figura 4-12.



Figura 4-12 Montaje de ensayo de flexión de vigas.

5. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan y analizan los resultados del programa experimental, inicialmente se muestra la detección de la reactividad de los agregados en estudio, con las variables descritas en la etapa I. Luego, para dos de las muestras que se detectaron reactivas, se evaluó su comportamiento frente a las diferentes adiciones mitigantes descritas en el capítulo 4. Finalmente se valoraron las propiedades mecánicas anteriormente descritas realizando comparaciones entre muestras reactivas e inocuas de la etapa 2.

5.1 Reactividad de los agregados y la influencia de la relación agua-cemento.

En la tabla 5-1, se presenta para cada una de las 12 mezclas elaboradas en la etapa 1, las expansiones registradas a 14 días, estas se midieron, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C1260,

Tabla 5-1 ASTM C 1260 Expansión para mezclas de la etapa I.

Agregado	Expansion %			
	0	3	7	14
BOCCOM47	0	0.06	0.07	0.07
BOCCON47	0	0.07	0.09	0.08
BOCCON60	0	0.08	0.10	0.10
BOCCOM60	0	0.08	0.07	0.07
TUCCOM60	0	0.06	0.08	0.13
TUCCON60	0	0.07	0.23	0.46
TUCCOM47	0	0.06	0.07	0.09
TUCCON47	0	0.07	0.08	0.13
CECCOM60	0	0.02	0.02	0.03
CECCON47	0	0.08	0.15	0.26
CECCOM47	0	0.03	0.05	0.05
CECON60	0	0.07	0.18	0.26

Los criterios de evaluación descritos en la ASTM C 1260 determinan la reactividad de los agregados así: si la expansión a los 14 días es menor que el 0.10% son considerados inocuos; si al decimocuarto (14) día la expansión esta entre el 0.10% y 0.20% son considerados como inconclusos, y si la expansión a los 14 días es mayor de 0.20% es considerado como reactivo; estas mediciones se hicieron para tres especímenes de cada una de las mezclas en estudio.

Para una mejor visualización, en la figura 5-1 se muestra un resumen de las expansiones presentadas a 14 días, en los especímenes de las 12 mezclas de la etapa 1, frente a la solución NaOH A 80°C, donde se especifican los respectivos límites de clasificación

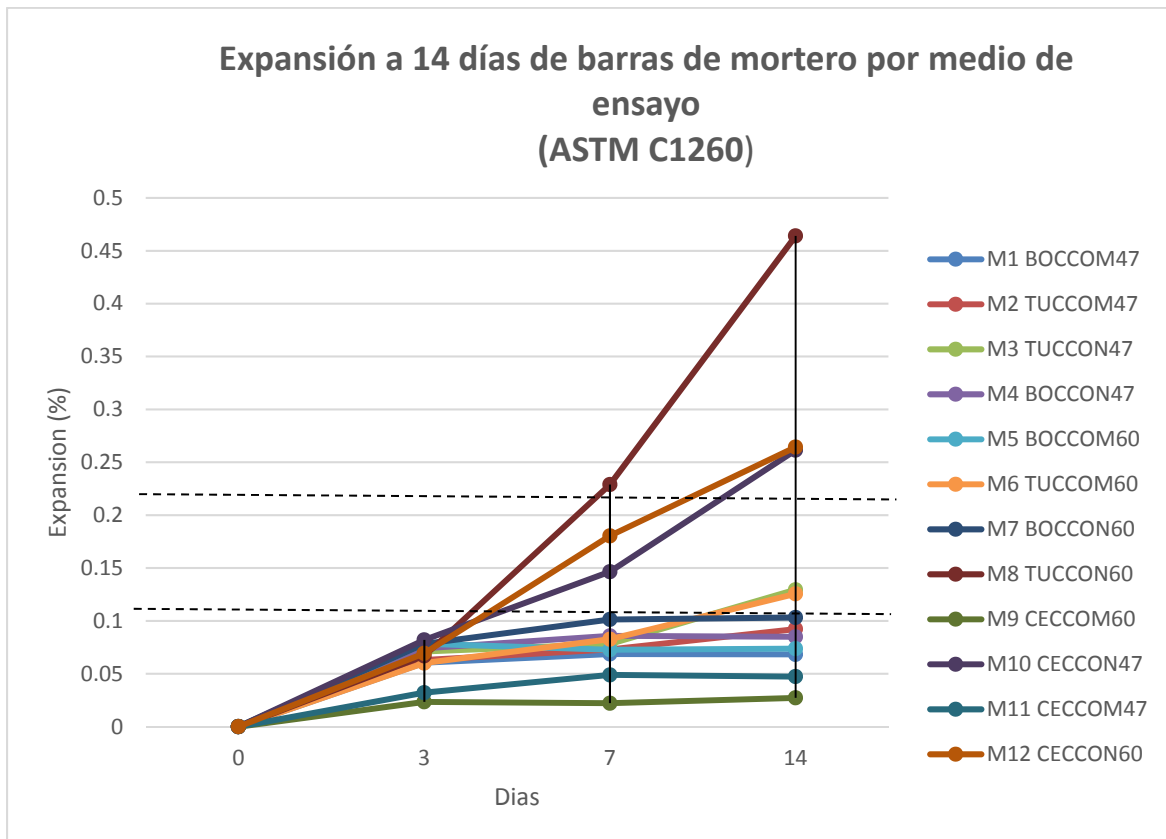


Figura 5-1 Expansión según ASTM 1260 para probetas elaboradas con las mezclas de la etapa 1.

Las combinaciones para el agregado de Tunjuelo (muestras 1,4,5,7) con los dos tipos de cemento y las dos relaciones agua cemento presentan expansiones relativamente bajas a 14 días siendo del orden de 0.07% a 0.10% en promedio. Mientras que las combinaciones

para el agregado de Tumaco (muestras 2,3,6,8) para lecturas a 14 días, las expansiones oscilan entre 0.13% a 0.46%, indicando que este agregado es potencialmente reactivo frente a una combinación específica de a/c. De otro lado, para el agregado de Cemex (muestras 9,10,11,12) las expansiones varían entre 0.08 a 0.26% indicando también una combinación potencialmente reactiva.

Para validar los resultados anteriores, se dejaron las muestras por 14 días más inmersas en la solución de NaOH y se registraron las expansiones a 28 días presentando los resultados de la figura 5-2.

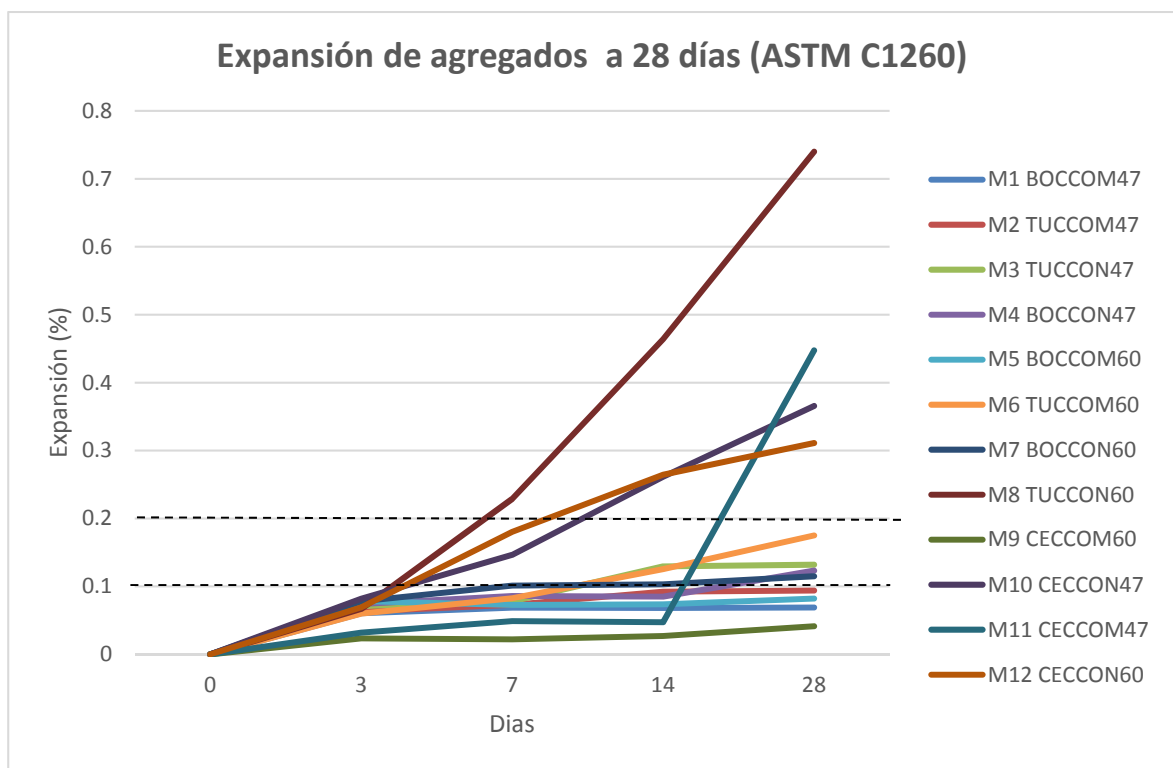


Figura 5-2 Expansión según ASTM 1260 para las diferentes combinaciones en estudio para mezclas de la etapa I.

Se observa que la muestra número 11 (CECCOM47) la cual era inconclusa a una lectura a 14 días, es decir, no se podía clasificar como reactiva o no. Evidenció ser reactiva a 28 días, por lo que usar el criterio de expansión mayor al de 0.20% a los 14 días es útil para agregados altamente reactivos; de otro lado el ensayo es útil para verificar agregados lentamente reactivos, los cuales mostraron expansiones entre 0,10% y 0,20%, después de los 28 días.

A continuación, se muestra el comportamiento individual de cada agregado en estudio como sigue: en la figura 5-3 para el agregado de Tunjuelo se encontró que las combinaciones BOCCOM60, BOCCOM47 y BOCCON47 están por debajo de la expansión a 0.1% siendo inocuas.

Se observa para las combinaciones con una relación agua-cemento de 0.60 que presentan una expansión mayor en un incremento del 17% respecto a la relación agua cemento de 0.47, para un cemento tipo III. Mientras que para el cemento tipo I se presenta un incremento del 8%. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Wiggum (1995) quien afirma que un aumento de la relación a / c presenta un aumento de la expansión con el tiempo.

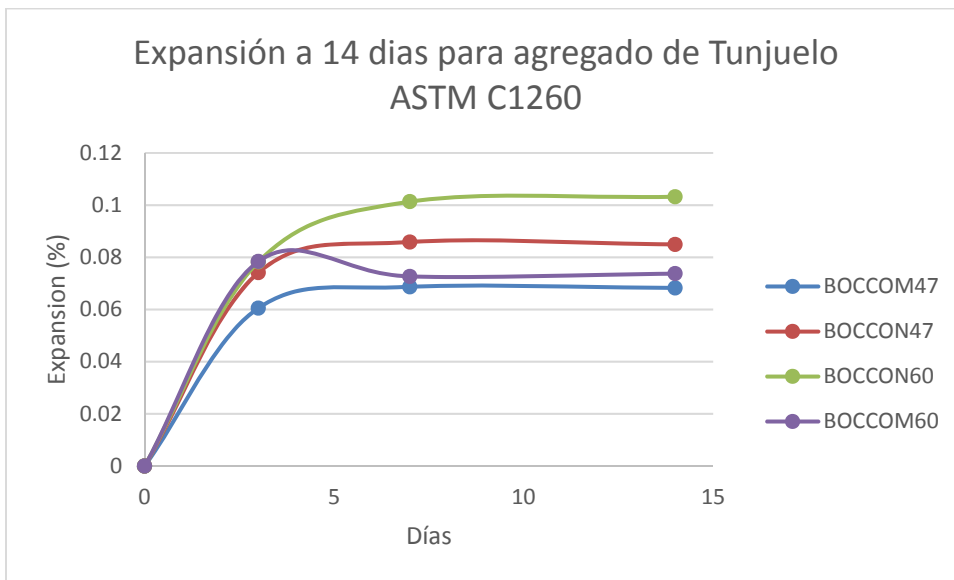


Figura 5-3 Expansión a los 14 días del agregado de Tunjuelo.

En la figura 5-4 se muestran las expansiones para el agregado de Tumaco, encontramos que la combinación TUCCON60 tiene una expansión mayor 2.3 veces la máxima recomendada.

Para las dos relaciones agua-cemento en estudio, se observa un incremento de expansión del 72% para el cemento tipo III y un incremento de la expansión del 36% para cemento tipo I.

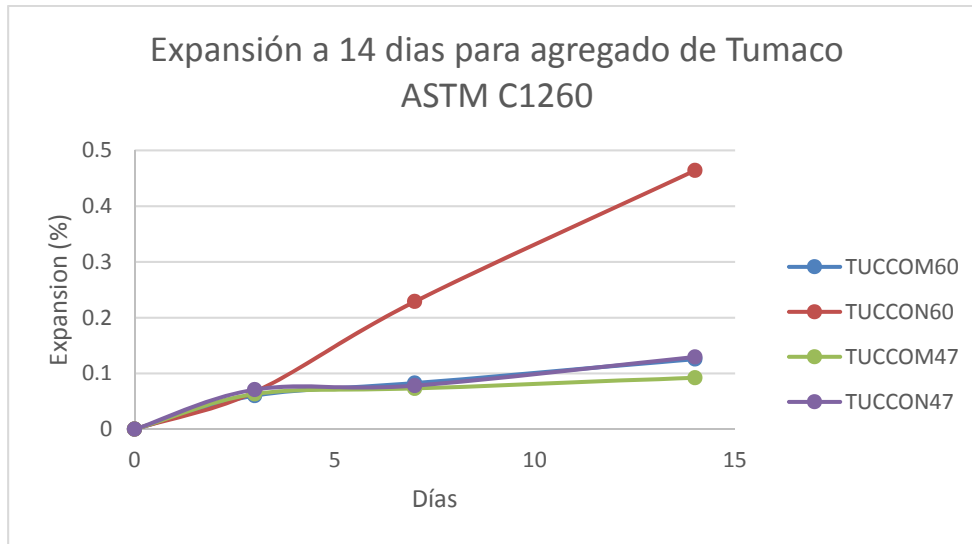


Figura 5-4 Expansión a los 14 días del agregado de Tumaco.

En la figura 5-5 se observa que para el agregado de Cemex las combinaciones: CECON60 y CECON47 están por encima de la expansión del 0.2% siendo potencialmente reactivas. Se observa que para las combinaciones con cemento III se presentaron las mayores expansiones debido al cambio de la relación agua-cemento.

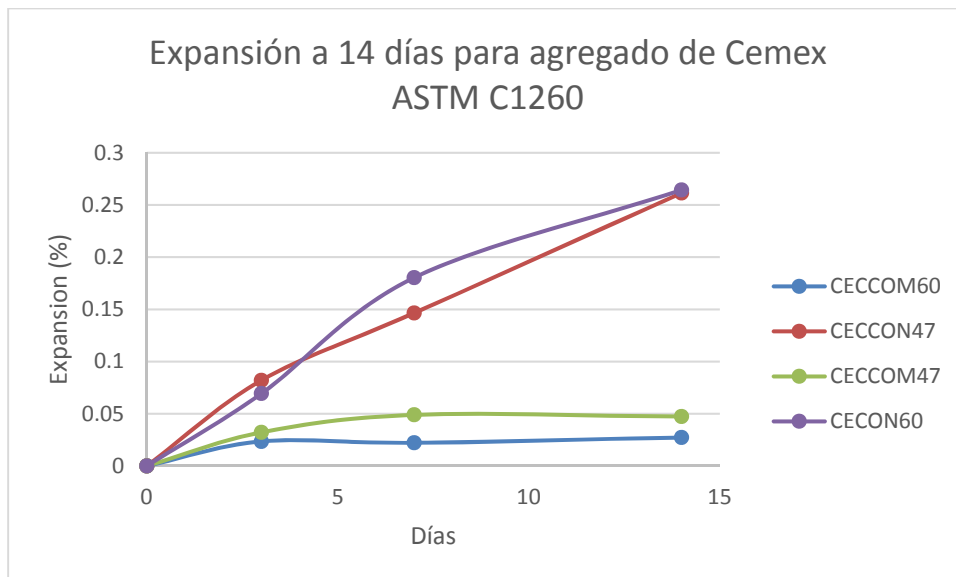


Figura 5-5 Expansión a los 14 días del agregado de Cemex.

En conclusión, a medida que la relación agua-cemento (a/c) aumenta de 0,47 (requisito de prueba C 1260 estándar) a 0,60, las expansiones aumentaron 17% para el agregado de

Tunjuelo en combinación con el cemento tipo III, para el agregado de Tumaco aumentó en 72% con cemento tipo III y 36% con cemento tipo I. Mientras que, para el agregado de Cemex en combinación con el cemento tipo I, la expansión aumentó en 42% a medida que disminuyó la relación a/c a 0.47.

Sin embargo, se presentaron mayores expansiones con una relación a/c de 0.6; esto podría explicarse por el hecho de que a medida que la a/c se aumenta, porosidad aumenta permitiendo mayor movimiento del agua en los capilares.

Finalmente se encontró que las muestras: 8 -TUCCON60, 10-CECCON47 y la muestra 12-CECON60, son potencialmente reactivas según criterios de la ASTM C 1260 con una expansión mayor de 0.2%. Para evaluar la eficiencia de las adiciones cementantes como control de las expansiones debido a la RAS, se tomó la muestra 8 y 10, descritas anteriormente con el fin de continuar con el plan experimental.

5.2 Evaluación de la eficiencia de las adiciones cementantes como control de las expansiones.

Se utilizó el ensayo ASTM C 1567 para evaluar los efectos de la ceniza volante de Clase F, microsilice y metacaolin, como material de control a las expansiones. Se eligieron dos combinaciones de los agregados que presentaron reactividad, para llevar a cabo estas investigaciones: 8-(TUCCON60) altamente reactivo y 10-(CECCON47) altamente reactivo. A continuación, se presenta la discusión de los resultados.

5.2.1 Uso de ceniza volante tipo F.

Con el fin de valorar el efecto de la ceniza volante tipo F en la mitigación de la expansión debido a la reacción álcali agregado, se hicieron dos tipos de reemplazo parciales de cemento: 15 y 20%, para los agregados TUCCON60 y CECCON47. Los resultados de expansión se muestran en la tabla 5-2 y en las figuras 5-6 y 5-7, a la edad de 3, 7, 14 y 28 días.

Tabla 5-2 ASTM C 1567. Expansión usando ceniza volante tipo F.

MUESTRA	% Expansión				
	0	3	7	14	28
TUCCON60	0	0.07	0.23	0.46	0.74
8CEN20	0.00	0.03	0.03	0.05	0.09
8CEN15	0.00	0.05	0.06	0.10	0.22
CECCON47	0.00	0.08	0.15	0.26	0.37
10CEN15	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06
10CEN20	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07

La figura 5-6 muestra el efecto de la inclusión de la ceniza volante en reemplazo parcial de cemento tipo III en 15 y 20% para las mezclas con el agregado Tumaco y una relación agua cemento de 0.60. Se observa que las expansiones disminuyen en proporción directa al nivel de aumento de la ceniza, donde, con un reemplazo del 20% la expansión disminuye en un 87%; llevando a expansiones por debajo del 0.10%, clasificándolo como inocuo. Por otro lado, con un reemplazo del 15% la expansión se disminuye en un 70% sin embargo no es suficiente para limitar la expansión y sigue siendo considerado como reactivo.

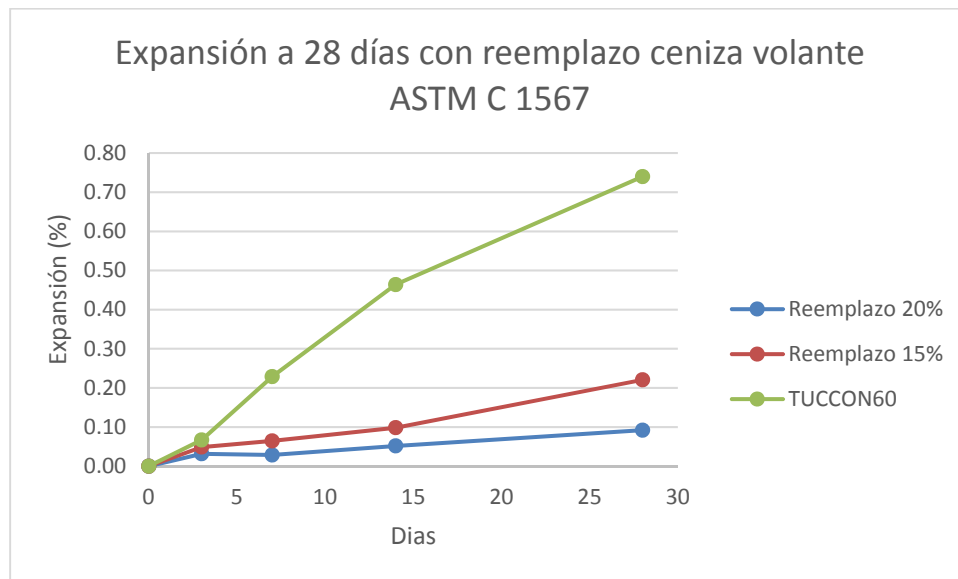


Figura 5-6 Efecto de ceniza volante para agregado de Tumaco.

La figura 5-7 muestra el efecto de la inclusión de la ceniza volante en reemplazo parcial de cemento tipo III en 15 y 20% para las mezclas que contenían el agregado Cemex con una relación agua cemento de 0.47. Con un reemplazo de cemento del 20% la expansión

disminuye en un 81%; llevando a expansiones por debajo del 0.10%, clasificándolo como inocuo. Por otro lado, con un reemplazo del 15% la expansión se disminuye en un 82% limitando la expansión y clasificándolo como inocuo.

Se observa que la velocidad de reducción de las expansiones desde el día 3 es altamente marcada para cualquiera de los dos porcentajes de reemplazos usados.

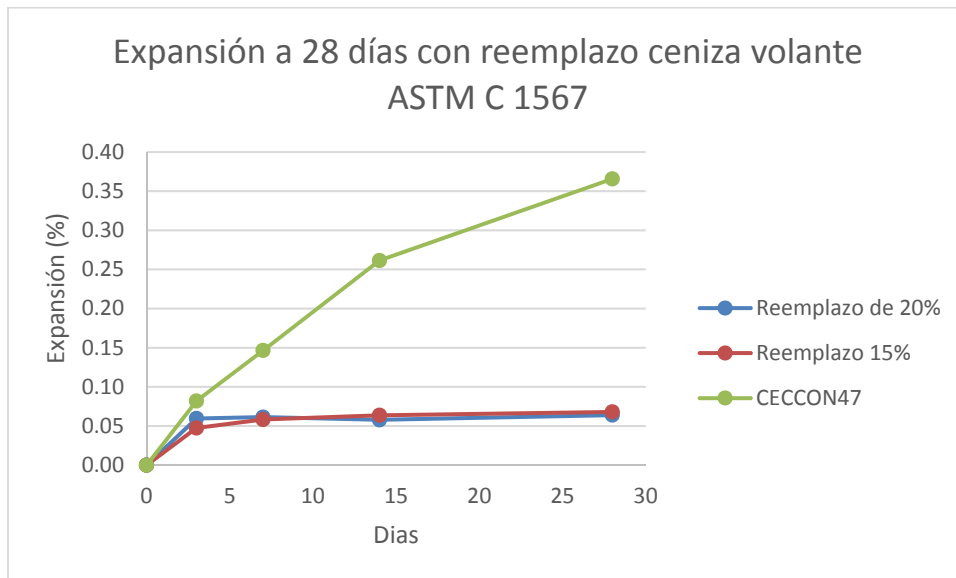


Figura 5-7 Efecto de ceniza volante para agregado Cemex.

5.2.2 Uso de Microsilice.

Para analizar los efectos del microsilice en la expansión debido a la reacción álcali agregado, se hicieron dos tipos de reemplazo 5 y 10%, para las dos combinaciones de agregados mencionados anteriormente. Los resultados se muestran en la tabla 5-3 y en las figuras 5-8 y 5-9.

Tabla 5-3 Expansión usando microsilice. ASTM C 1567

MUESTRA	Expansión (%)				
	0	3	7	14	28
8MIC5	0	0.12	0.18	0.34	0.61
8MIC10	0	0.05	0.09	0.30	0.54
10MIC10	0	0.04	0.06	0.07	0.08
10MIC5	0	0.06	0.08	0.18	0.33

La figura 5-8 muestra el efecto de la inclusión de microsilice en reemplazo parcial de cemento tipo III en 5 y 10% para las mezclas que contenían el agregado Tumaco con una relación agua cemento de 0.60, Se observa que las expansiones disminuyen con un reemplazo cemento por microsilice de 5% en un 17%; sin embargo, esta proporción de reemplazo no es suficiente a los 28 días para clasificar el agregado como inocuo, sigue siendo reactivo. De la misma forma, con un reemplazo del 10% la expansión se disminuye en un 27% sin embargo no es suficiente para limitar la expansión y sigue siendo considerado como reactivo.

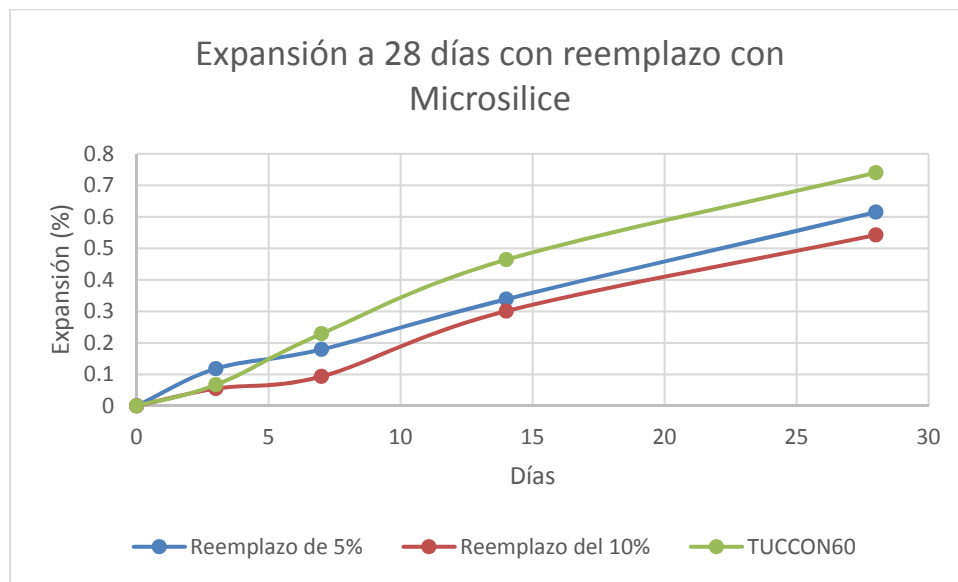


Figura 5-8 Efecto de microsilice para agregado de Tumaco.

La figura 5-9 muestra el efecto de la inclusión del microsilice en reemplazo parcial de cemento tipo III en 5 y 10% para mezclas que contenían el agregado Cemex con una relación agua cemento de 0.47. Con un reemplazo del 5%, se observa que las expansiones disminuyen un en un 10%; sin embargo, esta proporción de reemplazo no es suficiente a los

28 días para clasificar el agregado como inocuo, sigue siendo reactivo. De la misma forma, con un reemplazo del 10% la expansión se disminuye en un 80% limitando la expansión, ubicándola por debajo de 0.10%, clasificándolo como inocuo.

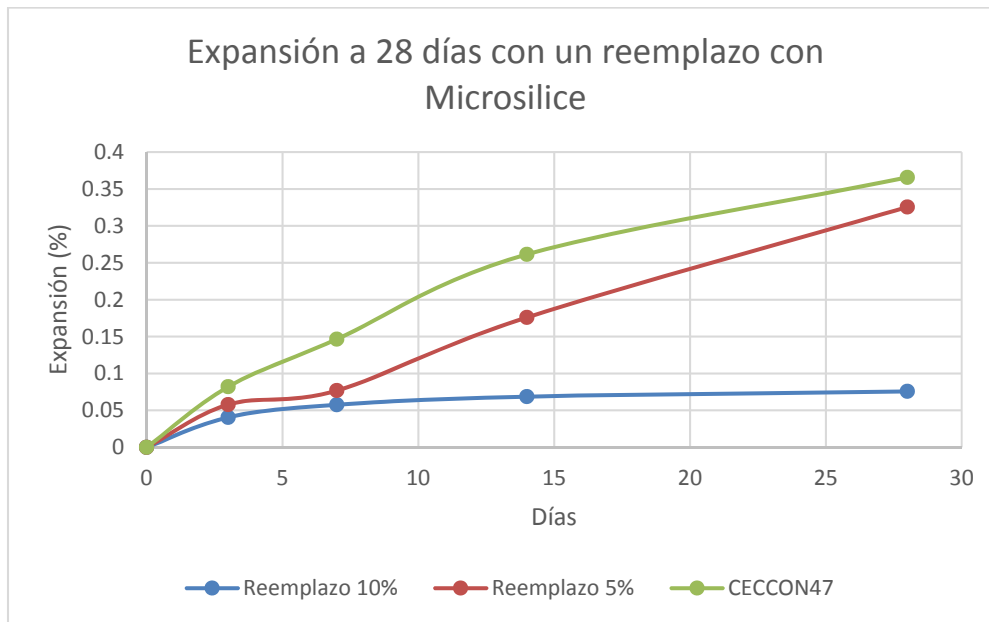


Figura 5-9 Efecto de microsilice para agregado Cemex.

5.2.3 Uso de Metacaolin.

Se analizan los efectos del metacaolin como mitigante en la expansión debido a la reacción álcali agregado, se hicieron dos tipos de reemplazo 10 y 20%, para las dos combinaciones de mezclas mencionadas anteriormente. Resultados del procedimiento se muestran en la tabla 5-4 y en las figuras 5-10 y 5-11.

Tabla 5-4 Expansiones usando metacaolin.

MUESTRA	Expansión (%)				
	0	3	7	14	28
8MET10	0	0.04	0.06	0.06	0.13
8MET20	0	0.06	0.06	0.03	0.06
10MET20	0	0.05	0.04	0.06	0.07
10MET10	0	0.08	0.07	0.10	0.11

La figura 5-10 muestra el efecto del reemplazo del metacaolín en reemplazo parcial de cemento tipo III en 10 y 20% para el agregado Tumaco con una relación agua cemento de

0.60,. Se observa que las expansiones disminuyen con un reemplazo de 10% en un 38%; sin embargo, esta proporción de reemplazo no es suficiente a los 28 días para clasificar el agregado como inocuo, se clasifica como inconcluso. Por otro lado, para un reemplazo del 20% la expansión disminuye en un 91% limitando la expansión hasta un valor menor al 0.1% considerándolo como inocuo.

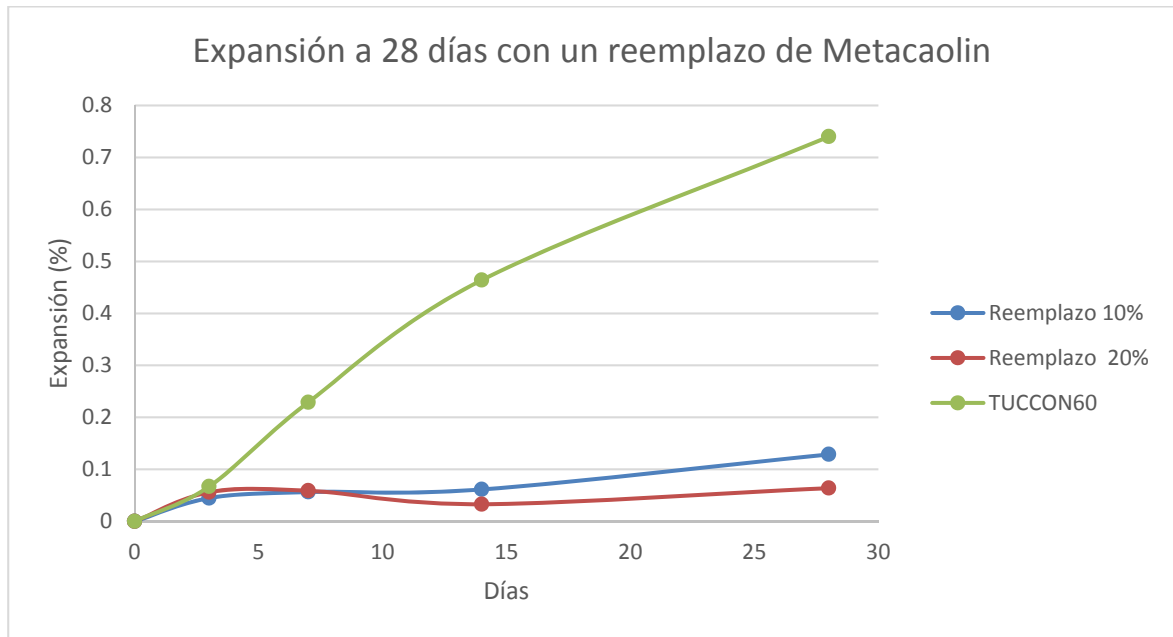


Figura 5-10 Efecto de metacaolin para agregado de Tumaco.

La figura 5-11 muestra el efecto de la inclusión de la ceniza volante en reemplazo parcial de cemento tipo III en 10 y 20% para las mezclas que contenían el agregado Cemex con una relación agua cemento de 0.47, Se observa que las expansiones disminuyen en proporción directa al nivel de aumento del reemplazo del cemento. Con un reemplazo del 10% la expansión disminuye en un 69%; llevando a expansiones al rango de inconcluso. De la misma manera, con un reemplazo del 20% la expansión se disminuye en un 81% limitando la expansión y clasificándolo como inocuo.

Se observa que la velocidad de reducción de las expansiones desde el día 3 es altamente marcada para cualquiera de los dos porcentajes de reemplazos usados.

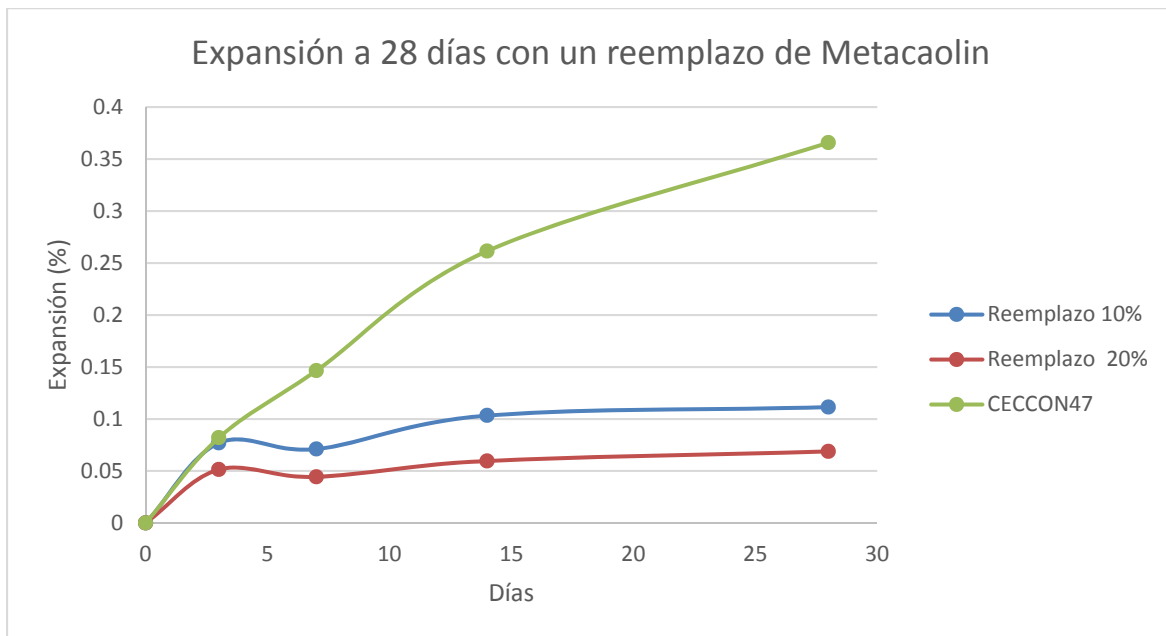


Figura 5-11 Efecto de metacaolin para agregado Cemex.

5.2.4 Efectividad de las alternativas de mitigación.

Utilizando como criterio una expansión de 14 días de 0.10%. para medir la efectividad de las alternativas de mitigación mediante la ASTM C 1567, se encuentra en la tabla 5-5 un resumen de esta evaluación. Como puede verse, las alternativas que fueron eficaces con el agregado Tumaco fueron la ceniza volante tipo F con un reemplazo de 10% y el metacaolin con un reemplazo del 10%. De otro lado para el agregado Cemex fue eficaz de un 10% y 15% de reemplazo con ceniza volante tipo F ,10% de Microsilice y 20% de metacaolin.

Tabla 5-5 Efectividad de alternativas de mitigación usando el criterio de 0.10% de expansión a los 14 días.

Material cementante	Nivel de reemplazo en peso de cemento	Agregado 28- días expansión (Clasificación C1567)	
		TUCCON60	CECCON47
Ceniza volante clase F	15%	Reactivo	Inocuo
	20%	Inocuo	Inocuo
Microsilice	5%	Reactivo	Reactivo
	10%	Reactivo	Inocuo
Metacaolin	10%	Inconcluso	Inconcluso
	20%	Inocuo	Inocuo

A continuación, se presenta un resumen de las expansiones de las combinaciones de la muestra 8 (TUCCON60) y la muestra 10(CECCON47) con las diferentes adiciones cementantes como se presenta en la Tabla 5-6 y 5-7 y en las figuras 5-12 y 5-13.

Tabla 5-6 Expansión en porcentaje para el agregado de Tumaco con las diferentes alternativas de mitigación.

Muestra	Días				
	0	3	7	14	28
TUCCON60	0.00	0.07	0.23	0.46	0.74
8CEN15	0.00	0.05	0.06	0.10	0.22
8CEN20	0.00	0.03	0.03	0.05	0.09
8MIC5	0.00	0.12	0.18	0.34	0.61
8MIC10	0.00	0.05	0.09	0.30	0.54
8MET10	0.00	0.04	0.06	0.06	0.13
8MET20	0.00	0.06	0.06	0.03	0.06

Tabla 5-7 Expansión en porcentaje para el agregado de Cemex con las diferentes alternativas de mitigación.

Muestra	Días				
	0	3	7	14	28
CECCON47	0.00	0.08	0.15	0.26	0.37
10CEN15	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06
10CEN20	0.00	0.05	0.06	0.06	0.07
10MIC5	0.00	0.06	0.08	0.18	0.33
10MIC10	0.00	0.04	0.06	0.07	0.08
10MET10	0.00	0.08	0.07	0.10	0.11
10MET20	0.00	0.05	0.04	0.06	0.07

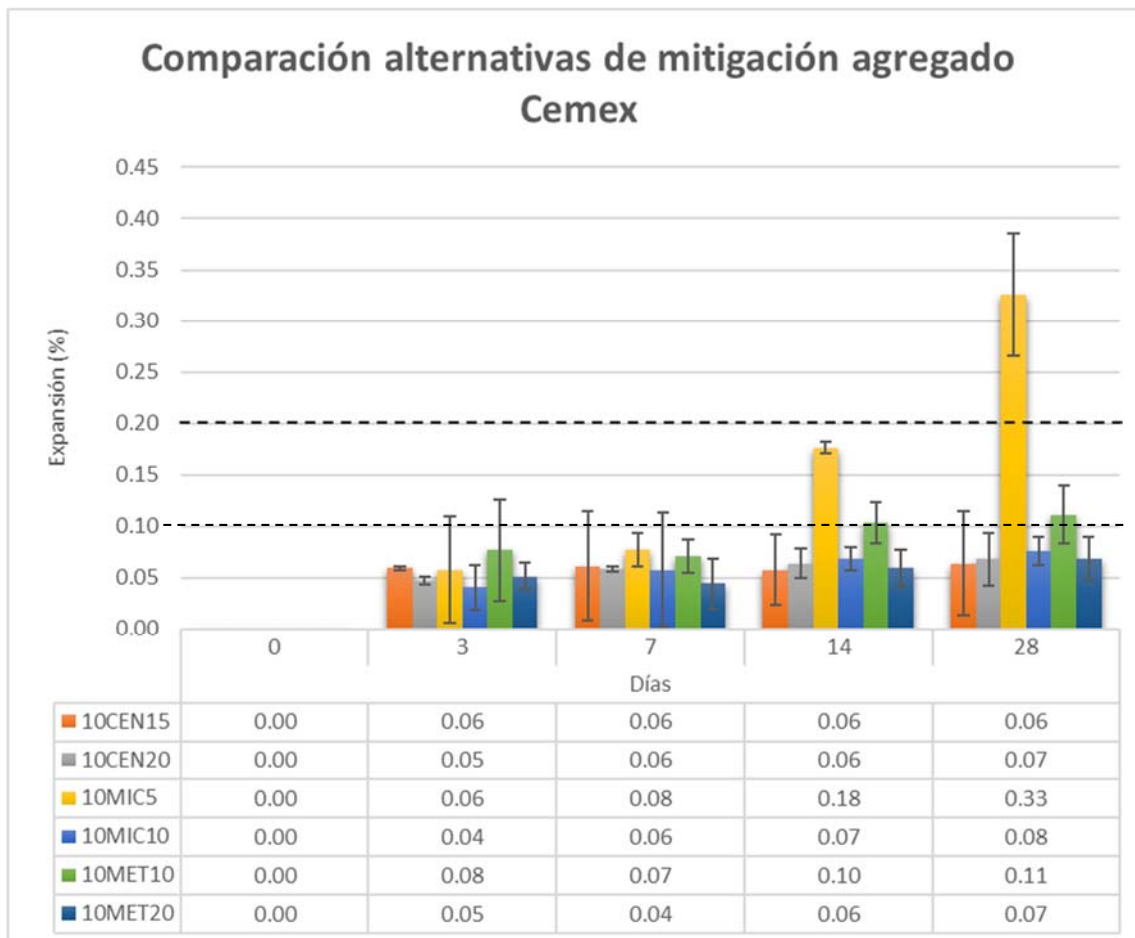


Figura 5-12 Comparación de 28 días con diferentes mitigantes para el agregado de Cemex.

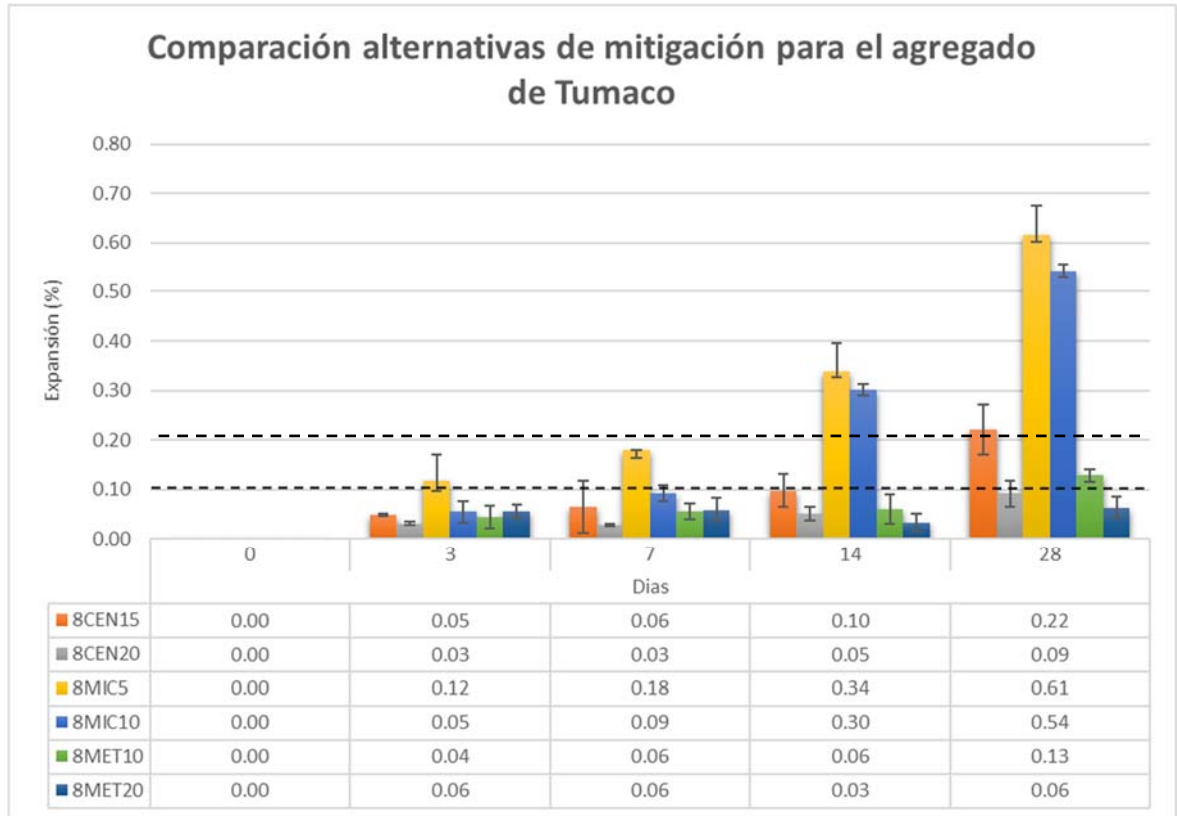


Figura 5-13 Comparación de 28 días con diferentes mitigantes para el agregado de Tumaco.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre el comportamiento de las adiciones como alternativas de mitigación:

1. Para el agregado Cemex la ceniza volante tipo F con reemplazo parcial de cemento de 15% y 20% disminuye la expansión entre un 82 -83% respectivamente. Por otro lado, un reemplazo de 10% de microsilice disminuye la expansión en un 80% y un reemplazo de metacaolin del 20% disminuye la expansión en un 80%. Se puede concluir que los tres materiales cementantes en los rangos seleccionados para el agregado Cemex son efectivos, llegando a una reducción de expansión similar.
2. Para el agregado Tumaco la ceniza volante tipo F con un reemplazo parcial de cemento tipo III en un 20% reduce la expansión en un 87%, de la misma manera el metacaolin con un reemplazo del 20% disminuye la expansión en un 91%. Por lo

que se puede concluir que para la combinación de agregado Tumaco con un cemento tipo III y una relación agua cemento de 0.60 el mejor mitigante es el metacaolin.

5.3 Análisis del Comportamiento Mecánico.

En la presente sección se expondrá el efecto en las propiedades mecánicas de dos de las mezclas que presentaron reactividad en la etapa I (TUCCON60 y CECCON47), bajo el comportamiento la resistencia a la compresión, a la flexión y módulo de elasticidad; comparándolas contra dos de las muestras que dieron inocuas en la etapa I (BOCCON60 y BOCCON47).

5.3.1 Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cubos de mortero.

Se realizó el ensayo de compresión sobre cubos de mortero para las diferentes combinaciones de mortero de la etapa I y se ensayaron a 7, 14 y 28 días. La mitad de las muestras se colocaron en curado estándar a 28 días inmersas en agua y las otras en solución de NaOH (Valores en gris). Los resultados de resistencia a compresión que se muestran en la tabla 5-8 y en las gráficas 5-14 y 5-15, corresponden a las dos muestras, usadas en la etapa II (TUCCON60 y CECCON47).

Tabla 5-8 Resistencia a compresión de cubos de mortero.

MUESTRA	Ensayo a 7 días (MPa)	Ensayo a 14 días (MPa)	Ensayo a 28 días (MPa)
TUCCON60 Curado estándar	32.59	36.00	37.10
TUCCON60 Curado en NaOH	32.20	29.60	29.41
CECCON47 Curado estándar	38.15	41.00	52.23
CECCON47 Curado NaOH	45.70	41.92	44.67

Para el agregado de Tumaco, en la figura 5-14 se observa que la resistencia es similar al inicio para los dos tipos de curado evaluados, (barras de color naranja corresponden a las mezclas con un curado normal, mientras que barras de color azul estuvieron

inmersas en NaOH); posteriormente a los 28 días ya se evidencia una pérdida de resistencia en un 20% con respecto a las muestras con curado normal.

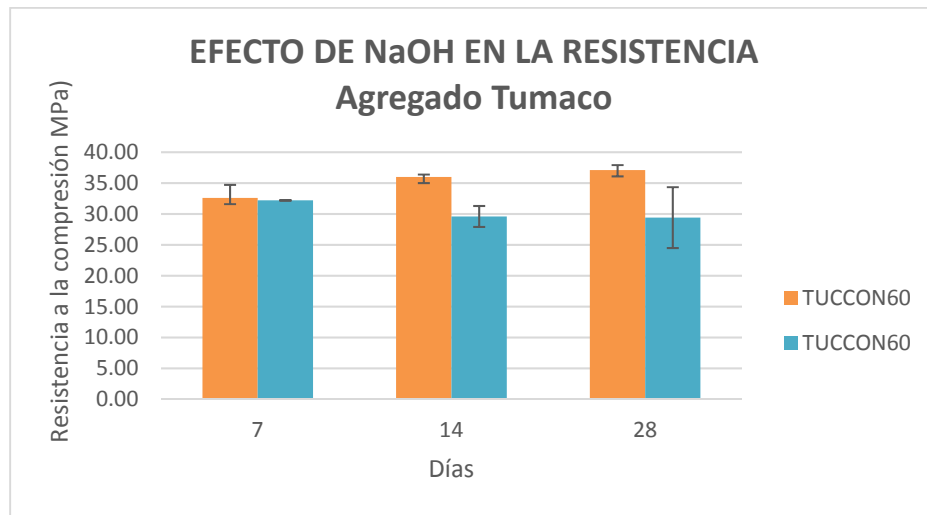


Figura 5-14 Comparación de resistencia a la compresión para agregado de Tumaco con curado en agua y NaOH.

Para el agregado Cemex, en la figura 5-15 se observa que las muestras con un curado normal tienen un ascenso en la resistencia, mientras que las muestras sometidas a la solución de NaOH se presenta una disminución de la resistencia a medida que pasa el tiempo y a los 28 días se presenta una disminución en un 14%.

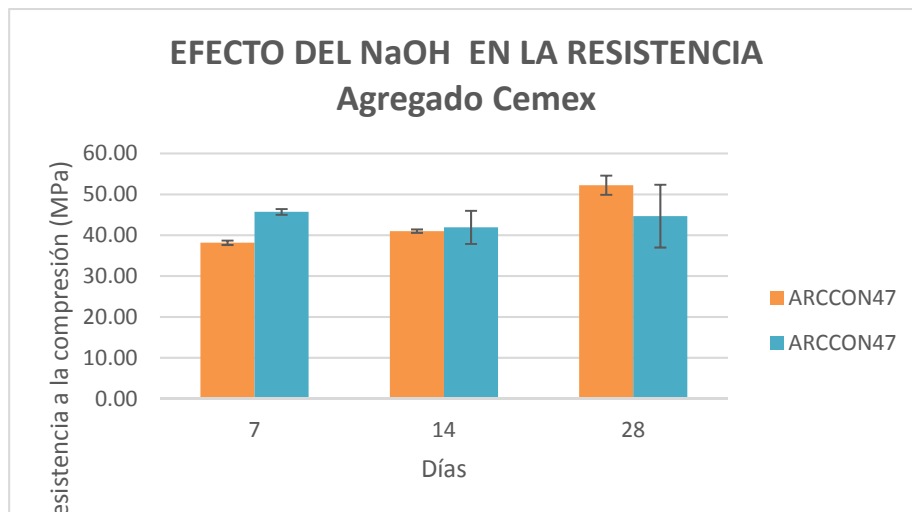


Figura 5-15 Comparación de resistencia a la compresión para agregado de Cemex con curado en agua y NaOH

Se puede concluir, que para mezclas que evidencian reactividad álcali sílice se presenta una disminución en la resistencia a compresión del mortero, para las probetas almacenadas en NaOH. Este rango varía dependiendo de la permeabilidad de la mezcla, es decir, la mezcla con una relación a/c mayor, presentó una mayor disminución en la resistencia, siendo más permeable y permitiendo una mayor reacción entre los álcalis del cemento y los elementos silíceos del agregado. Este ensayo muestra los resultados evidenciados para 28 días pero el efecto sigue en el tiempo.

Este comportamiento coincide con lo reportado por (Yurtdas, Chen, Hu, & Shao, 2013) donde indica que la resistencia a compresión disminuye en particular cuando los agregados son altamente reactivos. tal como lo evidencia el agregado de Tumaco y Cemex en los que se observa una expansión mayor a la de 0.2% en menos de 28 días.

5.3.2 Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cilindros de mortero.

Tabla 5-9 Esfuerzo a compresión en cilindros de mortero para muestras de la etapa II.

	Muestra	Esfuerzo Promedio a 28 días (MPa)	Esfuerzo Promedio a 90 días (MPa)
1	8TUCCON60	11.1	9.0
2	10CECCON47	14.3	14.5
3	10CECV20	19.8	21.0
4	10TUCV20	15.3	12.9
5	BOCCON47	20.9	21.0
6	BOCCON60	17.2	16.6

Al realizar el ensayo de compresión para cilindros de mortero de 45mm de diámetro por 90mm de alto, para las dos muestras reactivas de la etapa II, al compararlas con una muestra que no muestra alta expansión y con un cilindro con un reemplazo de material mitigante (ceniza volante tipo F) en la proporción encontrada como más eficaz se encontró que en agregados altamente reactivos se disminuye la resistencia a compresión en un 23% en un lapso de tiempo de 28 a 90 días. Mientras que en las mezclas que contenían el agregado Cemex no disminuyó la resistencia a compresión y en las probetas inocuas esta propiedad se mantuvo a lo largo de las fechas de ensayo. Respecto a las probetas

elaboradas con adición de ceniza volante, las probetas que contenían el agregado altamente reactivo (TUCCON60) la adición logró mantener la resistencia a compresión en las dos edades de ensayo y en las probetas que contenían el agregado de Cemex la resistencia a compresión disminuyó en un 18% en las dos edades.

Se puede concluir que para agregados altamente reactivos la disminución en el esfuerzo a compresión es notable y que las adiciones cementantes, pueden ayudar a contrarrestar el efecto de la reacción álcali agregado sobre la resistencia a compresión y por ende mantener los valores de esta propiedad a lo largo del tiempo. No obstante, se debe realizar ensayos para encontrar la proporción adecuada que minimice la reacción y favorezca las propiedades mecánicas. Los resultados descritos anteriormente se pueden observar en la tabla 5-9 y en la figura 5-16.

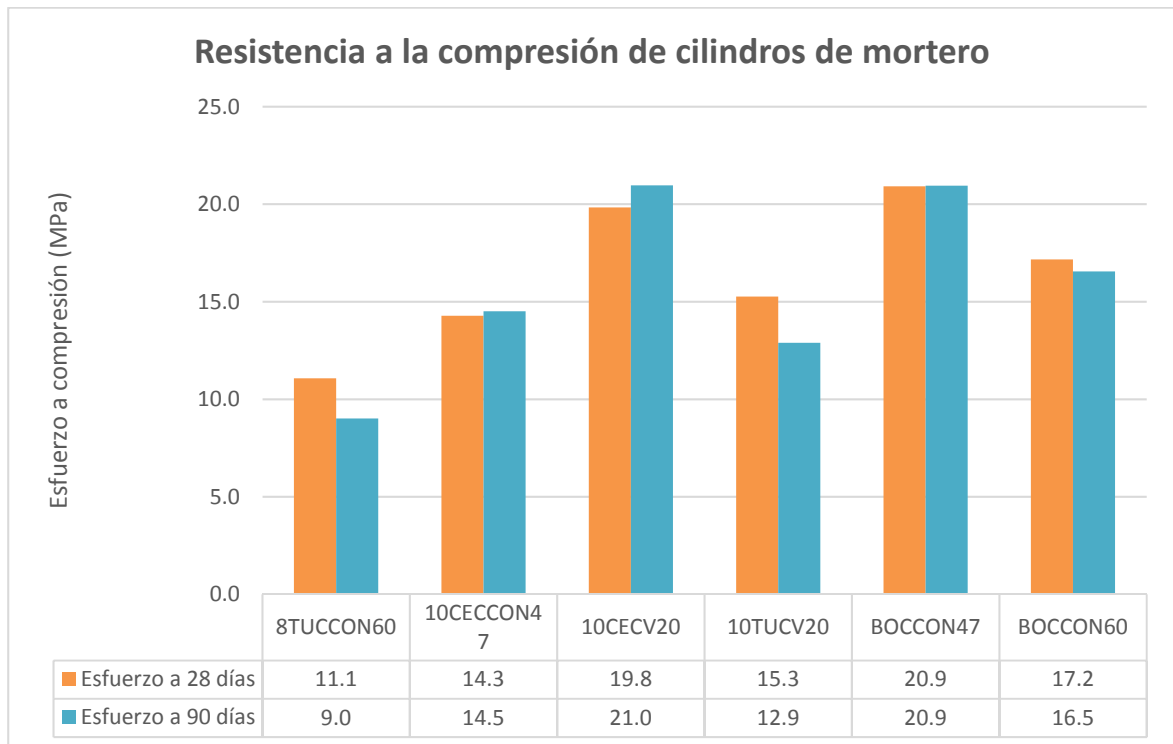


Figura 5-16 Grafica de esfuerzo a compresión para cilindros de mortero.

5.3.3 Efecto del RAS en la resistencia a la flexión.

Se realizó el ensayo a flexión de vigas de 50x50mm de sección transversal y 150mm de longitud para las dos combinaciones usadas en la etapa II (TUCCON60 y CECCON47) y

se compararon con dos muestras inocuas (BOCCON60 y CECCON47) usando el mismo tipo de cemento y la misma relación agua cemento. El ensayo se realizó a 90 días, tiempo en el cual las vigas estuvieron sumergidas en NaOH A 80°C. Los procesos de ensayo se muestran en las imágenes 5-17 y 5-18.



Figura 5-17 Ensayo a flexión de vigas de mortero.



Figura 5-18 Aspecto de la falla en vigas de mortero.

En la figura 5-19 se presenta el módulo de rotura obtenido para las vigas que contenían el agregado Tumaco (TUCCON60) donde se observa que disminuye 70% respecto a las

muestras que contenían el agregado inocuo (BOCCON60) bajo las mismas condiciones de exposición al NaOH. De la misma manera para el agregado Cemex en su combinación reactiva (CECCON47) el módulo de rotura disminuye en 42% respecto a las mezclas que contenían agregado inocuo (BOCCON47).

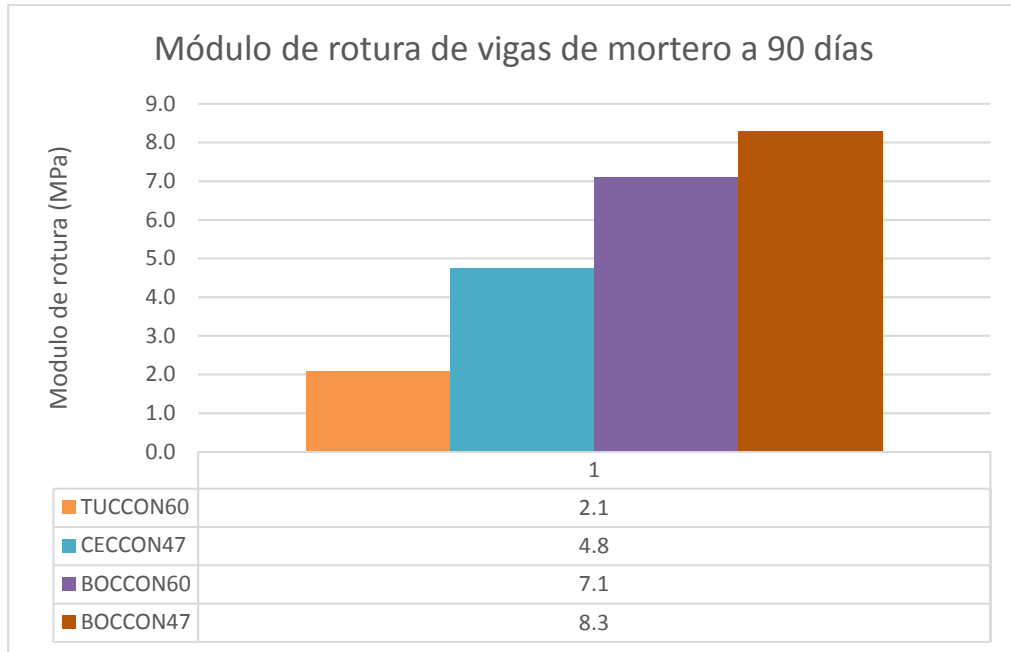


Figura 5-19 Modulo de rotura para mortero a 90 días.

Estos resultados evidencian una mayor sensibilidad de la resistencia a flexión de la RAS en mezclas que contienen agregados reactivos en comparación con la resistencia a la compresión; este comportamiento puede ser atribuido principalmente a la microfisuración. Comportamiento similar al reportado por (Yurtdas et al., 2013) donde encontró que el mortero afectado por RAS no se muestra tan sensible. En el caso de la resistencia a compresión debido al cierre de las micro fisuras bajo el esfuerzo de compresión, mientras que el esfuerzo a tracción rápidamente conduce a la propagación de micro fisuras. Como se puede observar en las muestras ensayadas a flexión, ver figura 5-19 donde se observa que la muestra ya presentaba un grado alto de fisuración debido al efecto RAS.



Figura 5-20 Fisuración de viga de mortero debido a RAS.

5.3.4 Efecto del RAS en el módulo elástico.

Se evaluó el módulo de elasticidad sobre cilindros de 45mm de diámetro y 90 mm de altura para los dos agregados en estudio de la etapa 2 (TUCCON60 y CECCON47) y se compararon con dos muestras inocuas usando el mismo tipo de cemento y la misma relación agua cemento. El ensayo se realizó a 28 y 90 días, en los cuales estuvieron sumergidas en NaOH A 80°C. Los resultados de esta propiedad se muestran en la tabla 5-11 y en las figura 5-20.

Tabla 5-10 Módulo de elasticidad para muestras de la etapa 2.

Módulo de elasticidad (MPa)			
Muestra		28 días	90 días
1	TUCCON60	8485	6888
2	CECCON47	11529	11932
3	CECV20	21323	20482
4	TUCV20	15359	13800
5	BOCCON47	16846	10330
6	BOCCON60	13680	12287

En la figura 5-21 se puede observar que para el agregado Tumaco en la muestra reactiva el módulo de elasticidad disminuyó en un periodo de 28 a 90 días en un 23% por el efecto de la RAS, mientras que la muestra con un reemplazo de ceniza volante en reemplazo parcial de cemento en un 20% en peso, presentó una disminución en el módulo de elasticidad en un 11%. Por otro lado, en comparación con un agregado inocuo en la misma

combinación de agua-cemento se observó una reducción del módulo de elasticidad de 11%. De donde se infiere:

1. Se presentó una reducción del módulo elástico por efecto del RAS en mezclas que contenían agregados altamente reactivos del 50% con respecto a mezclas que contenían el agregado inocuo.
2. El uso de ceniza volante como mitigante del RAS, además de incrementar la resistencia y el módulo de elasticidad disminuye la caída del módulo de elasticidad en un 50%.

Con respecto al agregado Cemex, ver figura 5-21, se observa que la muestra reactiva no muestra una disminución en el módulo de elasticidad y en la combinación con un reemplazo de ceniza volante de 20% en peso; se presenta una disminución del 4% en el valor del módulo de elasticidad. Por consiguiente, se puede deducir:

1. El efecto de disminución de módulo de elasticidad es significativo en agregados altamente reactivos.

Los resultados encontrados concuerdan con lo reportado por (Yurtdas et al., 2013) las probetas después del período de maduración, muestran que el módulo de elasticidad y la relación de Poisson de morteros Reactivos son menores que las del morteros No Reactivos.

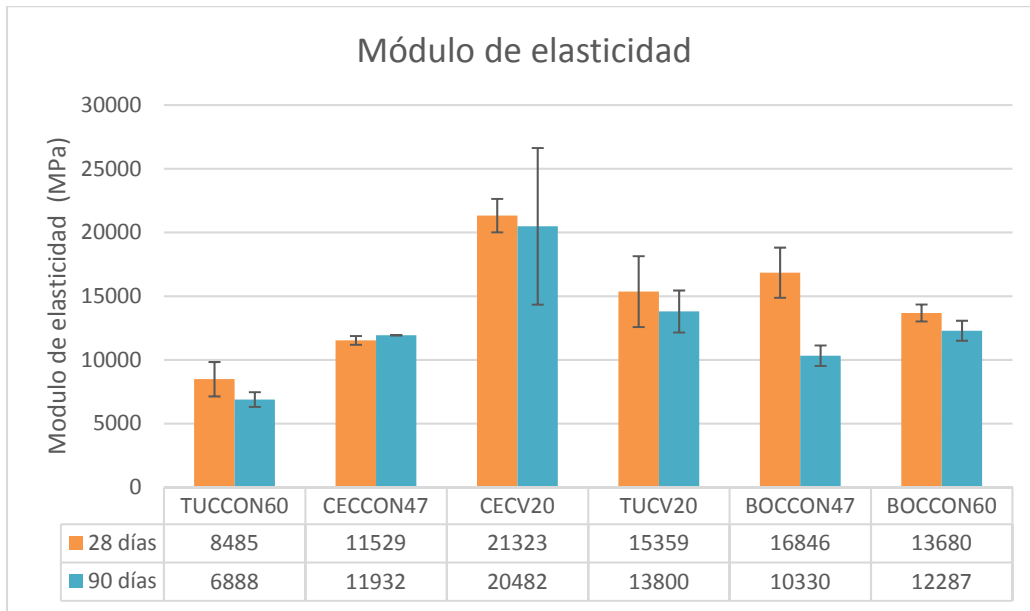


Figura 5-21 Módulo de elasticidad para probetas de la etapa II a 28 y 90 días

5.4 Análisis petrográfico

Para complementar los resultados, se realizó un análisis petrográfico según la ASTM C 856 sobre láminas delgadas extraídas de núcleos de concreto para las dos muestras reactivas de la etapa I, TUCCON60 y CECCON47. Ver figura 5-21.



Figura 5-22 Secciones delgadas de las muestras. Informe NRBMICROMATCO S.A.S

- Composición

En las muestras predominan los agregados de origen ígneo principalmente andesitas-basalto, tobas, granitos, y granos de plagioclasa, además de fragmentos de chert, entre otros; mencionados por US Departement of Transportation como altamente reactivos y clasificados por el departamento de Ingeominas en Colombia. En la tabla 5-12 se especifica la composición de los agregados en cada una de las secciones:

Tabla 5-11 Calculo de resultado de conteo de partículas. Informe NRBMICROMATCO S.A.S

CARACTERÍSTICA DE LOS CONSTITUYENTES	MUESTRAS	
	Tumaco	Cemex
	Porcentaje de Partículas	
Andesita basalto	34.4	10.5
Plagioclasa	31.1	14.0
Toba	23.3	8.8
Anfibol	7.8	0.0
Fragmento alterado	2.2	0.0
Piroxeno	1.1	0.0
Granito	0.0	21.9
Cuarcita	0.0	7.9
Feldespató potásico	0.0	4.4
Arcillolita silícea	0.0	0.9
Cuarzo	0.0	7.9
Esquisto	0.0	1.8
Chert	0.0	14.0
Cuarzo policristalino	0.0	3.5
Arcillolita	0.0	0.9
Arenisca fina	0.0	0.9
Limolita arcillosa	0.0	0.9
Total	100.0	100.0

Con base en el análisis microscópico mediante sección delgada, se pudo detallar la composición interna de los constituyentes y se encontraron agregados con características que los hacen potencialmente reactivos con los álcalis libres, como es el caso de las andesitas basalto, tobas, cuarcitas, cherts, arcillolitas silíceas y cuarzos policristalinos. En la tabla 5-13 se especifica la proporción de estos agregados en cada una de las secciones:

Tabla 5-12 Reactividad potencial del agregado. NRBMICROMATCO S.A.S

CARACTERÍSTICA DE LOS CONSTITUYENTES	MUESTRAS	
	Tumaco	Cemex
	Porcentaje de Partículas	
Potencialmente Reactivos	57.8	45.6
No Reactivos	42.2	54.4
Total	100.0	100.0

Se observa que la composición en porcentaje del agregado de Tumaco y Cemex los agregados reactivos están en un porcentaje del 58 al 46% respectivamente, con un porcentaje mayor de andesitas, plagioclasas y tobas en el agregado de Tumaco. Mientras que el agregado de Cemex presenta una gran variedad de agregados reactivos como el chert, cuarzo, cuarcita, andesita basalto, plagioclasa.

Según los resultados de la petrografía se observó la presencia de microgrietas en las muestras (2.4% y 1.0% respectivamente) con aberturas de 0.006mm a 0.08mm, formando un patrón hexagonal, se encuentran atravesando la pasta de cemento y algunos agregados. Es de resaltar que la mayoría para ambos agregados presentan gel de reacción álcali-sílice.

Se observa la presencia de un gel incoloro, cristalino birrefringente, con colores de interferencia de primer orden (gris a blanco) a segundo orden, localizado adentro de algunos vacíos y grietas en la pasta cementante. La existencia de este gel es más notoria en la muestra Tumaco. En general presenta fractura concoidea debido a retracción por secado. Tiene la apariencia de un material viscoso que ha fluido y puede apreciarse en varias capas. Comúnmente se presentan en forma de “lenguas” de extrusión de gel. (C-, Colombiana, & Julio, 2017)

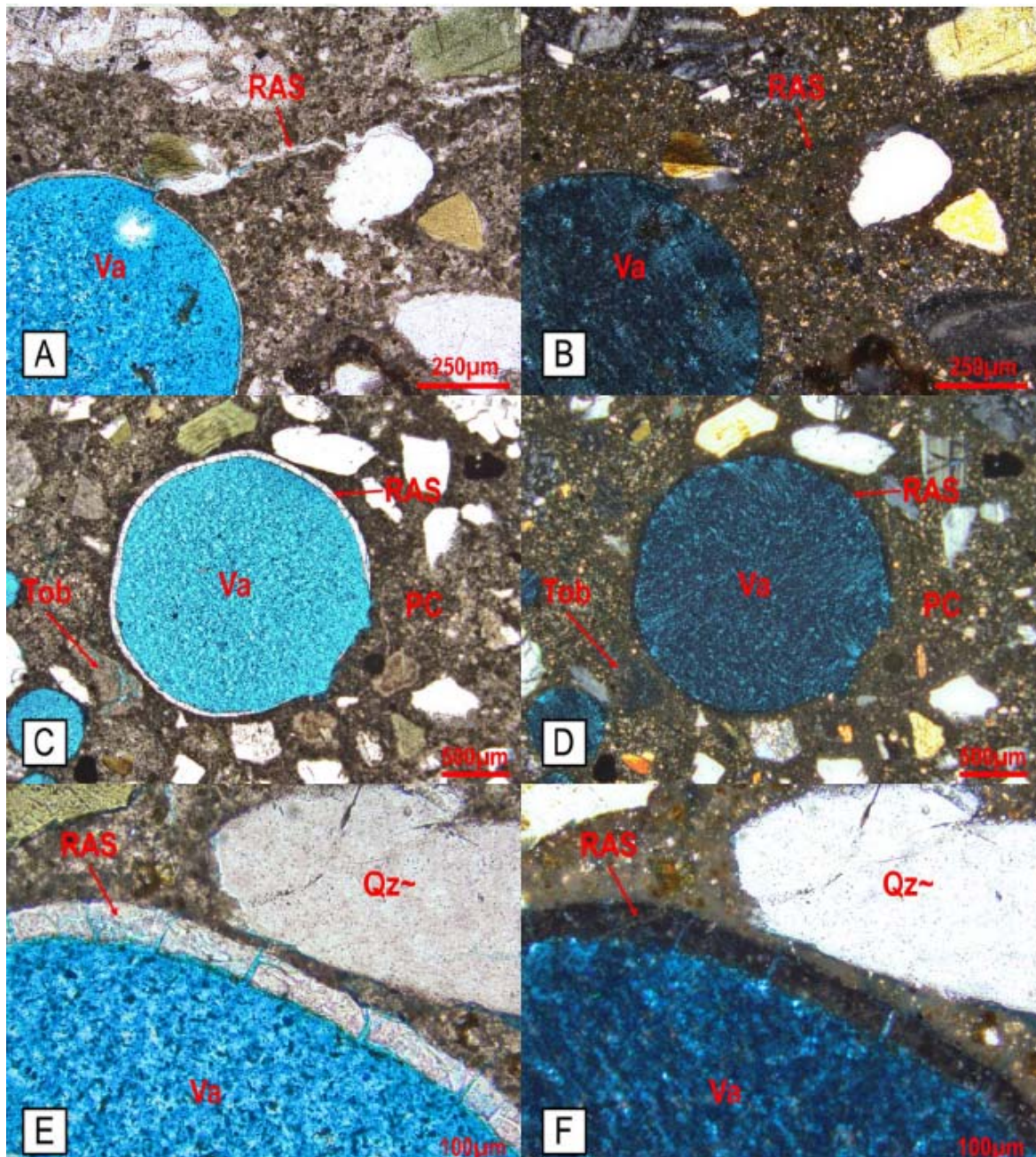


Figura 5-23 Microfotografías bajo el microscopio petrográfico de la muestra Tumaco mostrando varios vacíos (Va) con presencia de gel producto de reacción álcali – sílice (RAS) observándose como un gel cristalino birrefringente, además de la composición de algunos agregados como tobas (Tob) y cuarzo policristalino (Qz□) y la textura de la pasta cementante (PC), vistas con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A, C, E y B, D, F). INFORME NRBMICROMATCO S.A.S

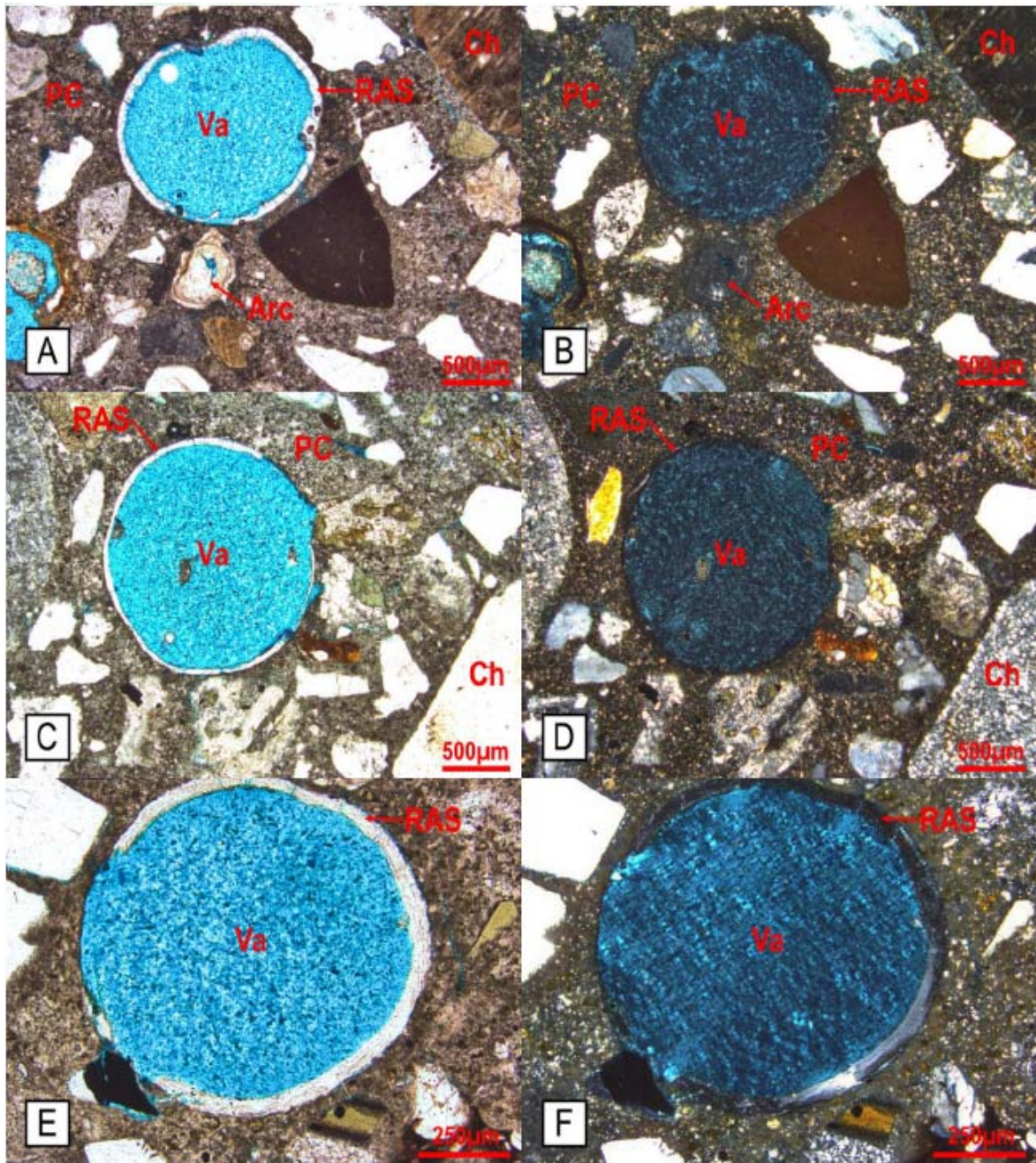


Figura 5-24 Microfotografías bajo el microscopio petrográfico de la muestra Cemex mostrando varios vacíos (Va) con presencia de gel producto de reacción álcali – sílice (RAS) observándose como un gel cristalino birrefringente, además de la composición de algunos agregados como cherts (Ch), arcillolitas (Arc) y la textura de la pasta cementante (PC), vistas con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente (A, C, E y B, D, F). INFORME NRBMICROMATCO S.A.S

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el proyecto se presentan las siguientes conclusiones:

- Al elaborar el estado del arte se encontró que la reacción álcali sílice se presenta principalmente por los componentes reactivos de los agregados, el contenido de álcalis en solución del poro y la humedad, cual actúa como catalizador de la reacción.
De igual manera el ensayo ASTM C 1260 demostró ser un ensayo rápido y confiable para agregados altamente reactivos, frente a la variedad de ensayos existentes para evaluar la potencial reactividad.
- Al evaluar la reactividad potencial de los tres agregados se encontró que al aumentar la relación a/c de la estándar (0.47) a 0.60 en su mayoría, para las diferentes combinaciones de los agregados en estudio, aumentó la porosidad del concreto endurecido y fluidez de la mezcla, Dejando más espacio para la formación del gel. Por lo que se puede concluir que la expansión se relaciona directamente con el aumento de la relación (a/c).
- Comparando las diferentes adiciones cementantes, el uso de ceniza volante tipo F, en concordancia según lo citado con (Malvar et al., 2002), que puede disminuir la expansión en reemplazos del 20% al 25% en peso; hasta valores de expansión menores del 0.10% , es decir puede reducir la reactividad de un agregado de potencialmente reactivo a inocuo. Al mismo tiempo incrementar la resistencia a la compresión en un 25 a 30%.

- El uso de microsilice en reemplazos del 5 al 10% redujó la expansión en un valor para el agregado de Tumaco el cuál no logro catalogarlo como inocuo; sin embargo, para un reemplazo del 10% para el agregado Cemex se logró minimizar las expansiones a 28 días clasificándolo como inocuo. Cabe decir que los resultados encontrados son coherentes a lo mencionado con (Touma, 2000) al afirmar que un reemplazo del 10% de microsilice disminuye las expansiones en la misma cantidad que un 20% de reemplazo con ceniza volante tipo F.
- El uso del metacaolin como mitigante de la reacción álcali sílice en un reemplazo del 20% en peso para los agregados en estudio, disminuye las expansiones de tal manera que se puedan clasificarse como inocuos. Aseverando lo mencionado por (Garber et al., 2006) “El uso de metacaolín ... aumenta la resistencia al ataque de RAS y sulfato, con un reemplazo del 10% aproximadamente”.
- El material cementante más eficaz para prevenir la RAS debe ser estudiado en particular para cada agregado. Como se observó, la ceniza volante, el microsilice y el metacolín son competentes para mitigar la RAS, es decir reducir la expansión hasta limitarlas al grado de inocuas, en diferentes proporciones de reemplazo según las recomendaciones del estado del arte.
- El uso de materiales cementantes en reemplazo en proporciones adecuadas como la ceniza volante tipo F traen ventajas en minimizar el fenómeno de RAS, aumenta la resistencia a la compresión en un 27% y ayuda a reducir la perdida de módulo de elasticidad en un 50%, para los agregados en estudio.
Al realizar el estudio petrográfico se pudo encontrar que los agregados encontrados como reactivos (Tumaco y Cemex) contenían álcalis libres, como es el caso de las andesitas basalto, tobas, cuacitas, cherts, arcillolitas silíceas y cuarzos policristalinos. Se puede inferir que el agregado de Tunjuelo, aunque contenía más porcentaje de sílice, sus componentes tetraédricos no eran inestables o con partículas de sílice incompletas, en concordancia con los resultados encontrados con el ensayo ASTM C 1260 de los agregados estudiados.
- Al analizar el comportamiento mecánico del mortero para las condiciones de ataque establecidas en esta investigación se encontró: La resistencia a la compresión se ve afectada por la RAS, en una disminución de la misma en un 15 a 20% respecto a las muestras sin RAS. La disminución de resistencia a la compresión se ve más

pronunciada con el paso del tiempo, es decir que el debilitamiento de la estructura va siendo de manera progresiva.

- La RAS ocasiona una disminución del módulo de elasticidad debido a la microfisuración, de manera significativa en agregados altamente reactivos en una disminución aproximadamente en un 23% a 90 días. En otras palabras, estructuras afectadas con la RAS presentarán una pérdida de rigidez y tenacidad bajo las secciones diseñadas inicialmente.
- La RAS genera una disminución de la resistencia a la flexión mayor que la disminución de la resistencia a la compresión debida a la microfisuración relacionada con la expansión de este fenómeno, es decir ayuda a la propagación de las microfisuras.

NOTA: Los resultados son aplicables solo para las variables de estudio del documento y serán aplicables bajo el criterio del profesional que los aplique.

6.2 Recomendaciones

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones que se podrán hacer en un futuro con el fin de profundizar y fortalecer algunos aspectos de esta investigación o la hora de emprender investigaciones similares.

- Continuar en permanente actualización, evaluación de mapas geológicos y de clasificación de agregados de cantera para un mejor uso de los agregados disponibles en el país para el uso en la construcción.
- Motivar a la comunidad científica para establecer ensayos que permitan evaluar la reactividad de los agregados y establecer criterios propios de clasificación según la geología de cada territorio.
- Realizar pruebas comparativas a largo plazo con la ASTM C1293 de los agregados en estudio para evaluar y comprar los resultados obtenidos en este proyecto.
- Realizar diferentes reemplazos de materiales cementantes para cada combinación de agregado-cemento permitirá encontrar el mitigante y proporción óptima del agregado a usar en la construcción de diferentes estructuras, tomando como base el estado del arte.

-
- Analizar el comportamiento a largo plazo de las características mecánicas del concreto bajo RAS en barras de mortero y bloques en condiciones de campo que permitan un mayor acercamiento al comportamiento real de las estructuras bajo el fenómeno de la RAS.
 - La humedad es el principal activador de la RAS por lo se recomienda el manejo adecuado de los niveles freáticos o corrientes de agua adyacente a las obras para mejorar la durabilidad y calidad de las mismas ante diferentes patologías entre ellas la reacción álcali sílice.
 - Propiedades de morteros y concretos a mayores edades de ensayo, cuando se usen materiales cementantes como mitigantes, para evaluar si los beneficios se mantienen con el tiempo.

7. ANEXOS

A lo largo de la investigación, se han generado diferentes anexos; estos anexos contienen toda la información de análisis, graficas, datos y procedimientos de ensayo para el desarrollo del mismo, a continuación, se realizó un resumen de los anexos.

Anexo A: Ensayo de expansión ASTM C 1260.

Anexo B: Ensayo de expansión ASTM C 1567.

Anexo C: Ensayo de compresión de cubos de mortero ASTM C 109.

Anexo D: Ensayo de módulo de rotura ASTM C 469.

Anexo E: Ensayo de compresión de cilindros. ASTM C 39

Anexo F: Ensayo Petrográfico.

8. Bibliografía

ASTM C 294 (2005). Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates. The American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards: 10 pp

ASTM C1567-13, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

ASTM C305-14, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM C1260-14, Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

ASTM C39. (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials*, 1–7. <http://doi.org/10.1520/C0039>

ASTM. (2014). ASTM C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International*, 1–5. <http://doi.org/10.1520/C0469>

Bérubé, M.-A., & Fournier, B. (1993). Canadian experience with testing for alkali-aggregate reactivity in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 15, 27–47. [http://doi.org/10.1016/0958-9465\(93\)90037-A](http://doi.org/10.1016/0958-9465(93)90037-A)

BRE Digest 330 (2004). Alkali-silica reaction in concrete. Building Research Establishment Centre for Concrete Construction, UK: 32 pp.

C-, N. A., Colombiana, E., & Julio, D. E. I. (2017). Análisis petrográfico de núcleos de concreto norma astm c-856.

Carman, PC (1940). Constitution of colloidal silica. Transactions, Faraday Society (36): 964- 973.

CHAK, Y.H.C., Y.C. (2005) The 2004 review on prevention of alkali silica reaction in concrete. GEO REPORT No. 167. Civil Engineering and development. Geotechnical Engineering office, Hong Kong.

Community, E., & Growth, S. (n.d.). *No Title*.

C. Tremblay, M.A. Bérubé, B. Fournier, M.D.A. Thomas, K.J. Folliard, Effectiveness of lithium-based products in concrete made with Canadian aggregates susceptible to ASR, ACI Mater. J. 104 (2) (2007) 195–205.

Diamond, S, Thaulow, N (1974). A study of expansion due to alkali-silica reaction as conditioned by the grain size of the reactive aggregate. Cement and Concrete Research (4): 591-607.

ESTUDIO DE LA REACTIVIDAD ÁLCALI-SÍLICE. (2012).

European Community. Competitive and Sustainable Growth Programme. Editor: SINTEF.

Farny, JA, Kosmatka, SH (1997). Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. Concrete Information, Portland Cement Association: 23 pp.

Fernandes, I (2007). Composition of alkali-silica gel related to its location in concrete. Book of abstracts and proceedings (CD-ROM) of the 11th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Porto, Portugal: 10 pp

Fernandes, I (2009). Composition of alkali-silica reaction products at different locations within concrete structures. Materials Characterization (60): 655-668.

Ferraris, CF (1995). Alkali-silica reaction and high performance concrete. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 5745, Gaithersburg, Maryland, USA: 20 pp.

Field, A. R. (n.d.). Alkali-silica reactivity field identification handbook.

Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Fournier, B., & Thomas, M. D. a. (2006). Technical Report Documentation Page Form DOT F 1700 . 7 (8-72)

Reproduction of completed page authorized, 7.

Fournier, B, Bérubé, MA, Thomas, MDA, Smaoui, N, Folliard, KJ (2004). Evaluation and management of concrete structures affected by alkali-silica reaction – a review. CANMET Materials Technology Laboratory, Report Number MTL 2004-11: 59 pp.

Garcia-Diaz, E, Bulteel, D, Monnin, Y, Degrugilliers, P, Fasseu, P (2010). ASR pessimum behavior of siliceous limestone aggregates. *Cement and Concrete Research* (40): 546-549.

Gillott, JE (1975). Alkali-aggregate reactions in concrete. *Engineering Geology* (9): 303-326.

Grattan-Bellew, PE (1986). Is high undulatory extinction in quartz indicative of alkali-expansivity of granitic aggregates? In: Grattan-Bellew, PE (ed). *Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Ottawa, Canada. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA: 434-439.

Hobbs, DW (1988). *Alkali-silica reaction in concrete*. Thomas Telford Ltd. London, UK: 183 pp.

HÖNNUM, R., WIGUM, B.J., PEDERSEN, L.T., GRELK, B., LINDGARD, J. (2006) State of the art report: Key parameters influencing the alkali aggregate reaction.

Isabel, V., & Ramos, M. (2013). Characterization of the potential reactivity to alkalis of Portuguese aggregates for concrete.

Kishitani, K., Nishibayashi, S., and Morinaga, S. (1986), "Response of JCI to Alkali-Aggregate Reaction Problem - Guideline for Determining Potential Alkali Reactivity", *Concrete Alkali-Aggregate Reaction*, Proceedings of the 7th International Conference on AAR, Ottawa, Canada, Noyes, Park Ridge, NJ, USA, 1987, pp. 264-268.

Kurihara, T, Katawaki, K (1989). Effects of moisture control and inhibition on alkali silica reaction. In: Okada, K, Nishibayashi, S and Kawamura, M (eds). *Proceedings of the 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*, Kyoto, Japan: 629-634.

Knudsen, T, Thaulow, N (1975). Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete. *Cement and Concrete Research* (5): 443-454.

Larive, C, Laplaud, A, Coussy, O (2000). The role of water in alkali-silica reaction. In: Bérubé, MA, Fournier, B and Durand, B (eds). Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec, Canada: 61-69.

Lindgård, J, Andiç-Çakır, O, Fernandes, I, Thomas, MDA, Rønning, TF (2012a). Alkali-silica reactions (ASR): literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete Research* (42): 223–243.

Malvar, L. J., Cline, G. D., Burke, D. F., Rollings, R., Sherman, T. W., & Greene, J. L. (2002). *Alkali-Silica Reaction Mitigation : State of the Art and Recommendations*, (99).

Martinez, G. A. (2012). Experimental studies of the behavior of “ pessimum ” aggregates in different test procedures used to evaluate the alkali reactivity of aggregates in concrete APPROVED BY SUPERVISING COMMITTEE :

Monograph on Alkali Aggregate Reaction. (2008).

Nixon, P., & Sims, I. (1996). Testing aggregates for alkali-reactivity. *Materials and Structures*, 29(July), 323–334. <http://doi.org/10.1007/BF02486340>

Olafsson, H (1986). The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars. In: Grattan-Bellew, PE (ed). Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, Canada: 461-465.

Pedneault, A (1996). Development of testing and analytical procedures for the evaluation of the residual potential of reaction, expansion and deterioration of concrete affected by ASR. Master thesis, Laval University, Québec, Canada: 133 pp.

Prezzi, M, Monteiro, PJ, Sposito, G (1997). The alkali-silica reaction. Part I: use of the double-layer theory to explain the behavior of reaction-product gels. *ACI Materials Journal* (94): 10-16.

Poole, A. B. (1992). Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In R. N. Swamy (Ed.), *The alkali-silica reaction in concrete* (pp. 1-28). New York: Van Nostrand Reinhold.

Poyet, S, Sellier, A, Capra, B, Thévenin-Foray, G, Torrenti, J-M, Tournier-Cognon, H, Boudarot, E (2006). Influence of water on alkali-silica reaction: experimental study and numerical simulations. *ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering* (18): 588-596.

Ramlochan, T., Thomas, M., & Gruber, K. a. (2000). Effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(3), 339–344. [http://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00261-6](http://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00261-6)

Russell, P (1983). *Efflorescence and the discoloration of concrete*. Taylor & Francis: 47 pp.

- Sarkar, SL, Zollinger, DG, Mukhopadhyay, AK, Seungwook, L (2004). Handbook for identification of alkali-silica reactivity in airfield pavement – Appendix 1. Texas Transportation Institute, USA: 15 pp.
- Shayan, A. (ed.) (1996) Alkali-aggregate reaction in concrete, Proceedings of the 10th International Conference, Melbourne, Australia, August 1996, CSIRO, Melbourne, Australia.
- Stark, DC (1991). The moisture condition of field concrete exhibiting alkali-silica reactivity. CANMET/ACI 2nd International Conference on Durability of Concrete, SP-126, American Concrete Institute: 973-987.
- St John, DA, Poole, AW, Sims, I (1998). Concrete petrography. A handbook of investigative techniques. Arnold, London, UK: 474 pp.
- Tam, W. H., & Division, M. (2002). KK LIU and W.H. TAM, (December).
- Taylor, HFW (1998). Cement chemistry. 2nd Edition, Thomas Telford Publishing, London: 459 pp.
- Thomas, M., Fournier, B., Folliard, K., Ideker, J., & Shehata, M. (2006). Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 1842–1856. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.014>
- Touma, W. E. (2000). Reaction in Portland Cement Concrete : Testing Methods and Mitigation, 1–556.
- US Department of Transportation. (2013). Alkali-Aggregate Reactivity (Aar) Workshops for Engineers and Practitioners. *Journal of the National Cancer Institute*, 105(January), NP. <http://doi.org/10.1093/jnci/djs534>
- Wigum, BJ (1995). Alkali-aggregate reactions in concrete – properties, classification and testing of Norwegian cataclastic rocks. PhD thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of Technology, Norway: 227 pp.
- Yurtdas, I., Chen, D., Hu, D. W., & Shao, J. F. (2013). Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 47, 165–174. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.046>
- Zollinger, DG, Mukhopadhyay, AK, Ghanem, H, Shon, C-S, Gress, D, Hooton, D (2009). Mitigation of ASR in concrete pavement – combined materials testing. Report IPRF-01-G-002-03-2, Innovative Pavement Research Foundation: 117 pp.