

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**INFLUENCIA DE LA PERMEABILIDAD Y RESISTENCIA EN LA
REACTIVIDAD ÁLCALI AGREGADO DEL CONCRETO**

POR:

VERÓNICA CHÁVEZ MARTÍNEZ

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

MAYO DE 2021



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto. Tesis presentada por Verónica Chávez Martínez como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.A. María de Lourdes Flores Portillo
Coordinador Académico

M.I. José Elías Villa Herrera
Director de Tesis

Mayo 2021

Fecha

Comité:

M.I. José Elías Villa Herrera
M.I. María Selene Ruíz Rivero
M.I. Marisol Villa Herrera
M.I. José Antonio Portillo Ocegüera

© Derechos Reservados
Verónica Chávez Martínez
Blvd. Díaz Ordaz No. 1811
Chihuahua, Chih. México
Mayo 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

16 de junio de 2021

I.C. VERÓNICA CHÁVEZ MARTÍNEZ.

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta dirección, propuesto y dirigido por el director la M.I. José Elías Villa Hernández para que lo desarrolle como tesis con el título **“Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto.”**

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Antecedentes
2. Justificación
3. Fundamentación Teórica
4. Objetivo
5. Hipótesis
6. Metodología
7. Conceptos Generales
8. Tipos de deterioros refac
9. Fisuras en el concreto
10. Reacción álcali-agregado
11. Aspectos químicos que causan deterioro en un concreto
12. Petrografía de los agregados
13. Difracción de rayos X



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

14. Microscopía electrónica de barrido
15. Composición y tipos de cemento
16. Álcalis en el cemento
17. Materiales y métodos
18. Resultados y conclusiones
19. Equipo de difracción de Rayos X
20. Microscopía electrónica de barrido
21. Caracterización del cemento
22. Dosificaciones
23. Conclusiones
24. Bibliografía

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

**EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

R. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

RESUMEN

Un proceso de degradación química en el concreto es la reacción que se presenta con los agregados pétreos y el álcali del cemento, la cual origina su deterioro prematuro. Como consecuencia, se pueden presentar expansiones y agrietamientos. El álcali está formado por los elementos sodio y potasio en forma de óxido Na_2O y K_2O y se encuentran principalmente en el cemento. Los óxidos al momento de interactuar con un sílice deformado, en presencia de suficiente humedad o agua la cual se encuentra en la solución de poro formando un gel el cual al ir incrementándose genera sobre esfuerzos internos en el concreto. Pastas con más óxidos de Na_2O y K_2O tendrán más álcalis y por lo tanto serán más reactivos. Se estudió y observó el comportamiento de un concreto con diferentes porcentajes de permeabilidad y la susceptibilidad de ser atacado químicamente por absorción de una solución alcalina como objetivo de esta investigación. Se utilizaron tres tipos de resistencias $f'_c=200$, $f'_c=300$, $f'_c=400$. Las metodologías empleadas fueron la ASTM C 642- absorción de agua del concreto endurecido y posteriormente la ASTM C 1260 modificada, donde la barra fue de 7.5 x 7.5 x 28.5 cm determinando el carácter reactivo del concreto. Se realizaron otros estudios complementarios como petrografías, difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido. Independientemente del carácter reactivo de los materiales existe una relación directamente proporcional, "a mayor resistencia, menor la permeabilidad y menor reacción química" debido a los diferentes porcentajes de agua que absorbió cada una de las barras.

Palabras clave: álcali, agregado, concreto.

ABSTRACT

A process of chemical degradation in concrete is the reaction that occurs with the stone aggregates and the alkali of the cement, which causes its premature deterioration. As a result, expansions and cracks may occur. Alkali is formed by the elements sodium and potassium in the form of oxide Na₂O and K₂O and are mainly found in cement. The oxides at the time of interacting with a deformed silica, in the presence of sufficient moisture or water which is in the pore solution forming a gel which when increasing generates on internal forces in the concrete. Pastes with more Oxides of Na₂O and K₂O will have more alkalis and therefore be more reactive. We studied and observed the behavior of a concrete with different percentages of permeability and the susceptibility of being chemically attacked by absorption of an alkaline solution as an objective of this research. Three types of resistances were used $f'_c=200$, $f'_c=300$, $f'_c=400$. The methodologies used were the ASTM C 642- water absorption from the hardened concrete and later the modified ASTM C 1260, where the bar was 7.5 x 7.5 x 28.5 cm determining the reactive character of the concrete. Other complementary studies such as petrography, X-ray diffraction and scanning electron microscopy were performed. Regardless of the reactive nature of the materials there is a directly proportional relationship, "the higher the resistance, the lower the permeability and the lower the chemical reaction" due to the different percentages of water absorbed by each of the bars.

Keywords : Alkali, aggregate, concrete.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

Índice de contenido

1.-Antecedentes.....	1
2.- Justificación	2
3.- Fundamentación Teórica	2
3.1.- Penetración del agua en el concreto	3
4.- Objetivo.....	3
5.- Hipótesis	3
6.- Metodología	3
6.1.- ASTM C 642	4
6.1.1.-ASTM C 1260 MODIFICADA (Sección transversal de la barra 75 x 75mm).....	6
7. Conceptos generales:	7
7.1. Naturaleza y origen del agregado.	7
7.1.1. Agregado grueso.	7
7.1.2. Agregado fino.....	10
7.1.3. Combinación Grava y Arena	12
7.2. Tipos de suelos.....	13
7.2.1. Rocas ígneas	14
7.2.2. Rocas sedimentarias	14
7.2.3. Rocas metamórficas	15
8.- Tipos de deterioros relacionados con los agregados.....	16
8.1.- Deterioro por acción física.	17
8.1.1.- Deterioro por acción química.	17



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

8.1.2.- Deterioros producidos por el congelamiento y deshielo de la pasta de cemento endurecido.	17
8.1.3.- Deterioros producidos por el uso de las sales de deshielo.	18
8.1.4.- Deterioro producido por el congelamiento y deshielo producido en los agregados.	18
9.- Fisuras en el concreto.	19
9.1.- Fisuras por contracción plástica	19
9.1.2.- Fisuras contracción por secado.	20
9.1.3.- Fisuras contracción por carbonatación	20
9.1.4.- Fisuras por contracción térmica.	21
9.2.- Como evitar las fisuras	21
9.3.- Fotos de variedad de fisuras en el concreto	21
10.- Reacción álcali-agregado	22
10.1.- Importancia del Tema	22
10.2.- Factores que afectan la reactividad álcali agregado.	23
10.3.- Humedad y temperatura.	24
10.4.- Deterioros típicos de la reacción álcali sílice.	24
10.5.- Gel de composición sílico-calcio-alcalina.	25
11.- Aspectos químicos que causan deterioro en un concreto.	25
12.- Petrografía de los agregados.	27
13.- Difracción de rayos X.	28
13.1.- Fluorescencia de rayos X.	30
14.- Microscopía electrónica de barrido.	31
15.- Composición y tipos de cemento.	31
15.1.- Cemento Portland.	32



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

15.1.1.- Normativa	32
15.1.2.- Tipos de cementos portland.....	32
16.- Álcalis en el cemento.....	34
16.1.- Métodos para evaluar el potencial de reactividad álcali sílice.....	34
16.1.1.- ASTM C 227	34
16.1.2.- ASTM C 289	34
16.1.3.- ASTM C 295	35
16.1.4.- ASTM C 1567	35
16.1.5.- ASTM C 441	35
16.1.6.- ASTM C 1260	35
16.1.7.- ASTM C 1293	35
17.- Materiales y métodos.....	36
17.1.- Selección de materiales.....	37
17.1.1- Lo que se le realizó a cada uno de los materiales	37
17.1.2. Dosificación del concreto	37
17.1.3.- Agregado Grueso	38
17.1.4. Densidad Relativa.....	38
17.1.5.- Contenido de humedad.....	39
17.1.6.- Peso volumétrico seco suelto.	39
17.1.7.- Peso volumétrico seco y compactado.....	39
17.2.- Agregado Fino	40
17.2.1.- Densidad Relativa.....	40
17.2.2.- Porcentaje de Absorción.....	40
17.2.3.- Contenido de Humedad.....	41



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

17.2.4.- Peso volumétrico seco suelto.	41
17.2.5.- Módulo de Finura.	41
18.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES	43
18.1.- CACTERIZACION DE LOS AGREGADOS	43
18.1.1.- Estudio petrográfico	43
18.1.2.- Imágenes del procedimiento.....	44
18.1.3.- Arena A1 (Arena de GCC)	44
18.1.4.- Fragmentos sub redondeados	45
18.1.5.- Abundancia en la muestra:	45
18.2.- Grava G1 (Grava Caliza)	45
18.2.1.- Muestra de mano:.....	46
18.2.2.- Descripción microscópica de 1 fragmento:	46
18.2.3.- Porcentajes:.....	46
19.- Equipo de difracción de Rayos X.....	46
19.1.- Gráfica de difracción de Rayos X (Arena A1)	47
19.2.- Gráfica de difracción de Rayos X Grava G1 (Grava Caliza)	48
20.- Microscopía electrónica de barrido.	49
20.1.- Microscopía electrónica de barrido Arena A1	49
20.1.1.- Microscopía electrónica de barrido (Grava G1)	50
21.- Caracterización del cemento	51
21.1.- Resumen de fluorescencia en cementos.....	51
21.2.- Gráfica de Equipo de difracción de Rayos X (Cemento C1)	52
21.3.- Microscopía electrónica de barrido (Cemento C1).....	53
22.- DOSIFICACIONES.	54



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

22.1.- DATOS DEL LABORATORIO:.....	54
22.1.1.- ABSORCIÓN	56
23.- CONCLUSIONES	58
24.- REFERENCIAS	59
25.- Anexos.....	63
25.1. Anexo I.....	63
25.1.1. Normativa ASTM C 1260	63
25.1.2. EQUIPO	63
25.1.3. Recipientes de almacenaje de las barras –	64
25.1.4. Baño de temperatura constante.....	64
25.1.5. Solución de hidróxido de sodio	64
25.1.6. Preparación del agregado –.....	65
25.1.7. Preparación de los moldes –.....	66
25.1.8. Mezclado del mortero –.....	66
25.1.9. Moldeo de los especímenes de ensayo –	67
25.1.10. Almacenaje inicial y medición de las barras –.....	67
25.1.11. Lecturas de cero –	67
25.1.12. Almacenaje y lecturas subsecuentes –.....	68
25.2 Anexo II.....	68
25.2.1. Normativa ASTM C 1293	68
25.2.2. Equipo.....	70
25.2.3. Recipientes de Almacenaje –.....	70
25.2.4. Preparación del agregado-.....	72
25.2.5. Preparación de los Moldes –.....	73



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

25.2.6. Lectura cero –	73
25.2.7. Almacenaje y medición –	73
25.3. Anexo III.....	74
25.3.1. Estudio petrográfico	74
25.3.2. Fragmentos subredondeados de:	74
25.3.3. Abundancia en la muestra:	75
25.3.4. Fragmentos subredondeados de:	75
25.3.5. Abundancia en la muestra:	75
25.3.6. Muestra de mano:	76
25.3.7. Descripción microscópica de 1 fragmento:	76
25.3.8. Porcentajes:	76
25.3.9. Muestra de mano:	76
25.3.10. Descripción microscópica de 1 fragmento:	76
25.3.11. Porcentajes:	77
25.3.12. Muestra de mano:	77
25.3.13. Descripción microscópica de 1 fragmento:	77
25.3.14. Porcentajes aproximados solamente de ese fragmento:	77
25.4. Anexo IV	78
25.4.1. Difracción de Rayos X.....	78
25.4.15. Arena A1	79
25.4.16. Arena A2	80
25.4.17. Arena A3.....	81
25.4.18. Grava G1	82
25.4.19. Grava G2	83



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

25.4.20. Grava G3	84
-------------------------	----

Índice de Figuras

Figura 1.1. Agregado grueso calizo.	9
Figura 1.2. Grietas tipo D en losa de concreto.....	9
Figura 1.3. Agregado fino de origen sedimentario.	12
Figura 1.4. Gravas y arenas de río.....	12
Figura 1.5. Rocas de río de origen volcánico.....	14
Figura 1.6. Roca caliza, origen sedimentario.....	15
Figura 1.8. Desprendimiento del lecho superficial del concreto.....	18
Figura 1.9. Grietas y manchado en el concreto.	19
Figura 2.1. Fisuración por reactividad álcali sílice.....	24
Figura 2.2. Formación del gel (Nicole Andrade, 2012).....	25
Figura 2.3. Ejemplo de una petrografía.....	27
Figura 2.4. Ejemplo de gráfico de difracción de rayos X.....	29
Figura 2.5. Ejemplo de gráfica de microscopía electrónica de barrido.....	31
Figura 2.6. Cemento Portland.....	32
Figura 3. Petrografía de agregados	43
Figura 3.1. Imágenes del procedimiento	44
Figura 4. Arena A1	44
Figura 4.1 Grava G1	45
Figura 4.2. Equipo de difracción de Rayos X ARENA A1 (Arena de GCC)	46
Figura 4.3. Tabla y gráfica arrojada de Equipo de difracción de Rayos X (Arena A1 GCC)	47
Figura 4.4. Tabla y gráfica arrojada de Equipo de difracción de Rayos X Grava G1 (Grava Caliza)	48
Figura 4.6. Tabla y gráfica de análisis de microscopía electrónica de barrido Arena A1 (GCC).....	49



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la reactividad álcali agregado del concreto

Figura 4.8. Tabla y gráfica de análisis de microscopía electrónica de barrido (Grava G1)	50
Figura 4.10. Tabla y gráfica arrojada del Equipo de difracción de Rayos X Muestra de cemento C1	52
Figura 4.11. Tabla y gráfica de análisis de microscopía electrónica de barrido (Muestra de cemento C1)	53
Figura 5. Barras de prueba 75 x 75mm	57
Figura 5.1. Barras sumergidas NAOH en prueba.	57
Figura 5.2. Barras de Concreto a Diferentes Dosificaciones	58



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

1.-Antecedentes

La reacción álcali agregado (RAA) es uno de los principales procesos de degradación química en el concreto. A la fecha es el más estudiado (Rajabipour et al., 2015). Este ataque empieza a desencadenarse en condiciones ambientales cálido-húmedas, debido a minerales reactivos en el agregado (sílice, carbonatos y silicatos) con los hidróxidos alcalinos derivados del álcali (Na_2O y K_2O) en el cemento. En general, se considera la reacción álcali sílice como la más común debido a que este elemento se encuentra de alguna forma en la mayoría de los agregados pétreos (Lindgård et al., 2012). Además cuando el ambiente es altamente alcalino ($\text{pH} > 13$) se produce un gel que se expande en presencia del agua, (Hasdemir et al., 2012; Lindgård et al., 2012) causando agrietamientos en su imagen externa y daños en su estructura interna. Otras formas de reactividad se darán en agregados que contienen sulfuros de hierro, o que por metamorfismo estén en contacto con soluciones ácidas, también la permeabilidad que puede tener un concreto, además de que como los álcalis están sujetos al hidróxido de sodio y potasio, podrían dar otras reacciones (Soriano, 1998; Galvis, 2007) la aparición de este problema en los concretos elaborados con cemento alto en álcali va de 1 a 5 años y con cemento bajo en álcali, hasta los 12 años (Hooton et al., 2013). Actualmente existe confusión referente a los posibles mecanismos usados para explicar la complejidad de muchos procesos en el envejecimiento del concreto. La humedad juega un papel importante en la mayoría de las reacciones químicas, en los procesos físico químicos y en los fenómenos de deterioro del concreto, esta se adhiere físicamente en los poros, y se liga mediante absorción (Owsiak et al., 2015).

Desde que Stanton (1940) en California Estados Unidos, descubrió esta patología que afectaba la durabilidad de los concretos, comienza la carrera por tratar de desarrollar métodos principalmente acelerados para determinar el potencial de esta reacción, así como medidas de mitigación (Lindgård, 2012; Latifee y Rangaraju, 2015). En la Figura 1 se muestra el típico agrietamiento en el concreto producido por la RAA.



Figura 1. Agrietamiento en el concreto producto de la RAA.

2.- Justificación

Existen innumerables obras de concreto afectadas por la reacción álcali agregado (RAA) en algunos países donde no existe una regulación en específico y solo recomendaciones generales para esta problemática, por lo que puede llegar a causar grandes costos de reparación y reconstrucción en la deterioración prematura en estructuras de concreto (Binal, 2015; Rajabipour et al., 2015). Un ejemplo de ello es la presa Val de la Mare, construida en Inglaterra, terminada en 1960, para 1971 se empezaron a detectar cambios de coloración en el concreto con la aparición de las primeras fisuras superficiales. Cualquier estructura de concreto puede estar expuesta, por lo que encontrar un método que brinde resultados con la mayor rapidez, confiables y de aplicabilidad universal es importante (Latifee y Rangaraju, 2015).

3.- Fundamentación Teórica

Factores externos a una estructura como la presión que se pudiera generar sobre ella o su mismo espesor, entre otros, podrían determinar si el concreto permite la absorción del agua. Debemos tener cuidado ya que, aunque se cuente con un concreto de muy baja porosidad, el agua podría atravesarlo si este tiene un espesor delgado. Hablar de un concreto impermeable, es hablar de alta resistencia, aunque de igual forma, este podría fallar si su sección no es lo suficientemente gruesa ante altas presiones. Debemos tener en cuenta no solo el diseño de la mezcla de un concreto, si no también, la absorción de los



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

materiales que lo constituyan para así poder decir que se cuenta con un concreto de baja permeabilidad (Hermida, 2013).

3.1.- Penetración del agua en el concreto

La penetración del agua al interior del concreto se da por varios aspectos físicos que van desde la permeabilidad, la absorción capilar, hasta la electromigración, pero en el campo de la construcción los factores más importantes son la absorción por capilaridad y altas presiones. La absorción capilar es considerada como la forma más detectada en la que el agua entra a estructuras de concreto reforzado. El agua al estar en contacto con la superficie de un concreto convencional, se comportará similar a una esponja. Un concreto impermeable no debería agrietarse (Hermida, 2013).

4.- Objetivo

Se estudió y observó el comportamiento de un concreto con diferentes dosificaciones, variando su revenimiento, así como cantidades de cemento-agregado, revisando la susceptibilidad al ser atacado químicamente, lo cual es producto de estas variables. Las metodologías que se emplearon fueron: ASTM C 642- absorción de agua del concreto endurecido y ASTM C 1260 modificada, para determinar el carácter reactivo del concreto.

5.- Hipótesis

Un concreto, que posee un alto contenido de álcali y agregados reactivos, sufre menor daño aunque posea un índice alto de álcali y agregados reactivos, la resistencia e impermeabilidad de un concreto de reacción químico harán que sea menos susceptible.

6.- Metodología

La recomendación general actual en la medición de la reactividad en la mezcla de los concretos es llevar a cabo un estudio petrográfico, complementado con estudios como difracción de rayos X y espectrometría de masas. Posteriormente se utilizaron los procedimientos ASTM C 1260, tanto en barras



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

de mortero como en barras de concreto, los cuales son aceptados como pruebas de uso general a nivel internacional. Se tomaron agregados de bancos seleccionados, así como la selección del cemento. Se comparó la reactividad álcali agregado del concreto mediante tres niveles de permeabilidad en las muestras. Se llevó a cabo el grado de absorción mediante la prueba ASTM C 642 y posteriormente la ASTM C 1260 modificada (ya que es barra de concreto grande).

6.1.- ASTM C 642

Este método determina la densidad, cuanto porcentaje de agua absorbe un concreto y porcentaje de vacíos en el concreto endurecido.

Las pruebas se pueden hacer en moldes de cilindros, en moldes de vigas, solo se pide que el volumen de cada porción no sea menor de 350 cm³. Cada prueba que se realice no debe tener grietas, fisuras visibles o bordes rotos.

Se pesa el concreto de muestra, se coloca en un horno a temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por no menos de 24h. Las muestras se sacan del horno y se secan en aire seco, se les determina nuevamente su masa. Si el espécimen se encontraba ya seco cuando se sacó del horno por primera vez, y la muestra de concreto concuerda con muy poca variación respecto a la primera, se le puede considerar seco. Si el espécimen estaba aún mojado al determinar el peso de la muestra, se le coloca nuevamente a un segundo tratamiento de secado por 24h y se determina su peso nuevamente. Si un tercer valor de la muestra de concreto concuerda con esta segunda determinación se puede considerar seco el espécimen. Si la diferencia de valores de la muestra excede del 0.5% del valor menor de la muestra comparada, se volverá a colocar la muestra de concreto al horno para un periodo adicional de secado por 24 h. Vamos a repetir el procedimiento hasta que la diferencia obtenida entre dos valores sucesivos de sea menor que el 0.5% del menor valor obtenido.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Después del secado final, enfriamiento y determinación del peso de la muestra de concreto, los especímenes se colocarán en agua en una temperatura de 21°C aproximadamente por un período no menor de 48h, con la muestra ya saturada de agua se tomará una toalla, se removerá la humedad superficial de los especímenes para dejarlos en condición de saturados, se pesará la muestra saturada de agua y se volverá a sumergir en agua otras 24h, se pesará nuevamente la muestra, si el segundo peso de la muestra tiene un incremento menor al 0.5% del 1er peso, se determinará el peso correcto de la muestra saturada, si no es así, se dejará más horas la muestra sumergida en agua para que termine de saturarse.

Después pondremos un recipiente con agua potable, y se dejará hervir por u 5hr, lo dejaremos enfriar al aire por pérdida natural de calor, por un tiempo no menor de 14h, hasta que su temperatura final sea de 20 a 25°C. Se le remueve la humedad superficial con una toalla y se pesará la muestra de concreto.

Después de su inmersión en agua y ebullición, los especímenes se suspenden dentro del agua por un alambre y se determina su masa sumergida aparente.

- Absorción después de inmersión, % = $[(B-A)/A] \times 100$

- Absorción después de inmersión y ebullición, % = $[(C-A)/A] \times 100$

- Densidad seca global (o bruta) , = $[A/(C - D)].\rho = g$

- Densidad global (o bruta) después de inmersión = $[B/(C-D)].\rho$

- Densidad global (o bruta) después de inmersión y ebullición = $[C/(C-D)].\rho$

A = Masa de muestra seca al horno, al aire, g

B= Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión, g

C= Masa de muestra saturada de superficie seca después de inmersión y ebullición, g.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

D= Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición, g

ρ = Densidad del agua = $1\text{Mg/m}^3 = 1\text{g/cm}^3$

6.1.1.-ASTM C 1260 MODIFICADA (Sección transversal de la barra 75 x 75mm)

ASTM C 1260 es una prueba estandarizada usada por químicos del cemento, desarrolladores en tecnologías del concreto e industria para determinar la susceptibilidad de un agregado a la reacción álcali sílice ó carbonato.

Los agregados que son usados en esta prueba son molidos hasta convertirlos en arenas, y graduados según lo indica la prueba. Una relación de agregado / cemento de 2.25 es usado al igual que una relación de agua / cemento de 0.45 a 0.47 (relación por masa).

Suficiente mortero es llevado a cabo para hacer 3 barras de $25 \times 25 \times 285$ mm que son curadas posteriormente por 24 horas en un cuarto húmedo a $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$, humedad relativa mínima de 54%, luego las barras son desmoldadas y colocadas en un contenedor con agua. La modificación de esta prueba consistirá en agrandar la en tamaño de la barra para que sea de concreto en vez de mortero.

El contenedor con agua es mantenido a 80°C por 24 horas. Después se toma lectura de la barra saturada en agua y se procede a sumergir las barras en contenedor en solución de hidróxido de sodio (40gr/Lt) a 80°C .

El volumen de las barras de la solución deberá ser entre 3.5 a 4.5 veces el volumen de las barras de mortero. Las barras serán medidas por 16 días aproximadamente a la misma hora, de ser necesario la lectura se hará una vez por semana.

Siguiendo la misma metodología estándar, se lleva a cabo la evaluación de la reactividad álcali agregado, pero modificando la barra a un tamaño de ASTM C 1293 $75 \times 75 \times 285$ mm y aumentando el volumen de la solución conforme al tamaño de la barra con cada una de las tres resistencias.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

7. Conceptos generales:

7.1. Naturaleza y origen del agregado.

Los agregados vienen de la explotación de fuentes naturales como ejemplo tenemos depósitos de arrastres fluviales como son las arenas y gravas de río, cantos rodados, diversas rocas, escoria volcánica, etc. (SCT, 1984, 2000).

Los materiales ya disgregados que se retienen en la malla # 3 se denominan guijarros (fragmentos de roca); a los que pasan dicha malla reteniéndose en la malla # 4 se le llama gravilla; a los que siguen y se retienen en la malla # 200 se les llama arenas; y los que pasan estas últimas se les conocen como finos, pudiendo ser estos últimos limos y/o arcillas. (Juárez, 2005).

Se considera que el agregado en el concreto como inerte e inactivo sin ninguna reacción físico química dentro de este, pero existen ciertos tipos de rocas y minerales que bajo condiciones favorables de temperatura y humedad reaccionan de manera deletérea en el concreto endurecido causando expansiones que resultan en agrietamientos, por lo que produce que el concreto se desintegre. Es importante detectar este tipo de elementos que son altamente reactivos en los agregados para no llegar a tener problemas con el concreto endurecido a futuro. (Golmakani, 2013).

Analizar el agregado es importante y necesario ya que representa $\frac{3}{4}$ partes de la pasta de concreto teniendo aproximadamente hasta el 85% del peso total de este. (Kosmatka, et al., 2004; Ugur, et al., 2010).

El agregado no solo podría limitar la resistencia del concreto, sino también su durabilidad y desempeño. (SCT, 1984, 2000).

7.1.1. Agregado grueso.

El agregado grueso debe de cumplir con ciertas propiedades como: su forma, textura, absorción, tamaño máximo, resistencia al ataque de sulfatos y dureza. (SCT, 1984, 2000).



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Se requieren de pruebas de laboratorio para analizar el agregado grueso para poder utilizarlo en el concreto, algunas de las pruebas más importantes son:

Masa volumétrica suelta: Esta prueba nos dice la cantidad de material grueso que hay por m^3 .

Masa volumétrica compacta: Esta prueba no dice la cantidad de material grueso que hay por m^3 pero compacto.

Densidad relativa aparente: No dice el peso del material grueso, ya que también por normativa se nos pide cierta densidad.

Densidad relativa absorción: Para ver cuanta humedad absorbe, ya que tendría mucha absorción de cemento.

Partículas alargadas y lajeadas: Las partículas gruesas no deben de tener un alto porcentaje de material alargado, ni lajeado deber ser partículas angulosas.

Desgaste de los ángulos: Esta prueba nos dice que tan resistente es el el material grueso con cierta carga.

Intemperismo acelerado: Nos sirve para determinar que tanto se desgasta el material ante la presencia del sulfato de sodio.

Granulometría gruesa: Nos dice la proporción que retiene cada malla ya que es importante porque la norma nos pide ciertos parámetros para que se pueda utilizar como concreto, su tamaño será desde $2\frac{1}{2}$ " a $1/4$ ", esto nos ayudará a tener un agregado más denso y un ahorro en el cemento. (SCT, 1984, 2000).

A mayor sea el tamaño del agregado será menor la cantidad de agua requerida, y para su trabajabilidad y riqueza de mezcla la relación agua/cemento puede reducirse, con el consiguiente aumento de la resistencia. Aunque como los dijimos anteriormente hay un límite para el tamaño del agregado ya que al sobre pasar el límite este puede causar efectos nocivos generando una menor adherencia y la discontinuidad en las partículas. (SCT, 1984, 2000).

Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Ver figura 1.1 agregado grueso que se utilizó en la investigación.



Figura 1.1. Agregado grueso calizo.

En México, el tamaño máximo de los agregados que se usa es de 1-1/2" aunque el departamento de transporte de Kansas, USA, se ha preocupado por la durabilidad del concreto, y ha sugerido limitar el tamaño del agregado a 1" en agregados calizos para protegerse de cuarteaduras tipo D.

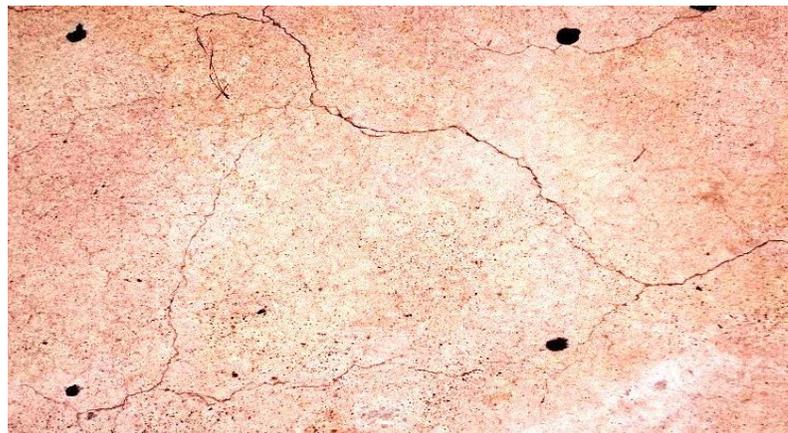


Figura 1.2. Grietas tipo D en losa de concreto.

Fisura Química: Por reactividad álcali – agregado.

La grava no siempre tendrá el mismo tamaño nominal, ya que dependerá de los espacios donde se colocará para que pueda tener un buen desplazamiento



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

cuando se coloque y se compacte. El Código ACI 318 nos dice que el tamaño de la grava no puede ser mayor a $1/3$ partes del espesor en losas de pavimento, debido a que se requiere menor proporción de mortero en la mezcla de concreto, es decir menos arena y cemento, criterio que hay que escoger con cautela.

La grava debe tener una superficie rugosa ya que al mezclarse con cemento, arena y agua tendrá mayor fricción.

Hay veces que colocan agregados con formas planas como boleas de cantos rodados a esto nos referimos que son piedras que han estado rodando muchos años en los ríos o donde hay corrientes de agua, por lo tanto toda su circunferencia es completamente lisa, esto disminuye mucho la resistencia en el concreto, ya que no tendrá una trabazón entre partículas lisas y arena con cemento.

ASTM C 88 Define la importancia de la sanidad de los agregados, ya que la sanidad se describe como su aptitud para soportar las acciones agresivas a que se expone el concreto que los contiene, especialmente el intemperismo.

7.1.2. Agregado fino

El agregado fino es a lo que comúnmente llamamos arena, puede ser natural o puede ser roca triturada y luego cribarla. La norma N-CMT-2-02-002/02 (Materiales para concreto hidráulico) nos dice que el tamaño de la partícula debe ser entre 75 micrómetro (malla No. 200) y 4,75 micrómetros (malla No. 4).

Para tener un buen agregado fino se hacen varias pruebas de laboratorio, como pasa en el agregado grueso: entre las pruebas más usuales son:

Masa volumétrica suelta y compacta, densidad relativa aparente y absorción, estas pruebas que se mencionaron también se hacen en el agregado grueso y son el mismo procedimiento.

Las siguientes pruebas son únicas de los agregados finos:



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Porcentaje de finos: Debemos tener no más del 5% de finos ya que es perjudicial para el concreto.

Intemperismo acelerado: Con el fin de conocer la sanidad de las partículas, ya que si se encuentran agrietas pueden llegar a fragmentarse.

Abrasión de los ángulos: Para determinar la dureza de las partículas.

Prueba de materia orgánica: Entre más materia orgánica tenga un agregado fino más perjudicial puede ser para el concreto (tales como raicillas, hojarascas).

Equivalente de arena: Con esta prueba podremos saber la cantidad de arena y finos perjudiciales que puede tener un material.

Módulo de finura: es útil para estimar las proporciones de agregado fino y grueso.

La especificación señala como límites de tolerancia un valor mínimo de 2.3 y máximo de 3.1, con el requisito adicional de que ningún número de partículas represente más del 45% del total. (ASTM C 33).

Granulometría fina: La composición granulométrica de la arena nos sirve para saber el porcentaje de los diversos tamaños del agregado en una muestra, se determinara pasándola por siete mallas:

La malla de 9.5 mm (3/8"), malla 4.75mm (No. 4), malla 2.36mm (No. 8),
1.18mm (No. 16), 600µm (No. 30), 300µm (No. 50), 150µm (No. 100).

Ver figura 1.3 agregado fino que se utilizó en la investigación.

Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto



Figura 1.3. Agregado fino de origen sedimentario.

7.1.3. Combinación Grava y Arena

En relación a estos dos agregados se busca una combinación de tal manera que se obtenga la menor cantidad de vacíos.

Para buscar el mínimo contenido de vacíos, hay que determinar experimentalmente la variación del peso volumétrico compactado de los dos agregados combinados (agregado grueso y agregado fino), se va cambiando la proporción entre grava y arena, a fin de establecer la proporción que produce el máximo peso volumétrico, esto quiere decir que se escogerá la combinación que tenga el mínimo contenidos de vacíos. (SCT, 1984, 2000).

Ver figura 1.4 combinación de arena y grava.



Figura 1.4. Gravas y arenas de río.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Otro procedimiento es el descrito por (ACI 211.1 -1999) Conforme a este, conociendo el tamaño máximo del agregado, el módulo de finura de la arena y el peso volumétrico de la grava compactada con varilla, es posible establecer la proporción de la grava en la unidad de volumen de concreto.

7.2. Tipos de suelos.

Tenemos diferentes tipos de suelos que componen nuestro mundo, a continuación daremos a conocer los diferentes materiales.

Arcilla, Limo, Arena Fina, Arena Gruesa, Grava, Roca Madre.

Arcillas: Cualquier material fino que pase por la malla No. 200 y se compone principalmente de silicatos de aluminio hidratados. Es el producto final de los numerosos minerales que se encuentran en las rocas ígneas y metamórficas sometidos a un agente de descomposición. (Juárez, 2005).

Limo: Son suelos finos, de poca o ninguna plasticidad y de granulometría generalmente uniforme. Su origen puede ser puramente mineral o parcialmente orgánico. (Graux, 1975).

Arena Fina: Es aquel tipo de suelo que posee una textura ligera. Son suelos sueltos de poca cohesión, escasa capacidad de retener agua, propensos a la desecación y fáciles de trabajar. Sus dimensiones son inferiores a los 5 milímetros. (Graux, 1975)

Arena gruesa: Es un conjunto de partículas de rocas disgregadas, de origen aluvial esto quiere decir que es material formado a partir de materiales arrastrados y depositados por corrientes de agua. Y coluvial, estamos hablando de materiales de diversos tamaños pero homogéneos, se encuentran en vertientes montañosas y se formaron por alteración y desintegración de las rocas. Las partículas varían de tamaño entre 0,063 y 2mm. (Graux, 1975).

Grava: Son rocas fragmentadas y disgregadas, también pueden ser piedras trituradas que se utilizan en la construcción.

Roca madre: El la clase de roca sobre la cual se sustenta el suelo.

7.2.1. Rocas ígneas

Las rocas ígneas se forman conforme se enfría y se solidifica una roca fundida o magma. Este proceso llega a ser lento, si ocurre en las profundidades de la corteza, o puede ser más rápido, si ocurre en la superficie.

Si ocurre en las profundidades el resultado son rocas plutónicas o intrusivas, estas son formadas por cristales gruesos o rocas volcánicas o extrusivas. (Tarbuck y Lutgens, 2005) Ver figura 1.5 rocas ígneas.



Figura 1.5. Rocas de río de origen volcánico.

7.2.2. Rocas sedimentarias

Una roca sedimentaria comienza con la alteración y la destrucción de rocas que ya existen, como consecuencia da lugar a los productos de la meteorización, que se pueden depositar en el mismo lugar donde se originaron, formando depósitos residuales. En casos más frecuentes los materiales son transportados por los ríos, el hielo, el viento o en corrientes oceánicas hacia zonas más alejadas de su área de origen. Por último estos materiales llegan a

Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

acumularse en cuencas sedimentarias formando los sedimentos que, una vez consolidados, originan las rocas sedimentarias. Las rocas sedimentarias son también cuando se presentan fósiles, restos de seres vivos, también se pueden observar en algunas rocas metamórficas de origen sedimentario.

Así, por ejemplo, una montaña va a desaparecer inevitablemente por consecuencia de la erosión de las rocas que se encuentran en la superficie. (Tarbuck y Lutgens, 2005)

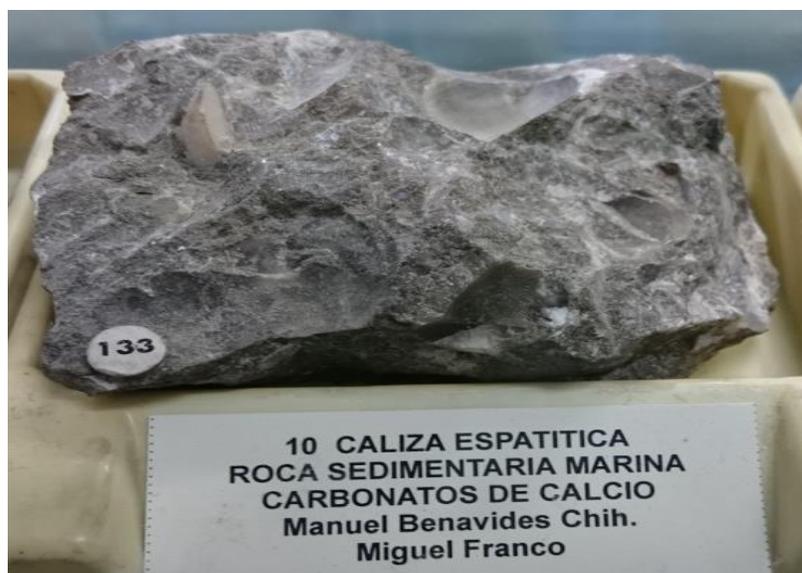


Figura 1.6. Roca caliza, origen sedimentario.

7.2.3. Rocas metamórficas

Cualquier roca metamórfica se ha hecho por la evolución de otra roca, al estar en un ambiente muy distinto a la de su formación, mucho más caliente o más frío o alguna presión muy diferente a la anterior. Ver figura 1.7 rocas metamórficas. (Tarbuck y Lutgens, 2005)

Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto



Figura 1.7. Roca metamórfica ignea.

Cuando esto ocurre la roca tiende a evolucionar hasta alcanzar características que la hagan estable bajo esas nuevas condiciones.

Este tipo de rocas abundan en zonas profundas de la corteza, al distribuirse se clasifican en zonas distintas según el grado de metamorfismo.

8.- Tipos de deterioros relacionados con los agregados.

Una obra bien diseñada, construida con concreto hidráulico se busca buscan dos cosas, que sea durable y que sea de bajo mantenimiento.

Desafortunadamente gran número de deterioros pueden ocurrir entre el concreto y el medio ambiente de servicio. En contraste con lo que se piensa que el concreto es un material inerte, de hecho es un complejo material cuyas propiedades pueden cambiar con el paso del tiempo. Algunos de estos cambios pueden ser benéficos al ir aumentando la resistencia del concreto a través de la hidratación o de aditivos minerales; pero estos cambios también pueden ser dañinos resultando en un deterioro prematuro.

Existen diferentes tipos de deterioros relacionado con el manejo inadecuado de los materiales. Estos se dividen en los que se producen por mecanismos de acción física y mecanismos de acción química. (SCT 1984, 2000)



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

8.1.- Deterioro por acción física.

Estos son producidos por congelamiento y deshielo de la pasta del concreto endurecido. (SCT 1984, 2000)

8.1.1.- Deterioro por acción química.

Estos deterioros son producidos por la reacción álcali-sílice, la reacción álcali-carbonato y la reacción álcali-silicato. Ataque externo e interno de sulfatos y del acero de refuerzo en el concreto. (SCT 1984, 2000)

8.1.2.- Deterioros producidos por el congelamiento y deshielo de la pasta de cemento endurecido.

El deterioro de la pasta de cemento puede ser causado por problemas de congelamiento y deshielo. Las manifestaciones superficiales son descamación, desprendimientos, agrietamientos en forma de mapa. Se inician generalmente cerca de las juntas o grietas con la posibilidad de afectar a la matriz interna del concreto. Las causas son: La saturación de la pasta de cemento sometido a repetidos ciclos de congelación y deshielo. El tiempo es de 1 a 5 años, las medidas de prevención o de reducción del deterioro son: utilización de un aditivo inclusor de aire con el fin de establecer un sistema protector de vacíos de aire. Ver figura 1.8 desprendimiento del lecho superficial del concreto. (SCT 1984, 2000).





Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Figura 1.8. Desprendimiento del lecho superficial del concreto.

Existen tres niveles de severidad en las grietas que se generan por el efecto de congelamiento y deshielo:

1. Nivel bajo: Son estrechas sin desprendimientos, no existen baches.
2. Nivel moderado: Se definen bien y algunos pedazos son flojos o se han desprendido.
3. Nivel alto: Bien definidas con un buen porcentaje de masa desprendida.

8.1.3.- Deterioros producidos por el uso de las sales de deshielo.

Se manifiesta como descamación o fracturado de la capa superficial del concreto, con posible alteración del sistema de poros del concreto y la hidratación de la pasta del cemento dejando manchas en juntas y grietas.

El uso de químicos para deshielo puede incrementar el deterioro producido por el congelamiento y deshielo interactuando con los productos de hidratación del concreto. Su tiempo de aparición es de 1 a 5 años. Se recomienda un contenido de 335 kg/m³ como mínimo de cemento, limitando la relación agua/cemento a no más de 0.45 y darle mínimo 30 días antes del uso de sales de deshielo. (SCT 1984,2000).

8.1.4.- Deterioro producido por el congelamiento y deshielo producido en los agregados.

Agrietamientos paralelos a juntas y grietas que conforme al tiempo pueden presentar descamación y manchado en la superficie. La acción de congelamiento y deshielo en los agregados resultan en fragmentación o una excesiva dilatación del agregado. El tiempo de aparición es de 10 a 15 años. Las medidas de prevención o reducción consisten en el uso de agregados no susceptibles o en la reducción del tamaño máximo del agregado grueso. Ver figura 1.9 grietas y manchado en el concreto. (SCT 1984, 2000).



Figura 1.9. Grietas y manchado en el concreto.

9.- Fisuras en el concreto. (Viadud, IMCYC 2013).

Las fisuras son pequeñas cuarteaduras que aparecen en la superficie del concreto endurecido, debido a la existencia de tensiones superiores a la resistencia de este. Cuando una fisura atraviesa una pieza de concreto de lado a lado se convierte en grieta.

Cuando tenemos un concreto endurecido, las fisuras se originan en los puntos más débiles, ya que cuando el concreto se coloca no queda homogénea la pasta de cemento, es por esta razón que hay resistencias distintas en cada sección

9.1.- Fisuras por contracción plástica

La causa principal de la fisuración por contracción plástica es cuando el concreto fresco está sujeto a una pérdida de humedad muy rápida, que puede ser provocada por varios factores diferentes que incluyen la temperatura del aire y del concreto, la humedad relativa y la velocidad del viento sobre la superficie del concreto.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Las fisuras por contracción plástica se forman en la superficie del concreto fresco inmediatamente después de su vaciado y mientras permanece en estado plástico. Estas grietas aparecen fundamentalmente en las superficies horizontales. Este tipo de grietas son antiestéticas, pero normalmente no afectan la resistencia o la durabilidad de los pisos de concreto y pavimentos. Estas fisuras se pueden minimizar si se toman medidas apropiadas antes y durante el vaciado y el acabado del concreto.

9.1.2.- Fisuras contracción por secado.

Si el medio ambiente es una atmósfera seca, la superficie expuesta del concreto pierde agua por evaporación. La evaporación dependerá de la humedad relativa, la temperatura, la relación agua-cemento y el área de la superficie expuesta del concreto, a esto le llamamos contracción por secado. Estas fisuras suelen aparecer a los días, semanas e incluso meses de haberse realizado la colocación de la mezcla.

Por varias causas hay pérdidas de humedad en el concreto que puede ser hasta un 1%. Si la contracción del concreto no encontrara restricciones, éste no sufriría fisuras.

9.1.3.- Fisuras contracción por carbonatación

El principal efecto de las fisuras por carbonatación es la oxidación de las armaduras. Cuando esto pasa las armaduras tienden a aumentar su volumen, lo que hace tensiones internas en el concreto lo que produce fisuras y grietas.

La corrosión de las armaduras en el concreto armado, especialmente cuando éste está ubicado en ambiente marino o de zona industrial, es una causa de fisuración ya que expansión a causa de la corrosión del acero; pueden provocar incluso el desprendimiento del recubrimiento de concreto. Las fisuras por corrosión del acero de refuerzo, muchas veces aparecen en el elemento de concreto después de 2 años de haberse construido la estructura. Según de cómo sea la fisura, la corrosión será más o menos acelerada. Las grietas estrechas y



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

perpendiculares a las barras de refuerzo provocan corrosión local; sin embargo, las fisuras anchas y paralelas a las barras provocan una corrosión generalizada.

En general, para prevenir las fisuras se debe tener especial cuidado en el curado, el que debe ser rápido y eficiente, para devolverle a la estructura la humedad perdida, también se puede contrarrestar al aumentar la cantidad y la calidad del agregado grueso, y al reducir la relación agua/cemento (a/c).

Un concreto denso es más impermeable que aquellos con orificios y mal compactados, es por eso que hay que vibrarlos bien para que no queden vacíos en su estructura.

9.1.4.- Fisuras por contracción térmica

Por otra parte, tenemos las fisuras por contracción térmica que se deben a la excesiva diferencia de temperatura dentro de la estructuras de concreto, la diferencia de temperaturas causa que la parte más fría se contraiga más que la parte caliente haciendo así la fisura en el elemento colado.

Para este efecto térmico diferencial, debemos colocar en donde existan cambios bruscos del espesor o cambios en el tipo de construcción lo que llamamos juntas de dilatación.

9.2.- Como evitar las fisuras

Existen varias medidas para prevenir las fisuras por contracción térmica:

- Hay algunos tipos de cementos que contienen silicato tricálcico, hay que evitarlos.
- Al igual hay cemento que viene demasiado molido, no hay que utilizarlo.
- El concreto debemos enfriarlo y más aún si nuestro elemento es de gran volumen.
- Hay que hacer juntas de dilatación estratégicamente.

9.3.- Fotos de variedad de fisuras en el concreto

Figuras 2. Fisuras en el concreto

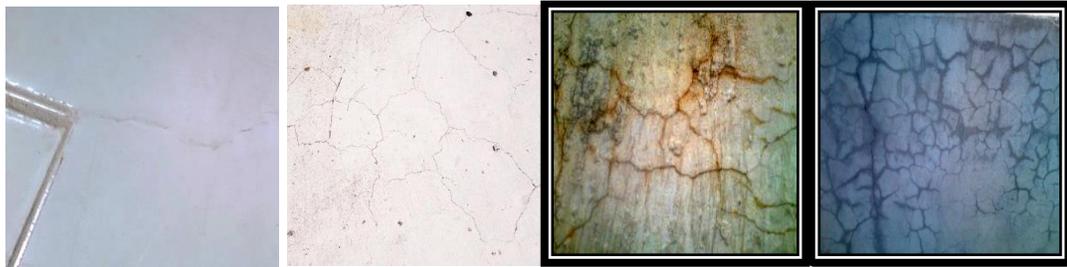
Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)

(g)

Concepto:

- (a) Fisura por reactividad álcali agregado.
- (b) Fisura por contracción térmica en muro.
- (c) Fisura por tensión diagonal en piso.
- (d) Fisura por deficiencia estructural en piso.
- (e) Fisura por contracción de secado en piso.
- (f) Corrosión en el acero de refuerzo.
- (g) Reactividad álcali agregado.

10.- Reacción álcali-agregado

10.1.- Importancia del Tema

De no darle la debida importancia a la reacción álcali agregado esta afectara al concreto en:

- Pérdida de resistencia por micro fisuración interna.
- Fisuración superficial por expansión no uniforme.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

- La permeabilidad aumentará y también las filtraciones.
- Variación de dimensiones por expansiones.
- Transferencia de cargas a elementos adyacentes.
- Problemas con los elementos móviles.
- Presencia de productos de la reacción.

La reactividad álcali-agregado fué reconocida desde finales de los años 30 como una fuente potencial de deterioración desde finales de los años 30. A pesar de la existencia de los agregados reactivos en toda América Latina y EE.UU., la ocurrencia de RAS no es tan común. (Eddy, 2011).

Las razones para esto son:

- La mayoría de los agregados son estables en concreto hidráulico.
- Los agregados que se utilizan para hacer cemento, se reconocen con buenos registros de servicio y son abundantes en muchas áreas.
- Muchos de los concretos que se encuentra en servicio están en lugares suficientemente secos para inhibir RAA.
- En muchas mezclas de concreto, el contenido de álcalis del concreto es suficientemente bajo para controlar la RAA.
- Algunas formas de RAA no producen expansión nociva significativa.

Para reducir el potencial de la RAA debemos entender como es su mecanismo, hay que usar los ensayos adecuadamente para identificar los agregados que son potencialmente reactivos y, si es necesario, debemos tomar las debidas precauciones para minimizar la expansión y el agrietamiento. (Eddy 2011).

10.2.- Factores que afectan la reactividad álcali agregado.

- Contenido de álcali del cemento.
- Reactividad de los agregados.
- Uso de adicionales minerales.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

- Temperatura.
- Humedad,

10.3.- Humedad y temperatura.

Cuando tenemos un concreto con un alto grado de álcali y tenemos fuertes humedades existe una reacción que hace que se haga un gel que se va expandiendo, si nuestra humedad relativo llega a ser menor al 80% no tiene lugar la expansión.

De igual manera en el concreto la temperatura también afectará ya que a mayor temperatura mayor será la velocidad de la reacción y mayor será la expansión dañando así al concreto. (Hermida, 2012)

10.4.- Deterioros típicos de la reacción álcali sílice.

Luego de algunas semanas de haber sido elaborado el concreto con cemento, arena y agua, los iones de sodio y potasio quedarán fijos a la mezcla.

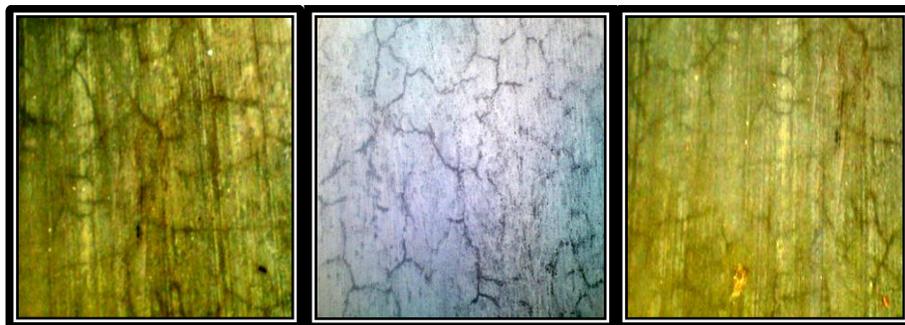


Figura 2.1. Fisuración por reactividad álcali sílice.

Los elementos amorfos derivados del sílice (Si) son los que se mezclan con los iones tanto del sodio como del potasio que son los álcalis que provienen principalmente del cemento y al mezclarse con este tipo de elementos (Si) son los que potencializan esta reacción en las condiciones de humedad y temperaturas propicios, generándose como producto de esta reacción un gel alcalino, su contenido principalmente es sílice y calcio, ocupando los espacios vacíos del concreto y al incrementarse será el responsable de agrietar el concreto ya que no hay más espacio. (Hermida 2012).

10.5.- Gel de composición sílico-calcio-alcalina.



Figura 2.2. Formación del gel (Nicole Andrade, 2012)

El gel expansivo, éste tiende a extraer agua de otras partes del concreto, lo que provoca expansiones locales junto con los correspondientes esfuerzos de tensión.

Todas las estructuras que son compuestas de concreto, corren el riesgo de ser afectadas por esta reacción álcali – agregado, en especial al estar en contacto con humedad suficiente y temperaturas cálidas, como lo puede ser una presa o un dique pero también puede haber otros elementos como cimentaciones o superficies de rodamiento. (Hermida 2012).

Un concreto en su durabilidad puede ser afectado tanto forma física como de forma química.

11.- Aspectos químicos que causan deterioro en un concreto. (Santos Silva, 2007)

- Exposición por agua salina
- Exposición a los sulfatos;
- Exposición a la humedad y al agua acida
- Materia orgánica



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

- Oxidación;
- Cambios volumétricos

Este trabajo se concentra en la reacción álcali – sílice. (RAS).

Aunque los álcalis Na y Ka se encuentran principalmente en el cemento, deben tenerse en cuenta otras fuentes que puedan suministrarlos para su total contabilidad y de igual manera otros elementos que puedan afectarlo de forma negativa como en este caso en nuestro estudio el sílice amorfo. (Santos Silva, 2007).

Las evidencias de la RAS pueden tardar años en manifestarse siendo estas las más típicas: fisuras, grietas, exudación y el mismo gel al brotar.

Hasta el momento no se encuentra con una respuesta ideal a este problema, por lo que la prevención es la mejor medida, seleccionando cada uno de los materiales en la elaboración del concreto, haciendo un diseño de la mezcla adecuado (Santos Silva, 2007).

En caso de no contar con materiales adecuados pueden ser empleado aditivos que ayuden a mitigar esta reacción. (Santos Silva, 2007)

En el IIth ICAAR (International Conference on Alkali Aggregate Reaction), los investigadores Gress e Kozikowski (2000) decidieron hacer modificaciones a las diversas metodologías estándares ya establecidas buscando mejorías en los tiempos de resultados. La justificación a estos trabajos es obtener resultados lo más rápido posible y de igual manera lo más confiable posible para poder evaluar materiales que requieren su pronta aplicación en el ámbito de la construcción.

Estas modificaciones se basaron tanto en barras de concreto como de mortero y modificando el tamaño de las mismas, buscando que los agregados sean los más similares al tamaño de un concreto real, adicionando álcali a las mismas para potenciar su reacción, de igual manera modificando la temperatura a la que estas barras son expuestas con respecto a lo establecido por las normas

ASTM C1293 y ASTM C 1260, buscando encontrar resultados similares pero en un tiempo más rápido. Gress e Kozikowski (2000).

12.- Petrografía de los agregados.

Los estudios que se llevan a cabo buscando la calidad de los materiales y duración en la elaboración del concreto son: el cemento, arena, grava y agua. (Godart et al., 2013) Ver figura 2.3 ejemplo de una petrografía.

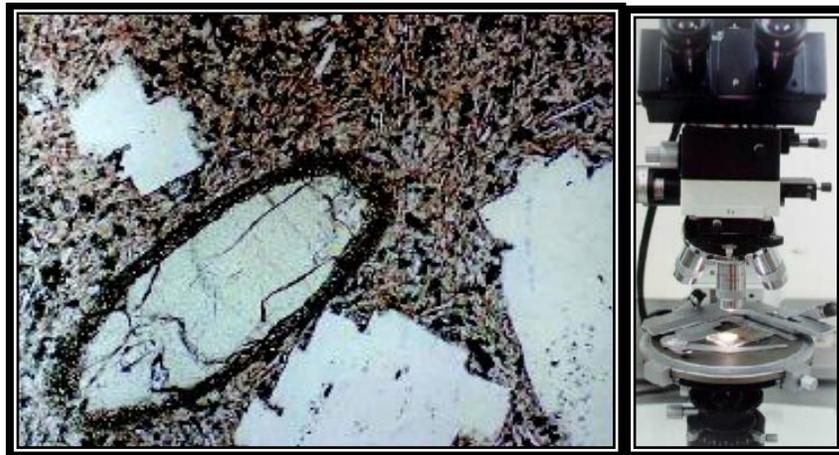


Figura 2.3. Ejemplo de una petrografía

El avance tecnológico hace necesario la interdisciplinariedad y transdisciplinariedad utilizando áreas de conocimiento de otras ciencias como la petrografía que es una rama de las ciencias geológicas dedicado a la descripción científica y clasificación sistemática de las rocas, a partir de un análisis en el microscopio, en donde se utiliza la mineralogía óptica que es una aplicación de la física de la luz al estudio de los minerales. (Hermida, 2012)

La petrografía viene del latín *petra*; que significa piedra y del griego *graphein*; que traduce describir, lo que literalmente significa descripción de las rocas. La base de la petrografía es el estudio al microscopio de las superficies pulidas, de rocas y materiales inmersos en resinas de índices de refracción conocido, que por exposición a la luz permiten analizar las secciones delgadas que proyectan.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

El microscopio petrográfico ha sido utilizado desde mediados del siglo XIX por los geólogos para entender e interpretar la génesis y mineralogía de las rocas. El pionero de la microscopía del concreto fue Johnson en 1915, luego le siguieron en épocas recientes investigadores como L. S. Brown, B. Mather y R. C. Mielenz.

La Petrografía del concreto es aplicable a los agregados del concreto, al concreto, al mortero, al yeso, al estuco, al ladrillo, al grout y mezclas similares del cemento Pórtland. La petrografía combina la inspección visual con el examen microscópico usando el estereoscopio, el microscopio petrográfico y el microscopio metalográfico. La interpretación de lo encontrado proporciona ayuda valiosa en el desarrollo de soluciones prácticas a los problemas que se presentan en las construcciones. Para el estudio petrográfico del concreto se hace usando las pautas dadas en la norma ASTM C 856. Esta Norma es para la examinación por microscopio petrográfico del concreto endurecido.

Para la ingeniera mexicana Alma Reyes, la prueba petrográfica permite evaluar la calidad del material para evitar que el problema de reactividad álcali sílice del concreto se presente. (Herminda, 2012).

13.- Difracción de rayos X.

El resultado de la interacción de la radiación emanado de los rayos X al chocar con los átomos del material nos da la difracción de los Rayos X.

La difracción de los rayos X nos ayuda a obtener información de los elementos principales que componen el material examinado.

Ver figura 2.4 ejemplo de gráfico de la difracción de rayos X de una muestra de arena utilizada en esta investigación. (Cimav, 1994).

Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

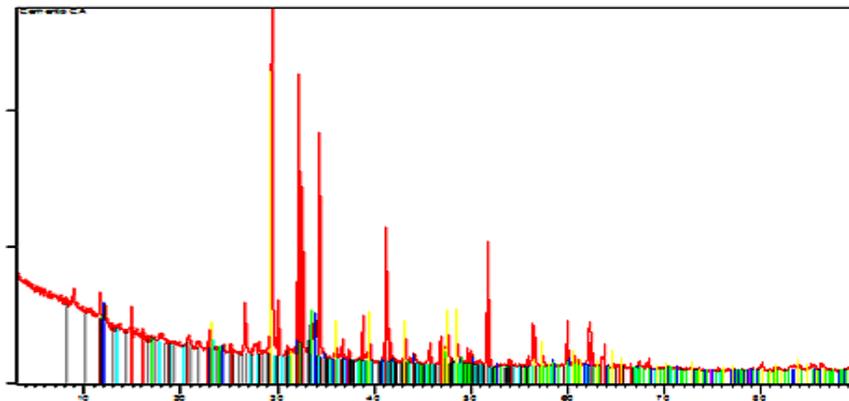


Figura 2.4. Ejemplo de grafico de difracción de rayos X en muestra de arena.

Se utilizan rayos X con una longitud de onda en torno a 1\AA (10-10 m) porque es del orden de las distancias interatómicas en los cristales, lo que posibilita la aparición de fenómenos de interferencia y de direcciones de difracción.

La materia cristalina se caracteriza por la presencia de orden a larga distancia. Se distingue así de otros estados de la materia sin orden o con orden en distancias cortas como son las formas gaseosas, líquidas o los sólidos amorfos. Un cristal está formado por un motivo (conjunto de átomos) que se repite en una red tridimensional según tres traslaciones independientes. Además, en función del motivo y su repetición, en los cristales pueden aparecer relaciones de simetría adicionales: ejes de rotación o planos especulares, etc.

Las propiedades de los materiales cristalinos dependen de su composición química (qué tipo de átomos forman el motivo que se repite y cuántos son) y de su estructura (cómo están colocados esos átomos y cómo se repite el motivo atómico que forma el cristal). Los materiales cristalinos se diferencian unos de otros o bien por su composición, o bien por su estructura. Un compuesto con una composición y estructura definidas se conoce como fase cristalina. La difracción de rayos X nos permite distinguir unas fases cristalinas de otras y conocer su estructura.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

La interacción de los rayos X con los cristales se explica, en sus aspectos geométricos, mediante la Ley de Bragg.

Si hacemos incidir un haz de rayos X sobre un cristal, observaremos la aparición de haces de rayos X difractados por el cristal según direcciones discretas y características de dicho cristal de acuerdo con la siguiente ecuación:
$$n\lambda = 2 d \text{ sen } \theta.$$

En una interpretación sencilla de la Ley de Bragg, las familias de planos cristalográficos paralelos de un cristal se comportarían como “espejos” que “reflejan” los rayos x para algunos ángulos de incidencia determinados. Los ángulos (θ) para los que aparecen rayos x difractados dependen de la distancia que separa los planos cristalográficos (d) y de la longitud de onda de los rayos X utilizados (λ).

13.1.- Fluorescencia de rayos X.

La difracción de rayos X la cual se abrevia por sus siglas en ingles XRF es usada comúnmente en materiales de una amplia gama en la construcción, así como también en otro tipo de elementos como vidrio, metales y cerámicos.

Mediante la difracción de rayos X podemos analizar un material tanto de manera elemental así como aspectos más profundos, como los químicos.

En el átomo encontramos electrones que están distribuidos en diferentes niveles y subniveles de energía. Los de menor energía son los que ocupan los primeros niveles así sucesivamente hasta llegar a colocarse todos, a lo que se le conoce como estado fundamental.

Los elementos que compongan el material en estudio al ser bombardeados los átomos con un haz de electrones estos son invertidos, lográndose este proceso lo cual involucra: Excitación y Emisión. (Cimav, 1994)

14.- Microscopía electrónica de barrido.

Es una herramienta muy útil de amplio espectro en el campo de materiales sólidos o también en la rama de la biología. Se generan figuras de alta definición, figurando el relieve de la muestra en estudio, la cual ha sido preparada previamente.

La microscopía electrónica de barrido similar a la fluorescencia de rayos X se lleva a cabo aplicando un rayo de electrones el cual genera la interacción con la materia, formando de esta manera la imagen buscada. (Cimav, 1994)

Abajo se muestra ejemplo de la microscopía electrónica de barrido, siendo una muestra de cemento portland tipo I.

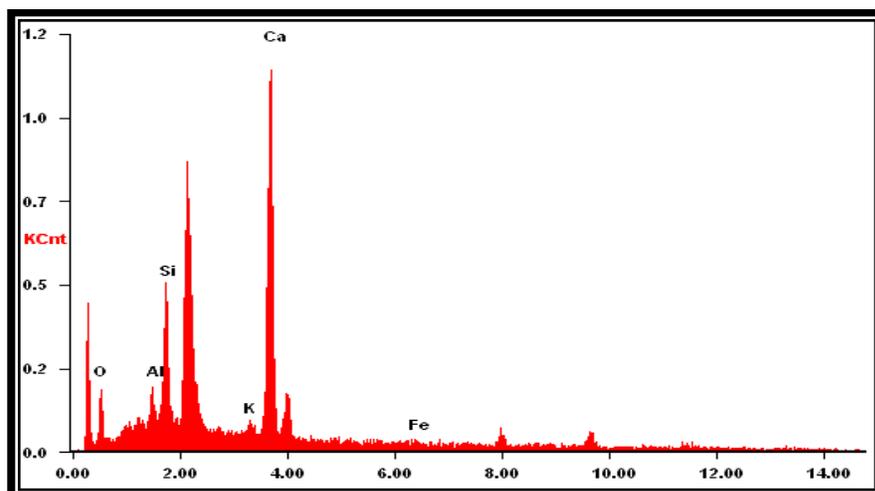


Figura 2.5. Ejemplo de gráfica de microscopía electrónica de barrido

15.- Composición y tipos de cemento.

El cemento está formado por caliza y arcilla calcinada ambas previamente molidas, el cual al estar en contacto con el agua este se endurece. Cuando el cemento lo mezclamos con agregados pétreos creamos una pasta que al poco tiempo empieza a fraguar y finalmente se endurece que es lo que en México conocemos como concreto. (GCC, 2012) Ver figura 2.6 cemento portland.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto



Figura 2.6. Cemento Portland.

15.1.- Cemento Portland.

El cemento Portland es el más común como parte de la preparación del concreto. Sus constituyentes más importantes es el Clinker portland y yeso, ambos pulverizados.

15.1.1.- Normativa

La calidad del cemento portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150. Las materias primas para la producción del Portland son minerales que contienen:

Óxido de calcio (44%),

Óxido de silicio (14,5%),

Óxido de aluminio (3,5%),

Óxido de hierro (3%) y óxido de magnesio (1,6%).

15.1.2.- Tipos de cementos portland.

En México, la norma mexicana NMX C-414 especifica y clasifica los diferentes tipos de cemento Portland. De acuerdo a esta norma los tipos de cemento pueden ser:



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Tipo

CPO	Cemento Portland Ordinario.
CPC	Cemento Portland Compuesto.
CPP	Cemento Portland Puzolánico.
CPEG	Cemento Portland Escoria Granulada.
CPS	Cemento Portland Humo de Sílice.
CEG	Cemento Escoria Granulada.

Clase Resistente.

Kg/cm ²	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20		203	407
30		305	509
30R	203	305	509
40		407	
40R	305	407	

Características especiales.

RS	Resistencia a sulfatos.
BRA	Baja reactividad álcali-agregado.
BCH	Bajo calor de hidratación.
B	Blanco.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

16.- Álcalis en el cemento.

La reactividad álcali agregado (RAA) básicamente es una reacción entre los elementos de la arena y grava y el álcalis proveniente principalmente del cemento.

Al inicio de la década de 1940 se optó como norma mantener el álcali del cemento en 0.6% con la finalidad de aminorar las expansiones y agrietamientos producidos por esta reacción. (Stanton, 1940)

En ese mismo entonces se desarrolló una ecuación que se sigue utilizando en fechas actuales, y es para obtener el porcentaje de álcali, a través del óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O), la fórmula es: ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \% \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \% \text{K}_2\text{O}$).

El óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0.658 \times \text{K}_2\text{O}$) es utilizado para la obtención del % de álcali en el cemento. (ASTM C150-02, 2003).

Algunos autores recomiendan que sus límites sean inferiores a 0.6%.

16.1.- Métodos para evaluar el potencial de reactividad álcali sílice.

16.1.1.- ASTM C 227 Método para determinar la reactividad álcali del cemento en combinaciones de agregado. (Barras de mortero).

Este es un método muy antiguo que es de la década de los 50s el cual emplea barras de mortero es decir un agregado fino, el cual presenta dificultades en su medición entre 4 y 12 meses por el cual ha sido desechado.

16.1.2.- ASTM C 289 Método para determinar la reactividad álcali sílice de agregados (método químico).

Se remonta igual a los años 50, el agregado se tritura y se expone a una situación extrema de temperatura y alcalinidad (NaOH), donde se intenta obtener que tanto se reduce la alcalinidad de los elementos en estudio.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

16.1.3.- ASTM C 295 Método para la exanimación petrográfica del concreto. Este método se concentra en la identificación de los minerales reactivos o en la identificación de gel en estructuras afectadas.

16.1.4.- ASTM C 1567 Método para determinar la reacción álcali sílice de materiales cementantes y agregados. (barras de mortero). Método que evalúa diferentes adiciones como reemplazo del cemento. Procedimiento similar al ASTM C 1260.

16.1.5.- ASTM C 441 Método para evaluar la efectividad de materiales mitigantes de la reacción álcali previniendo expansión excesiva. Puzolanas, escoria de fundición, ceniza volante, etc.

16.1.6.- ASTM C 1260 Método para evaluar la reactividad álcali de los agregados. (barras de mortero). Se fabrican viguetas de mortero similar al método ASTM C 227 y se sumergen en una solución de NaOH 1N a una temperatura de 80°C por 16 días, si la expansión es mayor a 0.10% en este tiempo se considera deletérea.

16.1.7.- ASTM C 1293 Método para evaluar la reactividad álcali agregado en el concreto. (barras de concreto). Método que se realiza con barras de mortero colocándolo en un ambiente alcalino a una temperatura de 38°C hasta los 12 meses, si las barras presentan una expansión mayor a 0.04% se consideran deletérea.

La gran mayoría de los casos de estructuras de concreto reportadas como deterioradas muestran la reactividad álcali sílice, se encontró que fueron construidas con cemento alto en álcalis. Con esto de los principales métodos desarrollados tipo ASTM (American Society for Testing and Materials), el ASTM C 1260 demostró ser el más común para comprobar el potencial de la reactividad álcali sílice de los agregados (método de las barras de mortero).



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

17.- Materiales y métodos.

Para las pruebas se utilizó un cemento ordinario comercial el cual se le nombró (C1). Al cemento se le realizó el estudio de fluorescencia de rayos X (espectrómetro XRF) con el propósito de conocer el porcentaje de álcali presente, del cual se hicieron variaciones mediante la adición de hidróxido de sodio conforme lo indicado por la prueba ASTM C 1293. El porcentaje inicial fue de 0.39% incrementado a 2%, 3% y 4%.

Para el agregado pétreo se utilizó un banco de materiales el cual se nombró (A1), se examinó petrográficamente, de igual forma se le realizó el estudio fluorescencia de rayos X (espectrómetro XRF) con el propósito de conocer el porcentaje de álcali presente, el cual se complementó con estudios de difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido.

Se emplearon tres repeticiones por prueba, dando un total de doce muestras. Los experimentos se condujeron conforme a la prueba ASTM C 1260 que dice así: La relación de agregado / cemento empleada fue de 2.25 y la relación de agua/cemento fue de 0.45 a 0.47. El mortero fue suficiente para la elaboración de barras (25mm x 25mm x 285 mm), las cuales posteriormente fueron curadas por 24 h en un cuarto húmedo a $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ (humedad relativa mínima de 54%). Transcurrido dicho periodo, las barras fueron desmoldadas y colocadas en un contenedor con agua, las cuales se mantuvieron a una temperatura de 80°C por 24 h. Posteriormente las barras fueron sumergidas nuevamente en un contenedor pero ahora en una solución de hidróxido de sodio (40gr por litro) a 80°C . La expansión de las barras se midió con micrómetro en pedestal (Marca Humboldt–Modelo: BG 2600 – 0 - 16001) diariamente por 14 días a la misma hora.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

17.1.- Selección de materiales

MATERIAL	SIMBOLOGIA	DESCRIPCIÓN
Arena	A1	Arena de Rio
Grava	G1	Grava Caliza
Cemento	C1	Cemento de GCC CPC-30R

17.1.1- Lo que se le realizó a cada uno de los materiales

17.1.2. Dosificación del concreto

En la dosificación de concretos nos basamos en los procedimientos del ACI en los cuales nos encontramos los siguientes parámetros, utilizando un agregado grueso calizo y un agregado fino de rio de origen ígneo, realizando las siguientes pruebas para las distintas dosificaciones realizadas:

- Agregado “Grueso”
 - Densidad relativa
 - Porcentaje de absorción (%)
 - Contenido de humedad (%)
 - Peso volumétrico seco suelto
 - Pero volumétrico seco compactado
- Agregado fino
 - Densidad relativa
 - Porcentaje de absorción (%)
 - Contenido de humedad (%)
 - Peso volumétrico seco suelto
 - Módulo de finura



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

17.1.3.- Agregado Grueso

17.1.4. Densidad Relativa.

Se satura grava por 24 horas, una vez saturada se retira y se seca superficialmente con una franela ligeramente húmeda, se pesa y se le llama W_{sss} (peso saturado y superficialmente seco).

Una vez pesada se determina el volumen desalojado de las gravas ($V_{des.}$), empleando el principio de Arquímedes, pesando las gravas en una canastilla, sumergida en agua, obteniendo el peso de gravas sumergidas ($W_{sum.}$).

$$V_{des.} = \frac{W_{sss} - W_{sum.}}{\gamma_w}$$

$$\gamma_w = \text{Peso específico de agua} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

Sin perder material, se vacía en una charola para secarlas totalmente, obteniendo así el peso de las gravas secas (W_s).

Con los datos anteriores se determina la absorción de las gravas:

$$\text{Absorción} = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100$$

Y se determina la densidad relativa:

$$Dr = \frac{W_s}{(V_{des.} - V_{abs.}) * \gamma_w}$$

Donde:

$$V_{abs.} = \frac{W_{sss} - W_s}{\gamma_w}$$



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

17.1.5.- Contenido de humedad.

Se vacía suelo húmedo en una charola y se pesa, obteniendo así la charola + suelo húmedo (T+ Sh).

Se pone a secar y a enfriar, obteniendo así la charola + suelo seco (T + S's).

Ya obtenidos esos resultados se determina el contenido de humedad:

$$w = \frac{(T + Sh) - (T + S's)}{(T + S's) - T} \times 100$$

17.1.6.- Peso volumétrico seco suelto.

Se pesa un recipiente vacío y realizando un cuarteo de material se llena el recipiente cuidando la caída que sea menor de 5 cms, para evitar la pérdida de material. Se pesa el recipiente con el material y se registra su peso y se calcula el P.V.S.S.

$$P.V.S.S = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

17.1.7.- Peso volumétrico seco y compactado.

Se pesa un recipiente vacío y realizando un cuarteo de material se llena el recipiente cuidando la caída que sea menor de 5 cms, para evitar la pérdida de material en tres capas y dándole a cada una de las capas 25 golpes.

Se pesa el recipiente con el material y se registra su peso y se calcula el P.V.S.C.

$$P.V.S.C. = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}}$$



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

17.2.- Agregado Fino

17.2.1.- Densidad Relativa.

Se satura la arena por 24 hrs y se le retira el agua meneándolo de un lado a otro para así obtener el estado saturado y superficialmente seco, comprobando mediante el cono truncado 2 dos capas, la primera capa de 15 golpes y la segunda de 10 golpes, que al retirar el cono se tiene que desmoronar.

Se pesan 2 muestras de 200 grs. (W_{sss}), se vierte agua en el matraz llenándolo hasta la mitad de la parte curva y se vierte la arena sin que se pierda material; la otra muestra se seca en la estufa para obtener el peso seco de la arena (W_s).

Se extrae el aire atrapado en el matraz mediante una bomba de vacíos 5 veces por 30 seg. y se completa la capacidad del matraz con agua hasta la marca de aforo de 500ml; se pesa y se obtiene el matraz + agua + arena (W_{mwa}).

Se toma la temperatura de la suspensión y se entra a la curva de calibración del matraz t se obtiene el peso del matraz + agua (W_{mw}).

Se determina la densidad relativa.

$$Dr = \frac{W_s}{W_s + W_{mw} - W_{mws}}$$

17.2.2.- Porcentaje de Absorción.

$$Absorción = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100$$



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

17.2.3.- Contenido de Humedad.

Se anota el peso de la charola.

Se vacía suelo húmedo en una charola y se pesa, obteniendo así la charola + suelo húmedo (T+ Ah).

Se pone a secar y a enfriar, obteniendo así la charola + suelo seco (T + A's).

Ya obtenidos esos resultados se determina el contenido de humedad:

$$w = \frac{(T + Ah) - (T + A's)}{(T + A's) - T} X 100$$

17.2.4.- Peso volumétrico seco suelto.

Se pesa un recipiente vacío y realizando un cuarteo de material se llena el recipiente cuidando la caída que sea menor de 5 cms, para evitar la pérdida de material.

Se pesa el recipiente con el material y se registra su peso y se calcula el P.V.S.S.

$$P.V.S.S = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Volumen del recipiente}}$$

17.2.5.- Módulo de Finura.

Se pesa material y se pasa por las mallas (3/8", no.4, 8, 16, 30, 50 y 100) y el porcentaje acumulado retenido se suma.

Dicha sumatoria se divide entre 100 y se obtiene el módulo de finura.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Tamaño de la malla	Porcentaje de la fracción individual retenida, en peso	Porcentaje acumulado que pasa, en peso	Porcentaje acumulado retenido, en peso
9.52 mm (3/8")	0	100	0
4.75 mm (No.4)	3	97	3
2.36 mm (No.8)	14	83	17
1.18 mm (No.16)	22	65	35
0.60 mm (No.30)	23	42	58
0.30 mm (No.50)	24	18	82
0.15 mm (No.100)	16	2	98
Charola	32	0	---
Total	100	293 Módulo de finura = 293/100 = 2.93	

Una vez realizadas las pruebas y con conocimiento previo de la densidad relativa y peso volumétrico del cemento que se utilizó se realizaron tres dosificaciones distintas para tres resistencias con corrección de laboratorio ($f'c=200, f'c=300, f'c=400$) basándonos en los procedimientos del ACI. Se elaboraron 3 cilindros (30cm de altura, 15cm de diámetro), para verificar que dichas resistencias se cumplieran.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Se hicieron pruebas de absorción simple en el concreto con cada una de las dosificaciones realizadas al cumplir su máxima resistencia (a los 28 días), deshidratándolos y sumergiéndolos en el agua (48 horas a dos lecturas), mediante corazones (3 cilindros de 3'' diámetro x 15cm de altura de cada resistencia) extraídos de vigas de dimensiones 15 x 15 x 40 cm, mediante una perforadora extractora de núcleos.

Una vez realizadas las pruebas de absorción se trabajó con la norma ASTM C 1260 a 16 días, modificando las dimensiones de la barra de 2.5 x 2.5 x 28.5cm a 7.5 x 7.5 x 28.5 con cada una de las resistencias, con fin de evaluar el potencial de reactividad álcali-agregado de las barras.

18.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

18.1.- CACTERIZACION DE LOS AGREGADOS

18.1.1.- Estudio petrográfico

Se lleva a cabo el estudio petrográfico en agregados tanto gruesos como finos.

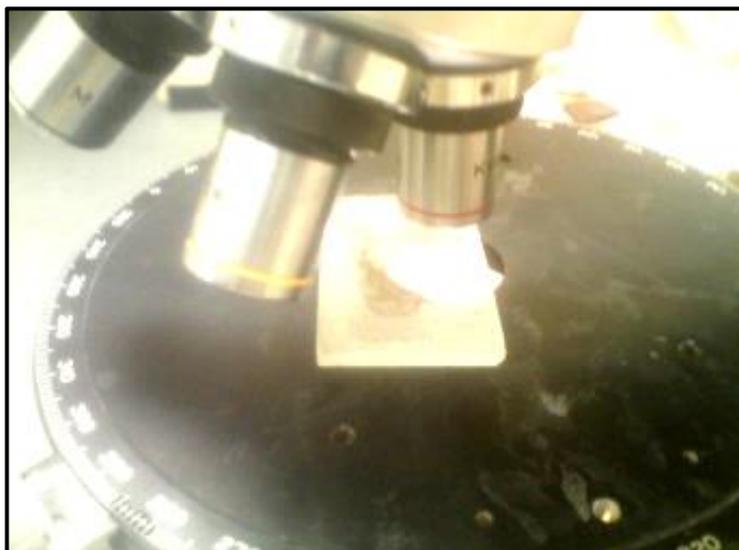


Figura 3. Petrografía de agregados

18.1.2.- Imágenes del procedimiento.



Figura 3.1. Imágenes del procedimiento

Se someten los agregados derivados de los tres bancos tanto agregado fino como agregado grueso obteniendo algunos de sus minerales más importantes y confirmando la procedencia de los mismos donde dos son de origen volcánico y el otro de origen sedimentario.

En las arenas el cuarzo es el componente predominante y en la gravas en lo que corresponde a la de origen calizo la calcita y/o dolomita es el componente predominante, en el resto agregado volcánico, fueron otros componentes como se muestra.

18.1.3.- Arena A1 (Arena de GCC)



Figura 4. Arena A1



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

18.1.4.- Fragmentos sub redondeados de:

- Cuarzo.
- Fragmentos de rocas o líticos (en su mayoría caliza) .

18.1.5.- Abundancia en la muestra:

- cuarzo 80%
- líticos 20%

Cuarzo entre 70% y 80%, que consiste en tridimita, cristobalita, y líticos como calcedonia y limonita conformando casi la totalidad de esta muestra.

Se encuentran feldespatos entre 3% y 5%.

Nota:

Muestra prácticamente puro cuarzo.

No se muestra presencia de vidrio.

18.2.- Grava G1 (Grava Caliza)

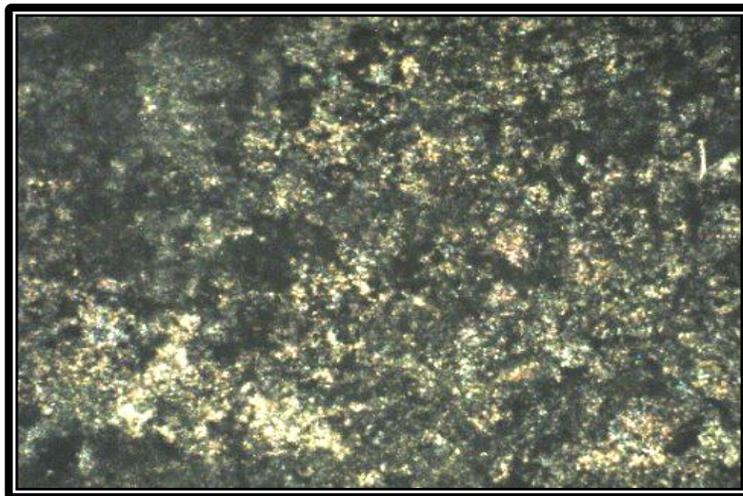


Figura 4.1 Grava G1



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

18.2.1.- Muestra de mano:

- gravas angulares.
- puros fragmentos de caliza.

18.2.2.- Descripción microscópica de 1 fragmento:

- Roca caliza.
- textura micrítica.
- minerales presentes: Minerales carbonatados (calcita y/o dolomita).

18.2.3.- Porcentajes:

Calcita 100% y/o dolomita.

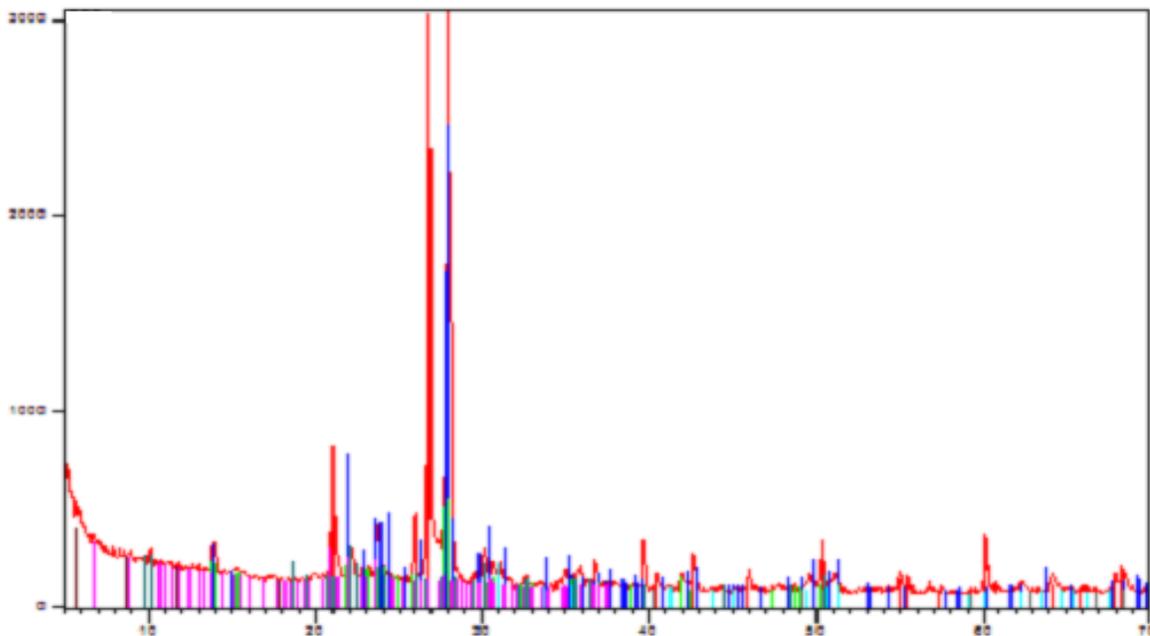
Cristalinidad media.

19.- Equipo de difracción de Rayos X



Figura 4.2. Equipo de difracción de Rayos X ARENA A1 (Arena de GCC)

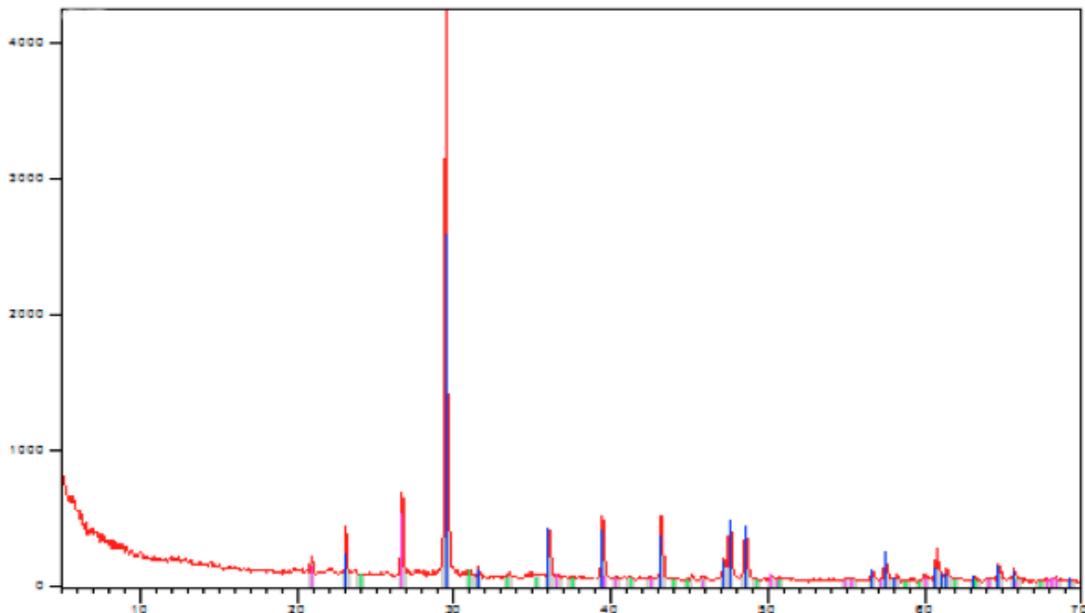
19.1.- Gráfica de difracción de Rayos X (Arena A1)



Nombre del compuesto	Formula química	Color	Proporción
Tridimita	Si O ₂	Rosa	Muy abundante
Cuarzo	Si O ₂	Azul fuerte	Muy abundante
Anortoclasa	6SiO ₂ Al ₂ O ₃ (K,Na) ₂ ^º	Gris	Abundante
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Café	Abundante
Calcita	CaCO ₃	Rojo	Indicios
Dolomita	Ca Mg (C O ₃) ₂	Azul claro	Indicios
Tschermigita	NH ₄ Al(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	Verde claro	Indicios
Estilbita	(Na,Ca) _n (Si ₂₇ Al ₉)O ₇₂ ·28H ₂ O	Verde fuerte	Indicios
Moscovita	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	Morado	Indicios

Figura 4.3. Tabla y gráfica arrojada de Equipo de difracción de Rayos X (Arena A1 GCC)

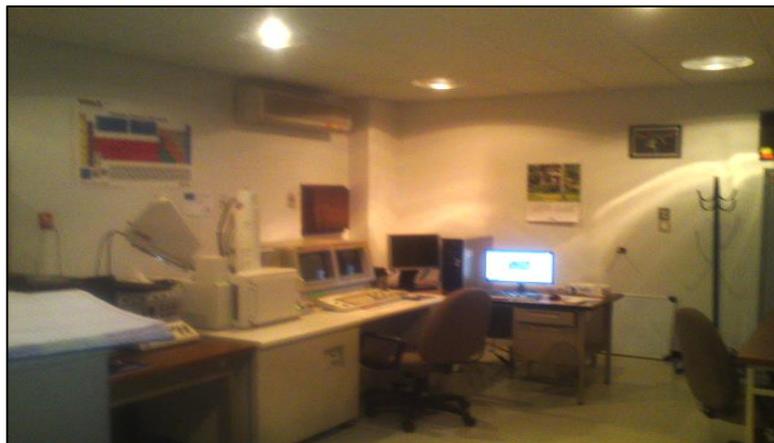
19.2.- Gráfica de difracción de Rayos X Grava G1 (Grava Caliza)



Nombre del compuesto	Formula química	Color	Proporción
Calcita	CaCO ₃	Azul	Muy abundante
Dolomita	Ca Mg (CO ₃) ₂	Rosa	Abundante
Cuarzo	SiO ₂	Verde fuerte	Indicios

Figura 4.4. Tabla y gráfica arrojada de Equipo de difracción de Rayos X Grava G1 (Grava Caliza)

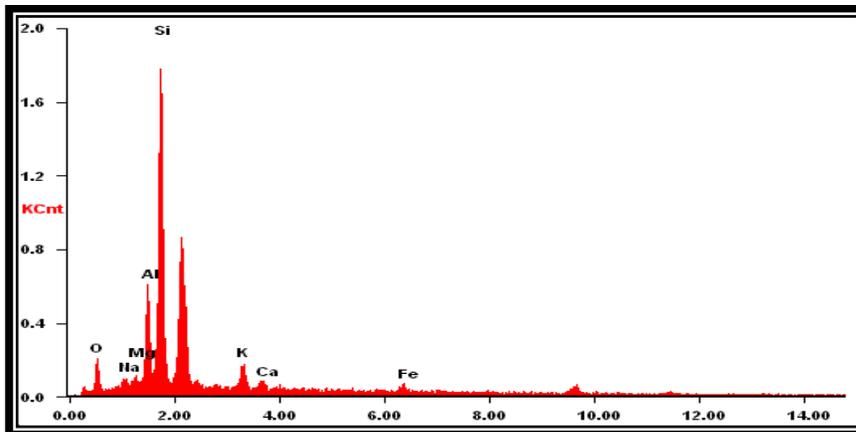
20.- Microscopía electrónica de barrido.



4.5.- Laboratorio de análisis de la microscopía electrónica de barrido CIMAV.

Figuras y tablas del análisis de la microscopía electrónica de barrido de los diez especímenes.

20.1.- Microscopía electrónica de barrido Arena A1



<i>Elemento</i>	<i>O</i>	<i>Na</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>
<i>Wt%</i>	13.22	1.67	1.93	13.45	53.61	7.61	2.83	5.68
<i>At%</i>	22.03	1.93	2.11	13.28	50.87	5.18	1.88	2.71

Figura 4.6. Tabla y gráfica de análisis de microscopía electrónica de barrido Arena A1 (GCC)

Promedio de tres pruebas.

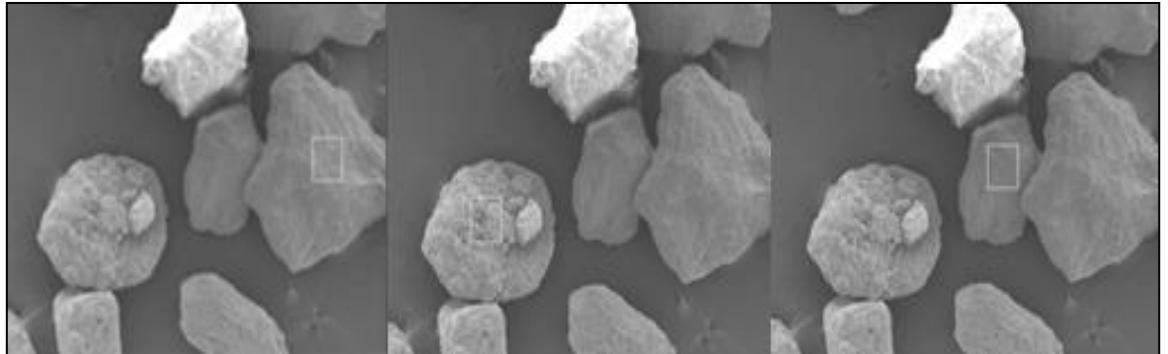
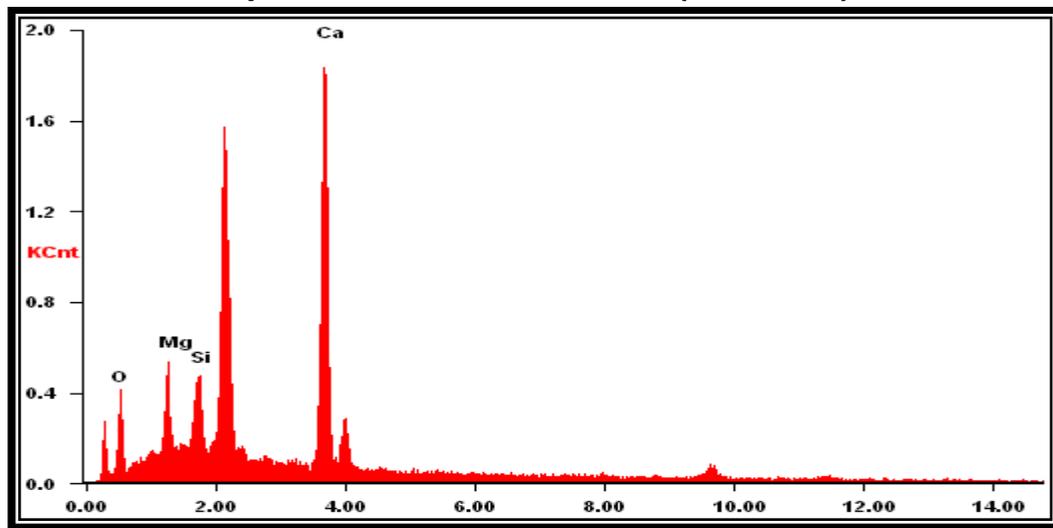


Figura 4.7.- Microscopía de barrido (Arena A1)

20.1.1.- Microscopía electrónica de barrido (Grava G1)



<i>Elemento</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Ca</i>
<i>Wt%</i>	<i>25.22</i>	<i>7.53</i>	<i>6.33</i>	<i>60.92</i>
<i>At%</i>	<i>43.41</i>	<i>8.53</i>	<i>6.21</i>	<i>41.85</i>

Figura 4.8. Tabla y gráfica de análisis de microscopía electrónica de barrido (Grava G1)

Promedio de tres pruebas.

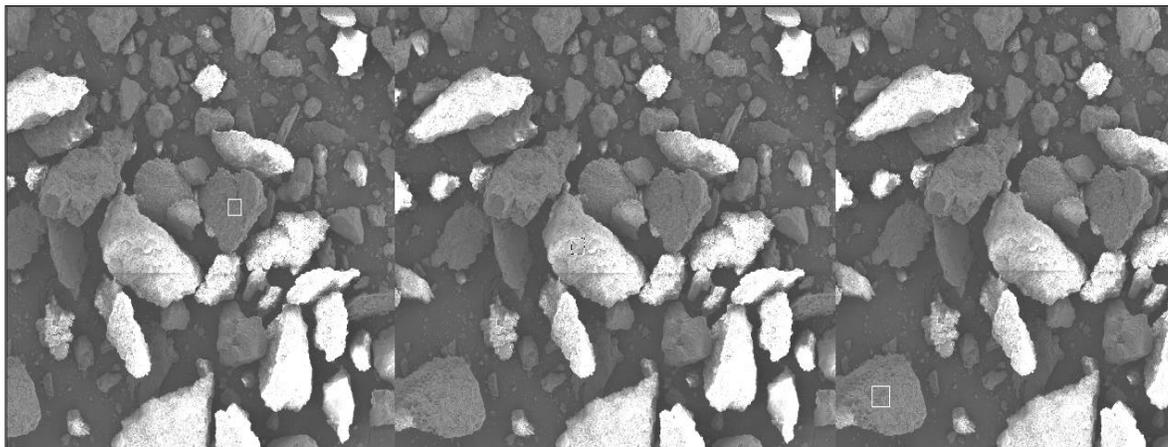


Figura 4.9.- Microscopia de barrido (Grava G1)

21.- Caracterización del cemento

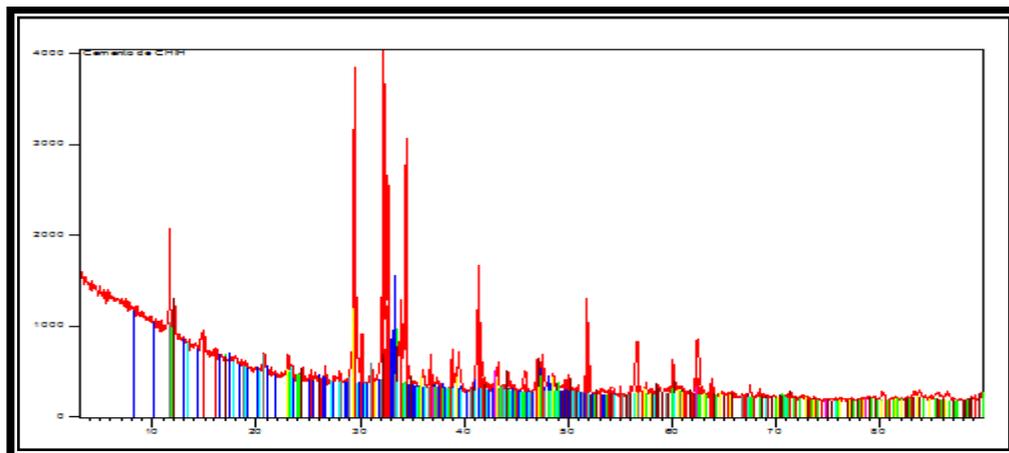
21.1.- Resumen de fluorescencia en cementos.

Estos resultados son obtenidos gracias al equipo de fluorescencia de rayos X de cementera ampliamente reconocida en el estado los cuales brindan los resultados mostrados de los cuatro cementos los cuales también fueron constatados mediante análisis cuantitativos según procedimientos para la obtención de óxido de sodio y óxido de potasio en porcentaje, además que los mismos cementos fueron analizados por absorción atómica donde después a través de estequiometría se obtiene el óxido de sodio y óxido de potasio en porcentaje con la misma finalidad de constatar los valores y obtener los álcalis.

Muestra	Si2O	CaO	MgO	K2O	Na2O	% Álcalis
C1	19.80	64.50	2.29	0.49	0.07	<u>0.39</u>

La muestra de cemento C1 cumple por debajo del porcentaje límite de la recomendación establecida.

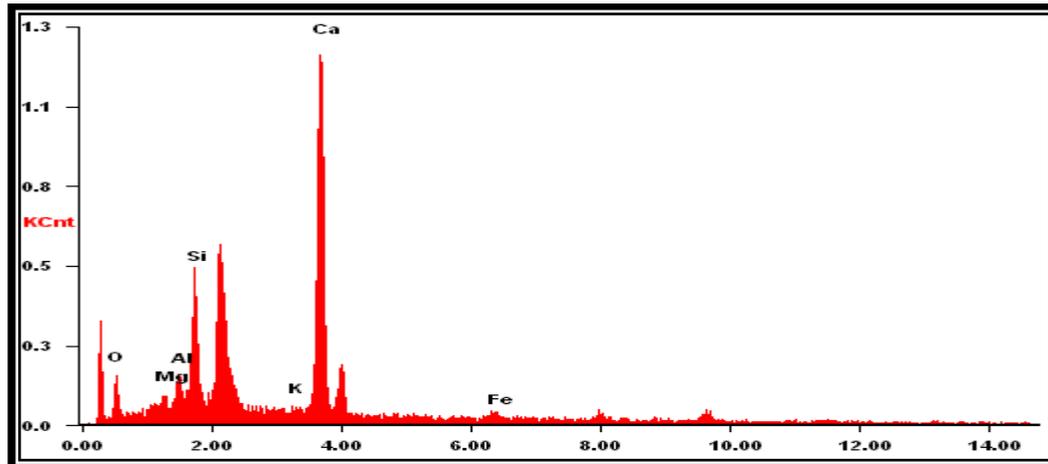
21.2.- Gráfica de Equipo de difracción de Rayos X (Cemento C1)



Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Ca ₃ Si O ₅	Silicato de calcio	Rojo
Ca _{8.25} Na _{1.5} (Al ₆	Calcio sodio aluminio	Azul fuerte
Ca ₂ Fe Mn O ₅	Hierro dicálcico	Verde
Ca S O ₄ · 2 H ₂ O	Yeso	Gris
Ca ₂ Fe Al O ₅	Brownmillerita	Café
Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ S O ₄	Ye'elimita	Azul claro
Mg O	Periclasa	Rosa
Ca C O ₃	Calcita	Verde crema

**Figura 4.10. Tabla y gráfica arrojada del Equipo de difracción de Rayos X
Muestra de cemento C1**

21.3.- Microscopía electrónica de barrido (Cemento C1)



<i>Elemento</i>	<i>O</i>	<i>Mg</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Fe</i>
<i>Wt%</i>	17.01	1.39	2.63	11.39	1.17	61.75	4.66
<i>At%</i>	32.44	1.75	2.98	12.37	0.91	47.01	2.55

Figura 4.11.- Tabla y gráfica de análisis de microscopía electrónica de barrido (Muestra de cemento C1)

Promedio de tres pruebas.

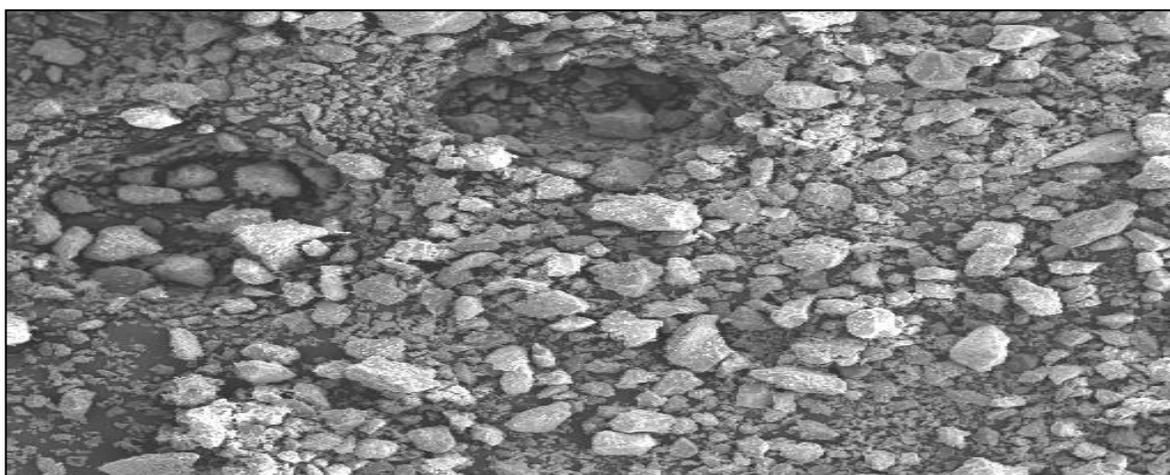


Figura 4.12.- Microscopia de barrido (Cemento C1)



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

22.- DOSIFICACIONES.

22.1.- DATOS DEL LABORATORIO:

CEMENTO:

DENSIDAD RELATIVA:	3150	kg/m ³	3.15	kg/lit
P.V.S. :	1500	kg/m ³		

GRAVA:

D.R. :	2696.7	kg/m ³	2.6967	kg/lit
% ABSORCIÓN:	2.25%	en peso		
% HUMEDAD:	0.28%	en peso		
P.V.S. :	1479.55574	kg/m ³		
P.V.C. :	1626.48557	kg/m ³	VARILLADO EN SECO	

ARENA:

D.R. :	2637.2	kg/m ³	2.6372	kg/lit
% ABSORCIÓN:	4.60%	en peso		
% HUMEDAD:	3.51%	en peso		
P.V.S. :	1489.56204	kg/m ³		
M.F. :	3.2			



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

f'c=400 A/C= 0.42			
para 1m ³ ó 1000lts			
UTILIZANDO UN REVENIMIENTO DE ENTRE 7.5-10			
			Corrección lab
AGUA	229.428281 kg	A/C =	0.3357487
CEMENTO	683.333333 kg		
ARENA	583.02178 kg		
GRAVA	929.667614 kg		
f'c=300 A/C= 0.54			
para 1m ³ ó 1000lts			
UTILIZANDO UN REVENIMIENTO DE ENTRE 7.5-10			
			Corrección lab
AGUA	231.313521 kg	A/C =	0.48519421
CEMENTO	476.744186 kg		
ARENA	762.050343 kg		
GRAVA	929.667614 kg		
f'c= 200 A/C= 0.69			
para 1m ³ ó 1000lts			
UTILIZANDO UN REVENIMIENTO DE ENTRE 7.5-10			
			Corrección lab
AGUA	232.5252515 Kg	A/C =	0.67602463
CEMENTO	343.9597315 Kg		
ARENA	877.1203279 Kg		
GRAVA	929.6676135 Kg		



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

22.1.1.- ABSORCIÓN

ABSORCIÓN					
	secados al horno	sumergidos 48 horas	diferencia	% abs	promedio %s
f'c = 400	1577.8	1577.8	10.4	0.65914565	0.698615152
	1588.8	1602	13.2	0.82397004	
	1589.6	1599.4	9.8	0.61272977	
f'c = 300	1675.0	1688.8	13.8	0.81714827	0.923692514
	1615.6	1631.0	15.4	0.94420601	
	1588.2	1604.4	16.2	1.00972326	
f'c = 200	1575.2	1600.1	24.9	1.55615274	1.510617665
	1575.6	1597.0	21.4	1.34001252	
	1587.6	1614.0	26.4	1.63568773	

Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto



Figura 5. Barras de prueba 75 x 75mm



Figura 5.1. Barras sumergidas NaOH en prueba.

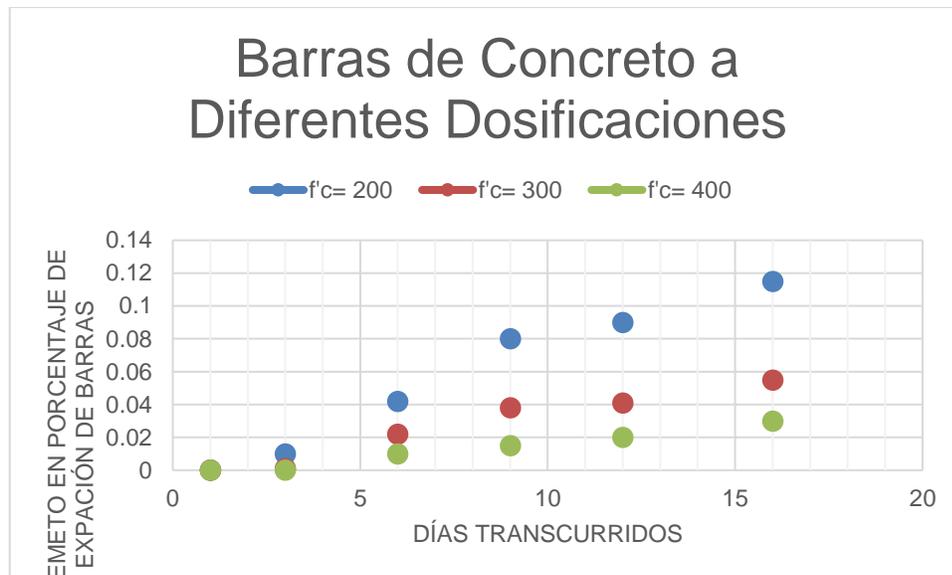


Figura 5.2. Barras de Concreto a Diferentes Dosificaciones

Se observó que el concreto de $F'c= 200 \text{ kg/cm}^2$ a los 16 días tuvo una expansión mayor a 0.1%, la de $F'c= 300 \text{ kg/cm}^2$ en 0.05% y la de $F'c=400 \text{ kg/cm}^2$ en 0.03% por lo que nos damos cuenta que si hay relación entre un porcentaje de resistencia, permeabilidad y su expansión.

23.- CONCLUSIONES

Independientemente del carácter reactivo de los materiales existe una relación directamente proporcional, “a mayor resistencia podemos tener menor permeabilidad y más baja reacción química” debido al porcentaje de agua que absorbió cada una de las barras.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

24.- REFERENCIAS

Binal, A., 2015, The Pessimum Ratio and Aggregate Size Effects on Alkali Silica Reaction: *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 15, p. 725-731.

Eddy, H., (2011), "Agregados", *Reactividad Alkali Agregado, Notas del concreto*.

Godart, B., M. de Rooij, and J. G. M. Wood, 2013, *Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures: Part 1, Diagnosis (AAR 6.1)*, v. 2013;1; DE, Springer Verlag.

Golmakani, F., 2013, *Possible Modifications to the Accelerated Mortar Bar Test (ASTM C1260)*, ProQuest Dissertations Publishing.

Galvis V., 2007, *identificación del deterioro producido por el medio ambiente natural sobre las estructuras de concreto, Monografía de grado, Universidad Industrial de Santander*.

GCC (Grupo Cementos de Chihuahua) (2012) "Tipos de cemento portland según la norma mexicana NMX C 414". Chihuahua, Chih.

Grawx D., (1975) "Fundamentos de mecánica de suelos Proyecto de muros y cimentaciones", Segunda edición, pág. 14 – 15.

Gress D. L., Kozikowski R. L. (2000) "Accelerated ASR testing of concrete prisms incorporating recycled concrete aggregate".

Hasdemir, S., A. Tugrul, and M. Yilmaz, 2012, *Evaluation of alkali reactivity of natural sands: Construction and Building Materials*, v. 29, p. 378-385.

Hermida, G., 2013, *Concreto de baja permeabilidad, algo más que disminuir la relación agua/cemento. Técnicas del Instituto Americano del Concreto Seccional Colombiana. ISSN No. 20111592*.

Hooton, R. D., C. Rogers, C. A. MacDonald, and T. Ramlochan, 2013, *Twenty-Year Field Evaluation of Alkali-Silica Reaction Mitigation: Aci Materials Journal*, v. 110, p. 145 – 148.

Hooton, R. D., and C. A. Rogers, 1993, *Development of the NBRI rapid mortar bar test leading to its use in North America: Construction and Building Materials*, v. 7, p. 539 – 548.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Juárez, Badillo, E., (2005), *Mecánica de suelos 1*”, Fundamentos de la mecánica de suelos, pág. 34 – 37.

Kosmatka S. H., Kerkhoff B., and Panarese W. C., (2004) “Diseño y control de mezclas para concreto”, PCA, Portland Concrete Association.

Latifee, E. R., and P. R. Rangaraju, 2015, Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating Alkali-Silica Reactivity of Aggregates: *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27.

Latifee, E. R., and P. R. Rangaraju, 2015, Miniature Concrete Prism Test: Rapid Test Method for Evaluating Alkali-Silica Reactivity of Aggregates: *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 27.

Lindgård, J., Ö. Andiç-Çakır, I. Fernandes, T. F. Rønning, and M. D. A. Thomas, 2012, Alkali–silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing: *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 223-243.

Lindgård, J., Ö. Andiç-Çakır, I. Fernandes, T. F. Rønning, and M. D. A. Thomas, 2012, Alkali–silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing: *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 223-243.

Lindgård, J., M. D. A. Thomas, E. J. Sellevold, B. Pedersen, Ö. Andiç-Çakır, H. Justnes, and T. F. Rønning, 2013, Alkali–silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion: *Cement and Concrete Research*, v. 53, p. 68-90.

Neville A., (1999), “Tecnología del concreto”, IMCYC, México. P. 163

O’Relly, V., (1990) “Método para dosificar mezclas de concreto”, Editorial Científico

Owsiak, Z., J. Zapala-Slaweta, and P. Czapik, 2015, Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, v. 63, p. 23-29.

Rajabipour, F., E. Giannini, C. Dunant, J. H. Ideker, and M. D. A. Thomas, 2015, Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps: *Cement and Concrete Research*, v. 76, p. 130-146.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

SCT (1984, 2000) Secretaria de comunicaciones y transportes: Características de los materiales para concreto. México

Santos, Silva, A., (2007) "Métodos para la evaluación de la reacción álcali sílice", Laboratorio nacional de ingeniería civil. Portugal

Soriano J. E. 1998, Reaccion Alkali Agregado, Tesis- Guayaquil, Ecuador, Escuela Superior Politécnica del Litoral.5

Stanton, T. E., 1940, Expansion of Concrete through Reaction between Cement and Aggregate, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 107, 1781-1811.

Tarbuck, E., and Lutgens F., (2005) "Geología Física", Ciencias de la tierra, 8va. Edición pag. 107 – 228.

Ugur, I., S. Demirdag, and H. Yavuz, (2010), "Effect of rock properties on the Los Angeles abrasion and impact test characteristics of the aggregates", *Materiales Characterization*, V. 61. P. 90 – 96.

Viadud, E., (2013), "Fisuras en el concreto" Síntoma o Enfermedad, IMCYC, Revistacyt.

ACI 318 – Requisitos de reglamento para concreto estructural.

ACI 211.1 – Proporcionamiento de mezcla de concreto.

ASTM C1260 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method).

ASTM C 1293 - Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction.

ASTM C 642 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

ASTM C 33 – Especificación Normalizada de Agregados para construcción.

ASTM C 88 – Método de ensayo estándar para sanidad de los agregados mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio.

ASTM C 856 – Práctica estándar para el examen petrográfico de concreto endurecido.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

ASTM C 150 – Especificación Normalizada para cemento portland.

ASTM C 227 – Método de prueba estándar para determinar la reactividad potencial alcalina de cemento y agregados.

ASTM C 150 – Especificación de los 8 tipos de cemento portland : Tipo I, Tipo IA, Tipo II, Tipo IIA, Tipo III, Tipo IIIA, Tipo IV y Tipo V.

ASTM C 289 – Ensayo estándar para reactividad álcali – sílice de agregados.

ASTM C 295 – Método de prueba estándar para examen petrográfica de agregados para concreto.

ASTM C 1567 – Método de ensayo para determinar el potencial de reactividad álcali – sílice para combinaciones de agregado y material cementante.

ASTM C 441 – Industria de la construcción, mampostería, bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso no estructural – Especificaciones y método de ensayo.

CIMAV, (Laboratorio) Centro de Investigación de Materiales Avanzados (1994).



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

25.- Anexos

25.1. Anexo I

25.1.1. Normativa ASTM C 1260

Esta norma nos dice como detectar en un periodo de 16 días, la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados en las barras de mortero.

Es muy útil para los agregados que reaccionan lentamente o que produzcan una expansión retardada.

Cuando se observen expansiones excesivas se recomienda para confirmar que la expansión se debe a la reacción álcali-sílice y se hacen exámenes petrográficos del agregado (guía ASTM C 295), para determinar si hay constituyentes conocidos como reactivos, presentes en el agregado.

El examen de los especímenes después de los ensayos de acuerdo con la práctica ASTM C 856 para identificar los productos de la reacción álcali-sílice.

Cuando se haya concluido como resultado de los ensayos realizados con este método de ensayo y de la información suplementaria recomendada, en que un agregado dado debe ser considerado potencialmente dañino, debe también evaluarse el uso de medidas de mitigación, tales como el uso de un cemento bajo contenido de álcalis, el uso de adiciones minerales activas o materiales cementantes, como las puzolanas o el uso de escoria granulada de alto horno molida, etc.

25.1.2. EQUIPO

El aparato para la determinación del cambio de longitud debe estar de acuerdo con la norma ASTM C 490



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

25.1.3. Recipientes de almacenaje de las barras –

Deben ser de tal naturaleza que las barras queden totalmente sumergidas en agua o en la solución de NaOH. Los recipientes deben ser hechos de un material que resista una prolongada exposición a 80°C (176°F) y deben ser resistentes e inertes a la solución de NaOH.

Los recipientes deben ser contruidos de tal forma que cuando se usen para almacenaje de especímenes, se prevenga la pérdida o ganancia de humedad, por el uso de tapaderas ajustadas, un sellado adecuado o ambos.

Las barras en la solución deben ser colocadas y soportadas de tal forma que la solución tenga acceso a la superficie completa de las barras; por lo tanto debe asegurarse que los especímenes no toquen los lados del recipiente y no se toquen unos contra otros. Los especímenes si se colocan verticalmente en la solución, no deben apoyarse en los tornillos de metal de sus extremos.

25.1.4. Baño de temperatura constante –

Un horno de convección o un baño de agua provisto de un control de temperatura que mantenga la temperatura a $80.0 \pm 2.0^{\circ}\text{C}$ ($176 \pm 3.6^{\circ}\text{F}$).

25.1.5. Solución de hidróxido de sodio –

Cada litro de solución debe contener 40.0g de NaOH disuelto en 900 mL de agua y debe ser diluido con agua adicional destilada o desionizada hasta obtener una solución 1.0L. La proporción en volumen de la solución de hidróxido de sodio en relación a las barras de mortero en el recipiente de almacenaje debe ser de 4 ± 0.5 volúmenes de solución por 1 volumen de barras de mortero. El volumen de las barras de mortero puede ser tomado como de 184 mL. Debe incluirse suficiente solución de hidróxido de sodio para asegurar la completa inmersión de las barras de mortero.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

25.1.6. Preparación del agregado –

Todos los agregados a los que se aplique este método de ensayo, deben graduarse de acuerdo con los requisitos dados en el cuadro mostrado abajo. Aquellos agregados que no tengan las suficientes cantidades de material de los tamaños especificados en el cuadro No. 1, deben ser triturados hasta que el material requerido haya sido producido.

La temperatura del cuarto de moldeo y de los materiales secos debe mantenerse a no menos de 20°C (68°F) ni más de 27.5°C (81.5°F). La temperatura del agua de mezcla y la del gabinete o cuarto húmedo no deben variar de 23°C (73.4°F) por más de 1.7°C (3°F).

Debe mantenerse la humedad relativa en el cuarto de moldeo a no menos de 50% HR. El cuarto o gabinete de curado debe cumplir con la norma ASTM C 511.

Debe mantenerse el baño de temperatura constante en el que se almacenan los especímenes en sus recipientes, a una temperatura de 80.0 ± 2.0 °C (176 ± 3.6 °F).

Tamaño de Tamiz		
Pasa	Retenido en	Masa,%
4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No.8)	10
2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	25
1.18 mm (No. 16)	600 µm (No. 30)	25
600 µm (No. 30)	300 µm (No.50)	25
300 µm (No. 50)	150 µm (No. 100)	15



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Cemento de referencia – Se usa un cemento portland que cumpla los requisitos de la norma ASTM C 150

Se ha encontrado que el contenido de álcalis del cemento tiene un efecto mínimo sobre la expansión, en este ensayo.

El cemento usado para este ensayo, debe ser pasado por un tamiz de 850 μm (No. 20) para remover grumos antes de su uso.

Número de especímenes – Deben hacerse por lo menos tres especímenes para cada combinación cemento-agregado.

25.1.7. Preparación de los moldes –

Se preparan los moldes de los especímenes de acuerdo con los requisitos de la práctica ASTM C 490, excepto que las superficies interiores de los moldes se deben recubrir con un agente desmoldante. Un agente desmoldante será aceptable si sirve como un agente separador sin afectar el tiempo de fraguado del cemento y sin dejar cualquier residuo que pueda inhibir la penetración de agua en el espécimen.

Para agregados con una densidad relativa seca al horno igual o mayor a 2.45, las cantidades de materiales secos que hayan de ser mezclados de una sola vez para una amasada de mortero suficiente para hacer tres especímenes de ensayo, deben ser: 440g de cemento y 990g de agregado conformado recomblando las fracciones retenidas en los varios tamices de la graduación prescrita en el Cuadro arriba. Se debe usar una relación agua-cemento de 0.47 en masa

25.1.8. Mezclado del mortero –

El mortero se mezcla de acuerdo con los requisitos de la práctica ASTM C 305.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

25.1.9. Moldeo de los especímenes de ensayo –

Los especímenes de ensayo se moldean dentro de un tiempo total no mayor de 2 min y 15 s después de haber completado el mezclado original de la amasada de mortero. Se llenan los moldes en dos capas aproximadamente iguales compactando cada capa con el apisonador. Se debe presionar el mortero en las esquinas, alrededor de los tornillos de contacto y a lo largo de las superficies del molde, usando el apisonador hasta que se obtenga un espécimen homogéneo. Después de que la capa superior haya sido compactada, cortar a ras del tope del molde la rebaba de mortero y alisar la superficie con algunos deslizamientos de la espátula.

25.1.10. Almacenaje inicial y medición de las barras –

Se coloca cada molde en el gabinete o el cuarto de curado, inmediatamente después de que haya sido llenado. Los especímenes deben permanecer en los moldes por 24 ± 2 h. Luego se sacan los especímenes de los moldes, y mientras se les protege de la pérdida de humedad se les identifica y se hace una lectura inicial con el comparador de longitud. Esta lectura inicial y todas las demás lecturas subsecuentes se hacen con una aproximación al más cercano 0.002 mm. Se colocan los especímenes hechos de cada muestra de agregado en un recipiente de almacenaje con suficiente agua potable para que queden totalmente sumergidos. Se sellan y se colocan los recipientes de almacenaje en un horno de convección o en un baño de agua mantenidos a una temperatura de 80 ± 2.0 °C (176 ± 3.6 °F) por un período de 24h.

25.1.11. Lecturas de cero –

Se sacan los recipientes del baño a temperatura constante de uno en uno a la vez. Se sacan los otros recipientes de almacenaje solo hasta que las barras del primer recipiente de almacenaje hayan sido medidas y retornadas al baño a temperatura constante. El tiempo transcurrido entre retirar y retornar los especímenes al baño a temperatura constante no debe exceder de 10.0 min. Las barras deben sacarse una a la vez del agua y debe secarse su superficie con una toalla poniendo especial atención a los dos tornillos de los extremos. Se toma la



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

lectura cero de cada barra, inmediatamente después de que haya sido secada y se hace la lectura tan pronto las barras estén colocadas en el aparato medidor. Se completa el proceso de secado y lectura dentro de los 15 ± 5 s después de haber sido sacado del agua, el espécimen. Después de hacer las lecturas se deja el espécimen en una toalla, hasta que todas las lecturas comparativas hayan sido hechas sobre las restantes barras. Luego se colocan todos los especímenes hechos de la muestra de cada agregado, en un recipiente separado de almacenaje con suficiente solución 1N NaOH, a $80 \pm 2^\circ\text{C}$ ($176 \pm 3.6^\circ\text{F}$) para que los especímenes queden totalmente sumergidos. Se sella el recipiente de almacenaje y se regresa al horno de convección o al baño de agua.

25.1.12. Almacenaje y lecturas subsecuentes –

Se deben realizar lecturas subsecuentes comparativas de los especímenes periódicamente, con por lo menos tres lecturas intermedias por el período de 16 días después de realizar la lectura cero, y aproximadamente a la misma hora cada día. Si las lecturas se continúan más allá del período de 16 días, se recomienda tomar por lo menos una lectura por semana.

25.2 Anexo II

25.2.1. Normativa ASTM C 1293

Este método permite detectar, en un periodo de 12 meses, la reactividad potencial álcali-sílice de los agregados utilizando barras de concreto.

La reacción álcali sílice es una interacción química entre constituyentes silíceos en el agregado de concreto y iones de hidróxido. La concentración de iones de hidróxido con el concreto es predominantemente controlada por la concentración de sodio y potasio.

El método intenta evaluar expansiones potencialmente deletéreas debido a la reactividad álcali sílice. Debe tomarse decisión en cuanto al número de barras de una misma prueba de la cual también es importante reconocer la variabilidad de la litología del material para evaluar el potencial de esta expansión deletérea.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Esta prueba evalúa el comportamiento de agregados en un ambiente alcalino. La prueba determina el potencial de expansión deletérea del concreto tanto de agregados gruesos como de agregados finos, las condiciones de curado probablemente diferirán de las condiciones de curado de campo en un ambiente seco o húmedo y diferentes temperaturas, combinaciones de estas y otras temperaturas, las cuales no serán duplicadas.

Un examen petrográfico en las barras de concreto debe confirmar los reactivos constituyentes que están presentes y así poder identificarlos. Practica C 856.

La fracción del agregado grueso y fino no es probada al mismo tiempo. Si el agregado grueso está siendo probado por reactividad, un agregado fino no reactivo debe ser usado a la mezcla. Similar si la fracción fina si está siendo probada, un agregado grueso no reactivo es usado. Un agregado no reactivo es aquel que desarrolla una expansión menor a 0.10% en 16 días según ASTM C 1260.

El cemento a usar debe tener un contenido alto en álcalis de 0.9 ± 0.1 %, (Na₂O equivalente es calculado como el porcentaje Na₂O + 0.658 por el porcentaje K₂O del peso del cemento), otra forma de saberlo es a través de la información certificada del fabricante.

Para acelerar en esta prueba la expansión en las barras de concreto con un cemento bajo en álcalis, se le aumenta su contenido al agregar al mismo NaOH para incrementar el contenido de álcalis en 1.25% (Prueba modificada).

Por cada 420 kg/m³ del contenido de cemento deberá corresponder a 5.25 kg/m³ su contenido de álcalis. La relación de agua cemento estará en un rango de 0.42 a 0.45 del peso del cemento de tal manera que esta pueda ser trabajable.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

La graduación del agregado grueso se da como se muestra en tabla, para agregado fino esta se toma como está dada en campo en un concreto a usar.

Graduación Requerida (Agregado Grueso)		
Tamaño de Malla		
Pasa	Retenido	Masa %
19.0-mm (3/4-in.)	12.5-mm (1/2-in.)	33
12.5-mm (1/2-in.)	9.5-mm (3/8-in.)	33
9.5-mm (3/8-in.)	4.75-mm (No. 4)	33

25.2.2. Equipo

Una cantidad suficiente de hidróxido de sodio es adherido a la mezcla para incrementar el contenido de álcalis en 1.25%. Una cantidad suficiente de concreto se mezcla para hacer 3 barras de 76 x 76 x 285 mm. El procedimiento de mezcla es usado conforme a la misma prueba ASTM C 1293. Las barras son curadas en cuarto húmedo $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa mayor a 95% por 24 horas. La primera lectura se lleva a cabo a las primeras 24 horas.

25.2.3. Recipientes de Almacenaje –

Después, las barras son colocadas en contenedores cilíndricos con tapa hermética con 20 ± 5 mm con agua reactiva en el fondo del contenedor. El agua no puede tocar las barras. Los contenedores serán alojados en un ambiente con temperatura de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$. las barras serán medidas a los 7, 28, 56 días, y 3, 6, 9 y 12 meses. Si la expansión promedio de las 3 barras es igual o mayor a 0.04% a la edad de un año el agregado es considerado como potencialmente reactivo.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Las pruebas de moldeo y de medida de longitud deben hacerse conforme a los métodos de pruebas C 157 y C 490.

El contenedor recomendado es de 22 litros (5.8 galones) hecho de polipropileno con tapa y hermética, de 250 a 270 mm de diámetro, de 290 a 310 mm en la parte superior y de 450 a 480 mm de largo, se debe colocar una rejilla donde se colocaran las barras quedando encima del agua que esta en el fondo.

Se debe colocar una tela de absorción hecha de fibras de polipropileno en la parte interna alrededor del contenedor desde abajo hasta la parte superior.

Solución de NaOH –La solución que será depositada en el contenedor se entenderá como agua reactiva según la especificación D 1193 tipo III o tipo IV.

Agua Reactiva				
D 1193				
Limite	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
NaOH gr/Lt	1	5	10	50

Nota:

Se tomara como agua reactiva según D1193 – Tipo III NaOH 10 gr/Lt.

Para incrementar la cantidad de álcalis de un cemento de 0.9% a 1.25%.

Cantidad requerida de NaOH en mezcla de concreto =1.898kg/m³



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

Factor para convertir Na ₂ O a NaOH = 1.47	
Componentes	Peso Molecular
Na ₂ O	61.98
NaOH	39.99
Factor de conversión $2 \times 39.99 / 61.98 = 1.291$	
Cantidad de NaOH requerido $1.47 \times 1.291 = 1.898 \text{ kg/m}^3 \times 420 \text{ kg/m}^3$	

Dosificación de la mezcla de concreto para 4 barras con 20% de desperdicio.

Dosificación Concreto	kg
Cemento	3.32
Grava	7.74
Finos	5.6
Agua	1.75

Nota:

Es recomendado hacer una cuarta barra por prueba en el caso de hacer 3 barras para promediar lecturas, esto con la finalidad de poder hacer un examen petrográfico.

25.2.4. Preparación del agregado-

La preparación del agregado puede ser realizada con respecto a la tabla arriba pagina 64, es un ejemplo para la dosificación del concreto con una resistencia aproximada de 400 kg/cm^2 y una



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

relación agua cemento de 0.42 a 0.45. El agregado grueso se gradúa según tabla mostrada en esta normativa y agregado fino con respecto a campo.

25.2.5. Preparación de los Moldes –

Una cantidad suficiente de concreto se mezcla para hacer 3 barras de 76 x 76 x 285 mm. El procedimiento de mezcla es usado conforme a la misma prueba ASTM C 1293. Las barras son curadas en cuarto húmedo $23 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa mayor a 95% por 24 horas.

25.2.6. Lectura cero –

La primera lectura se lleva a cabo a las primeras 24 horas después de salir del cuarto de curado.

25.2.7. Almacenaje y medición –

La primera lectura se lleva a cabo a las primeras 24 horas. Después, las barras son colocadas en contenedores cilíndricos con tapa hermética con 20 ± 5 mm de agua reactiva en el fondo del contenedor. El agua no puede tocar las barras. Los contenedores serán alojados en un ambiente con temperatura de $38 \pm 2^{\circ}\text{C}$. las barras serán medidas a los 7, 28, 56 días, y 3, 6, 9 y 12 meses. Si la expansión promedio de las 3 barras es igual o mayor a 0.04% a la edad de un año el agregado es considerado como potencialmente reactivo.

Antes de cada lectura las barras deberán ser removidas por 16 ± 4 horas colocadas en cuarto húmedo de acuerdo a la especificación C 511. Cuando las barras vuelvan a ser colocadas en su contenedor deberán ser invertidas de la posición inicial en la que estaban en los contenedores.

ASTM C 1293

Expansión (%)	Reactividad del agregado
Menor a 0.04	No reactivo
Igual o mayor a 0.04	Potencialmente reactivo



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

25.3. Anexo III

25.3.1. Estudio petrográfico

Se lleva a cabo el estudio petrográfico en agregados tanto gruesos como finos.

Imágenes del procedimiento.



Se someten los agregados derivados de los tres bancos tanto agregado fino como agregado grueso obteniendo algunos de sus minerales más importantes y confirmando la procedencia de los mismos donde dos son de origen volcánico y el otro de origen sedimentario.

En las arenas el cuarzo es el componente predominante y en la gravas en lo que corresponde a la de origen calizo la calcita y/o dolomita es el componente predominante, en el resto fueron otros componentes como se muestra.

Revisamos la Arena (1) para ver que minerales encontramos:

25.3.2. Fragmentos subredondeados de:

- Cuarzo.
- Fragmentos de rocas o líticas (en su mayoría caliza) .



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

25.3.3. Abundancia en la muestra:

- cuarzo 80%
- líticos 20%

Muestra prácticamente puro cuarzo: Sílice, tridimita, cristobalita, ópalo.

No se muestra presencia de vidrio.

Líticos formados por riolitas y feldespatos sódicos.

Después analizamos la siguiente prueba de arena (2)

25.3.4. Fragmentos subredondeados de:

- cuarzo
- minerales opacos (óxidos)
- fragmentos de roca (líticos) (al parecer volcánicos)

25.3.5. Abundancia en la muestra:

- cuarzo 50%
- óxidos 10%
- líticos 5%
- otros 15%

No contiene carbonatos (calcita y/o dolomita), sin embargo presenta alto contenido de vidrio volcánico, (50%) del cual 30% es cuarzo, 15% es tridimita y un 5% de feldespatos alcalinos.

Se observan también minerales opacos 15% como: Magnetita, hermtita y materia orgánica.

El material fino es mínimo representa menos del 5%.

Nota: Esta arena al contener vidrio volcánico la hace reactiva a sustancias alcalinas, si no expansivas, degradándola con el paso del tiempo por intemperismo y humedad.

Para los líticos estos son riolitas y rocas acidas de matriz vítrea.



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

El material fino es mínimo representa menos del 5%.

Nota: Arena ideal para creación de concreto, muy poco vidrio, no hay carbonatos y trazas de tridimita. Ligeramente reactiva.

Continuamos con la grava (1)

25.3.6. Muestra de mano:

- gravas angulares.
- puros fragmentos de caliza.

25.3.7. Descripción microscópica de 1 fragmento:

Roca caliza.

- textura micrítica.
- minerales presentes: Minerales carbonatados (calcita y/o dolomita).

25.3.8. Porcentajes:

Calcita 100%y/o dolomita.

Nota: Cristalinidad media, lo cual lo hace considerablemente reactivo. Pura calcita y/o dolomita.

Continuamos con nuestra 2da. Prueba de grava:

25.3.9. Muestra de mano:

- gravas redondeadas.
- mezcla de fragmentos de caliza, rocas volcánicas (varios tipos).

25.3.10. Descripción microscópica de 1 fragmento:

Roca volcánica.

- textura porfídica
- fenocristales de feldespatos



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la

Reactividad álcali agregado del concreto

- matriz desvitrificada
- otros minerales presentes: óxido Fe – Ti, posiblemente cuarzo.

25.3.11. Porcentajes:

- feldespatos 50%
- óxidos Fe – Ti 10%
- vidrio volcánico 35%
- cuarzo 5%

Es un buen agregado para concreto. Se escogió un fragmento representativo y se clasifico como ignimbrita riolitica, he ignimbrita cristalina vítrea.

Vidrio aglutinado sin estar en contacto (encerrado).

Es ligeramente reactiva.

Continuamos con la muestra 3 de grava:

25.3.12. Muestra de mano:

- gravas redondeadas
- mezcla de fragmentos de: Caliza, rocas volcánicas, conglomerados cementados con caliche.

25.3.13. Descripción microscópica de 1 fragmento:

Roca volcánica

- textura porfídica
- fenocristales de feldespatos, plagioclasas, cuarzo
- otros minerales: óxidos Fe - Ti
- matriz: combinación de vidrio volcánico alterado con microcristales (cuarzo y/o feldespatos)

25.3.14. Porcentajes aproximados solamente de ese fragmento:

- feldespatos 40 %



Influencia de la permeabilidad y resistencia en la Reactividad álcali agregado del concreto

- plagioclasas 10 %
- cuarzo 10 %
- óxidos 5 %
- vidrio volcánico 10 %
- otros 25 % Líticos.

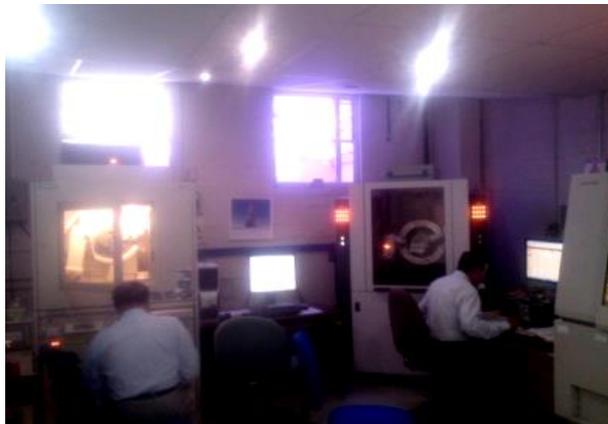
Es un buen agregado para concreto fragmento de roca representativa ignimbrita, riolita lítica cristalina. Poco vidrio.

Ligeramente reactiva.

25.4. Anexo IV

25.4.1. Difracción de Rayos X

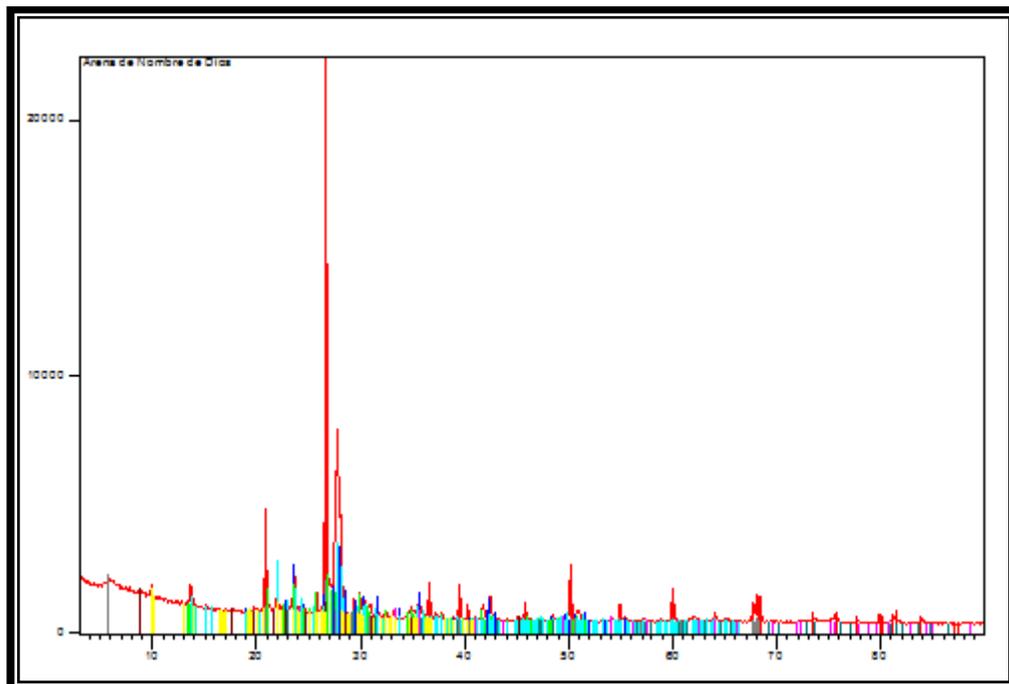
Se colocó el material en un equipo que se encuentra en el CIMAV.



Laboratorio de difracción de rayos X CIMAV

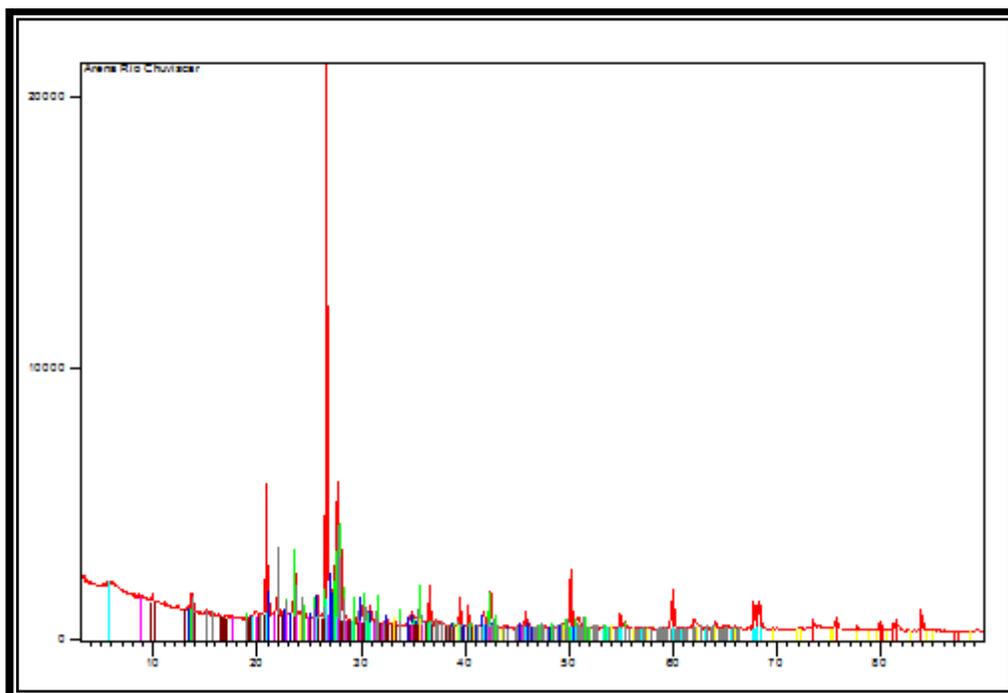
El equipo de difracción de rayos x, nos ayudó en conocer el contenido químico de los materiales, a continuación mostramos las gráficas con sus tablas de los resultados que arrojó el equipo.

25.4.15. Arena A1



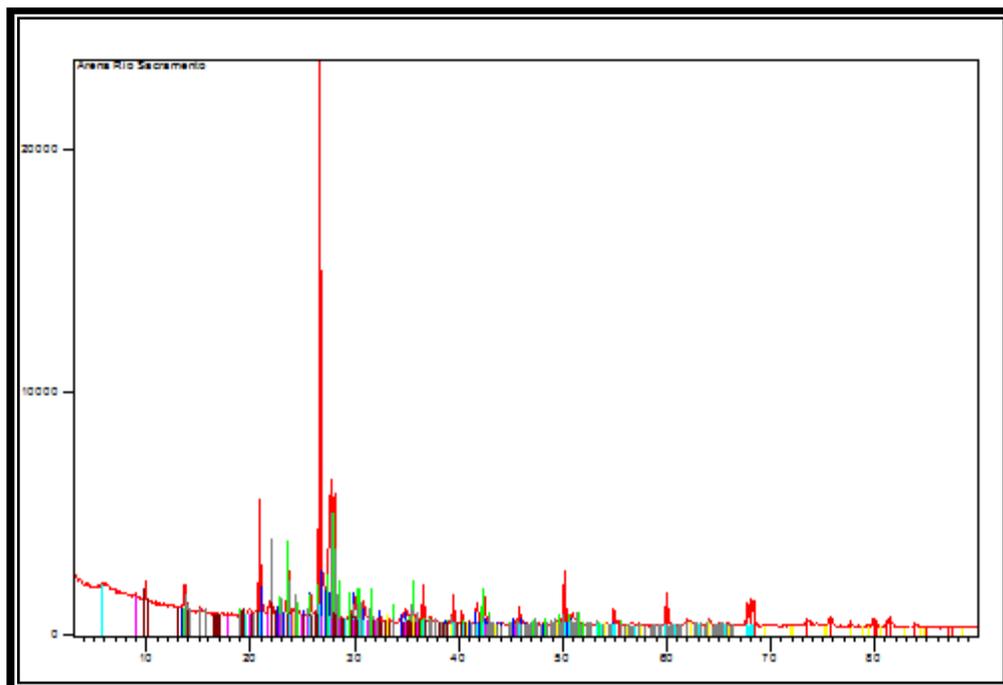
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Si O ₂	Oxido de sílice	Rojo
(Ca , Na) (Si)	Anortita sódica	Azul fuerte
K Al Si ₃ O ₈	Ortoclasa	Verde
(Na , Ca) _{0.3} Fe ₂	Nontronita	Gris
K Al ₂ (Si , Al) ₄	Muscovita	Café
Na (Al Si ₃ O ₈)	Sodio tecno aluminio	Azul claro
Fe ₂ O ₃	Hierro 3 oxido	Rosa
Ca _{1.5} Na _{0.32} (Si)	Estilbita	Amarillo
Ca C O ₃	Calcita sintética	Verde crema

25.4.16. Arena A2



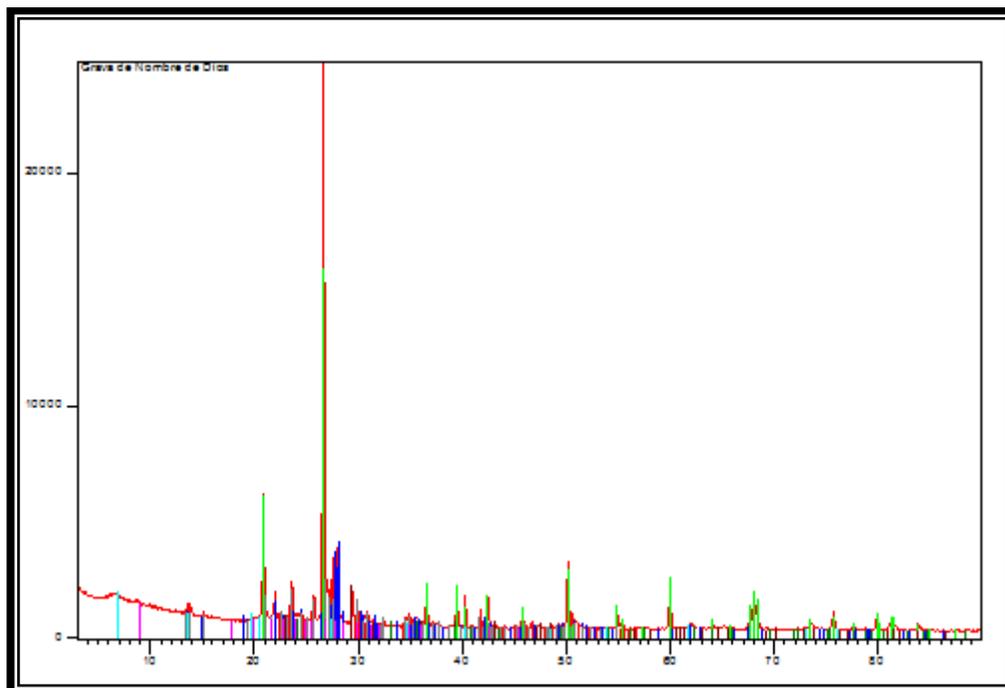
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Si O2	Oxido de sílice	Rojo
K Al Si3 O8	Ortoclasa	Azul fuerte
(Ca , Na) (Si)	Anortita sódica	Verde
Na (Al Si3 O8)	Sodio tecno aluminio	Gris
Ca1.5 Na0.32 (Si)	Estilbita	Café
(Na , Ca)0.3 Fe2	Nontronita	Azul claro
K Al2 (Si , Al)4	Muscovita	Rosa
Fe2 O3	Hierro 3 oxido	Amarillo

25.4.17. Arena A3



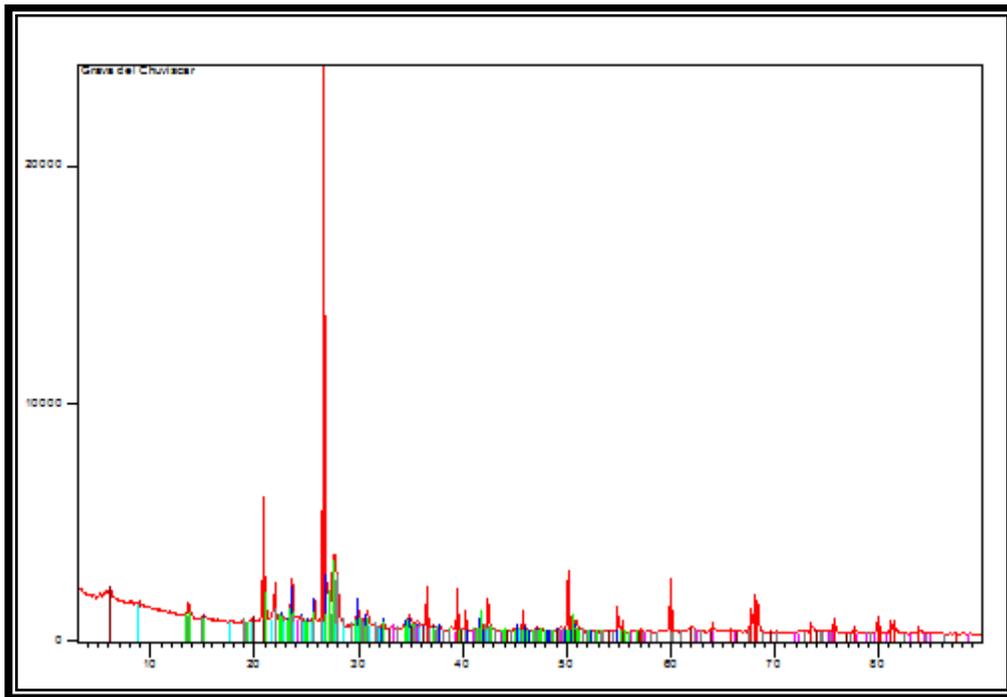
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Si O2	Oxido de sílice	Rojo
K Al Si3 O8	Ortoclasa	Azul fuerte
(Ca , Na) (Si)	Anortita sódica	Verde
Na (Al Si3 O8)	Sodio tecno aluminio	Gris
Ca1.5 Na0.32 (Si)	Estilbita	Café
(Na , Ca)0.3 Fe2	Nontronita	Azul claro
K Al2 (Si , Al)4	Muscovita	Rosa
Fe2 O3	Hierro 3 oxido	Amarillo

25.4.18. Grava G1



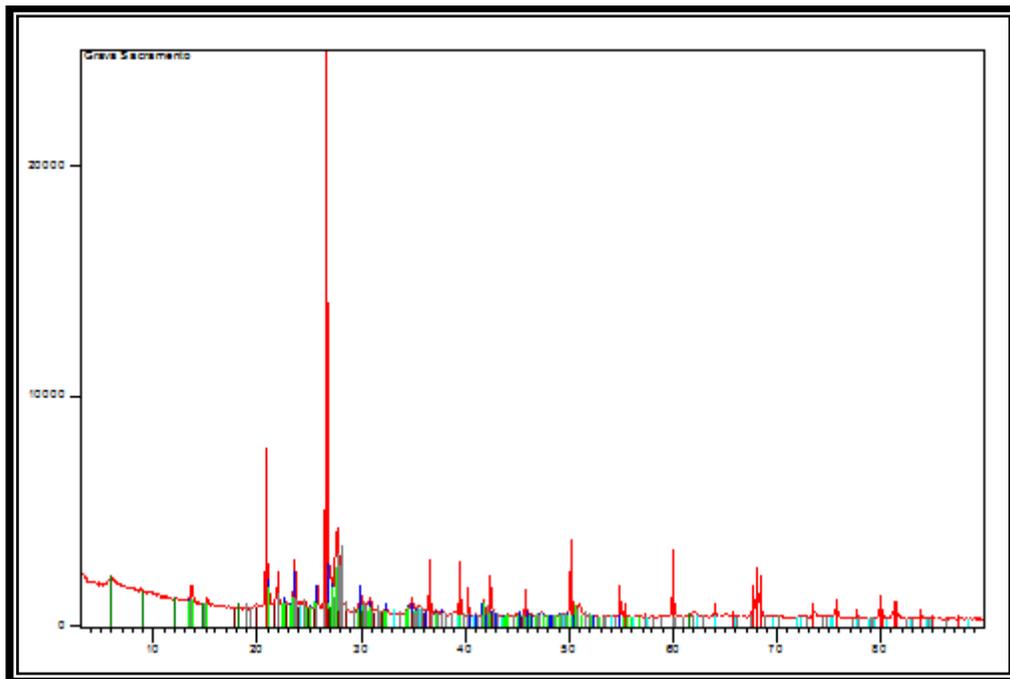
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
K Al Si ₃ O ₈	Microclina	Rojo
Ca Al ₂ Si ₂ O ₈	Anortita ordenada	Azul fuerte
Si O ₂	Oxido de sílice	Verde
K Al Si ₃ O ₈	Ortoclasa	Gris
Ca C O ₃	Calcita sintética	Café
Na (Al , Mg) ₂	Montmorillonita	Azul claro
K Al ₂ (Si , Al) ₄	Muscovita	Rosa
Fe ₂ O ₃	Hierro 3 oxido	Verde crema

25.4.19. Grava G2



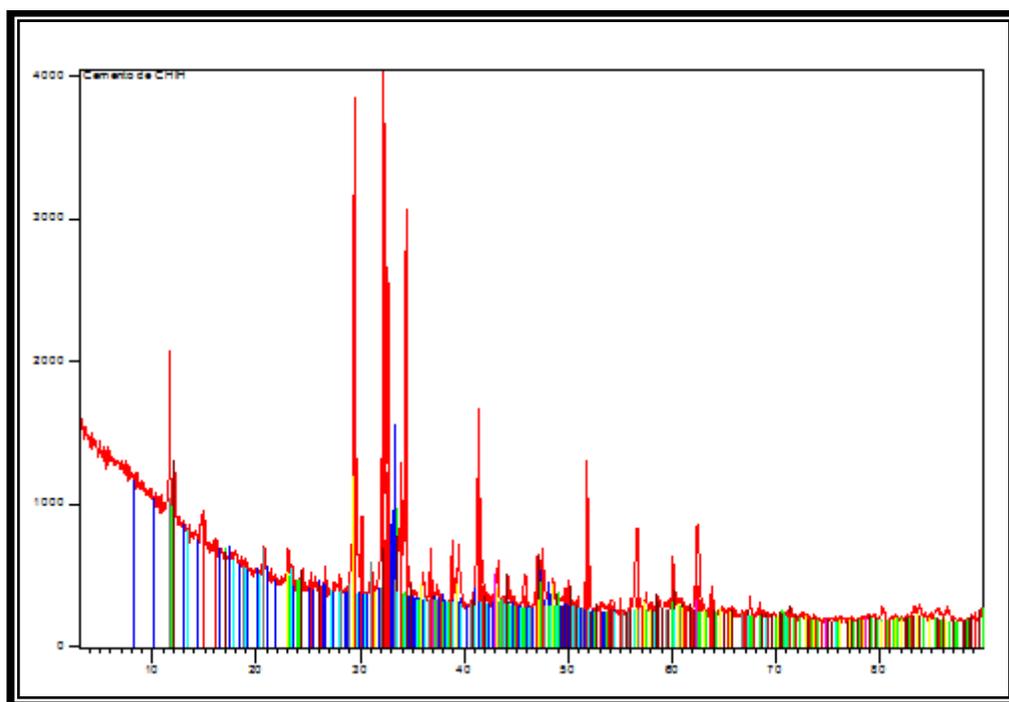
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Si O2	Oxido de sílice	Rojo
K Al Si3 O8	Ortoclasa	Azul fuerte
Ca Al2 Si2 O8	Anortita ordenada	Gris
K Al2 (Si , Al)4	Muscovita	Café
Fe2 O3	Hierro 3 oxido	Azul claro
Na0.33 Fe2 +3 (Si)	Nontronita	Verde crema
K Al Si3 O8	Microclina	Verde

25.4.20. Grava G3



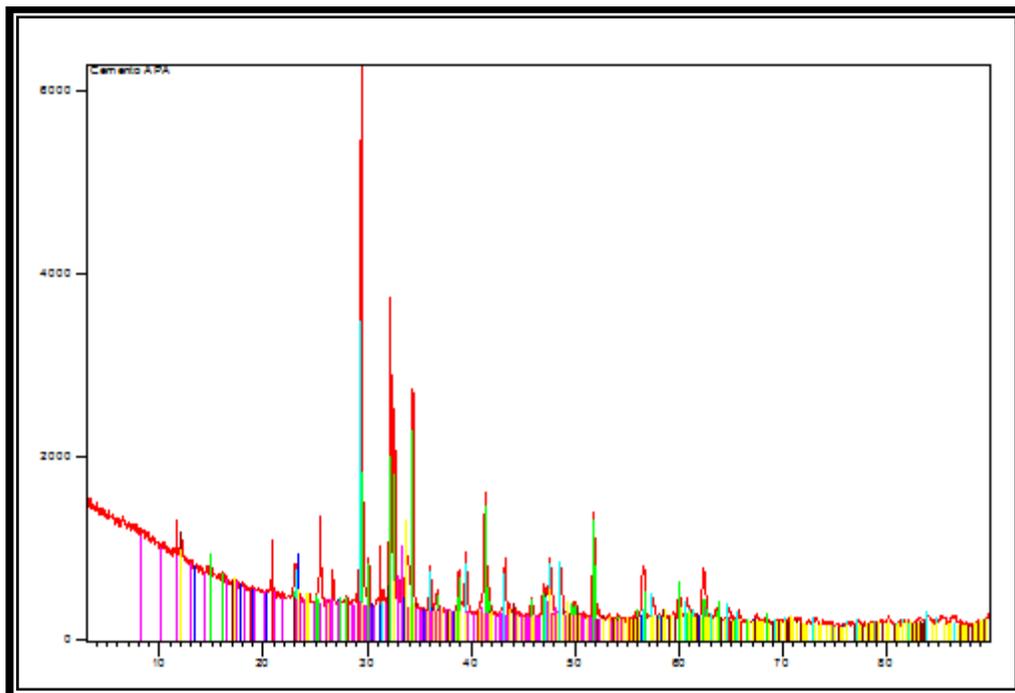
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Si O ₂	Oxido de sílice	Rojo
K Al Si ₃ O ₈	Ortoclasa	Azul fuerte
Ca Al ₂ Si ₂ O ₈	Anortita ordenada	Gris
K Al ₂ (Si , Al) ₄	Muscovita	Café
Fe ₂ O ₃	Hierro 3 oxido	Azul claro
Na (Al , Mg) ₂	Montmorillonita	Verde crema
K Al Si ₃ O ₈	Microclina	Verde

25.4.21. Cemento C1



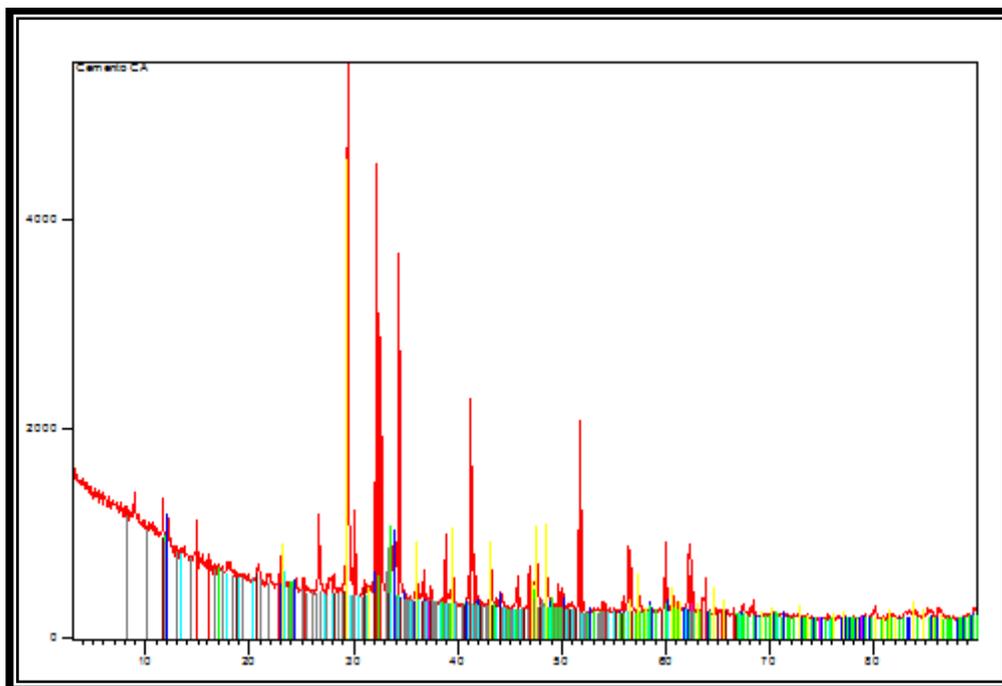
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
$\text{Ca}_3 \text{Si O}_5$	Silicato de calcio	Rojo
$\text{Ca}_{8.25} \text{Na}_{1.5} (\text{Al}_6$	Calcio sodio aluminio	Azul fuerte
$\text{Ca}_2 \text{Fe Mn O}_5$	Hierro dicálcico	Verde
$\text{Ca S O}_4 \cdot 2 \text{H}_2 \text{O}$	Yeso	Gris
$\text{Ca}_2 \text{Fe Al O}_5$	Brownmillerita	Café
$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{S O}_4$	Ye'elimita	Azul claro
Mg O	Periclasa	Rosa
Ca C O_3	Calcita	Verde crema

25.4.22. Cemento C2



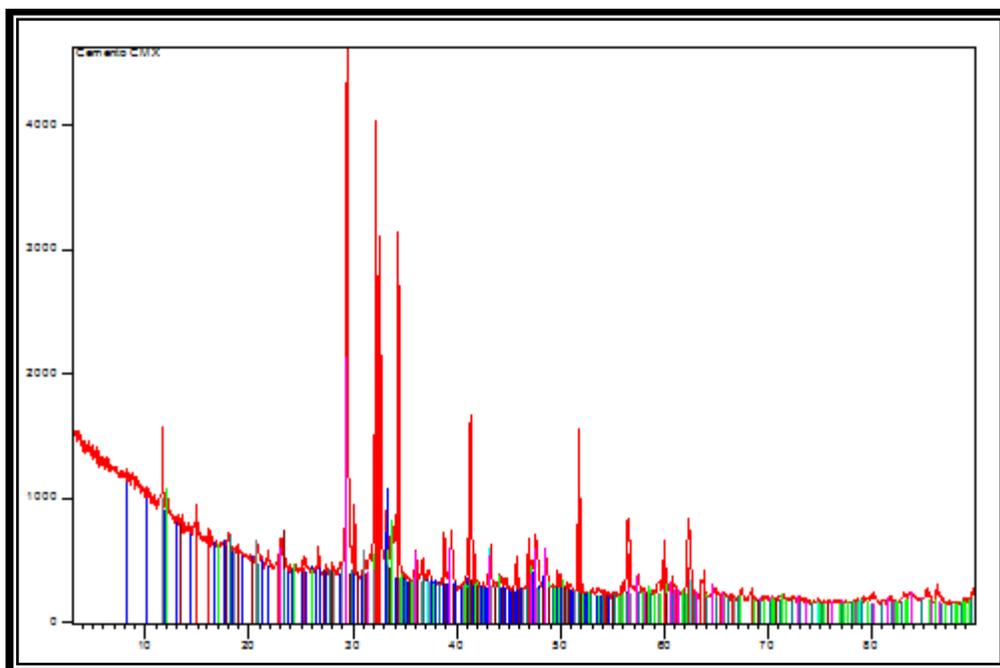
Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
$\text{Ca S O}_4 \cdot 2 \text{ H}_2 \text{ O}$	Yeso	Rojo
$\text{Ca}_4 \text{ Al}_6 \text{ O}_{12} \text{ S O}_4$	Ye'elimita	Azul fuerte
$\text{Ca}_3 \text{ Si O}_5$	Silicato de calcio	Verde
Mg O	Periclasa	Gris
$\text{Ca}_2 \text{ Fe Al O}_5$	Brownmillerita	Café
Ca C O_3	Calcita	Azul claro
$\text{Ca}_{8.25} \text{ Na}_{1.5} (\text{ Al}_6)$	Calcio sodio aluminio	Rosa
$\text{Ca}_2 \text{ Fe Mn O}_5$	Hierro dicálcico	Amarillo

25.4.23. Cemento C3



Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
Ca ₃ Si O ₅	Silicato de calcio	Rojo
Ca ₂ Fe Al O ₅	Brownmillerita	Azul fuerte
Ca ₂ Fe Mn O ₅	Hierro dicálcico	Verde
Ca _{8.25} Na _{1.5} (Al ₆)	Calcio sodio aluminio	Gris
Ca S O ₄ · 2 H ₂ O	Yeso	Café
Ca ₄ Al ₆ O ₁₂ S O ₄	Ye'elimita	Azul claro
Mg O	Periclasa	Rosa
Ca C O ₃	Calcita	Amarillo

25.4.24. Cemento C4



Formula química	Nombre del compuesto	Color de identificación
$\text{Ca}_3 \text{SiO}_5$	Silicato de calcio	Rojo
$\text{Ca}_8.25 \text{Na}_{1.5} (\text{Al}_6)$	Calcio sodio aluminio	Azul fuerte
$\text{Ca}_2 \text{FeAlO}_5$	Brownmillerita	Verde
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	Gris
$\text{Ca}_4 \text{Al}_6 \text{O}_{12} \text{S}_4$	Ye'elimita	Café
MgO	Periclasa	Azul claro
CaCO_3	Calcita	Rosa
$\text{Al}_{14} \text{Ca}_{12} \text{O}_{33}$	Mayenita	Verde crema