UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ESTUDIO DE DURABILIDAD AL ATAQUE DE SULFATOS DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO.

Arq. William Garzón Pire

Universidad Nacional de Colombia
Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia

2013

ESTUDIO DE DURABILIDAD AL ATAQUE DE SULFATOS DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO.

Arq. William Garzón Pire

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Construcción

Directora:
Arq. Mgr. Martha Luz Salcedo Barrera

Línea de Investigación:
Concretos

Universidad Nacional de Colombia
Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2013

Dedicatoria

El noble trabajo, la guía constante de una Madre, la presencia y consejos de un Padre, La paciencia y el amor de una Esposa, y el cariño e inocencia de un Hijo, hacen posible que mi trabajo y mis ideas puedan ser una realidad. Ellos son mi motor y motivo; por ellos seguiré pensando en cómo cada acto que realicemos se puede mejorar.
Porque quiero que las generaciones futuras puedan agradecer a sus antecesores, por haberles dejado un mundo mejor.

A Martha, Manuel, Lady, Andrés, Diana y Juan David.

Resumen

El ataque químico al concreto es uno de los factores que mas afectan la durabilidad de los concretos. Dentro de estos químicos, uno de los que se considera mas perjudicial es el Sulfato de Magnesio. Este afecta directamente al Aluminato Tricálcico presente en el cemento. Esta acción se puede ver incrementada en concretos con mayores contenidos de cemento, y aun más cuando este, se presenta también en los agregados de la mezcla.

Basándose en esta hipótesis, y usando como herramienta las Normas de ensayos de expansión, se realizaron inmersiones de muestras de concreto con agregado reciclado en una solución de sulfato del 5%, teniendo como variables el porcentaje de reemplazo de agregados, la relación agua/material cementante y reemplazo con cenizas volantes, teniendo en cuenta que esta última genera menor permeabilidad en los concretos y mayor resistencia al ataque de los sulfatos. (MOLINARI, 2011). Así mismo se produjeron muestras para determinar las resistencias de cada una de las variables a estudiar, y posteriormente comparar las muestras curadas en la solución de sulfatos con las que se curaron con inmersión en tanque. Producto de estos ensayos se evidenciaron mayores expansiones en las muestras con mayor relación agua/material cementante, pero que en la mayoría de los casos se disminuía con la adición de ceniza volante en la mezcla. Para mezclas con menores relación A/Cte se evidenciaron menores expansiones, pero a su vez menores resistencias y en las muestras con adición de cenizas, menor manejabilidad del concreto.

Palabras Claves:

Concreto con agregado reciclado.
Durabilidad.
Ataque de sulfatos.
Expansión.
Adición de cenizas volantes.

Abstract

Chemical attack the concrete is one of the factors that affect the durability of concrete. Within these chemicals, one of which is considered more harmful the magnesium sulfate. This directly affects the tricalcium aluminate in cement. This action can be strengthened in concrete with higher cement contents, and even more when it is presented also in the mix aggregates.

Based on this assumption, and using as tool Standards expansion tests were performed on samples dives recycled aggregate concrete sulfate solution 5%, having as variables the replacement percentage of aggregate, the water / cementitious material and fly ash replacement, given that the latter generates at the lower permeability and higher specific resistance to attack by sulfates. (Molinari, 2011). Also samples were produced to determine the resistance of each of the variables to study and compare the samples subsequently cured sulfate solution with which they react with the immersion tank. Product of these assays showed greater expansions in samples with higher water / cementitious material, but in most cases was lowered by the addition of fly ash in the mixture. For mixtures with lower A / Cte minor expansions were evident, but in turn less resistance and samples not containing ash, less concrete workability.

Keywords:

Recycled aggregate concrete.
Durability.
Sulfate attack.
Expansion.
Adding fly ash.

Contenido

2. Antecedentes 18
1.1. Durabilidad. 18
1.1.1. Ataque químico al concreto 18
1.2. Concreto reciclado. 21
1.3. Ataque de sulfatos al concreto. 24
1.3.1. Ocurrencia 24
1.3.2. Mecanismos 24
1.3.3. Variables De Daño Del Ataque De Los Sulfatos A Los Concretos 24
- Tipo de sulfatos 24
- Concentración de sulfatos. 25
- Tipo de ataque 25
- Presión 25
- Temperatura. 25
- Presencia de otros iones en la solución del sulfato. 25
1.3.4. Factores Que Afectan La Resistencia A Sulfatos Del Concreto 25
- Cementos 26
- Contenido de cemento del concreto. 26
- Relación agua-cemento. 26
- Adiciones. 27

- Aditivos. 27

1.3.5. Ataque de sulfatos y agregados reciclados. 27

3. Estado Del Arte 28

4. Objetivos 33

3.1 General 33

3.2 Específicos. 33

5. Metodología Y Ensayos 35

4.1 Determinación de las propiedades físicas de los agregados. 35

4.1.1 Granulometría 37

4.1.2 Absorción Y Densidad 41

4.1.3 Masa Unitaria 42

4.1.4 Contenido De Materia Orgánica En Arenas 44

4.2 Diseños de mezcla 45

Variables de experimentación de mezclas. 53

4.2.1 Relación A/Cte 54

4.2.2 Reemplazo de agregados Naturales por agregado reciclado 54

4.2.3 Reemplazo de Cemento por ceniza volante 54

6. PRUEBAS Y ENSAYOS. 55

5.1 Ensayos a compresión. 55

5.2 Ensayos De Expansión De Concreto 57

5.2.1 Inmersión en sulfatos. 60

7. RESULTADOS 62

6.1 Tabla de mezclas. 62

6.2 Resultados Ensayos De compresión 63

6.3 Resultados Ensayos de Expansión. 72

6.3.1 Variable: Reemplazo de agregados. 72

6.3.2 Variable: Reemplazo de Ceniza Volante. 80
6.3.3 Variable: Relación A/C. 89
CONCLUSIONES 91
Del proceso y los ensayos. 92
De los resultados. 92
Compresión. 92
Expansión. 95

Ilustraciones

Ilustración 4-1. Desarrollo de pruebas de densidad y granulometría de los agregados. 35

Ilustración 4-2: Grafico de granulometría Agregado Fino Reciclado.....37

Ilustración 4-3: Grafico de granulometría Agregado Grueso Reciclado. 38

Ilustración 4-4: Grafico de granulometría Agregado Fino Natural. 39

Ilustración 4-5: Grafico de granulometría Agregado Grueso Natural. 40

Ilustración 4-6: Resultado prueba de presencia de materia orgánica en agregado fino reciclado. 44

Ilustración 4-7: Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación. Tomado de ACI 211. 45

Ilustración 4-8: Matriz de variables de experimentación. 53

Ilustración 5-1: Toma de asentamiento de una de las muestras.....56

Ilustración 5-2: Muestra conformada por tres cilindros 56

Ilustración 5-3: Molde utilizado para elaboración de viguetas.....57

Ilustración 5-4: Conjunto de viguetas y cilindros de una misma muestra.....58

Ilustración 5-5: Tornillos de ajuste del calibrador fabricados de acuerdo a la norma NTC 3938.....58

Ilustración 5-6: Muestras de viguetas para inmersión en solución de sulfato. 59

Ilustración 5-7: Medición de viguetas en comparador de caratula. 59

Ilustración 5-8: Preparación de la solución de sulfatos en recipientes inertes. 60

Ilustración 6-1: Grafico resumido de resistencias de mezclas. 64

Ilustración 6-2: Tabla de mezcla, variables y resistencias en curado normal. 65

Ilustración 6-3: Grafico de resistencias. Reemplazo de agregados 0% – Adición de cenizas: 0% - Variable Relación A/C 66

Ilustración 6-4: Grafico de resistencias. Relación A/C 0.48 – Adición de cenizas: 0% - Variable % reemplazo agregados.....67

Ilustración 6-5: Grafico de resistencias. Relación A/C 0.48 – Adición de cenizas: 40% - Variable % reemplazo agregados.....68

Ilustración 6-6: Grafico de resistencias. Relación A/C 0.53 – Adición de cenizas: 0% - Variable % reemplazo agregados.....69

Ilustración 6-7: Gráfico de resistencias. Relación A/C 0.53 – Adición de cenizas: 40% - Variable % reemplazo agregados.....70

Ilustración 6-8: Resistencias de diferentes relaciones A/C, con variable de reemplazo de agregados, 0% de adición de ceniza. 71

Ilustración 6-9: Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.48. RCV:0%. ...72

Ilustración 6-10: Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.48. RCV:40%. 74

Ilustración 6-11: Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.53. RCV:0%. .76

Ilustración 6-12. Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.53. RCV: 0%. 76

Ilustración 6-13: Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.53. RCV: 40%. 77

Ilustración 6-14: Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.58. RCV: 0%. 78

Ilustración 6-15. Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.58. RCV: 0%. .....**¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 6-16: Grafico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.58. RCV: 40%. 79

Ilustración 6-17: Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.48. RAR: 0%. 80

Ilustración 6-18: Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.53. RAR: 0%. 81

Ilustración 6-19. Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.48. RAR: 50%. . **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 6-20: Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.48. RAR: 100%. 84

Ilustración 6-21: Gráfico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.53. RAR: 100%. 86

Ilustración 6-22: Gráfico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.58. RAR: 50%. 87

Ilustración 6-23: Gráfico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.58. RAR: 100%. 88

Ilustración 6-24: Gráfico de expansión Vs Relación A/C. RCV: 0%. RAR: 100%.....89

Ilustración 6-25: Gráfico de expansión Vs Relación A/C. RCV: 40%. RAR: 100%.....90

Ilustración 0-14: Ficha Expansión individual M-10. (Continuación).....115

Ilustración 0-21: Ficha Expansión individual M-19.....122

Tablas

Tabla 2-1: Resumen de documentos consultados respecto a durabilidad de concretos. 29

Tabla 2-2: Resumen de documentos consultados respecto a durabilidad de concretos. 32

Tabla 4-1: Granulometría Agregado Fino Reciclado. 37

Tabla 4-2: Granulometría Agregado Grueso Reciclado. 38

Tabla 4-3: Granulometría Agregado Fino Natural. 39

Tabla 4-4: Granulometría Agregado Grueso Natural. 40

Tabla 4-5: Ficha resultado de pruebas de Absorción y densidad de agregados gruesos natural y reciclados. 41

Tabla 4-6: Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AFR. 42

Tabla 4-7: Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AFN. 42

Tabla 4-8: Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AGR. 43

Tabla 4-9: Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AGN. 43

Tabla 4-10: Resumen de caracterización de agregados para diseño de mezcla. 47

Tabla 4-11: Criterios preliminares para el diseño de mezcla. 47

Tabla 4-12: Selección del factor para el peso agregado grueso. Método ACI.....48

Tabla 4-13: Tabla de selección del peso de del agregado grueso. 48

Tabla 4-14: Volúmenes consolidados de materiales sin incluir agregado fino. 49

Tabla 4-15: Calculo del volumen de agregado fino. 49

Tabla 4-16: Presentación de diseño. Variable 1. 0% reemplazo de agregados naturales. ..49

Tabla 4-17: Presentación de diseño. Variable 2. 50% reemplazo de agregados naturales. .50

Tabla 4-18: Presentación de diseño. Variable 3. 100% reemplazo de agregados naturales. 50

Tabla 4-19: Tabla resumen de diseños de mezcla con las variables a comparar. 51

Tabla 4-20: Tabla resumen de las nomenclaturas de las mezclas y las variables a comparar. 51

Tabla 6-1: Tabla de mezclas y variables de ensayo. 62

Tabla 6-2: Resultados de muestras de ensayos de compresión a los 28 días. (Resultados en PSI).....63

Tabla 7-1: Resultados individuales de ensayos de compresión de las muestras.....98

Introducción

Desde la aparición de los concretos con agregado reciclados, a mediados del siglo XX, se han estudiado muchas de sus propiedades físicas y mecánicas. En Europa Central se han dado grandes avances en cuanto a caracterizar la resistencia a compresión y flexión de este tipo de concretos. En principio se asociaban estas propiedades físico-mecánicas a la durabilidad de los concretos, pero las experiencias prácticas y el avance de la investigación en este campo han demostrado que son estos aspectos necesarios, más no suficientes para obtener un concreto durable.

Bajo la luz de las normas vigentes, la durabilidad se ratifica como propiedad fundamental para el diseño de estructuras en concreto. Instituciones de carácter normativo como el ACI (American Concrete Institute), las normas ASTM, entre otras, le han dado la relevancia al diseño de estructuras bajo la óptica de la durabilidad como factor fundamental.

El ACI define la durabilidad del concreto de cemento Portland, como (ACI 201, 2001): "La habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, la abrasión, o cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzca deterioro del concreto."[1] De esta manera se entiende que la durabilidad no depende únicamente de la elaboración del concreto sino del medio al que este se exponga.

Esta investigación pretende determinar el efecto que tienen sobre el concreto con agregados gruesos reciclados agentes agresivos, específicamente los sulfatos, que

[1] **ACI 201.2R-01**, **Guide to Durable Concrete**, 2001.

puedan afectar la vida útil de este, y así poder demostrar si su aplicabilidad se puede ampliar en el campo de la construcción. Al demostrarse una buena resistencia a agentes externos y del medio, se contemplaría el potencial uso de estos en cimentaciones en suelo con contenidos altos de sulfatos.

Por definición los concretos reciclados son aquellos que reemplazan alguno de sus agregados –sean finos o gruesos- por materiales que se reutilizan con un fin específico, para generar un concreto que cumpla con determinadas características de resistencia o estética. Dentro de estos tipos de concretos se destacan dos, que por su uso y los estudios que se han desarrollado alrededor de estos, son los mas comunes en su aplicación en la industria de la construcción. El primero es aquel que reemplaza los agregados finos o gruesos por escombros arcillosos provenientes de ladrillos o bloques. Este se utiliza con bastante frecuencia en concretos que requieren una pigmentación especial, y que no requieren un desempeño de resistencia muy alto.

En segundo lugar se encuentran los concretos con agregados de concreto reciclado. Estos son utilizados en la industria de la construcción para elementos que pueden requerir un desempeño de resistencia mayor que los anteriormente mencionados. En esencia, estos concretos se elaboran reemplazando el agregado natural, por agregado reciclado; específicamente con residuos triturados de concreto.

Esta práctica, que nace como consecuencia de la reconstrucción de las ciudades mas afectadas al final de la II Guerra mundial, se ha ido incrementando en países europeos, dado la escasez del recurso natural, y se ha ido perfeccionando específicamente desde la década de los 80’s.

Precisamente desde esta óptica, y bajo los esquemas actuales de conservación de las estructuras, que han empezado a predominar, no solo en los concretos reciclados, sino a nivel general, aspectos fundamentales que permitan garantizar la estabilidad estructural de las edificaciones. Dentro de estos aspectos, uno de los mas predominantes en las

últimas décadas ha sido la determinación de la durabilidad de las estructuras en concreto.

1. Antecedentes

1.1. Durabilidad.

Como se planteó en la introducción, la durabilidad de una estructura se debe plantear desde varios niveles. Para el caso específico del objeto de investigación del presente trabajo, se pretende visualizar desde la perspectiva del material, específicamente del concreto.

Bajo esta óptica, los diferentes agentes que pueden afectar la durabilidad del concreto son:[2]

- Hielo y deshielo.
- Exposición a agentes químicos.
- Abrasión.
- Corrosión de metales u otros metales embebidos en el concreto.
- Reacciones químicas de los agregados.

Para el caso específico, y tema central de esta tesis, la investigación se centrara en el ataque químico, especialmente el causado por los sulfatos solubles.

1.1.1. Ataque químico al concreto

El ión sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. El contenido de ión sulfato de las aguas subterráneas es considerable en

[2] ACI 201.2R-01, Guide to durable concrete, Reported by ACI Committee 201.

los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales.

En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario.

Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio y de sodio, todos ellos de diferente solubilidad.

La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio C3A y el ferro aluminato tetra cálcico C3FA.

El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

- La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferro aluminato tetra cálcico, produciendo sulfo aluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).
- La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita
- La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento.[3]

El ataque por sulfatos es uno de los mas peligrosos para el concreto, el agente agresivo comienza por atacar los granos de Clinker hidratados, la pasta de cemento sufre cierta expansión, se torna blanda y por último se agrieta.

De los cuatro compuestos de cemento Portland (aluminato tricálcico, aluminato tetra cálcico, silicato bicalcico y silicato tricálcico) el mas vulnerable es el aluminato tricálcico (C3A) Este compuesto reacciona con el sulfato de calcio (CaSO4) mas 32 moléculas de agua (32 H2O) formándose un sulfoaluminato cálcico llamado etringita (C3A 3 CaSO4)

[3] GONZALEZ, De La Cotera Manuel, Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto, Perú, 1991.

que es poco soluble y que crea muy fuertes presiones por su aumento de volumen (expansión) que es alrededor de 2.3 veces el original.

$$CaSO4 + C3A + 32H2O \rightarrow C3A\ 3\ CaSO4\ .\ 32\ H2O$$

Como afirma Gómez ((Grübi P)GOMEZ CORTES, 2002), el sulfato de calcio es mas agresivo que el de sodio y el de magnesio. Su ataque sobre el concreto, que puede ser físico o fisicoquímico, se da por reacción con el aluminato cálcico hidratado, generando la formación de yeso en los capilares y espacios vacíos. Este efecto inicialmente aumenta la compacidad del concreto pero como el yeso es un compuesto expansivo, finalmente deteriora el material.[4]

Teniendo en cuenta esto, se han generado múltiples recomendaciones y normas en las que se especifican ciertas características con las cuales se debe contar para lograr un concreto durable y resistente a sulfatos. En esencia las características que debe tener un concreto para reducir el impacto del ataque de los sulfatos son:

- Garantizar la baja permeabilidad y porosidad del concreto.
- Reducir la reacción que tiene los sulfatos con el aluminato tricálcico.

Para garantizar la baja permeabilidad del concreto es recomendado[5] disminuir la relación agua cemento de la mezcla, teniendo siempre en cuenta que esta no provoque posteriormente fisuras por contracción del concreto, por el calor de hidratación de la pasta de cemento.

La segunda característica se debe especialmente al tipo de cemento empleado en la mezcla. De esta manera, y de acuerdo a la ASTM C 150, existen cementos de alta resistencia a los sulfatos (Tipo V y Tipo II), los cuales tienen un contenido moderado de Aluminato tricálcico lo que hace menos vulnerable a la mezcla de reaccionar ante la presencia de los sulfatos.

[4] José Gabriel. Materiales para Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2002. p. 148.

[5] ACI 201.2R-01, Guide to durable concrete, Reported by ACI Committee 201.

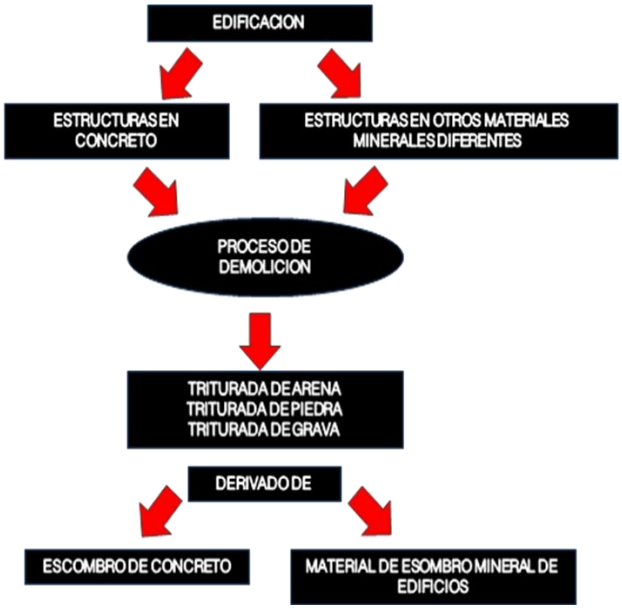
Ahora bien, estas condiciones de estudio han sido estudiadas bajo la luz de la existencia en la mezcla de agregados naturales, que solo en determinados casos, puedan llegar a ser nocivos para los efectos de durabilidad del concreto.

A nivel de hipótesis inicial, el concreto con agregado grueso reciclado presentaría una mayor vulnerabilidad a estos ataques, dado que el sulfato, que ataca a la pasta de cemento, también atacaría a los agregados.

1.2. Concreto reciclado.

El concreto reciclado paso de ser un campo de investigación, a ser una práctica que ha sido usada por muchos años en diferentes ciudades que han liderado las investigaciones de este material. Varios proyectos pilotos han sido implementados en estas ciudades con resultados alentadores (Koulouris A., Fried, & Roberts, 2004) (Poon C., 2007). Se ha llegado a generalizar el uso de este tipo de concretos que incluso se han generado normas de uso alrededor de este, con el fin de definir sus especificaciones.

Figura 1:1 **Proceso del concreto con agregado reciclado.** (Grübi P, November 11–12 1998)



Una de estas normas es el código alemán (Grübi P, November 11–12 1998)que incluye dentro de sus capítulos de concreto reforzado un aparte especial para el uso de concretos reciclados, en el que se especifica, entre otras características, sus posibles campos de aplicación, los contenidos máximos de agregado reciclado, su absorción y se restringe el origen de los agregados reciclados para que cumplan la especificaciones de este código, y que deben ser, en gran medida, muy similares a las que debiera cumplir un concreto con agregados naturales, regidas bajo la norma DIN 1045.

Los usos que permite esta norma están dados bajo las siguientes especificaciones:

Figura 1:2 **Campos de aplicación de concretos con agregados reciclados, según Código alemán Fuente: International symposium "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate". Elaboración Propia**

CAMPOS DE APLICACIÓN	RESTRICCIONES
Componentes interiores	ninguna
Componentes esteriores en general	el material debe ser seleccionado
Componentes impermeables	el menor contacto en contra
Componentes con resistencia moderada a ataques quimicos	reaccion alkali silica

La clasificación de los agregados reciclados se puede dar por su origen o por su desempeño en el concreto. Por su procedencia encontramos:

- Agregados tipo 1, que son aquellos que provienen de la mampostería.
- Agregados Tipo 2, provenientes de escombros de demoliciones de estructuras en concreto. (puentes, estructuras, vías, etc.)
- Agregados Tipo 3 que combinan agregados de concreto con naturales.

Por su desempeño, dependiendo que agregado se piense reemplazar, sea el fino o el grueso. En aquellas investigaciones que resaltan el comportamiento de resistencia a compresión del concreto, se reemplaza el agregado grueso, parcial o totalmente, ya que se ha comprobado su mejor comportamiento, y además existe la limitante para el reemplazo del agregado fino que es su difícil control para evitar la contaminación de este con demás partículas.

Desde el punto de vista técnico, para que el escombro de concreto, sea un agregado válido, debe cumplir con las mimas exigencias normativas que los concretos con agregados naturales.

Dentro de las propiedades inherentes a los concretos reciclados sobresalen el hecho de que tienen una mayor absorción de humedad comparada con la de los agregados naturales (9.6% vs 1.9%) (LEON Rodríguez, 2001), debido a los contenidos de cemento adjuntos a las partículas de este (TAM Vivian, 2008); menor peso unitario (1140 kg/m3 vs 1458 kg/m3). Los concretos compuestos con agregados gruesos reciclados presentan unas resistencias ligeramente mayores (12%) para relaciones a/c altas (0.60), y notablemente mayores (47%) para relaciones a/c bajas (0.40). Su comportamiento a la flexión es significativamente mayor (25%) que la de un concreto con agregado natural con relaciones a/c altas (0.60), y aun mas altas con relaciones a/c mas bajas (0.40). (LEON Rodríguez, 2001)

También se ha determinado que el concreto con agregados reciclados presenta mayor permeabilidad (Padmini, 2009), lo que incrementa el daño producido por los sulfatos, paralelamente con los posibles daños ocasionados por la corrosión de los refuerzos y carbonatación.

1.3. Ataque de sulfatos al concreto.

1.3.1. Ocurrencia

En ocasiones se encuentran sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio, que ocurren naturalmente en el suelo o disueltos en el agua que corre por el suelo o presentes en agregados (por ejemplo, pirita). El sulfato puede estar presente también en los efluentes y desechos industriales tales como los de las industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio y en la minería. El agua empleada en las torres de enfriamiento también puede contener sulfatos debido a la acumulación gradual de sulfatos provenientes de la evaporación.

1.3.2. Mecanismos

Hay dos reacciones químicas involucradas en el ataque de sulfatos al concreto.

- Reacción del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando sulfatos de calcio (yeso).
- Reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado, formando sulfoaluminato de calcio (etringita).

Estas dos reacciones dan como resultado un incremento en el volumen de sólidos, causa de la expansión y descomposición de los concretos expuestos a soluciones de sulfatos. Debe señalarse que los sulfatos y los químicos en general raramente, si acaso lo hacen, atacan el concreto si se encuentran en una forma sólida o seca. Para que resulte un ataque significativo en el concreto, los sulfatos deben estar en solución y por encima de alguna concentración mínima.

1.3.3. Variables De Daño Del Ataque De Los Sulfatos A Los Concretos

La severidad del ataque de sulfatos al concreto depende de los siguientes factores:

- **Tipo de sulfatos**

Los sulfatos de magnesio y amonio son los más dañinos al concreto.

- **Concentración de sulfatos.**

La presencia de sulfatos más solubles es más perjudicial al concreto. La mayoría de las recomendaciones toman en cuenta la cantidad de sulfatos presente al clasificar la severidad del ataque.

- **Tipo de ataque**

La severidad del ataque se incrementa en el caso de las aguas que fluyen. Así, la naturaleza y el contacto entre el sulfato y el concreto son importantes. El ataque más intensivo tiene lugar en el concreto que está expuesto a ciclos de mojado y secado que en el concreto completa y continuamente sumergido en la solución.

- **Presión.**

La fuerza del ataque aumenta debido a que las presiones tienden a forzar la solución del sulfato en el concreto.

- **Temperatura.**

Al igual que sucede con cualquier reacción química, la velocidad de la reacción se incrementa con la temperatura.

- **Presencia de otros iones en la solución del sulfato.**

Afectan la potencia del ataque. Un ejemplo típico es el agua de mar, que contiene sulfatos y cloruros. Generalmente, la presencia de iones de cloruro altera la extensión y la naturaleza de la reacción química, produciendo menor expansión en el concreto debido a los sulfatos en el agua de mar.

Como puede verse, la intensidad del ataque de sulfatos es una cuestión compleja influida por muchos factores. Sin embargo, en la práctica es difícil considerar todos los factores involucrados y en la mayoría de los casos, la severidad del ataque está relacionada principalmente con la concentración de sulfatos, y la manera de combatirlo se especifica de acuerdo con cada caso.

1.3.4. Factores Que Afectan La Resistencia A Sulfatos Del Concreto

El ataque de sulfatos al concreto tiene lugar cuando la solución de sulfato penetra en el concreto y reacciona químicamente con sus constituyentes, principalmente con la matriz de cemento. Así pues, los factores que afectan la resistencia a sulfatos del concreto no son solamente aquellos que influyen en la reacción química con la matriz de cemento, sino también aquellos que influyen en la permeabilidad y la calidad total del concreto.

- **Cementos.**

La relación entre la resistencia a sulfatos del cemento Portland y su contenido de aluminato tricálcico (C3A) está bien establecida. El cemento Portland que contiene menos de 5% de C3A ha sido clasificado como un resistente a sulfatos, y se usa como el criterio de especificación de muchos reglamentos y normas para el cemento en todo el mundo.

Los estudios han demostrado que los cementos que contienen potencialmente menos hidróxido de calcio en la hidratación se comportan bien en exposición de sulfatos.

Los cementos especificados para el ataque de sulfatos, son, de acuerdo a su contenido de C3A, el tipo II (ataque moderado) y V (ataque severo).

- **Contenido de cemento del concreto.**

Afecta significativamente su resistencia a sulfatos, sin importar la composición del cemento.

La velocidad de deterioro disminuye al incrementarse el contenido de cemento, aún en concretos hechos con cemento Portland ordinario. En otras palabras, para producir concreto resistente a sulfatos, la utilización de un cemento resistente a sulfatos debe combinarse con el uso de un contenido mínimo de cemento. Esta conclusión se refleja en las recomendaciones para producir concreto resistente a sulfatos.

- **Relación agua-cemento.**

La permeabilidad del concreto es un factor significativo que influye en su resistencia al ataque de sulfatos. Cuando se tiene materiales de buena calidad, proporcionamiento satisfactorio y una buena práctica, la permeabilidad del concreto es una función directa de su relación agua-cemento y del tiempo de curado.

En otras palabras, siendo todos los otros factores iguales, la resistencia a sulfatos del concreto se incrementa al disminuir su relación agua-cemento.

Este efecto de la relación agua-cemento se muestra en la tercera figura, basada en los datos obtenidos de las pruebas de exposición.

- **Adiciones.**

Se utilizan cuando se pretenden reducir la cantidad de cemento en la mezcla de concreto, con el fin de reducir el daño potencial del sulfato al aluminato tricálcico del cemento.

- **Aditivos.**

Hay muchos tipos de aditivos disponibles para su incorporación en el concreto para mejorar ciertas propiedades, para economizar o para ambas cosas. Generalmente, el efecto de los aditivos en las propiedades del concreto depende no sólo de su formulación y su interacción con el cemento, sino también de las variaciones o ajustes que provocan en las proporciones de la mezcla de concreto. De este modo, los aditivos que provocan una reducción en la relación agua-cemento y/o incrementan la trabajabilidad, pueden aumentar la resistencia del concreto a sulfatos, a condición de que no se usen para reducir su contenido de cemento. Está bien establecido que los aditivos que contienen cloruro de calcio afectan adversamente la resistencia del concreto a sulfatos.

1.3.5. Ataque de sulfatos y agregados reciclados.

El contenido cementico del agregado reciclado de este tipo de concretos, hace que este, a nivel de hipótesis, sea mas vulnerables a los ataques de los sulfatos, y de esta manera obtendríamos un escenario donde el sulfato ataca mayoritariamente, no solo a la pasta de cemento original, sino en este caso, a los agregados.

Bajo este parámetro, se analizará, bajo la luz de los estudios realizados acerca del comportamiento de los agregados reciclados, un análisis detallado de las propiedades físico-mecánicas de estos con el fin de inferir el posible comportamiento de estos como parte integral del concreto.

2. Estado Del Arte

El concreto reciclado nace a mediados del siglo XX, luego de la Segunda Guerra Mundial, debido a la necesidad de reconstruir las ciudades devastadas por la guerra. Estas construcciones nuevas comenzaron a implementar los escombros dejados para la construcción de nuevos edificios. Sin embargo tuvo un auge de aproximadamente 10 años y hasta comienzos de los setentas se retomaron las investigaciones por la escasez de recursos naturales que se empezaba a presentar en los países de Europa Central.

En principio la principal aplicación que se le dio al Hormigón con agregado reciclado (H.A.R), fue para la elaboración de elementos prefabricados en las edificaciones, debido a que no se habían generado a esta época ensayos que permitieran determinar su comportamiento estructural. Luego, con las investigaciones posteriores, se determinó que al cambiar los diseños de mezcla y los contenidos de cemento se podían obtener mayores resistencias, especialmente a compresión, con lo que su uso se empezó a extender en Europa.

Las investigaciones realizadas sobre el H.A.R, se han encargado de estudiar las propiedades físicas y mecánicas del concreto reciclado, tales como su resistencia a la compresión, flexión, adherencia, pesos específicos, porcentaje de reemplazo de agregado, estudios de contracción y fluencia etc. A nivel internacional, personajes como Malhotra y Buck A.D., han explorado estos aspectos como fundamento para la utilización de este tipo de concreto, en países Europeos como Holanda, Alemania, Noruega, etc. En cuanto a durabilidad, en Europa se ha estudiado el efecto del hielo/deshielo en estos concretos, factor que aplica en nuestro entorno, cuando el concreto es utilizado para ciertos fines como frigoríficos, u otros.

A continuación se relacionan los documentos y tesis que con respecto al tema se han escrito, y que fueron consultadas para el desarrollo preliminar de esta investigación:

Tabla 2-1: **Resumen de documentos consultados respecto a durabilidad de concretos.**

DURABILIDAD					
DOCUMENTOS					
	NOMBRE	**TIPO**	**AUTOR**	**AÑO**	**ENTIDAD / INSTITUTO**
1	Expansión causada por el ataque de sulfato de magnesio al concreto	Tesis	JULIAN HUMBERTO ESCOBAR ESPINAL JORGE JACK PAUL PEREZ HINCAPIE	2004	Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil.
2	Ataque químico al concreto	Exposición	ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA	1991	Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto
3	Guía introductora a la durabilidad en el concreto	Documento	ING. MANUEL GONZÁLES DE LA COTERA	2009	Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto
4	Petrografía de concretos hidráulicos con adición de cenizas volantes de termopaipa	Tesis	VALBUENA LEGUÍZAMO, HUMBERTO	2006	Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Magister en Ciencias Geología
5	Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la micro estructura y durabilidad de la pasta de cemento portland	Tesis	MARIA PAZ LORENZO GARCIA	1993	Universidad Complutense De Madrid, Facultad De Ciencias Químicas

	hidratado				
6	Efecto de diferentes reemplazos de cemento por ceniza volante de termo Paipa sobre resistencia a compresión	Tesis	FONSECA FONSECA, LUIS GABRIEL	2004	Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
7	Efectos del sulfato de magnesio sobre la durabilidad en concretos de alto desempeño	Tesis	JEREZ BARBOSA, SANDRA ROCÍO	2002	Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá Maestría En Estructuras
8	Estudio del comportamiento mecánico de concretos con aditivos expansivos	Tesis	SOTO MURIEL, CARLOS JULIAN	1999	Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá
9	Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations	Investigación	KAMILE TOSUN A, BURAK FELEKOG˘LU A,*, BÜLENT BARADAN A, _I. AKIN ALTUN B	2009	Universidad de Turquía. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061809000543
10	Evaluación del desempeño durable de concretos adicionados con cenizas volantes	Tesis	VALDERRAMA PUENTES, CLAUDIA PATRICIA	2009	Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá. Maestría en Estructuras
11	Sulfate resistances of different types of Turkish Portland cements by selecting the appropriate test methods	Investigación	BURAK FELEKOG˘LU , KAMBIZ RAMYAR, KAMILE TOSUN, BARIS MUSAL	2006	Construction and Building Materials.

NORMAS				
	NOMBRE	**TITULO**	**AÑO**	**ENTIDAD / INSTITUTO**
	ACI 201 2R-01	Guide to durable concrete	2001	ACI
	NTC 5551	Concretos. Durabilidad de estructuras de concretos	2007	Instituto Colombiano De Normas Técnicas Icontec
	ASTM 1012:04 - NTC 3330:2006	Método de ensayo para determinar el cambio longitudinal de morteros de cementos hidráulicos expuestos a una solución de sulfatos.	2004:2006	American Section of the International Association for Testing Material - Instituto Colombiano De Normas Técnicas Icontec
	ASTM490:04 - NTC3938:2006	Aparatos para la determinación del cambio de longitud en pasta de cemento, mortero y concreto.	2004:206	American Section of the International Association for Testing Material - Instituto Colombiano De Normas Técnicas Icontec
	ASTM C157:2006 - NTC 5640:2008	Cambio longitudinal del mortero y el concreto de cemento hidráulico endurecido.	2006:2008	American Section of the International Association for Testing Material - Instituto Colombiano De Normas Técnicas Icontec

Tabla 2-2: **Resumen de documentos consultados respecto a durabilidad de concretos.**

CONCRETOS RECICLADOS			
DOCUMENTOS			
NOMBRE	**TIPO**	**AUTOR**	**AÑO**
INFLUENCE OF AMOUNT OF RECYCLED COARSE AGGREGATES AND PRODUCTION PROCESS ON PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE	INVESTIGACION	M. ETXEBERRIA, E. VÁZQUEZ, A. MARÍ, M. BARRA	2007
Propiedades del concreto reciclado como agregado	TESIS	LEON Rodríguez, Álvaro	2001
New approach in measuring water absorption of recycled aggregates	INVESTIGACION	TAM Vivian	2008
Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete	INVESTIGACION	A.K. Padmini	2009
CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES	DOCUMENTO	German committee for reinforced concrete, University of Dundee, Concrete Technology Unit, London (UK)	1998
Recycled Concrete—A Source for New Aggregate	INVESTIGACION	Rasheeduzzafar, Khan.	1998
NORMAS			
NOMBRE	**TITULO**	**AUTOR**	**AÑO**
ACI 555R-01	Removal and Reuse of Hardened Concrete	ACI Committee 555	2001
PLAN MAESTRO PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS	PLAN MAESTRO PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS	Bogotá distrito capital	2006
Decreto 2104 del 83	Plan de manejo de residuos sólidos	PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA	1983

3. Objetivos

3.1 General

Determinar la expansión causada por el ataque del sulfato de magnesio a Concreto con Agregados Reciclados con diferentes variables de mezcla con el fin de compararlos con el comportamiento de concretos de las mismas características pero con agregados naturales.

3.2 Específicos.

- Generar la caracterización de los agregados reciclados y los agregados naturales con el fin de hacer un acercamiento inicial a los diseño de mezcla a utilizar.

- Establecer diseños de mezcla teóricos de acuerdo a los procedimientos establecidos normativamente y por la bibliografía existente relevante.

- Realizar pre diseños de mezclas prácticas con el fin de conocer la formulación adecuada que cumpla con los criterios de manejabilidad del material propuestos.

- Establecer las resistencias a compresión de cada una de las muestras, de acuerdo a las variables escogidas para la realización de los ensayos.

- Realizar el ensayo correspondiente para determinar los cambios de longitud en las muestras de concretos expuestas a soluciones de sulfato de magnesio, de acuerdo a las variables de experimentación escogidas.

- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas de resistencia y expansión con el fin de determinar los porcentajes de expansión y establecer si están dentro de los rangos de aceptación para concretos estructurales.

- Establecer las relaciones de expansión de cada una de las mezclas, con las variables de resistencia, asentamiento, porcentaje de reemplazo de agregados y adición de cenizas volantes a la mezcla.

4. Metodología Y Ensayos

4.1 Determinación de las propiedades físicas de los agregados.

De acuerdo a las Normas Técnicas Colombianas correspondientes se generaron las respectivas granulometrías de los agregados reciclados y naturales, gruesos y finos. Estas se harán con agregados lavados y sin lavar con el fin de conocer, en el estado natural del material, la influencia que pueda tener los finos adheridos al agregado grueso y la posible pérdida de agua que le puedan generar a la mezcla. Las granulometrías se harán teniendo en cuenta las siguientes Normas:

- NTC 174: Especificaciones de los agregados para el concreto.
- NTC 3937: Arena Normalizada para ensayos de cemento hidráulico.
- NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.

Ilustración 4-1. **Desarrollo de pruebas de densidad y granulometría de los agregados.**

Paralelamente se hicieron los ensayos para conocer los porcentajes de absorción en masa de los agregados reciclados y naturales con el fin de que, en el momento de las mezclas, se hagan las correcciones de masa de agua y no afectar así las relaciones a/cte. que se establecen inicialmente como variables.

- NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado.

Con el fin de conocer las propiedades del agregado fino reciclado se establecen dos pruebas adicionales necesarias. La primera es conocer el porcentaje del material que pasa por el Tamiz 200, con el fin de determinar posibles presencias de arcillas y/o limos del agregado que hacia parte del anterior agregado, o finos cementicos del agregado reciclado, que afecten la relación A/Cte de la mezcla. En segunda instancia se determina el grado de impurezas del agregado fino.

- NTC 78: Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 um en agregados minerales.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

4.1.1 Granulometría

Tabla 4-1: **Granulometría Agregado Fino Reciclado.**

AGREGADO RECICLADO							
	PESO DE LA MUESTRA:	1	KG				
AGREGADO FINO							
ABERTURA DEL TAMIZ		MASA RETENIDA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	NORMA	
(MM)	(DENOM ESTÁNDAR)					INFERIOR	SUPERIOR
4.76	4	55	5.5%	5.5%	94.5%	95%	100%
2.38	8	371	37.2%	42.8%	57.2%	80%	100%
1.19	16	243	24.4%	67.2%	32.8%	50%	85%
0.6	30	130	13.1%	80.2%	19.8%	25%	60%
0.3	50	102	10.2%	90.5%	9.5%	10%	30%
0.15	100	66	6.6%	97.1%	2.9%	2%	10%
	FONDO	29	2.9%	100.0%	0.0%	0%	0%
	TOTAL	**996**	**100.0%**				

Ilustración 4-2: **Grafico de granulometría Agregado Fino Reciclado**

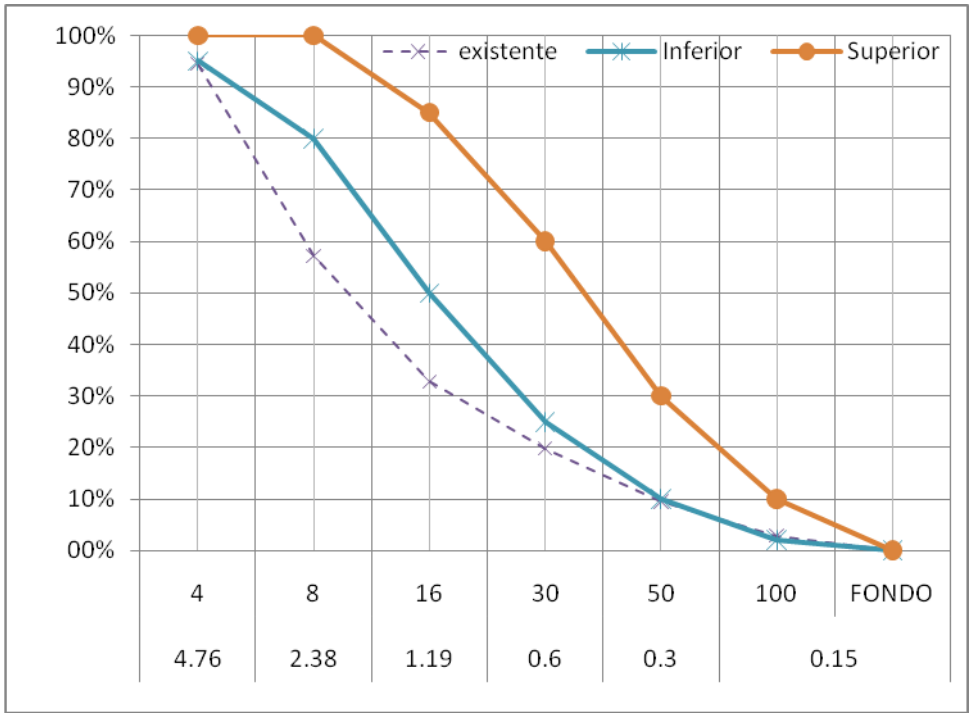


Tabla 4-2: **Granulometría Agregado Grueso Reciclado.**

PESO DE LA MUESTRA:	2	KG

AGREGADO GRUESO

ABERTURA DEL TAMIZ (MM)	MASA RETENIDA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	NORMA	
					INFERIOR	SUPERIOR
37,5 mm	0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
25,0 mm	0	0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
19,0 mm	284	14.2%	14.2%	85.8%	100%	100%
12,5 mm	277	13.9%	28.1%	71.9%	90%	100%
9,5 mm	435	21.8%	49.9%	50.1%	40%	70%
No 4	870	43.6%	93.5%	6.5%	0%	15%
Fondo	130	6.5%	100.0%	0.0%	0%	0%
TOTAL	**1996**	**100.0%**				

Ilustración 4-3: **Grafico de granulometría Agregado Grueso Reciclado.**

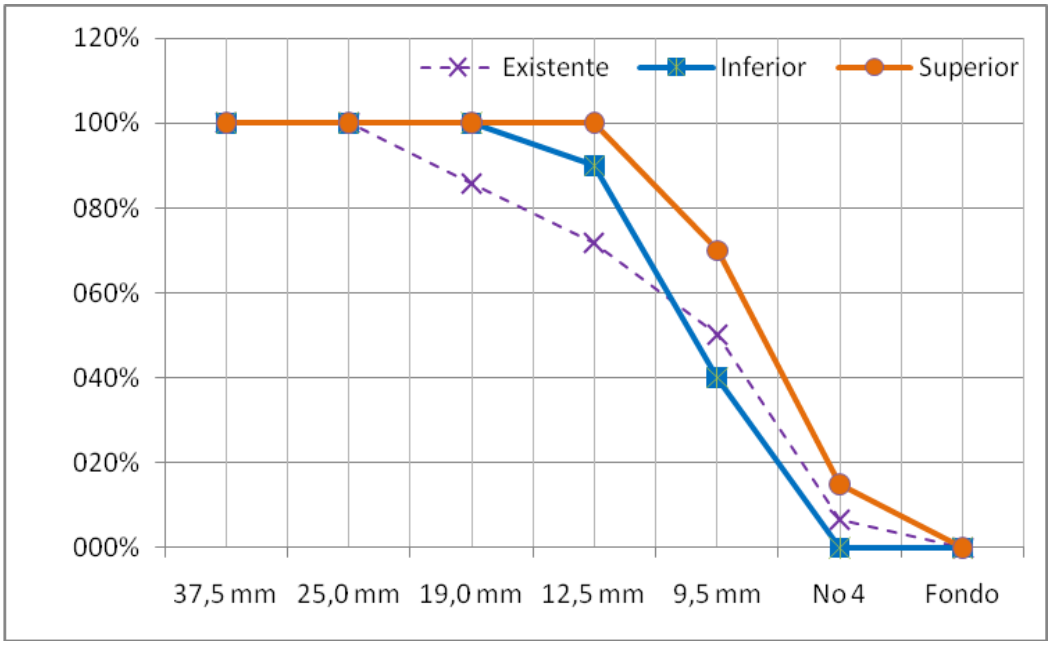


Tabla 4-3: **Granulometría Agregado Fino Natural.**

AGREGADO NATURAL

PESO DE LA MUESTRA:	1	KG

AGREGADO FINO

ABERTURA DEL TAMIZ		MASA RETENIDA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	NORMA	
(MM)	(DENOM ESTÁNDAR)					INFERIOR	SUPERIOR
4.76	4	73	7.4%	7.4%	92.6%	95%	100%
2.38	8	318	32.0%	39.4%	60.6%	80%	100%
1.19	16	130	13.1%	52.5%	47.5%	50%	85%
0.6	30	87	8.8%	61.2%	38.8%	25%	60%
0.3	50	190	19.1%	80.4%	19.6%	10%	30%
0.15	100	157	15.8%	96.2%	3.8%	2%	10%
	Fondo	38	3.8%	100.0%	0.0%	0%	0%
	TOTAL	**993**	**100.0%**				

Ilustración 4-4: **Grafico de granulometría Agregado Fino Natural.**

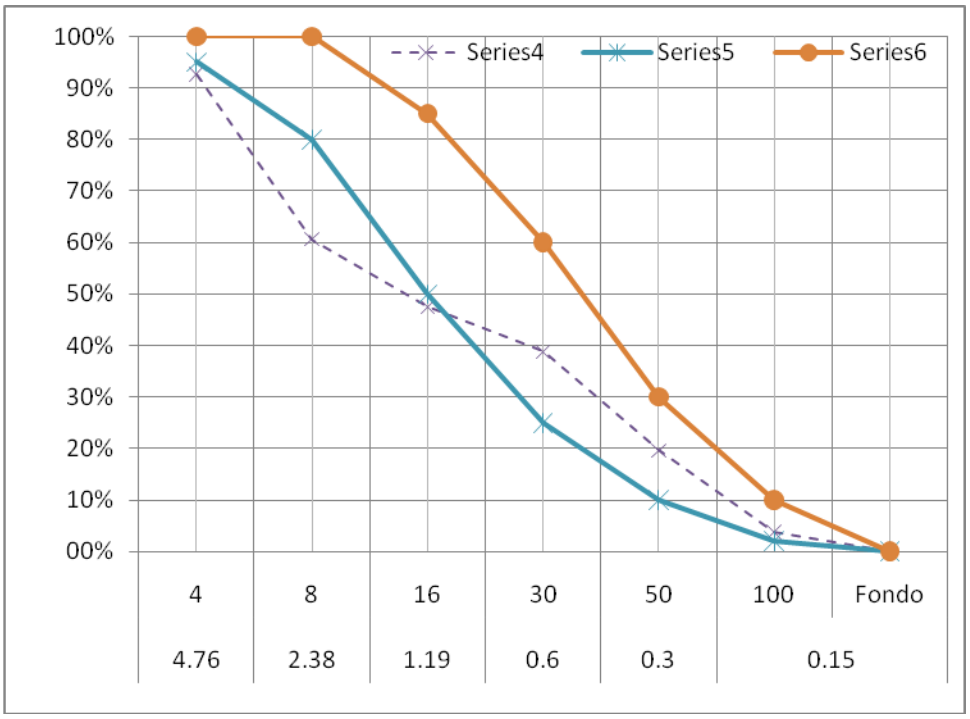
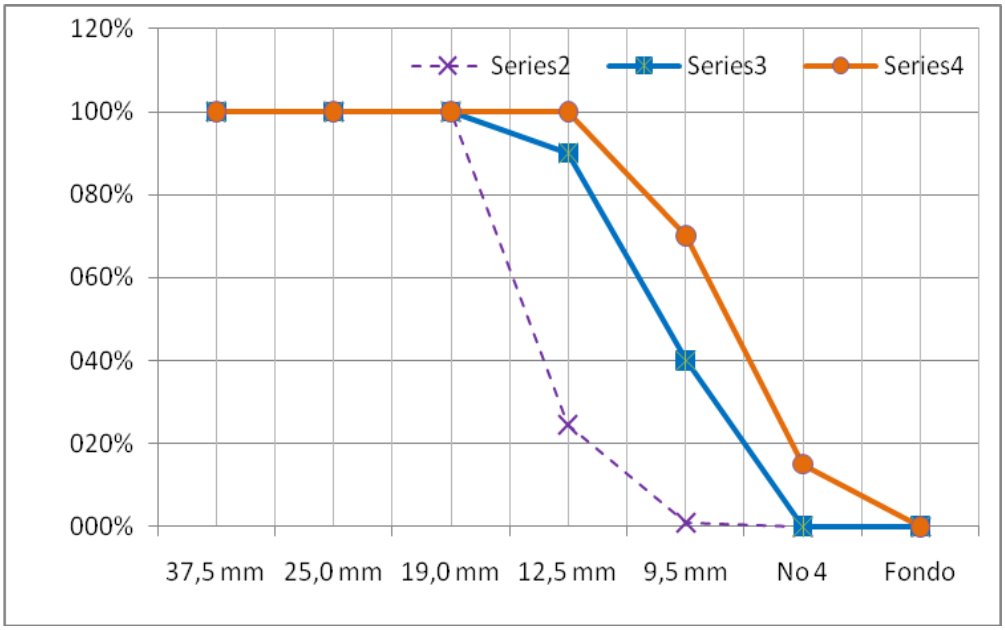


Tabla 4-4: **Granulometría Agregado Grueso Natural.**

AGREGADO GRUESO						
ABERTURA DEL TAMIZ (MM)	MASA RETENIDA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	NORMA	
					INFERIOR	SUPERIOR
37,5 mm		0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
25,0 mm		0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
19,0 mm		0.0%	0.0%	100.0%	100%	100%
12,5 mm	1505	75.4%	75.4%	24.6%	90%	100%
9,5 mm	472	23.6%	99.0%	1.0%	40%	70%
No 4	20	1.0%	100.0%	0.0%	0%	15%
Fondo		0.0%	100.0%	0.0%	0%	0%
TOTAL	**1997**	**100.0%**				

Ilustración 4-5: **Grafico de granulometría Agregado Grueso Natural.**



4.1.2 Absorción Y Densidad

Los ensayos de densidad y absorción de los agregados gruesos se realizaron bajo los procedimientos especificados en la NTC 176.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4-5: **Ficha resultado de pruebas de Absorción y densidad de agregados gruesos natural y reciclados.**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MAESTRIA EN CONSTRUCCION
TITULO DE LA INVESTIGACION
ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS
ARQ. WILLIAM GARZON PIRE
DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 176**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y ABSORCION DEL AGREGADO GRUESO

FORMULA:

$D_{zBulk} = 0{,}9975 \times A/(B-C)$

$Ds\ aparente\ (saturado-superficialmente-seco) = 0{,}9975 \times B/(B-C)$

$Ds\ nominal = 0{,}9975 \times A/(A-C)$

$Absorción,\% = [(B-A)/A] \times 100$

PESO DE LA MEZCLA	3 KG	A	MASA EN AL AIRE DE LA MUESTRA DE ENSAYO MEZCLADA EN EL HORNO.
		B	MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA DE ENSAYO SATURADA Y SUPERFICIALMENTE SECA
		C	MASA EN EL AGUA DEL ENSAYO SATURADA

TIPO DE AGREGADO	(A)	(B)	(°C)	DsBulk	Ds aparente	Ds Nominal	Absorcion
AGREGADO GRUESO NATURAL	2958	3000	1860	2,588	2,625	2,687	1,42%
AGREGADO GRUESO RECICLADO	2797	3000	1709	2,161	2,318	2,564	7,26%

4.1.3 Masa Unitaria

Esta prueba se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma NTC 92, para método compacto y método suelto.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4-6: **Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AFR.**

Masa unitaria agregado fino reciclado				
Vol rec. Arena			0,002831685	
Vol rec. Grava			0,014158424	
masa compactada fino reciclado				
Compactado	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	6,7250	2,718	4,0070	
M2	6,6100	2,718	3,8920	
M3	6,7350	2,718	4,0170	**Peso unitario**
Promedio			3,9720	**1402,70 Kg/m3**
masa suelta fino reciclado				
Suelto	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	6,4640	2,718	3,7460	
M2	6,2780	2,718	3,5600	
M3	6,4570	2,718	3,7390	**Peso unitario**
Promedio			3,6817	**1300,17 Kg/m3**

Tabla 4-7: Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AFN.

Masa unitaria agregado fino natural				
Vol rec. Arena			0,002831685	
Vol rec. Grava			0,014158424	
masa compactada fino natural				
Compactado	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	7,618	2,718	4,9	
M2	7,599	2,718	4,881	
M3	7,6	2,718	4,882	**Peso unitario**
Promedio			4,88766667	**1726,06 Kg/m3**
masa suelta fino natural				
Suelto	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	7,305	2,718	4,587	
M2	7,328	2,718	4,61	
M3	7,278	2,718	4,56	**Peso unitario**
Promedio			4,58566667	**1619,41 Kg/m3**

Tabla 4-8: **Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AGR.**

Masa unitaria agregado grueso reciclado				
Vol rec. Arena			0,002831685	
Vol rec. Grava			0,014158424	
Agregado grueso reciclado compactado				
Compactado	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	30,4	11,5	18,9	
M2	31	11,5	19,5	
M3	30,9	11,5	19,4	**Peso unitario**
Promedio			19,2666667	**1360,79 Kg/m3**
Agregado grueso reciclado suelto				
Suelto	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	29,2	11,5	17,7	
M2	29,6	11,5	18,1	
M3	29,9	11,5	18,4	**Peso unitario**
Promedio			18,0666667	**1276,04 Kg/m3**

Tabla 4-9: **Resultados pruebas de masa unitarias sueltas y compactadas AGN.**

Masa unitaria agregado grueso natural				
Vol rec. Arena			0,002831685	
Vol rec. Grava			0,014158424	
Agregado grueso natural compactado				
Compactado	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	32,5	11,5	21	
M2	32,8	11,5	21,3	
M3	32,4	11,5	20,9	**Peso unitario**
Promedio			21,0666667	**1487,92 Kg/m3**
Agregado grueso natural suelto				
Suelto	Peso total	Peso recipiente	Masa real	
M1	30,7	11,5	19,2	
M2	30,9	11,5	19,4	
M3	31,1	11,5	19,6	**Peso unitario**
Promedio			19,4	**1370,21 Kg/m3**

4.1.4 Contenido De Materia Orgánica En Arenas

Se realizó esta prueba de acuerdo con lo establecido en la NTC 127. El resultado para los dos tipos de arena ensayados, fueron satisfactorios ya que la solución del líquido sobrenadante fue mas claro que el color estándar de la placa No 3, de acuerdo a como lo establece la Norma en su aparte de Interpretación de los resultados.

Ilustración 4-6: **Resultado prueba de presencia de materia orgánica en agregado fino reciclado.**

4.2 Diseños de mezcla.

Los diseños de mezcla que se tienen en cuenta para la etapa experimental de la investigación son:

- Según la NTC 5551 el concreto expuesto a ataques químicos, específicamente al ataque de sulfatos es un concreto de clase 6 subclase 6.3 con ataques mayores a soluciones de sulfato de 3000 mg/lt. Para este tipo de concreto se exige una relación A/Cte de 0.45, con un contenido mínimo de material cementante de 325 Kg/m3 y una resistencia mínima a la compresión de 35 MPa.
- De acuerdo al método de proporcionamiento de mezclas de concreto establecido por el ACI 211, se escogió un asentamiento esperado de consistencia media, resultante en 7.5 cm +-1 cm (tabla 1).

Ilustración 4-7: Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación. Tomado de ACI 211.

Consistencia	*Asentamiento (mm)*	*Ejemplo de tipo de construcción*	*Sistema de colocación*	*Sistema de compactación*
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse)

- Se procede con la escogencia del tamaño máximo del agregado, que para efectos del material que se tiene dispuesto esta en ¾”.

- De acuerdo a esto se puede establecer la cantidad de aires esperado en concretos sin aire incluido, de acuerdo a diferentes tamaños máximos de agregados. Esto mediante la tabla No 11.5 del mismo código. Para el tamaño máximo del agregado (3/4”) se puede esperar una contenido de aire atrapado en la mezcla de concreto del 2.5%.

- De acuerdo a la tabla 11.7 se puede establecer que, de acuerdo al tamaño máximo del agregado y del asentamiento esperado, la cantidad de agua para establecer esta mezcla debe estar alrededor de los 187 Kg/m3 de concreto.

- La determinación de la resistencia se hará dentro de los parámetros exigidos por la NTC 5551, por lo que de acuerdo a lo establecido en el ACI 211 se debe regir por la siguiente formula, dado que no hay dato que permitan determinar la desviación estándar: Para concreto de 210kg/cm2 a 350 kg/cm2 es de f’c+85 Kg/cm2, por lo que se debe diseñar para obtener un concreto de 330 kg/cm2.

- De acuerdo a la resistencia escogida, las relaciones A/cte, debe de estar entre los límites de 0.38 a 0.49. Teniendo en cuenta estudios anteriores que permitieron determinar que la manejabilidad de los concretos con agregados reciclados es mínima, se deberán cambiar estas relaciones de A/Cte, durante el desarrollo de las pre mezclas de las muestras de prueba. Inicialmente se manejaran relaciones A/Cte que estén inicialmente dentro del rango exigido por la NTC 5551.

- Siguiendo acorde a este procedimiento, se procede a escoger la cantidad de material cementante mediante la fórmula C=A/(A/C). Si se tiene en cuenta esto el contenido de cemento para relaciones entre 0.45, 0.50 y 0.55, deben de estar entre los rangos de 340 Kg/m3 a 415 Kg/m3. Según

la ACI 318, el empleo de ceniza volante (ASTMC 618, Clase F) ha demostrado que mejora la resistencia del concreto a los sulfatos. También ciertos cementos Tipo IP fabricados con puzolana Clase F y cemento portland con un contenido de aluminato tricálcico (C3A) superior al 8% pueden proporcionar resistencia a los sulfatos en casos de exposición moderada. (ACI 318S-05)

- Los pasos siguientes para la determinación del diseño de mezcla se hará de acuerdo a los resultados de la caracterización de los agregados naturales y reciclados.

Tabla 4-10: **Resumen de caracterización de agregados para diseño de mezcla.**

	grava reciclado	arena reciclado	grava natural	arena natural
MU Compactada	1360 Kg/m3	1402 Kg/m3	1487 Kg/m3	1726 Kg/m3
MU Suelta	1276 Kg/m3	1300 Kg/m3	1370 Kg/m3	1619 Kg/m3
M finura	-	2,17	-	2,63
Absorción	7,3%	7,0%	1,4%	2,3%
Absorción para la mezcla	2,5%	2,5%	1,4%	2,3%
Densidad	2,161	2,319	2,587	2,441

Tabla 4-11: **Criterios preliminares para el diseño de mezcla.**

TMN	3/4	
Resistencia requerida	350	Kg/cm2
Asentamiento esperado	3" - 4"	
Volumen de Agua (tabla 1)	205	l/m3
Contenido de aire total (tabla 2)	2,00%	
Relación A/C	0,53	
Contenido de cemento	386,79	Kg/m3
% reemplazo x cenizas	0%	

Tabla 4-12: **Selección del factor para el peso agregado grueso. Método ACI.**

PESO DEL AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DEL CONCRETO

	Vólumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumén del concreto, para diversos módulos de fineza del fino. (b / b_o)			
Tamaño máximo nominal del agregado grueso.	2.40	2.60	2.80	3.00
3 / 8 "	0.50	0.48	0.46	0.44
1 / 2 "	0.59	0.57	0.55	0.53
3 / 4 "	0.66	0.64	0.62	0.60
1 "	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1 / 2 "	0.76	0.74	0.72	0.70
2 "	0.78	0.76	0.74	0.72
3 "	0.81	0.79	0.77	0.75
6 "	0.87	0.85	0.83	0.81

tabla confeccionada por el comité 211 del ACI.

Tabla 4-13: **Tabla de selección del peso de del agregado grueso.**

Selección del peso del agregado grueso		
(tabla 4) b/bo=	0,64	
bo rec.=	1.360,79	Kg/m3
bo nat.=	1.487,92	Kg/m3
b rec=	870,91	Kg
b nat=	952,27	Kg

Tabla 4-14: **Volúmenes consolidados de materiales sin incluir agregado fino.**

Volúmenes de materiales	peso	densidad	volumen	
Cemento	386,79	3120	**0,124**	**m3**
Agua	205	1000	**0,205**	**m3**
Aire	2	100	**0,020**	**m3**
Ag. Grueso Rec.	870,91	2.161,12	**0,403**	**m3**
Ag. Grueso Nat.	952,27	2.587,38	**0,368**	**m3**

Tabla 4-15: **Calculo del volumen de agregado fino.**

Calculo del volumen de agregado fino		
Volumen del agregado fino	1 - Vol. Mat.	
Rec.	0,248	m3
Nat.	0,283	m3

Tabla 4-16: **Presentación de diseño. Variable 1. 0% reemplazo de agregados naturales.**

Presentación del diseño					
Cemento	386,79	kg/m3			
Agua	205	kg/m3			
Aire	0,02	kg/m3	%Reemplazo Agr.		
A.F.N.	690,83	kg/m3	0%	690,83	kg/m3
A.F.R	575,25	kg/m3		-	
A.G.N.	952,269	kg/m3		952,27	kg/m3
A.G.R.	870,906	kg/m3		-	
Corrección x absorción				29,54	kg/m3

Tabla 4-17: **Presentación de diseño. Variable 2. 50% reemplazo de agregados naturales.**

Presentación del diseño					
Cemento	386,79	kg/m3			
Agua	205	kg/m3			
Aire	0,02	kg/m3	%Reemplazo Agr.		
A.F.N.	690,83	kg/m3	50%	345,42	kg/m3
A.F.R	575,25	kg/m3		287,63	
A.G.N.	952,269	kg/m3		476,13	kg/m3
A.G.R.	870,906	kg/m3		435,45	
Corrección x absorción				32,85	kg/m3

Tabla 4-18: **Presentación de diseño. Variable 3. 100% reemplazo de agregados naturales.**

Presentación del diseño					
Cemento	386,79	kg/m3			
Agua	205	kg/m3			
Aire	0,02	kg/m3	%Reemplazo Agr.		
A.F.N.	690,83	kg/m3	100%	-	kg/m3
A.F.R	575,25	kg/m3		575,25	
A.G.N.	952,269	kg/m3		-	kg/m3
A.G.R.	870,906	kg/m3		870,91	
Corrección x absorción				36,15	kg/m3

Tabla 4-19: Tabla resumen de diseños de mezcla con las variables a comparar.

	Cemento	Agua	Ceniza	Agregado Fino Natural	Agregado Fino Reciclado	Agregado Grueso Natural	Agregado Grueso Reciclado
M1	386 Kg/m3	185 Kg/m3	0 Kg/m3	668 Kg/m3	0 Kg/m3	977 Kg/m3	0 Kg/m3
M3	232 Kg/m3	185 Kg/m3	154 Kg/m3	668 Kg/m3	0 Kg/m3	977 Kg/m3	0 Kg/m3
M4	386 Kg/m3	205 Kg/m3	0 Kg/m3	668 Kg/m3	0 Kg/m3	977 Kg/m3	0 Kg/m3
M5	232 Kg/m3	205 Kg/m3	154 Kg/m3	668 Kg/m3	0 Kg/m3	977 Kg/m3	0 Kg/m3
M7	386 Kg/m3	224 Kg/m3	0 Kg/m3	668 Kg/m3	0 Kg/m3	977 Kg/m3	0 Kg/m3
M10	386 Kg/m3	185 Kg/m3	0 Kg/m3	334 Kg/m3	276 Kg/m3	488 Kg/m3	447 Kg/m3
M12	232 Kg/m3	185 Kg/m3	154 Kg/m3	334 Kg/m3	276 Kg/m3	488 Kg/m3	447 Kg/m3
M13	386 Kg/m3	185 Kg/m3	0 Kg/m3	0 Kg/m3	551 Kg/m3	0 Kg/m3	893 Kg/m3
M15	232 Kg/m3	185 Kg/m3	154 Kg/m3	0 Kg/m3	551 Kg/m3	0 Kg/m3	893 Kg/m3
M19	386 Kg/m3	205 Kg/m3	0 Kg/m3	0 Kg/m3	551 Kg/m3	0 Kg/m3	893 Kg/m3
M21	232 Kg/m3	205 Kg/m3	154 Kg/m3	0 Kg/m3	551 Kg/m3	0 Kg/m3	893 Kg/m3
M22	386 Kg/m3	224 Kg/m3	0 Kg/m3	334 Kg/m3	276 Kg/m3	488 Kg/m3	447 Kg/m3
M24	232 Kg/m3	224 Kg/m3	154 Kg/m3	334 Kg/m3	276 Kg/m3	488 Kg/m3	447 Kg/m3
M25	386 Kg/m3	224 Kg/m3	0 Kg/m3	0 Kg/m3	551 Kg/m3	0 Kg/m3	893 Kg/m3
M27	232 Kg/m3	224 Kg/m3	154 Kg/m3	0 Kg/m3	551 Kg/m3	0 Kg/m3	893 Kg/m3

Tabla 4-20: **Tabla resumen de las nomenclaturas de las mezclas y las variables a comparar.**

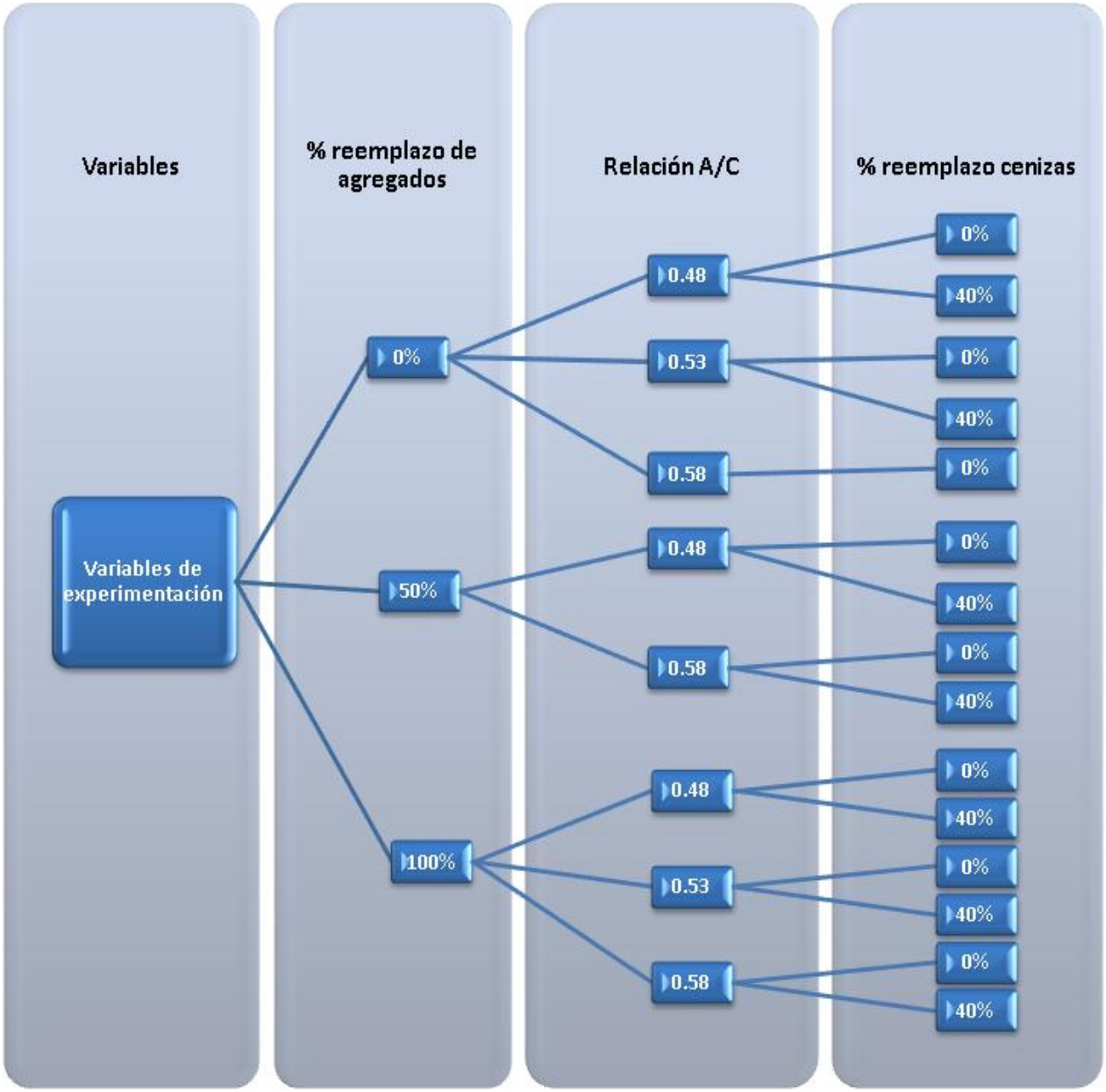
	% reemplazo agregado	Relación a/c	% reemplazo cenizas volantes
M1	0,00%	0,48	0,00%
M3	0,00%	0,48	40,00%
M4	0,00%	0,53	0,00%
M5	0,00%	0,53	40,00%
M7	0,00%	0,58	0,00%

M10	50,00%	0,48	0,00%
M12	50,00%	0,48	40,00%
M13	100,00%	0,48	0,00%
M15	100,00%	0,48	40,00%
M19	100,00%	0,53	0,00%
M21	100,00%	0,53	40,00%
M22	50,00%	0,58	0,00%
M24	50,00%	0,58	40,00%
M25	100,00%	0,58	0,00%
M27	100,00%	0,58	40,00%

Variables de experimentación de mezclas.

De acuerdo a todo lo enunciado anteriormente, para las pruebas de expansión y compresión que se realizaran al concreto con agregados reciclados, se determinaron las siguientes variables de diseño:

Ilustración 4-8: **Matriz de variables de experimentación.**



4.2.1 Relación A/Cte

De acuerdo a lo establecido en las normas NTC y ACI, se escogió como valor mas bajo de la relación A/Cte como 0.48. Esta deberá ser corregida, si es el caso, durante el desarrollo de las remezclas para establecer si el concreto resultante es de buena manejabilidad o no, y si da con los resultados de asentamientos esperados. De aquí en adelante se tendrán tres variables de la relación A/Cte, que se distanciaran cada 0.5. Para efectos de cantidades preliminares de materiales se tienen en cuenta: 0.48 – 0.53 – 0.58.

4.2.2 Reemplazo de agregados Naturales por agregado reciclado

Esta se hará de acuerdo a los resultados de las pre mezclas teniendo en cuenta los asentamientos obtenidos. Inicialmente, y para abarcar una buena parte de los valores de esto, se harán reemplazos del 0%, 50% y 100%

4.2.3 Reemplazo de Cemento por ceniza volante

Esto teniendo en cuenta las múltiples recomendaciones que se han hecho con respecto a este reemplazo con el fin de disminuir la porosidad y aumentar la impermeabilidad del concreto. Se tendrán reemplazos del 0% y del 40%, con el fin de evidenciar la incidencia real de esta adición, sacrificando, de acuerdo a la bibliografía consultada, la resistencia final.

5. PRUEBAS Y ENSAYOS.

5.1 Ensayos a compresión.

Se generaron ensayos a compresión con el fin de determinar la resistencia de cada una de las mezclas de las variables especificadas anteriormente y relacionarlas finalmente con las pruebas de expansión.

Estos se realizaron con camisas de acero de dimensiones normalizadas de 4”x 8”**.**

Se realizaron los ensayos de acuerdo a lo establecido en la NTC 673.

Se realizaron 3 cilindros para efectos de la prueba mas un testigo.

Se tomaron dos muestras para cada una de las mezclas, teniendo en cuenta que una muestra seria curada en tanque de inmersión de agua, y la otra seria curada en solución de sulfatos. Esto con el fin de comparar las resistencias de un concreto normal y uno con exposición clase 3. Adicionalmente se les hizo seguimiento de peso a los cilindros, para denotar si había cambios significativos en la masa dependiendo del curado que se le dio a cada uno.

Ilustración 5-1: **Toma de asentamiento de una de las muestras.**

Ilustración 5-2: Muestra conformada por tres cilindros

5.2 Ensayos De Expansión De Concreto

Estos ensayos se realizaron de acuerdo a la NTC 3330 (ASTM 1012), con una variación en los moldes exigidos por la NTC 3938 (referida a los aparatos para la realización de la prueba de la NTC 3330). La variación que se tendrá está en función del cambio de dimensión de las viguetas de expansión que según la norma son de 2.5 cm x 2.5 cm x 28.5 cm. Las pruebas de expansión se realizaron con viguetas de 7 cm x 7 cm x 28.5 cm. Este cambio dado a que la dimensión de los moldes exigidos por la norma no garantiza resultados confiables teniendo en cuenta que el tamaño máximo del agregado es de ¾" (19 mm). Estos fueron fabricados en madera, garantizando la impermeabilización y acabado liso de los moldes con el fin de no perder agua por absorción del diseño de mezcla inicial.

El comparador de caratula corresponde a lo avalado por la anterior norma.

Se tomaron tres muestras de cada una de las variables de estudio.

Ilustración 5-3: **Molde utilizado para elaboración de viguetas.**

Ilustración 5-4: **Conjunto de viguetas y cilindros de una misma muestra**

Ilustración 5-5: **Tornillos de ajuste del calibrador fabricados de acuerdo a la norma NTC 3938.**

Ilustración 5-6: **Muestras de viguetas para inmersión en solución de sulfato.**

Ilustración 5-7: Medición de viguetas en comparador de caratula.

5.2.1 Inmersión en sulfatos.

La inmersión en sulfatos se hizo para las viguetas, luego de haber sido previamente curadas en tanque de inmersión durante 7 días y se realizó de acuerdo a la solución que establece la NTC 3330, teniendo en cuenta que en cuanto a volumen la solución de agua sulfato debe ser de 4 partes a 1 +/- 0.5. La solución de sulfato estudiada se realizó de acuerdo a esta misma norma y será de 50 gr de sulfato de magnesio por cada 900 ml de agua. De acuerdo a lo establecido en esta norma se tomaron mediciones semanalmente durante el primer mes y luego mediciones mensuales hasta 15 semanas. Posteriormente se deben realizar mediciones a 4, 6, 9 y 12 meses.

Para cada una de las muestras a ensayar se realizaron 3 probetas.

Ilustración 5-8: **Preparación de la solución de sulfatos en recipientes inertes.**

15/04/2011

6. RESULTADOS.

6.1 Tabla de mezclas.

Tabla 6-1: **Tabla de mezclas y variables de ensayo.**

ID	% reemplazo agregado	Relación a/c	% reemplazo cenizas volantes
M1	0.00%	0.48	0.00%
M3	0.00%	0.48	40.00%
M4	0.00%	0.53	0.00%
M5	0.00%	0.53	40.00%
M7	0.00%	0.58	0.00%
M10	50.00%	0.48	0.00%
M12	50.00%	0.48	40.00%
M13	100.00%	0.48	0.00%
M15	100.00%	0.48	40.00%
M19	100.00%	0.53	0.00%
M21	100.00%	0.53	40.00%
M22	50.00%	0.58	0.00%
M24	50.00%	0.58	40.00%
M25	100.00%	0.58	0.00%
M27	100.00%	0.58	40.00%

6.2 Resultados Ensayos De compresión.

Para los ensayos a compresión se utilizaron cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura. Los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

Tabla 6-2: **Resultados de muestras de ensayos de compresión a los 28 días. (Resultados en PSI)**

Resistencia a los 28 días					
Mezcla	**Curado normal**	**Curado en sulfato**	**Nomenclatura**	**Diferencia entre el curado normal y el curado con solución de sulfatos**	**Diferencia porcentual**
M1	4,854.07	5,438.19	0-0.48-0	584.11	12.03%
M3	2,623.12	2,983.24	0-0.48-0.4	360.13	13.73%
M4	4,244.13	4,324.48	0-0.53-0	80.35	1.89%
M5	3,426.83	3,454.53	0-0.53-0.4	27.70	0.81%
M7	3,450.02	3,598.17	0-0.58-0	148.15	4.29%
M10	4,148.03	4,049.54	0.5-0.48-0	(98.49)	-2.37%
M12	2,398.87	2,597.56	0.5-0.48-0.4	198.68	8.28%
M13	3,058.50	3,378.27	1-0.48-0	319.77	10.45%
M15	2,525.27	2,821.54	1-0.48-0.4	296.27	11.73%
M19	3,064.36	3,204.80	1-0.53-0	140.45	4.58%
M21	2,381.17	2,435.26	1-0.53-0.4	54.08	2.27%
M22	3,231.48	3,706.68	0.5-0.58-0	475.19	14.71%
M24	2,354.86	2,742.83	0.5-0.58-0.4	387.97	16.48%
M25	3,652.20	4,557.92	1-0.58-0	905.73	24.80%
M27	2,312.02	2,747.75	1-0.58-0.4	435.72	18.85%

Ilustración 6-1: **Grafico resumido de resistencias de mezclas.**

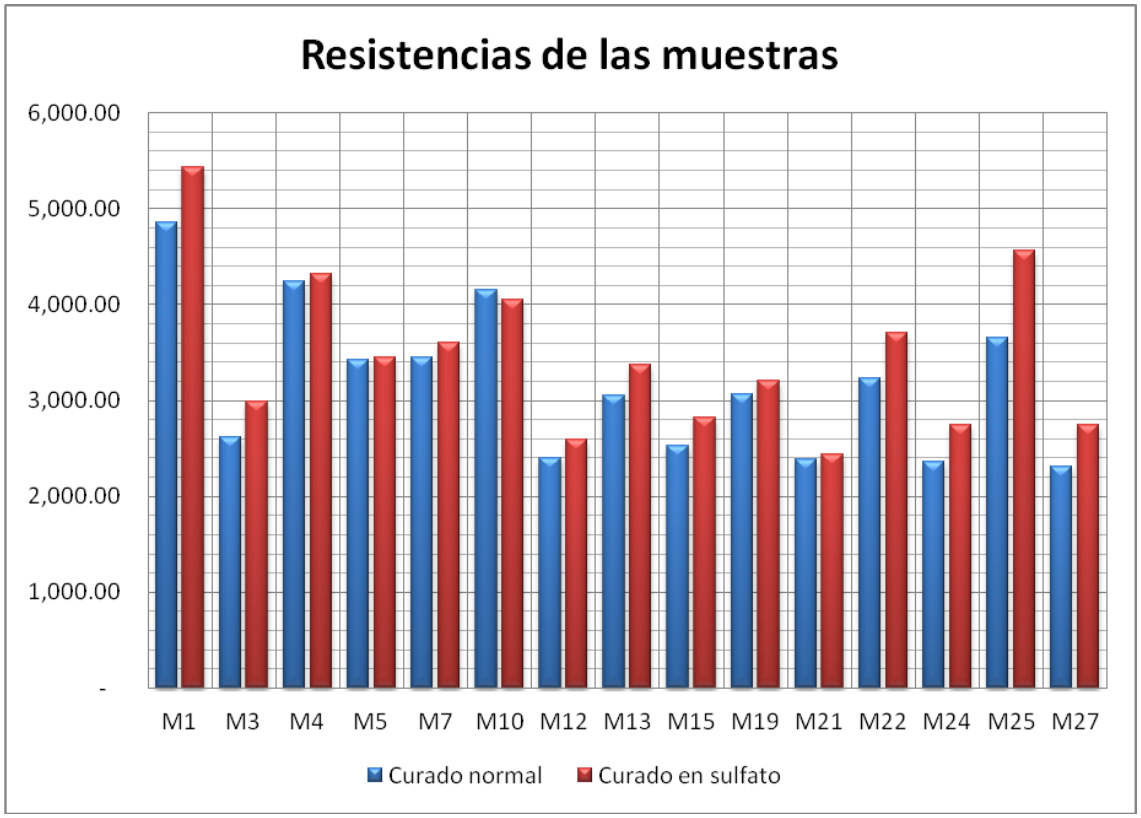
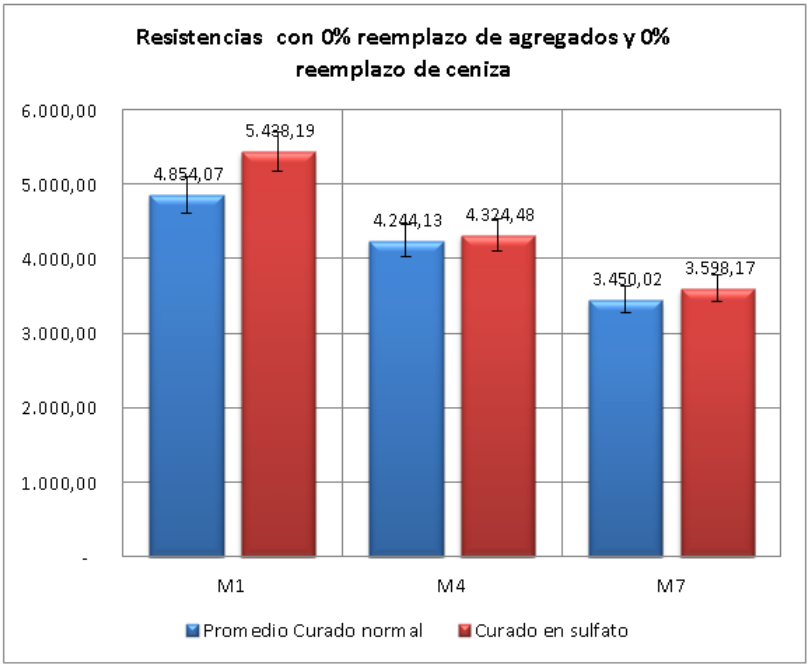


Ilustración 6-2: **Tabla de mezcla, variables y resistencias en curado normal.**

	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M1	0%	0.48	0%	4,854.07
M3	0%	0.48	40%	2,623.12
M4	0%	0.53	0%	4,244.13
M5	0%	0.53	40%	3,426.83
M7	0%	0.58	0%	3,450.02
M10	50%	0.48	0%	4,148.03
M12	50%	0.48	40%	2,398.87
M13	100%	0.48	0%	3,058.50
M15	100%	0.48	40%	2,525.27
M19	100%	0.53	0%	3,064.36
M21	100%	0.53	40%	2,381.17
M22	50%	0.58	0%	3,231.48
M24	50%	0.58	40%	2,354.86
M25	100%	0.58	0%	3,652.20
M27	100%	0.58	40%	2,312.02

Resultados comparativos de los ensayos de resistencia.

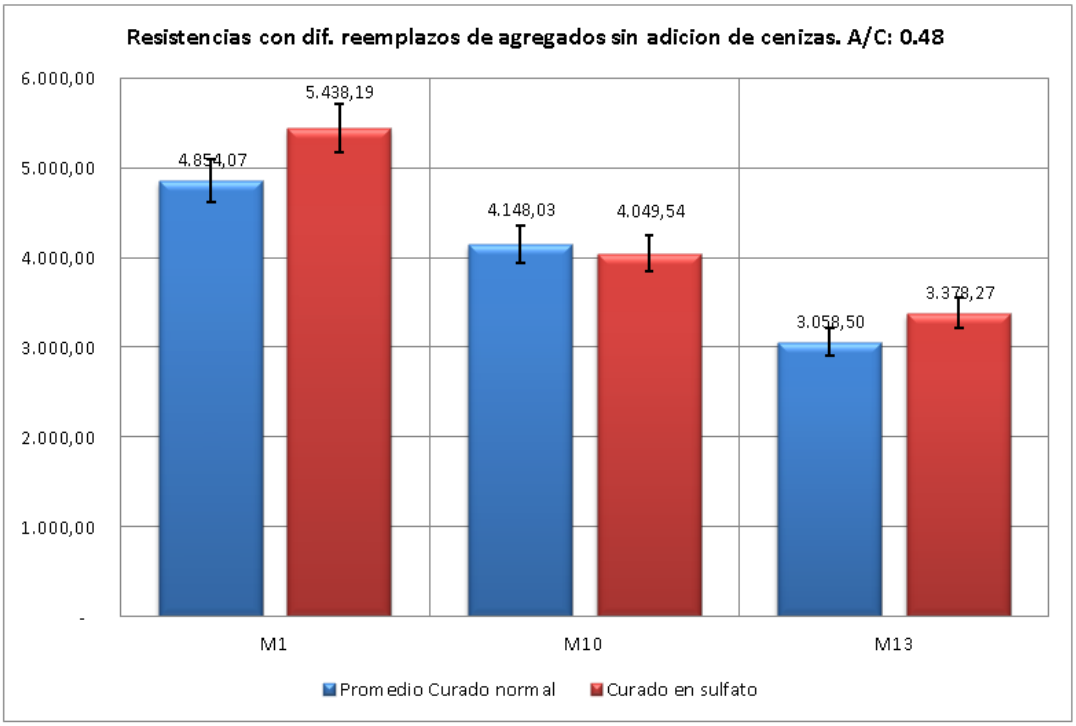
Ilustración 6-3: **Grafico de resistencias. Reemplazo de agregados 0% – Adición de cenizas: 0% - Variable Relación A/C**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M1	0%	0,48	0%	4.854,07
M4	0%	0,53	0%	4.244,13
M7	0%	0,58	0%	3.450,02

Se evidencia menores resistencias a mayores relaciones A/C. Las muestras curadas en la solución del sulfato tienden a presentar un aumento de la resistencia a los 28 días, con respecto a las muestras curadas solamente en inmersión de agua sin presencia de sulfatos.

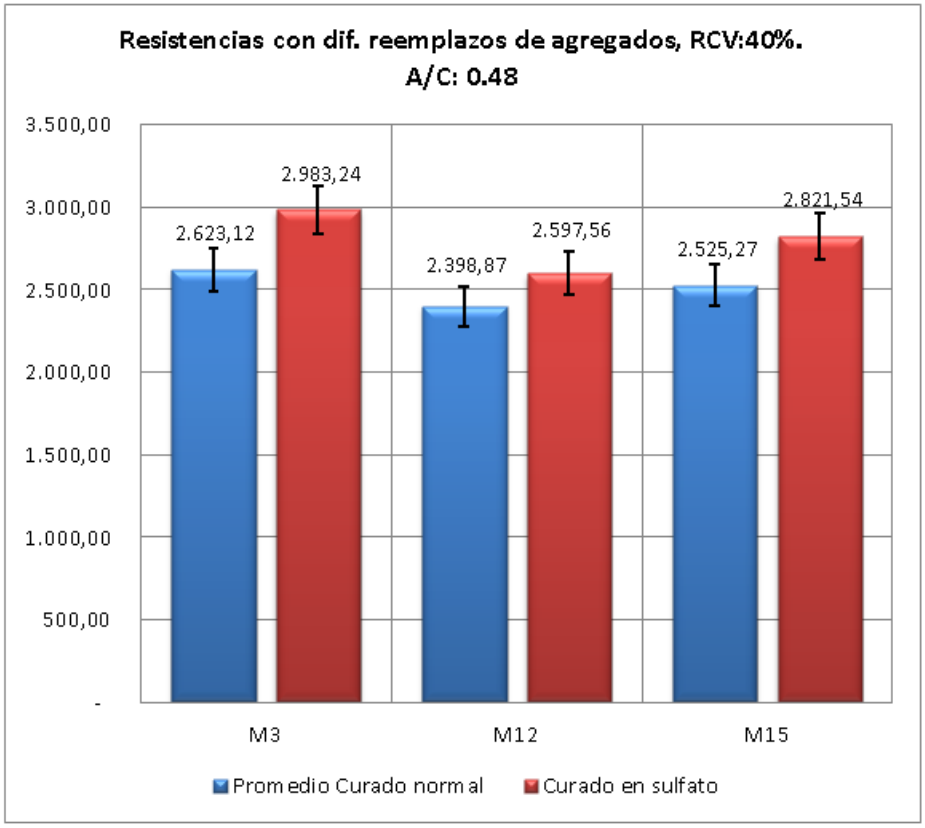
Ilustración 6-4: **Grafico de resistencias. Relación A/C 0.48 – Adición de cenizas: 0% - Variable % reemplazo agregados**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M1	0%	0,48	0%	4.854,07
M10	50%	0,48	0%	4.148,03
M13	100%	0,48	0%	3.058,50

Para esta relación A/C se evidencia una disminución de las resistencias a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de agregados. Sin embargo se evidencia que las muestras curadas en la solución de sulfato presentan una resistencia levemente mayor a los 28 días a excepción de la muestra con 50% de reemplazo, cuya disminución es prácticamente nula (2%).

Ilustración 6-5: Grafico de resistencias. Relación A/C 0.48 – Adición de cenizas: 40% - Variable % reemplazo agregados

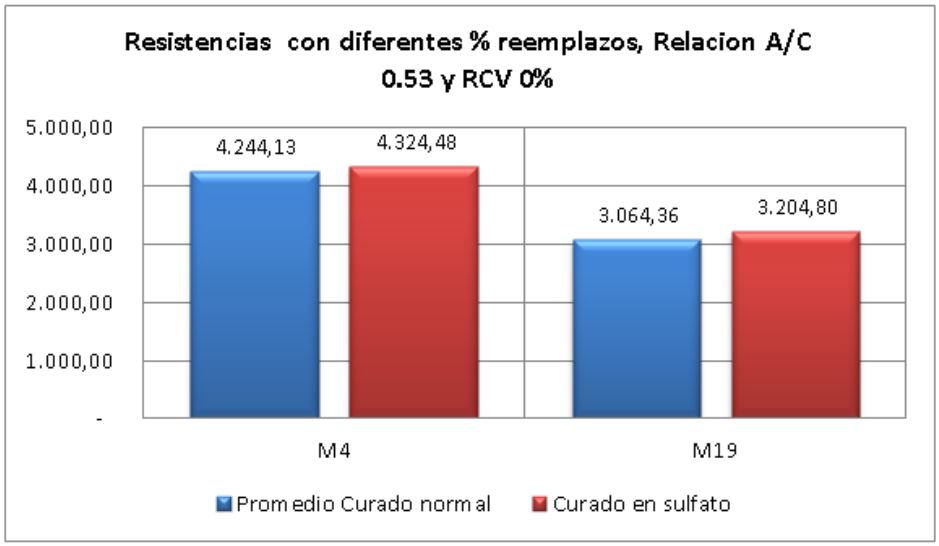


	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M3	0%	0,48	40%	2.623,12
M12	50%	0,48	40%	2.398,87
M15	100%	0,48	40%	2.525,27

Se evidencia que con la misma relación A/C (0.48) con una adición del 40% de ceniza, las resistencia disminuyen dramáticamente, con respecto a las no adicionadas. En las mezclas con reemplazo de agregados de 0% y 50% la disminución en promedio es del 44% con respecto a las no adicionadas. En la mezcla con reemplazo del 100% la disminución es del 17%. Esto para las muestras curadas en tanque de inmersión.

Una vez mas se evidencia que la resistencias son mayores cuando el curado se realiza directamente en la solución del sulfato. El aumento porcentual más significativo se evidencio en la mezcla que no tiene reemplazo de agregados que fue del 13%, seguido de la que tiene reemplazo del 100% con un 11%, y por último la mezcla con el 50% de reemplazo con un 8%.

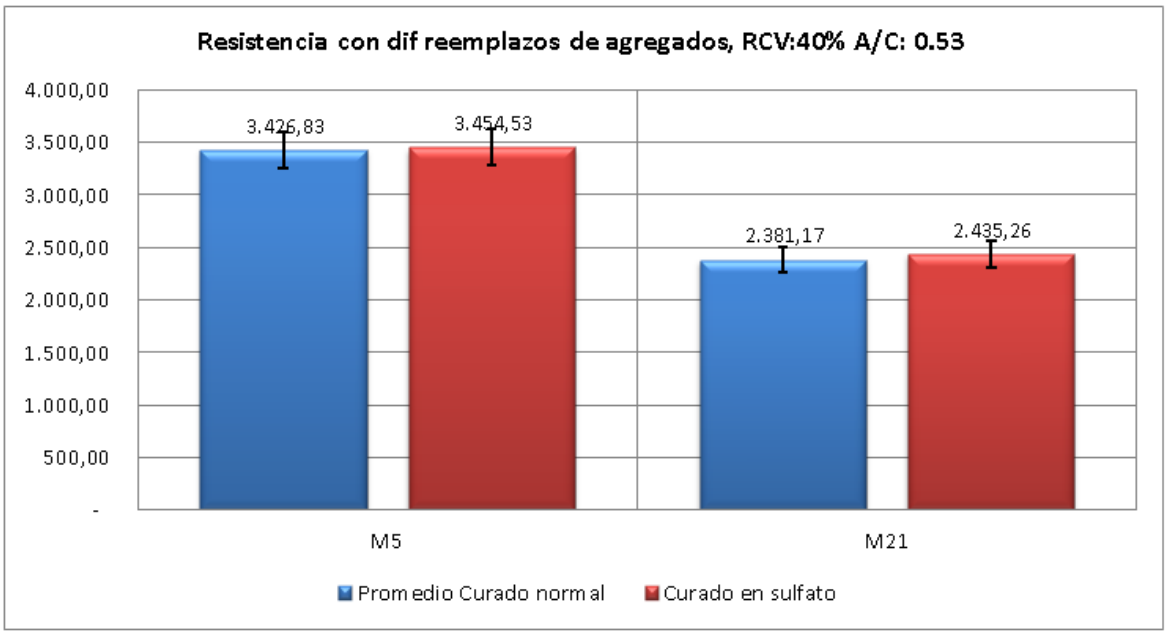
Ilustración 6-6: **Grafico de resistencias. Relación A/C 0.53 – Adición de cenizas: 0% - Variable % reemplazo agregados.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M4	0%	0,53	0%	4.244,13
M19	100%	0,53	0%	3.064,36

Para estas mezclas se sigue presentando las mismas condiciones vistas, dado que la resistencia disminuye a medida del aumento del reemplazo, y se evidencia n leve aumento de resistencia en las probetas curadas en sulfatos.

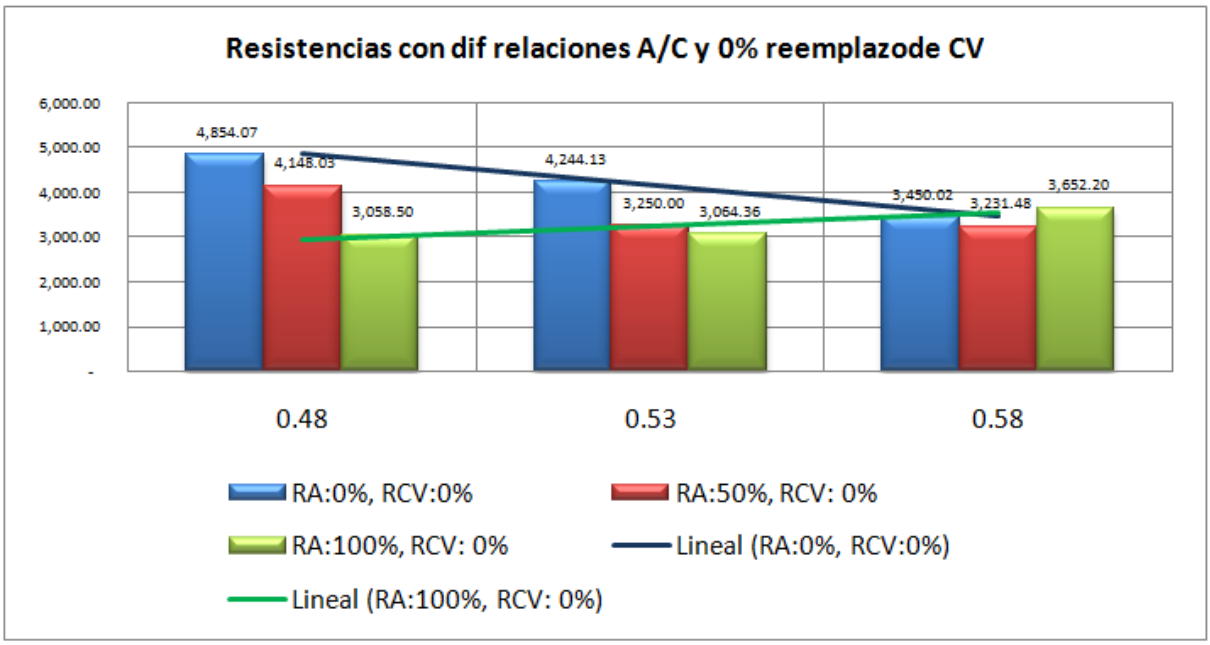
Ilustración 6-7: **Gráfico de resistencias. Relación A/C 0.53 – Adición de cenizas: 40% - Variable % reemplazo agregados.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M5	0%	0,53	40%	3.426,83
M21	100%	0,53	40%	2.381,17

Con respecto a la anterior gráfica, se puede evidenciar que la adición de ceniza a la mezcla, disminuye la resistencia fuertemente – 19% en la muestra sin reemplazo de agregado y 22% para la muestra con reemplazo del 100% de reemplazo de agregado - y la inmersión para el curado en sulfato presentan unos leves aumentos en la resistencia.

Ilustración 6-8**: Resistencias de diferentes relaciones A/C, con variable de reemplazo de agregados, 0% de adición de ceniza.**



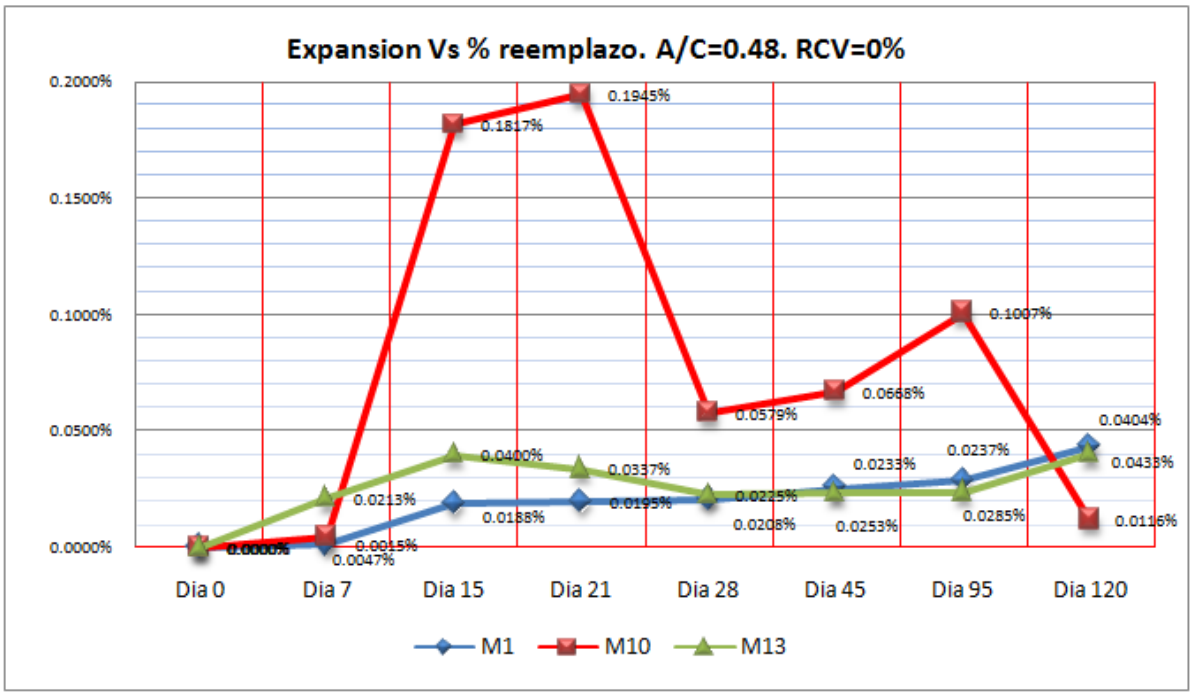
Con esta grafica se pretende demostrar que de acuerdo con los resultados de los ensayos de compresión, en relaciones A/C menores se obtienen menores resistencias en las mezclas con reemplazo de agregados del 0%, pero esta tendencia se revierte a medida que la relación A/C se incrementa, trayendo, una baja de resistencia de las mezclas sin reemplazo de agregados, pero un incremento de la resistencia de las mezclas con reemplazo del 100%.

6.3 Resultados Ensayos de Expansión.

6.3.1 Variable: Reemplazo de agregados.

Constante: A/C: 0.48. Reemplazo de ceniza volante (RCV): 0%

Ilustración 6-9: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.48. RCV:0%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M1	0%	0.48	0%	4,854.07
M10	50%	0.48	0%	4,148.03
M13	100%	0.48	0%	3,058.50

De todas las comparaciones que se hicieron entre mezclas, es esta la mas variable e irregular de todas, causada por los resultados de la mezcla M10. De esta muestra se hicieron dos mezclas en tiempos diferentes, dado al observar, los resultados tan elevados que se tenían de esta. Al comenzarse a evidenciar las expansiones anormales (por encima del 0.1%), se decidió volver a repetir las muestras, generando un resultado similar al evidenciado en la gráfica. En principio se consideraba, una causa, la mayor presencia de cemento en la mezcla, por la presencia de más agregados, pero la mezcla M13, con un reemplazo del 100% de los agregados, no presentó una expansión tan significativa y exagerada como esta. Pese a esta disparidad del resultado, la expansión

acumulada al final de la exposición al sulfato, fue menor que las de las muestras con 0% y 100% de reemplazo.

Se aclara que para la toma de estas muestras se volvió a calibrar el comparador de caratula, y que se trabajó con el mismo aparato durante toda la prueba.

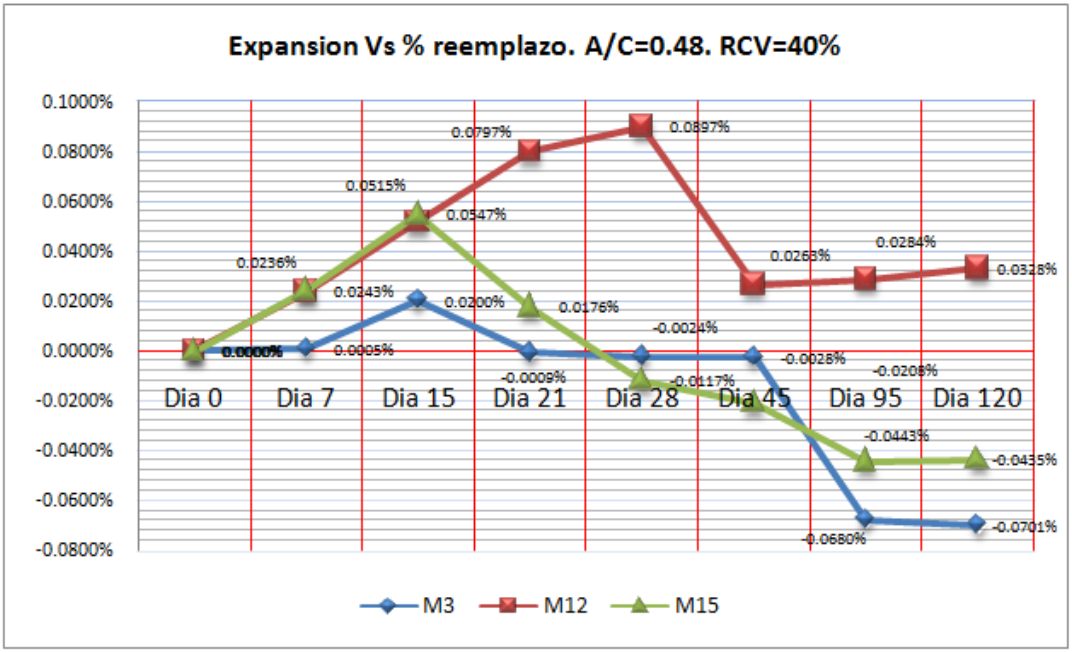
Mayor expansión: 0.1945% (M12)

Mayor contracción: -0.0116% (M3)

Variable: Reemplazo de agregados.

Constante: A/C: 0.48. RCV: 40%

Ilustración 6-10: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.48. RCV:40%.**



reemplazo				
	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M3	0%	0.48	40%	2,623.12
M12	50%	0.48	40%	2,398.87
M15	100%	0.48	40%	2,525.27

Para estas mezclas, donde la constante es la relación A/C más baja (0.48) y el reemplazo de ceniza es el más alto de los escogidos como variables (40%), se observa que la muestra con menor contenido de cemento en la mezcla (en el sentido de que no tiene cemento en sus agregados), conserva un porcentaje de expansión menor al de las muestras con reemplazo de agregados reciclados. En la muestra con reemplazo del 50% de agregado se observa que su pico de expansión se da a los 28 días de exposición, mientras que en las otras muestras se da a los 15 días. Después de su ciclo de expansión, la muestra con el reemplazo del 50% de agregado reciclado (M12) es la única de estas que no vuelve a tener expansiones negativas, a diferencia de las otras dos muestras (M3 – M15).

Estas muestras mostraron un comportamiento de menor expansión a las mismas mezclas, pero sin adición de cenizas.

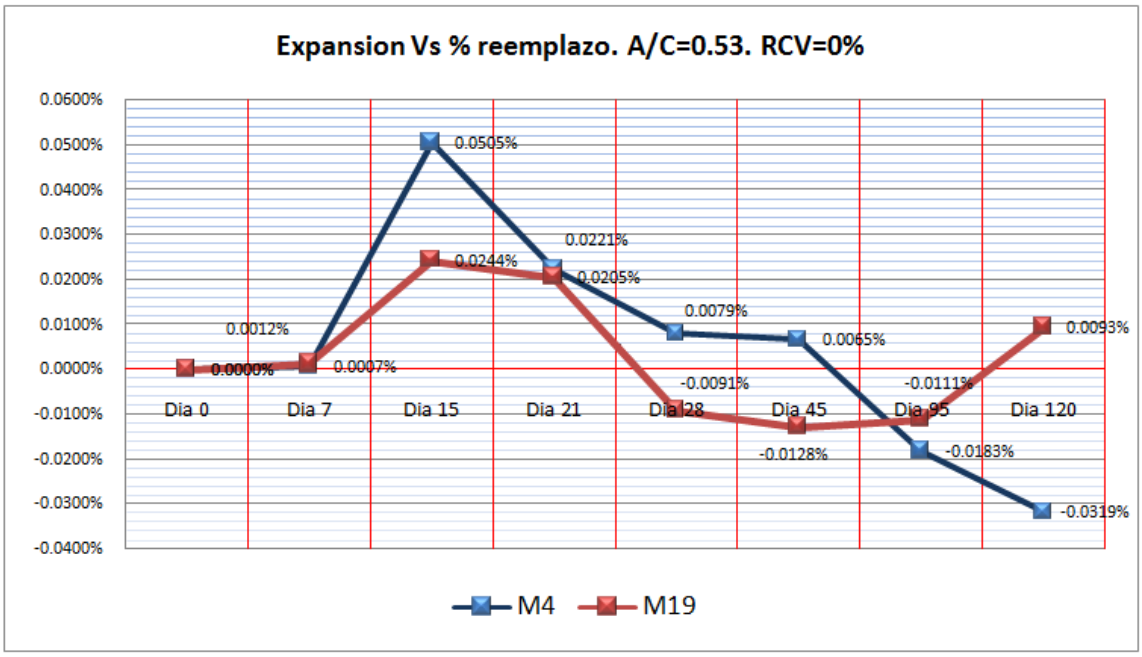
Mayor expansión: 0.0897% (M12)

Mayor contracción: -0.0701% (M3)

Variable: Reemplazo de agregados.

Constante: A/C: 0.53. RCV: 0%

Ilustración 6-11: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.53. RCV:0%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M4	0%	0.53	0%	4,244.13
M19	100%	0.53	0%	3,064.36

Ilustración 6-12. Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.53. RCV: 0%.

La muestra sin reemplazo de agregado presenta la mayor expansión acumulada (0.0505%), sin embargo también presenta una tendencia posterior a la contracción, evidenciada al final de la exposición. En este ámbito la muestra con el 100% de agregado reciclado presento expansiones considerablemente menores y, a pesar de un periodo de contracción, la tendencia fue a seguir expandiéndose.

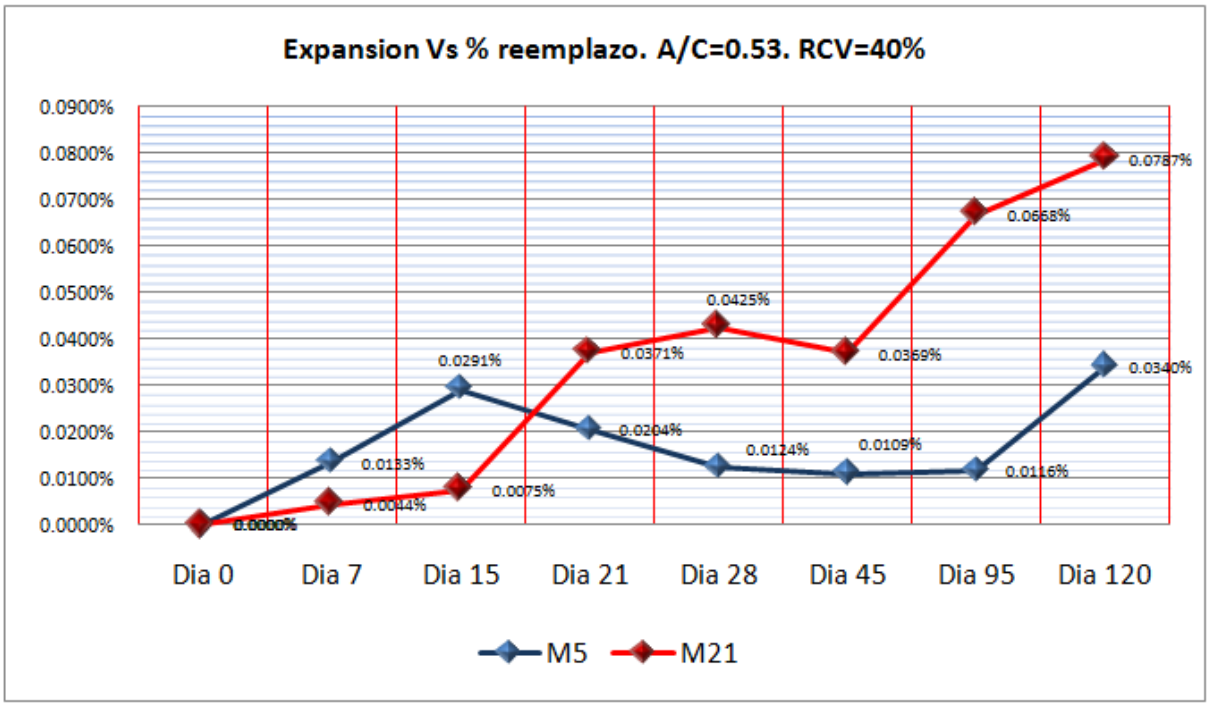
Mayor expansión: 0.0505% (M12)

Mayor contracción: -0.0319% (M3)

Variable: Reemplazo de agregados.

Constante: A/C: 0.53. RCV: 40%

Ilustración 6-13: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.53. RCV: 40%.**



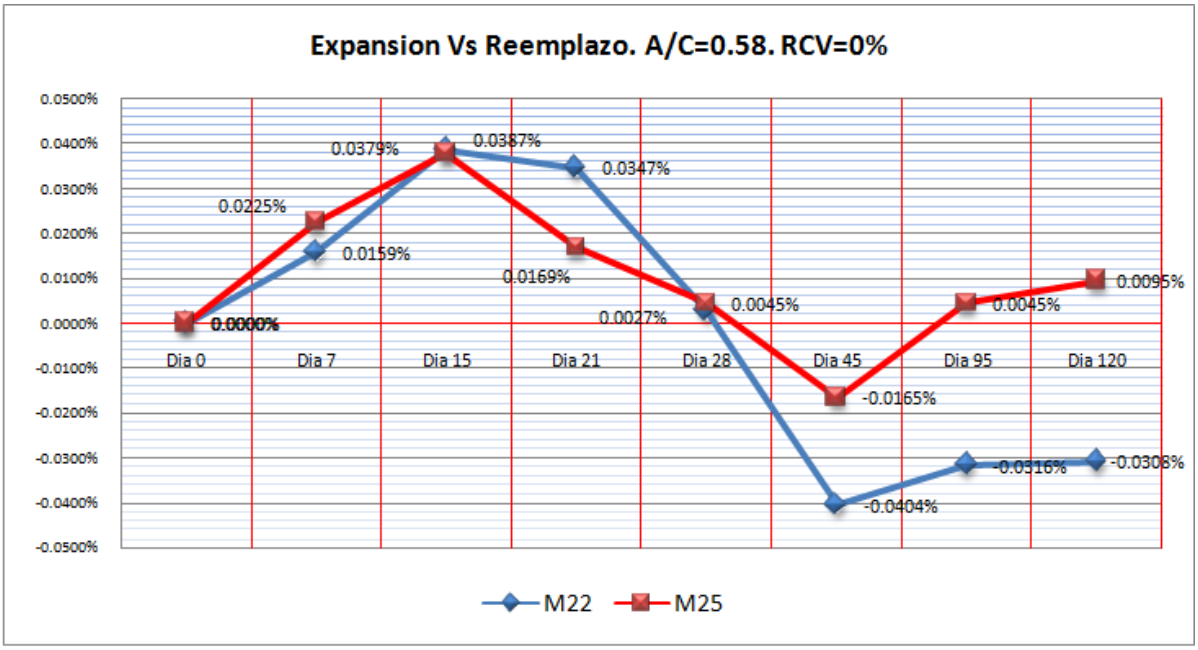
	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M5	0%	0.53	40%	3,426.83
M21	100%	0.53	40%	2,381.17

En estas mezclas no se presentaron contracciones de las probetas. Al contrario se evidenció una tendencia a la expansión, incrementada aun en la mezcla con el 100% de reemplazo de agregados. La diferencias de expansiones acumuladas al final del tiempo de exposición es considerable entre las dos muestras, ya que es mas del doble, comparativamente.

Variable: Reemplazo de agregados.

Constante: A/C: 0.58. RCV: 0%

Ilustración 6-14: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.58. RCV: 0%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M22	50%	0.58	0%	3,231.48
M25	100%	0.58	0%	3,652.20

Para estas mezclas, donde la constante es la relación A/C más alta (0.58) y el reemplazo de ceniza es del 0%, se observa que a nivel general tienen comportamientos similares durante los tiempos de exposición, reflejándose esto en que en las dos muestras se alcanza la mayor expansión a los quince días de exposición, y a su vez la mayor contracción a los 45 días de exposición. Finalmente la muestra con el mayor reemplazo de agregado muestra una tendencia a seguirse expandiendo, mientras que la otra muestra tiende a conservar su contracción.

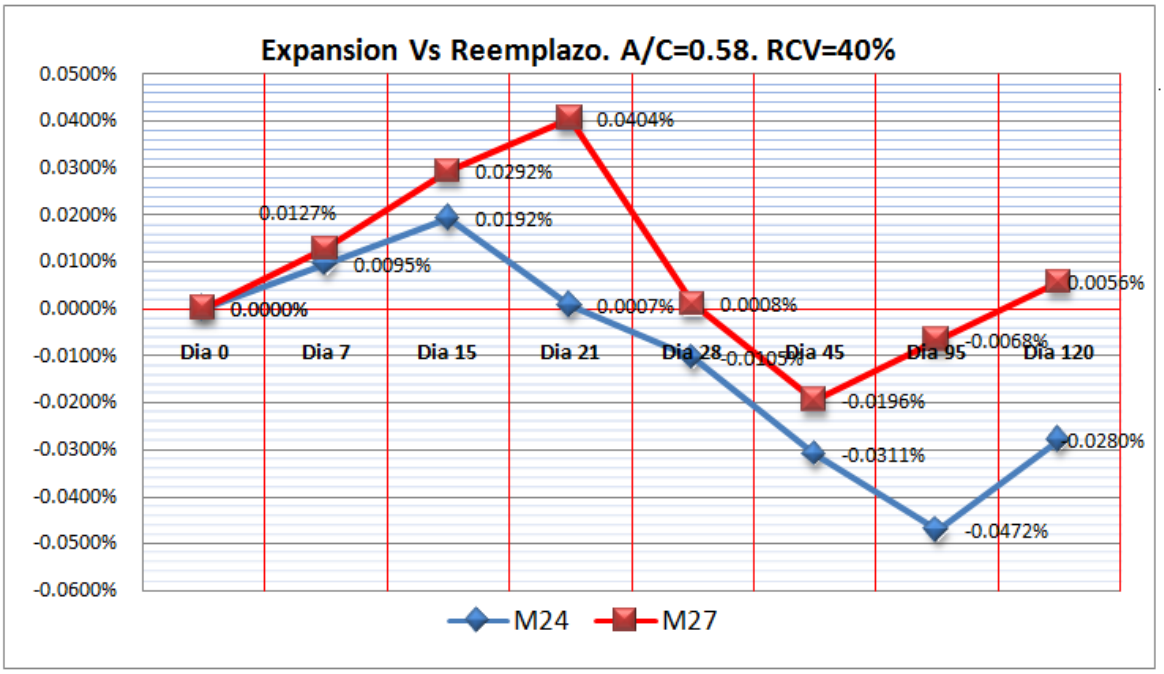
Mayor expansión: 0.0387% (M22)

Mayor contracción: -0.0404% (M22)

Variable: Reemplazo de agregados.

Constante: A/C: 0.58. RCV: 40%

Ilustración 6-15: **Grafico de expansión Vs Reemplazo de agregados. A/C: 0.58. RCV: 40%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M24	50%	0.58	40%	2,354.86
M27	100%	0.58	40%	2,312.02

Para estas mezclas, donde la constante es la relación A/C mas alta (0.58) y el reemplazo de ceniza del 40%, se observa que la mezcla con reemplazo del 50% presenta una expansión menor a la que tiene reemplazo del 100%, pero a su vez una mayor contracción. Al final del tiempo de exposición, la mezcla con mayor variabilidad en sus dimensiones fue la del reemplazo de agregado con el 50%. A pesar de la adición de la ceniza, no se evidencia una considerable menor expansión de las muestras de las mismas características pero con reemplazo de la ceniza al 0% (M22 y M25).

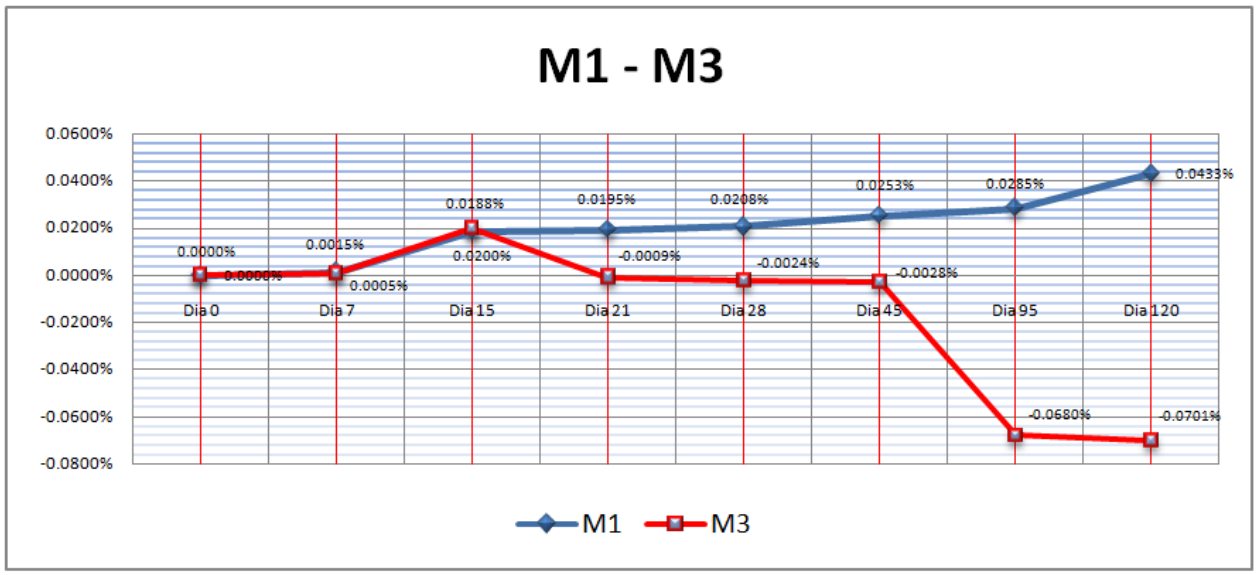
Mayor expansión: 0.0404% (M27)

Mayor contracción: -0.0472% (M24)

6.3.2 Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.48. RAR: 0%

Ilustración 6-16: **Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.48. RAR: 0%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M1	0%	0.48	0%	4,854.07
M3	0%	0.48	40%	2,623.12

En esta comparación se demuestra que, tal como lo se enuncia en la bibliografía consultada, la ceniza controla, para estas muestras de control, la expansión provocada por el ataque del sulfato. Pero teniendo en cuenta, que se eligió un porcentaje alto de reemplazo de material cementante por la ceniza, se evidencia que la resistencia se disminuye drásticamente en un 46%.

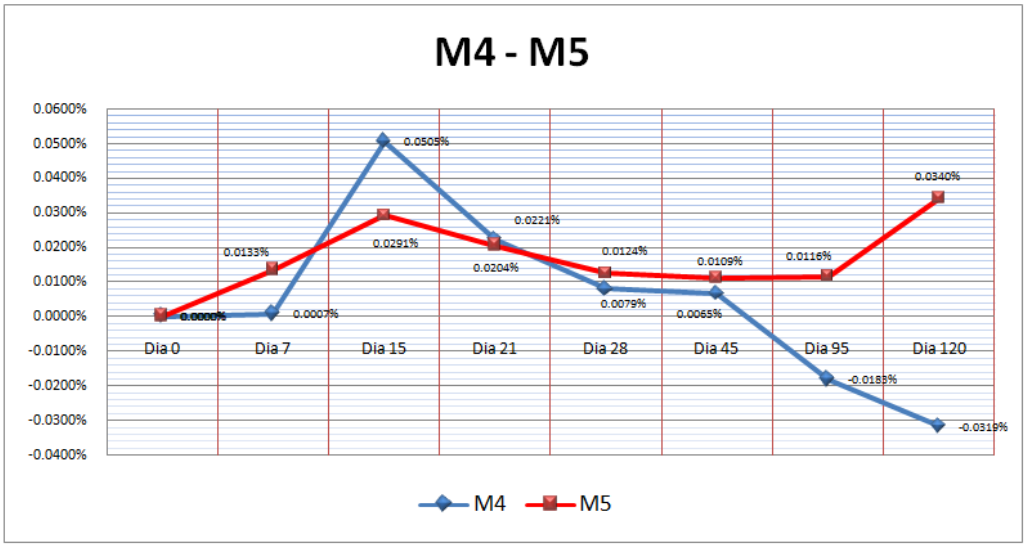
Mayor expansión: 0.043% (M1)

Mayor contracción: -0.0701% (M3)

Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.53. RAR: 0%

Ilustración 6-17: **Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.53. RAR: 0%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M4	0%	0.53	0%	4,244.13
M5	0%	0.53	40%	3,426.83

En esta comparación se evidencia que para esta relación A/C la expansión acumulada es menor en la muestra sin adición de ceniza, pero, al mismo tiempo, el tope de expansión, que se presenta a los quince días, se presenta con esta muestra, que adicionalmente muestra una contracción al final de la exposición, generando un cambio drástico en la estructura interna, con el efecto expansión-contracción que reduce considerablemente la durabilidad del concreto.

Adicionalmente se evidencia que la mayor expansión unitaria se da en esta muestra con relación A/C de 0.53 que en la anterior de 0.48, que por su contenido mayor de material cementante, se suponía, iba a presentar mayor expansión.

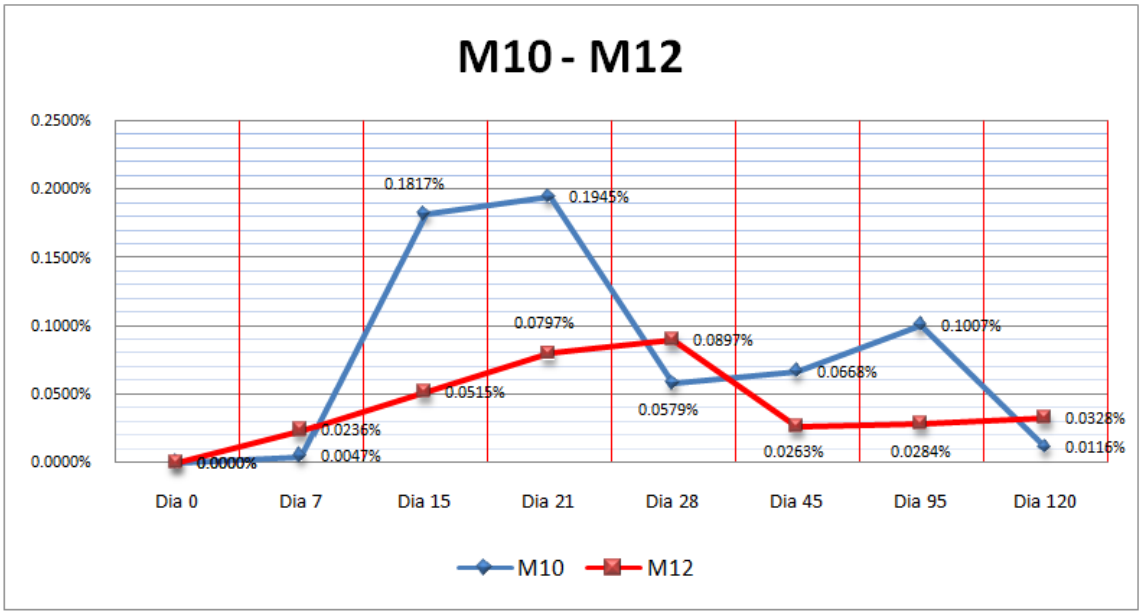
Se presenta una disminución de la resistencia a la compresión del 19%.

Mayor expansión: 0.0505% (M4)

Mayor contracción: -0.0319% (M4)

Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.48. RAR: 50%



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M10	50%	0.48	0%	4,148.03
M12	50%	0.48	40%	2,398.87

Para efecto de estas dos muestras se evidencia que con el 50% de reemplazo de agregados, las expansiones máximas, son mayores a las que no tienen reemplazo de agregados.

De la misma manera que en las anteriores muestras, se evidencia que la muestra con ceniza presenta menores expansiones a la muestra sin adición, pero asimismo una baja considerable de la resistencia en un 42%.

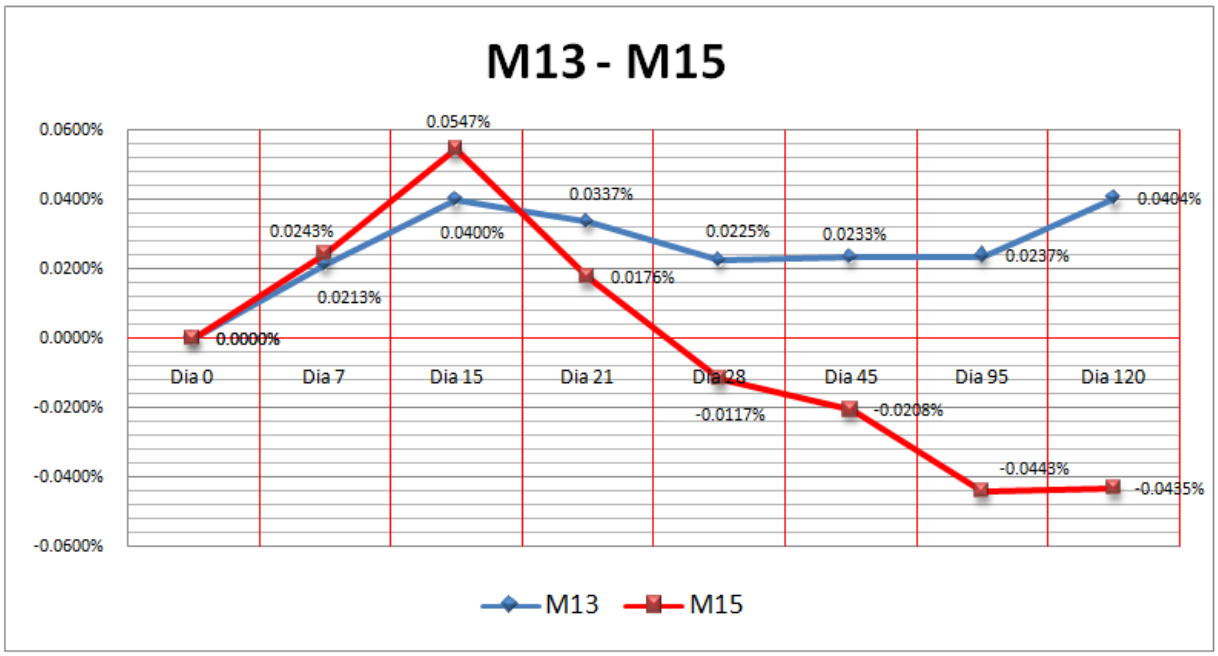
Mayor expansión: 0.1945% (M10)

Mayor contracción: -0.0116% (M10)

Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.48. RAR: 100%

Ilustración 6-18: **Grafico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.48. RAR: 100%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M13	100%	0.48	0%	3,058.50
M15	100%	0.48	40%	2,525.27

En esta par de muestras se evidencia que la adición de ceniza logra un mayor efecto sobre la expansión del concreto, incluso llegando a niveles de contracción, que igualmente puede afectar la durabilidad del concreto. A diferencia de la muestra sin adición, que únicamente presenta variación en la expansión desde el comienzo de la exposición.

Las resistencias a la compresión, bajo el escenario de la misma mezcla, con reemplazo de los agregados, son menores a las muestras de control, que no tienen reemplazo de agregados. La disminución de esta mezcla sin adición (M13), con respecto a la misma condición, pero sin reemplazo (M1), es de un 37%.

La resistencia de esta mezcla con respecto a la adición de ceniza, disminuye cuando es adicionada, en un 17%.

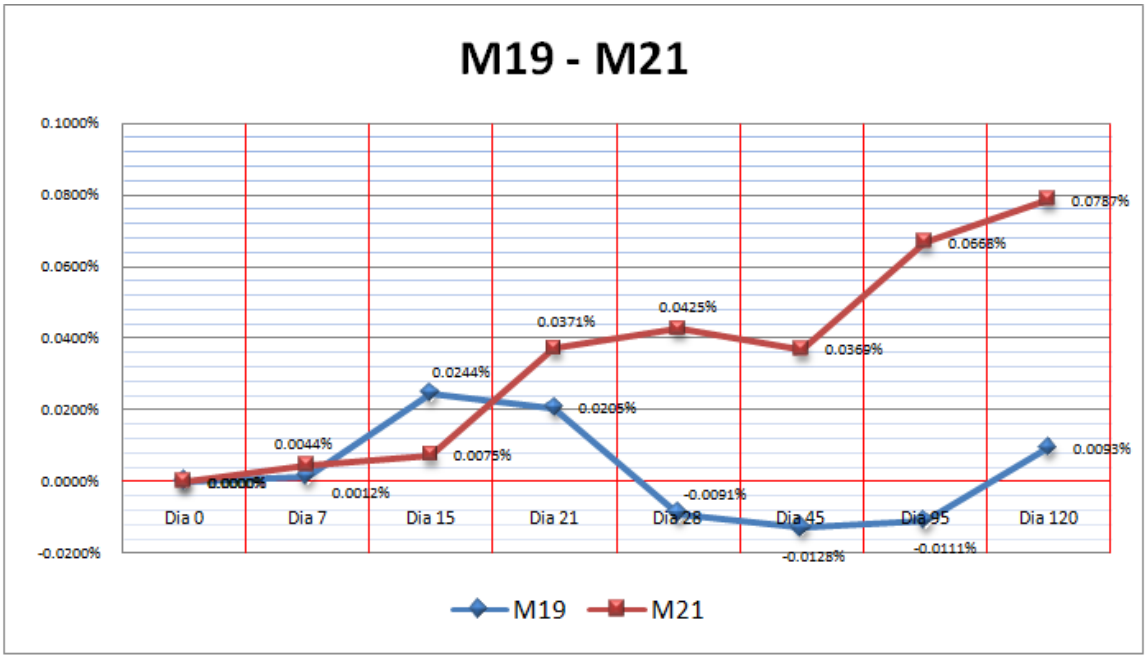
Mayor expansión: 0.057% (M15)

Mayor contracción: -0.0435% (M15)

Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.53. RAR: 100%

Ilustración 6-19: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.53. RAR: 100%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M19	100%	0.53	0%	3,064.36
M21	100%	0.53	40%	2,381.17

En esta mezcla se rompe con la tendencia de afirmar que la adición de ceniza controla la expansión. Como se evidencia en la gráfica la expansión de la mezcla con adición de ceniza es notablemente mayor a la sin adición. Inclusive superando las expansiones con menores relaciones A/C. Para efectos de la mezcla sin adicionar, se puede afirmar, que tiene un comportamiento bastante estable durante todo su tiempo de exposición.

La disminución de la resistencia, como en todas las muestras adicionadas, es considerable. Las resistencias disminuyen en un 22%.

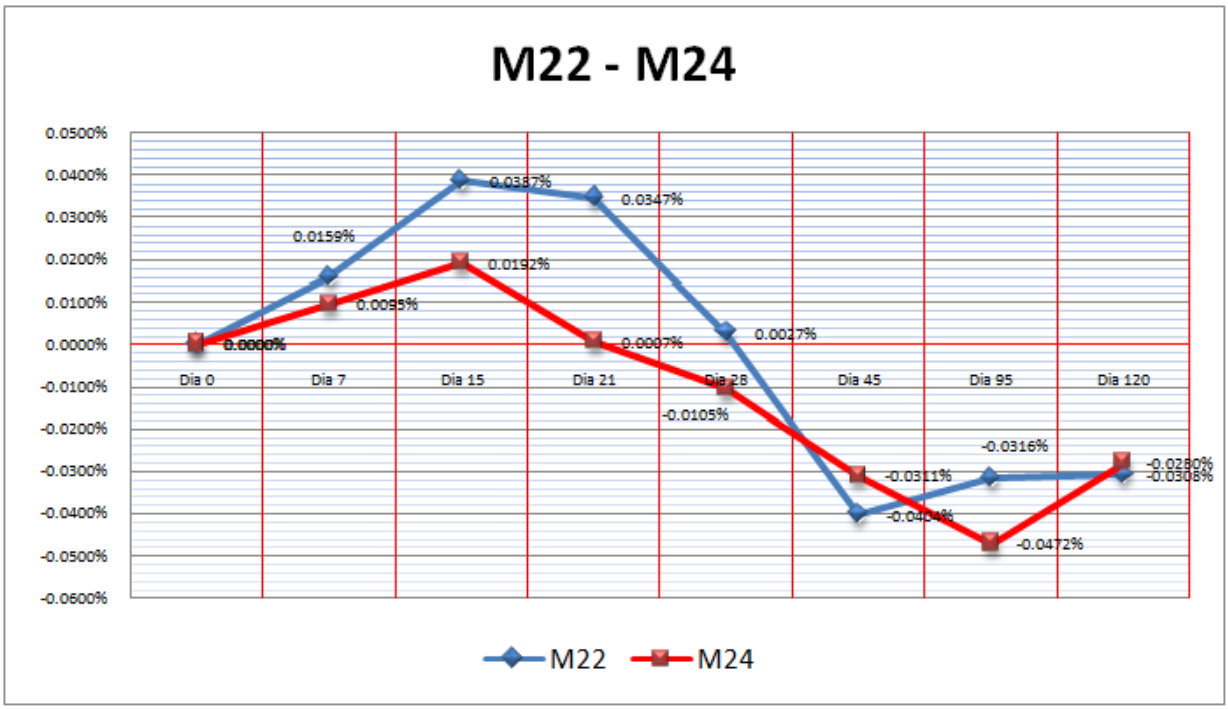
Mayor expansión: 0.0787% (M21)

Mayor contracción: -0.0128% (M19)

Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.58. RAR: 50%

Ilustración 6-20: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.58. RAR: 50%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M22	50%	0.58	0%	3,231.48
M24	50%	0.58	40%	2,354.86

Se evidencia, una vez más, que la adición de ceniza en la mezcla, disminuye las expansiones de la mezcla. Pese a esto el comportamiento de estas dos mezclas es similar en cuanto a su efecto de expansión-contracción en casi el mismo periodo de tiempo, y su cambio de longitud, al final del tiempo de exposición, es prácticamente el mismo.

Disminución de la resistencia en un 27%.

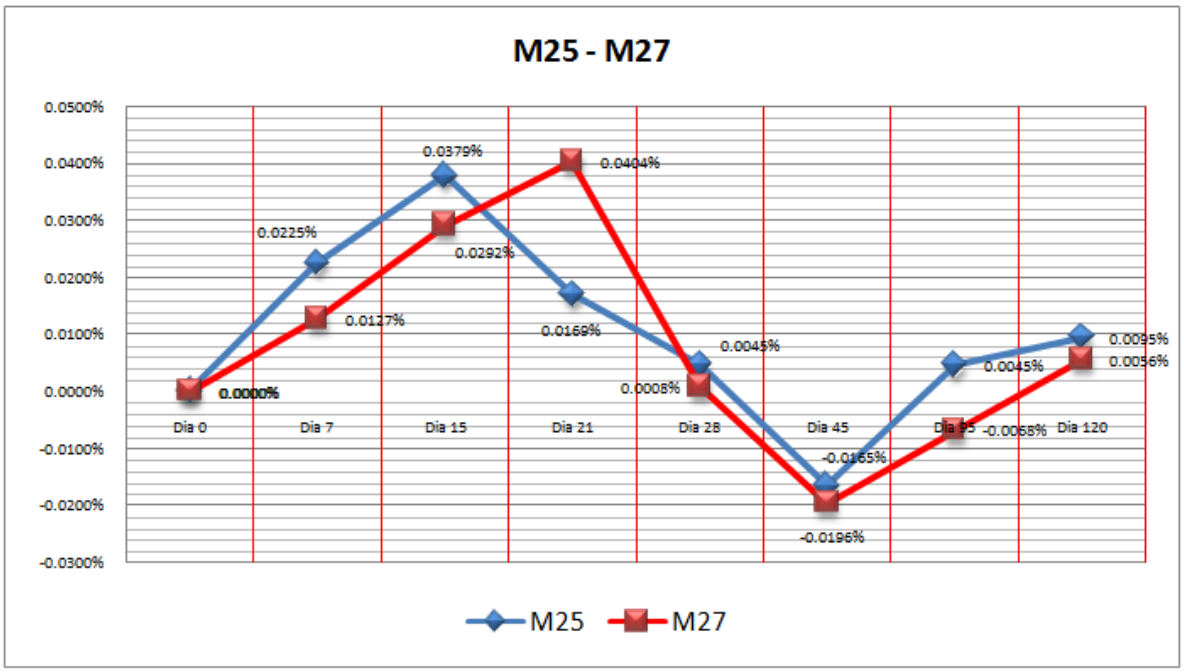
Mayor expansión: 0.0387% (M21)

Mayor contracción: -0.0472% (M19)

Variable: Reemplazo de Ceniza Volante.

Constante: A/C: 0.58. RAR: 100%

Ilustración 6-21: **Gráfico de expansión Vs Reemplazo ceniza. A/C: 0.58. RAR: 100%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M25	100%	0.58	0%	3,652.20
M27	100%	0.58	40%	2,312.02

El comportamiento de este par de mezclas fue muy similar en cuanto a expansiones unitarias y acumuladas, y enmarcada por presentar efecto expansión-contracción-expansión en tiempos muy similares de exposición a la solución de sulfato. Por lo que para estas mezclas no fue definitiva la adición de ceniza para controlar la expansión.

Las expansiones presentadas para esta relación A/C son similares, independiente del porcentaje de reemplazo de agregados y de la adición de ceniza.

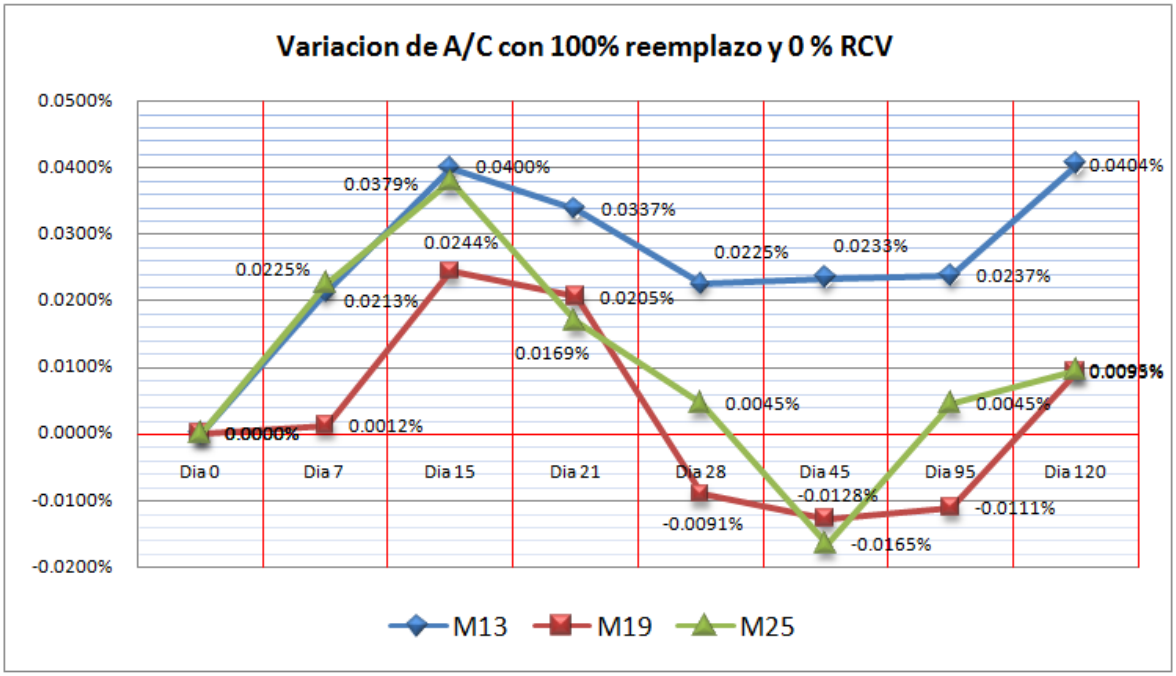
Mayor expansión: 0.0404% (M27)

Mayor contracción: -0.0196% (M27)

6.3.3 Variable: Relación A/C.

Constante: RCV: 0%. RAR: 100%

Ilustración 6-22: **Gráfico de expansión Vs Relación A/C. RCV: 0%. RAR: 100%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M13	100%	0.48	0%	3,058.50
M19	100%	0.53	0%	3,064.36
M25	100%	0.58	0%	3,652.20

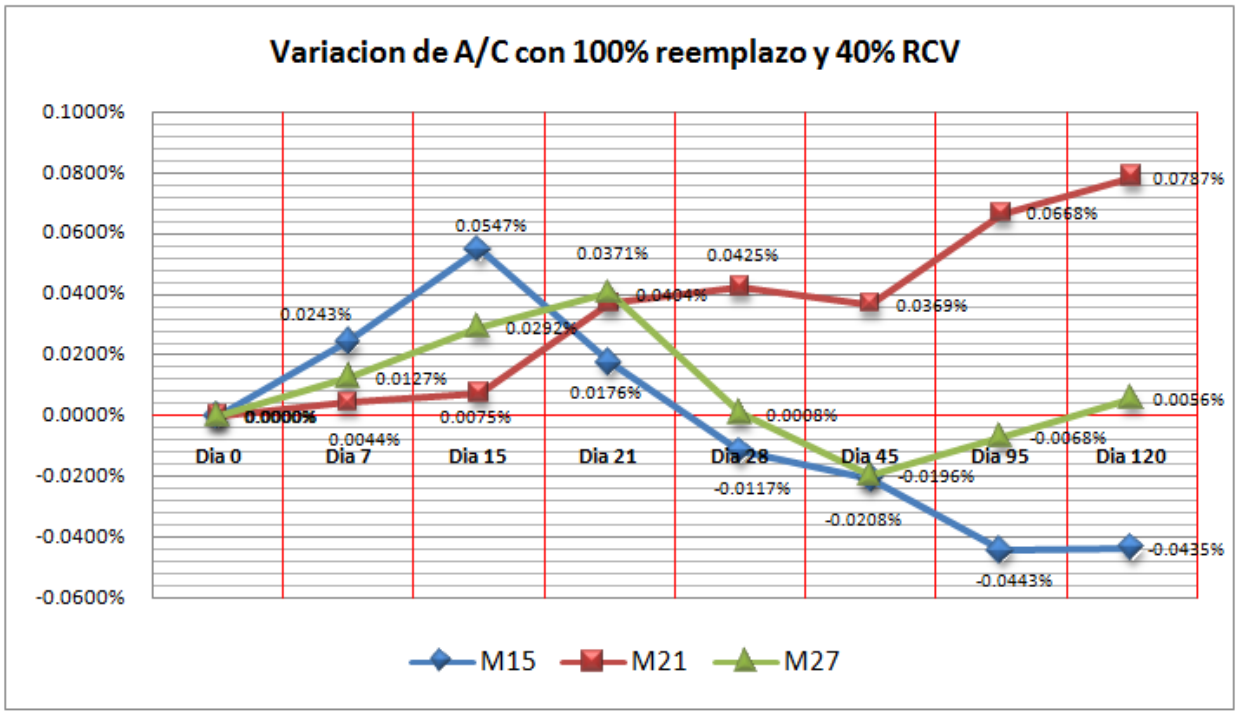
La relación A/C más baja presenta no solo la mayor expansión unitaria, sino la mayor expansión final del tiempo de exposición a la solución de sulfato. Las otras dos, presentan un comportamiento muy similar de expansión y contracción en tiempos similares.

Como en la mayor parte de las muestras de la presente investigación las mayores expansiones se presentan a las dos semanas de exposición a los sulfatos.

Variable: Relación A/C.

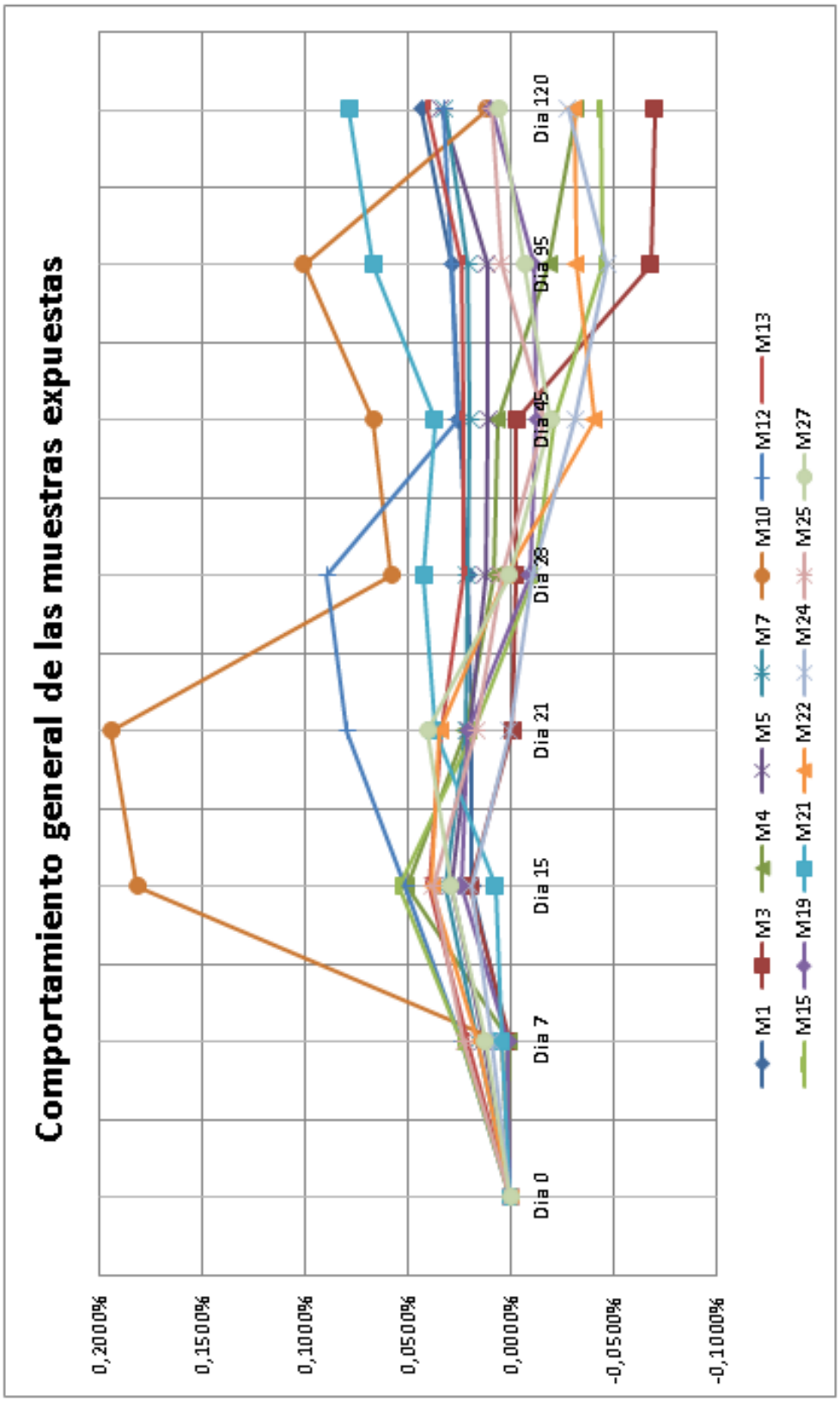
Constante: RCV: 0%. RAR: 100%

Ilustración 6-23: **Gráfico de expansión Vs Relación A/C. RCV: 40%. RAR: 100%.**



	% agr rec.	A/C	ceniza	f´c
M15	100%	0.48	40%	2,525.27
M21	100%	0.53	40%	2,381.17
M27	100%	0.58	40%	2,312.02

Como en la mayoría de las mezclas, con relación A/C de 0.53, esta presento un comportamiento diferente al de las otras dos mezclas con relaciones opuestas. Esta presentó al final del tiempo de la exposición una tendencia a seguir expandiéndose, mientras que las mezclas con relación A/C de 0.48y 0.58, siguieron presentando la tendencia de mayor expansión a los quince días de exposición y posteriormente un efecto de contracción.


Comportamiento general de las muestras expuestas
0,2000%
0,1500%
0,1000%
0,0500%
0,0000%
-0,0500%
-0,1000%
Dia 0
Dia 7
Dia 15
Dia 21
Dia 28
Dia 45
Dia 95
Dia 120
M1
M3
M4
M5
M7
M10
M12
M13
M15
M19
M21
M22
M24
M25
M27

CONCLUSIONES

Del proceso y los ensayos.

1. Para las muestras con reemplazos del 100% del agregado reciclado, se obtuvieron mezclas con menores asentamientos y por lo tanto menor trabajabilidad. Esta situación se incrementaba cuando las mezclas tenían adiciones de cenizas. Esta situación inclusive se presentó haciendo las respectivas correcciones por absorción de humedad adicional que tienen los agregados reciclados.

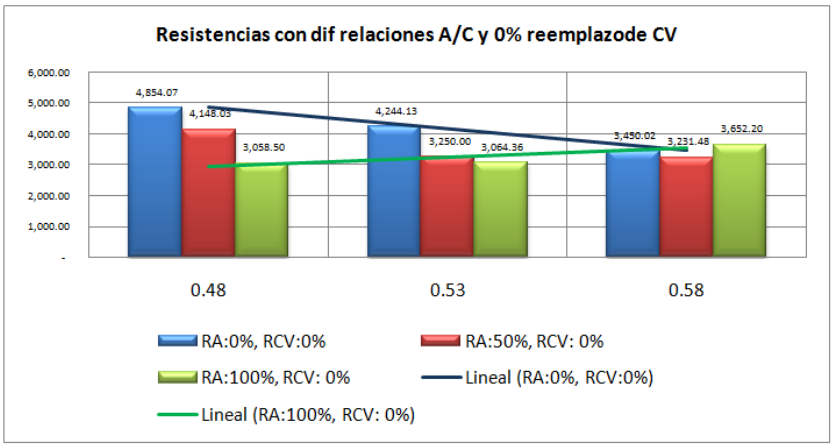
2. Durante el proceso de fundida de las muestras se tomaron unas plaquetas con el material sobrante del concreto. Aunque fue sin dimensiones normalizadas, se evidencio, que los concretos con agregados reciclados, presentan efectos de retracción más notables que los concretos con agregados naturales. Esto debido a la mayor cantidad de cemento de la mezcla, teniendo en cuenta el que está presente en los agregados. En la literatura consultada se nombra el efecto de que del concreto viejo, pueden haber aun, partículas de cemento que no habrían reaccionado con el agua en su primera vida útil, que lo pueden llegar a hacer en su reutilización, generando así una mayor reacción exotérmica que provoca finalmente estas retracciones adicionales.

3. Se evidenció la mayor absorción de los agregados reciclados de concreto, tal como lo enunciaba la mayor parte de la bibliografía consultada.

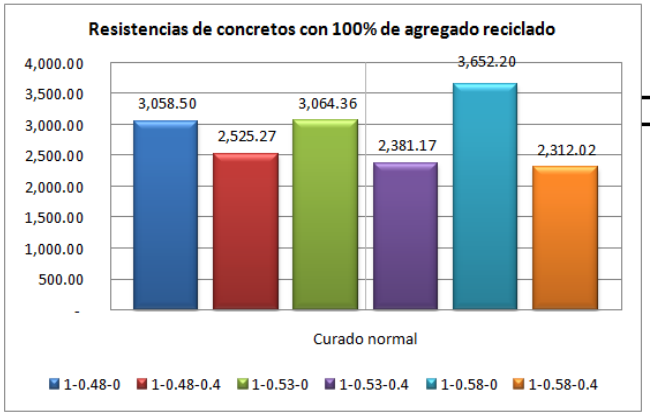
De los resultados.

Compresión.

1. El porcentaje de reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados afecta la resistencia a la compresión de las muestras. Este fenómeno se ve disminuido a medida que aumenta la relación A/C. Ejemplo: Para muestras curadas en agua, la resistencia a los 28 días de la relación A/C 0.48 fue de 4.854 PSI, mientras que para misma relación, pero con reemplazo total de agregados por reciclados fue de 3.058 psi. Perdida de resistencia del 37%. Ahora si vemos, estas dos mismas muestras comparadas pero con una relación A/C de 0.58, la resistencia de la muestra con 100% de reemplazo, incluso llego a ser un poco superior a la muestra con agregados naturales. Esta condición se da en ausencia de adición de cenizas volantes.

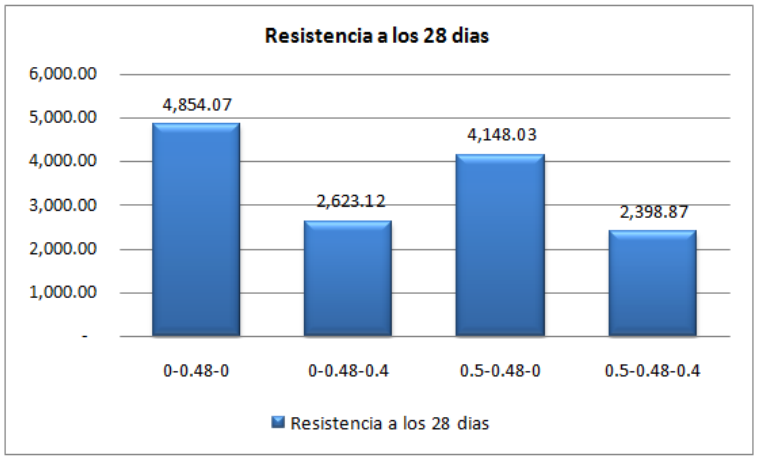


2. La mayor resistencia de un concreto con reemplazo del 100% del agregado fue de 3.652 PSI. Este no se obtuvo con la menor relación A/C (0.48), sino por el contrario con la más alta de las tres relaciones exploradas en la presente investigación. Pese a esto, estuvo bastante por debajo de la resistencia lograda con el concreto con agregados naturales.



3. Las resistencias de las mezclas con adición de ceniza volante del 40% fueron considerablemente más bajas que las que no tenían la adición. Este fenómeno se presentó mas notablemente en las mezclas con relación A/C 0.48 donde en promedio se tuvo una disminuciones de entre el 42% y el 46%, de resistencias de 4.854 PSI a 2.623 PSI para mezcla sin reemplazo de agregados, y de resistencias de 4.148 PSI a 2.398 para la mezcla con el 50% de reemplazo de agregados. El argumento es la mayor

cantidad de cemento que evidencia esta relación A/C, que es reemplazado por la ceniza, que no tiene las mismas propiedades de reacción cementante.



4. Para todas las mezclas que se curaron en la solución del 5% de sulfato, se evidencio un incremento, en promedio de la resistencia a los 28 días del 9.5%, teniendo como referencia, que el incremento mas considerable de esta resistencia se presentó en la muestra M25 (100% RAR, A/C 0.58, RCV 0%), donde se evidenció un incremento porcentual de la resistencia en un 24.8%. Esto reafirma que los concretos con agregados reciclados con relaciones A/C mas altas pueden presentar mejores comportamientos, ante el ataque de la solución de sulfatos, con relaciones A/C que no necesariamente sean bajas.

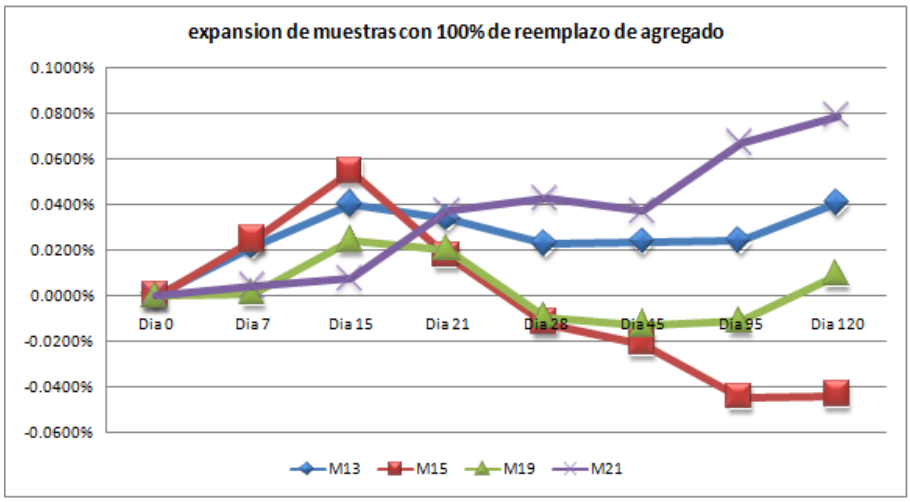
Expansión.

1. La adición de cenizas, contribuyó al control de la expansión en 5 de las 7 muestras comparadas con este criterio. La excepción se presentó en las muestras con A/C 0.53 con 0% y 100% de reemplazo de agregados. Teniendo en cuenta que la única variable de esta adición fue el 40% de reemplazo de cemento por ceniza volante, se recomienda utilizar menores adiciones para futuros investigaciones, teniendo en cuenta el no sacrificar la resistencia, y pudiendo llegar diferencias similares en el control de la expansión.

2. Para mezclas sin adición de ceniza volante, las mayores expansiones se evidenciaron con mayores relaciones de A/C. Adicionalmente, la mezcla con relación mas baja (0.48) con el reemplazo de agregados del 100% presento la mayor expansión explicándose esto, posiblemente, por la mayor presencia de aluminato tricálcico en estas mezclas (debido a la mayor cantidad de cemento y de agregado reciclado).

3. En la mayor parte de las muestras examinadas durante el tiempo de exposición, las mayores expansiones se presentaron a los 15 días de exposición. Así mismo, la mayor parte de las muestras mostraron un efecto posterior de contracción o expansión negativa. Tan solo en 5 de las 15 muestras (M1 – M5 – M7 –M13 – M21), se evidenció una tendencia a seguir expandiéndose, teniendo tres de estas muestras en común la no adición de cenizas volantes, y las otras dos tener una relación A/C de 0.53, con 0 y 100% de reemplazo de agregados.

4. De las mezclas que contienen 100% de agregado reciclado la que menor variación presento en el cambio dimensional de las probetas fue la que contiene la relación A/C 0.53, con 0% de adición de cenizas (M19). De acá se concluye que, aunque para la mayoría de los casos, la ceniza volante, controla muy bien la expansión, también es un factor indispensable la relación A/C que se utilice.



5. Pese a que la menor expansión acumulada que se presento fue detectada en la mezcla con el 100% de reemplazo de agregado reciclado, adición de ceniza volante al 40% y una relación A/C de 0.58, fue al mismo tiempo la que mas cambios dimensionales en su longitud tuvo, lo que implica que en un periodo de 21 días llego al 0.040% , a las tres semanas una contracción negativa de 0.06% y posteriormente una nueva expansión positiva de 0.025%. Como conclusión, se puede explicar que no necesariamente una expansión baja asegura una buena durabilidad del concreto, dado que durante los periodos de lectura se pueden evidenciar diferentes cambios longitudinales que alterarían la porosidad y estabilidad estructural del concreto.

A. Anexo: Resultados ensayos de compresión.

Tabla 0-1: **Resultados individuales de ensayos de compresión de las muestras.**

Nomenclatura	Resistencia en kilos	Resistencia en Kg/cm2	Resistencia en PSI
1AS	26,953.50	343.18	4,902.61
1BS	33,069.00	421.05	6,014.97
1CS	29,671.50	377.79	5,396.99
1DN	26,610.00	338.81	4,840.13
1EN	26,800.00	341.23	4,874.69
1FN	26,650.00	339.32	4,847.40
2AS	20,385.00	259.55	3,707.86
2BS	20,470.00	260.63	3,723.32
2CS	20,240.00	257.70	3,681.48
2DN	19,320.00	245.99	3,514.14
2EN	17,850.00	227.27	3,246.76
2FN	19,280.00	245.48	3,506.87
3AS	15,016.95	191.20	2,731.45
3BS	16,194.75	206.20	2,945.69
3CS	17,992.00	229.08	3,272.59
3DN	15,730.00	200.28	2,861.15
3EN	14,547.00	185.22	2,645.97
3FN	12,987.00	165.36	2,362.22
4AN	22,610.00	287.88	4,112.56
4BN	23,720.00	302.01	4,314.46
4CN	23,670.00	301.38	4,305.37
4DS	22,698.00	289.00	4,128.57
4ES	23,956.00	305.02	4,357.39
4FS	24,671.27	314.12	4,487.49
5AN	18,624.00	237.13	3,387.54
5BN	18,684.00	237.89	3,398.46
5CN	19,212.00	244.61	3,494.50
5DS	18,722.00	238.38	3,405.37
5ES	19,329.82	246.11	3,515.93
5FS	18,925.00	240.96	3,442.29
7AS	19,809.00	252.22	3,603.09
7BS	19,755.00	251.53	3,593.26
7CN	18,855.00	240.07	3,429.56
7DN	19,080.00	242.93	3,470.49
10AN	23,330.00	297.05	4,243.53

Nomenclatura	Resistencia en kilos	Resistencia en Kg/cm2	Resistencia en PSI
10BN	22,280.00	283.68	4,052.54
10CS	22,330.00	284.31	4,061.63
10DS	22,197.00	282.62	4,037.44
12AN	13,689.00	174.29	2,489.91
12BN	12,688.00	161.55	2,307.84
12CS	14,722.50	187.45	2,677.90
12DS	13,839.15	176.21	2,517.22
13AS	18,120.00	230.71	3,295.87
13BS	18,573.00	236.48	3,378.27
13CS	19,026.00	242.25	3,460.67
13DN	16,540.00	210.59	3,008.48
13EN	17,090.00	217.60	3,108.52
15AS	14,789.56	188.31	2,690.09
15BS	16,511.85	210.24	3,003.36
15CS	15,235.25	193.98	2,771.16
15DN	14,418.00	183.58	2,622.51
15EN	13,348.80	169.96	2,428.03
19AS	17,907.50	228.01	3,257.22
19BS	18,154.50	231.15	3,302.15
19CS	16,796.00	213.85	3,055.05
19DN	16,522.00	210.36	3,005.21
19EN	17,169.54	218.61	3,122.99
19EN	16,850.00	214.54	3,064.87
21AS	11,911.91	151.67	2,166.67
21BS	13,721.65	174.71	2,495.85
21CS	14,531.98	185.03	2,643.24
21DN	12,584.00	160.22	2,288.92
21EN	13,469.58	171.50	2,450.00
21FN	13,220.00	168.32	2,404.60
22AS	22,485.60	286.30	4,089.94
22BS	19,569.60	249.17	3,559.54
22CS	19,080.36	242.94	3,470.55
22DN	17,841.60	227.17	3,245.23
22EN	17,690.40	225.24	3,217.73
24AS	17,685.00	225.17	3,216.75
24BS	12,474.00	158.82	2,268.91
24DN	14,850.00	189.08	2,701.09
24EN	11,043.00	140.60	2,008.63
25AS	24,150.00	307.49	4,392.68
25BS	21,879.90	278.58	3,979.76

25CS	29,145.60	371.09	5,301.33
25DN	17,608.80	224.20	3,202.89
25EN	22,549.20	287.11	4,101.50
27AS	14,459.76	184.11	2,630.11
27BS	15,492.60	197.26	2,817.97
27CS	15,367.20	195.66	2,795.16
27DN	11,536.80	146.89	2,098.44
27EN	13,885.20	176.79	2,525.60

B. Anexo: Resultados ensayos de expansión.

Anexo 0-1: Ficha Expansión individual M-01.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE MCEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

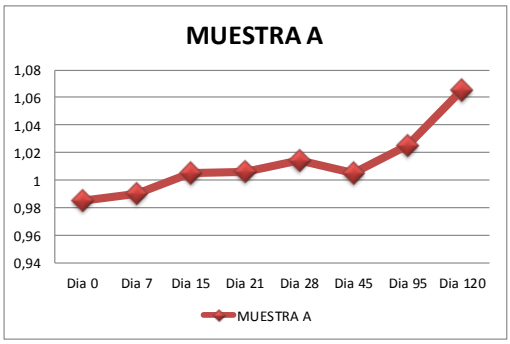
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M1

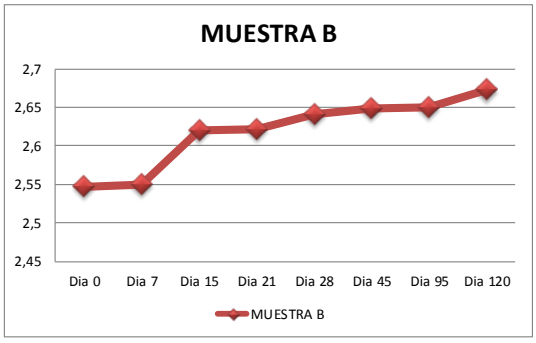
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

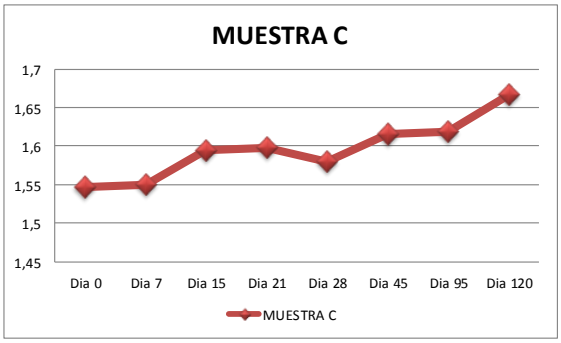
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	0%
A/C	0,48

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
1A	0,985
1B	2,547
1C	1,547

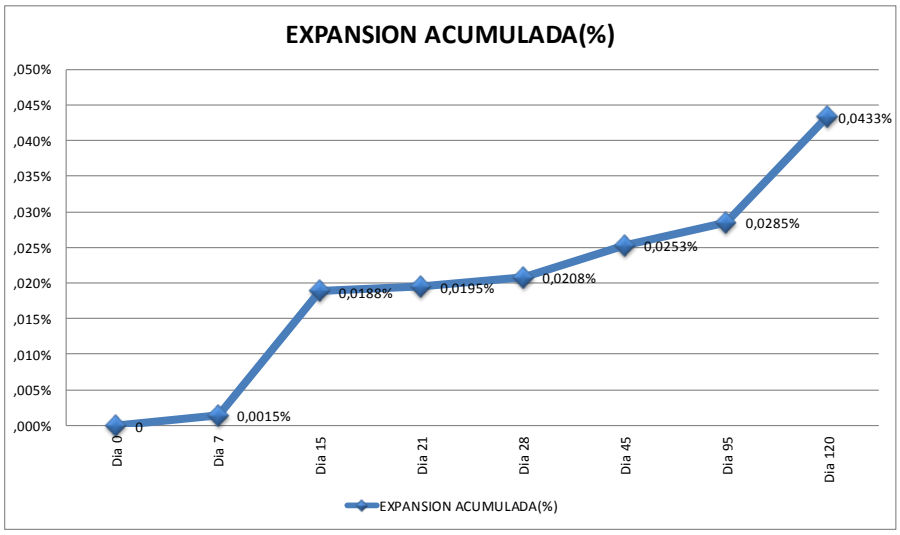
FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA (%)	OBSERVACIONES
Dia 0	0,985	2,547	1,547	0	0	
Dia 7	0,99	2,55	1,55	0,0015%	0,0015%	
Dia 15	1,005	2,62	1,595	0,0188%	0,0173%	ADHERIDO SUPERFICIALMENTE A LAS CARAS DE LA VIGA
Dia 21	1,006	2,621	1,598	0,0195%	0,0007%	
Dia 28	1,014	2,641	1,58	0,0208%	0,0013%	
Dia 45	1,005	2,649	1,615	0,0253%	0,0045%	
Dia 95	1,025	2,65	1,618	0,0285%	0,0032%	
Dia 120	1,065	2,673	1,666	0,0433%	0,0148%	
DESV. EST	0,024867865	0,046615257	0,038771998			

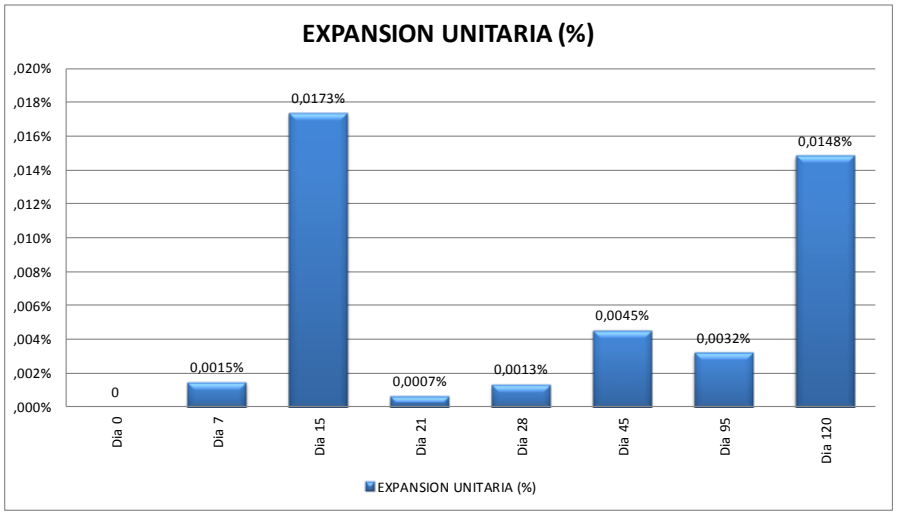






Anexo 0-2: Ficha Expansión individual M-01. (Continuación)





Anexo 0-3: Ficha Expansión individual M-03.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MAESTRIA EN CONSTRUCCION
TITULO DE LA INVESTIGACION
ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS
ARQ. WILLIAM GARZON PIRE
DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE MCEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

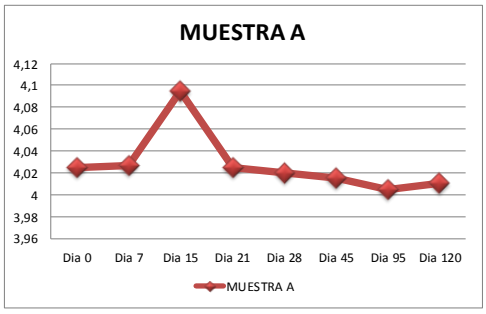
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M3

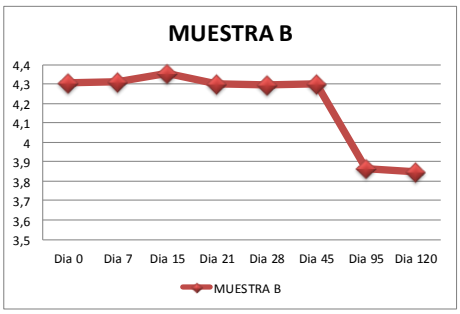
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

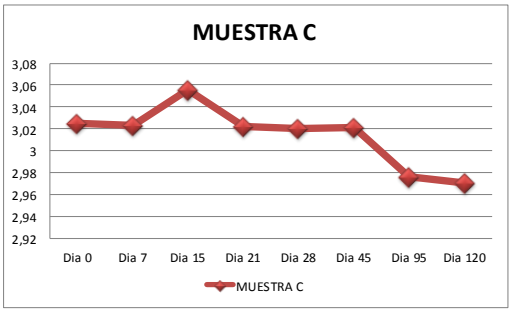
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	0%
A/C	0,48

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
3A	4,025
3B	4,306
3C	3,025

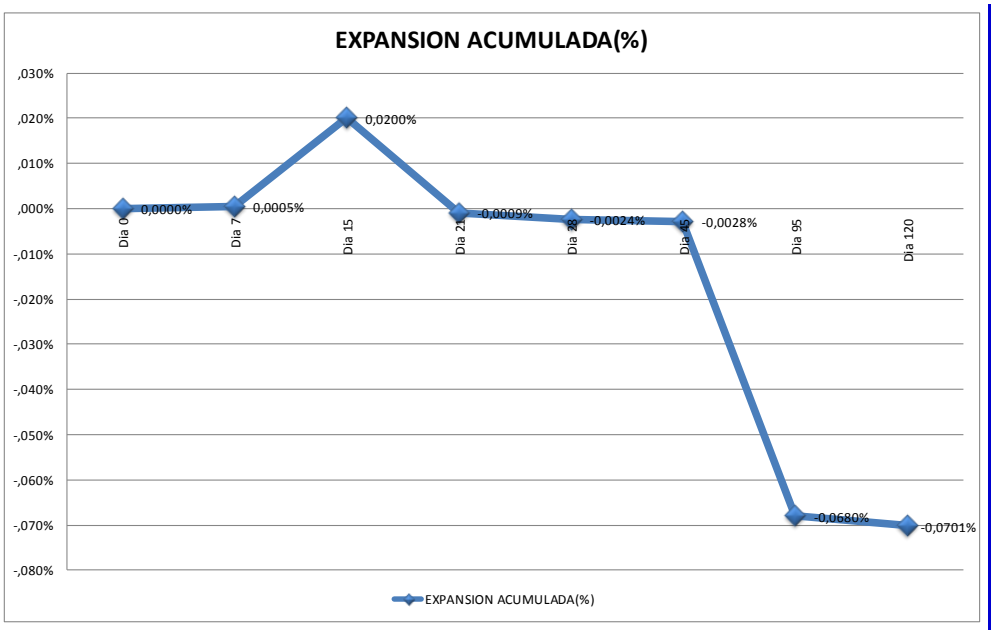
FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA (%)	OBSERVACIONES
Dia 0	4,025	4,306	3,025	0,0000%	0,000%	
Dia 7	4,027	4,31	3,023	0,0005%	0,001%	
Dia 15	4,095	4,355	3,056	0,0200%	0,019%	
Dia 21	4,025	4,302	3,022	-0,0009%	-0,021%	
Dia 28	4,02	4,298	3,02	-0,0024%	-0,001%	
Dia 45	4,015	4,299	3,021	-0,0028%	0,000%	
Dia 95	4,005	3,865	2,976	-0,0680%	-0,065%	
Dia 120	4,010	3,850	2,970	-0,0701%	-0,002%	
DESV. EST	0,028267852	0,21107442	0,028017533			

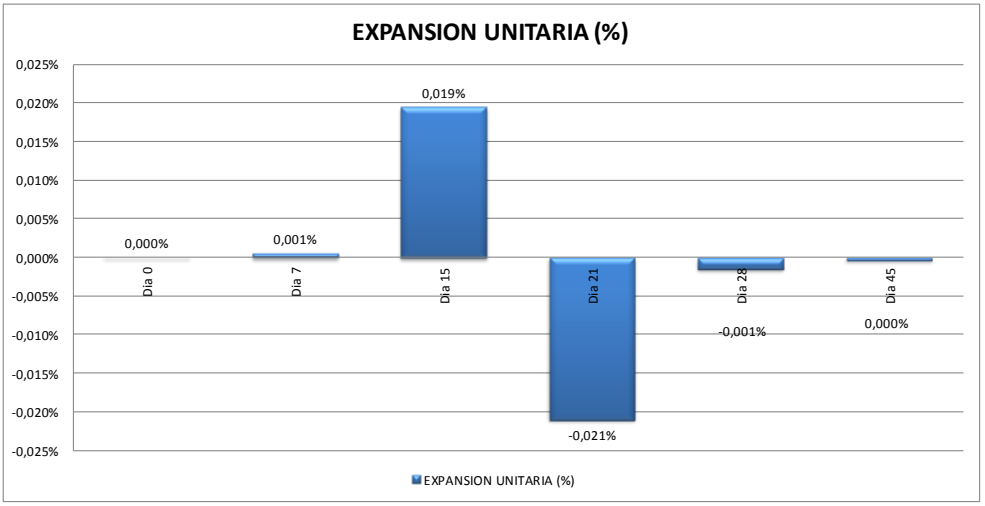






Anexo 0-4: Ficha Expansión individual M-03. (Continuación)





Anexo 0-5: Ficha Expansión individual M-04.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

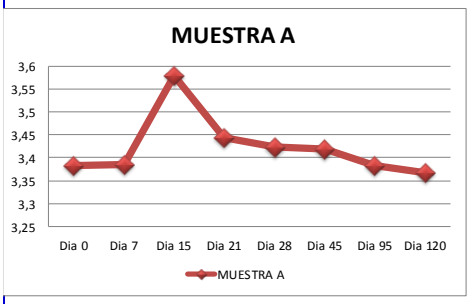
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M4

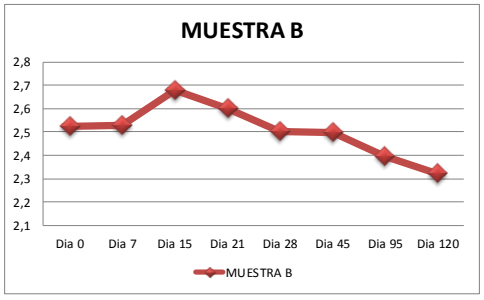
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

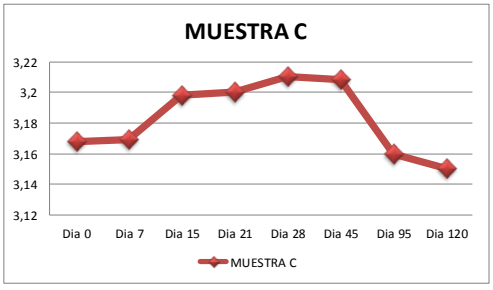
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	0%
A/C	0,53

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
4A	3,384
4B	2,525
4C	3,168

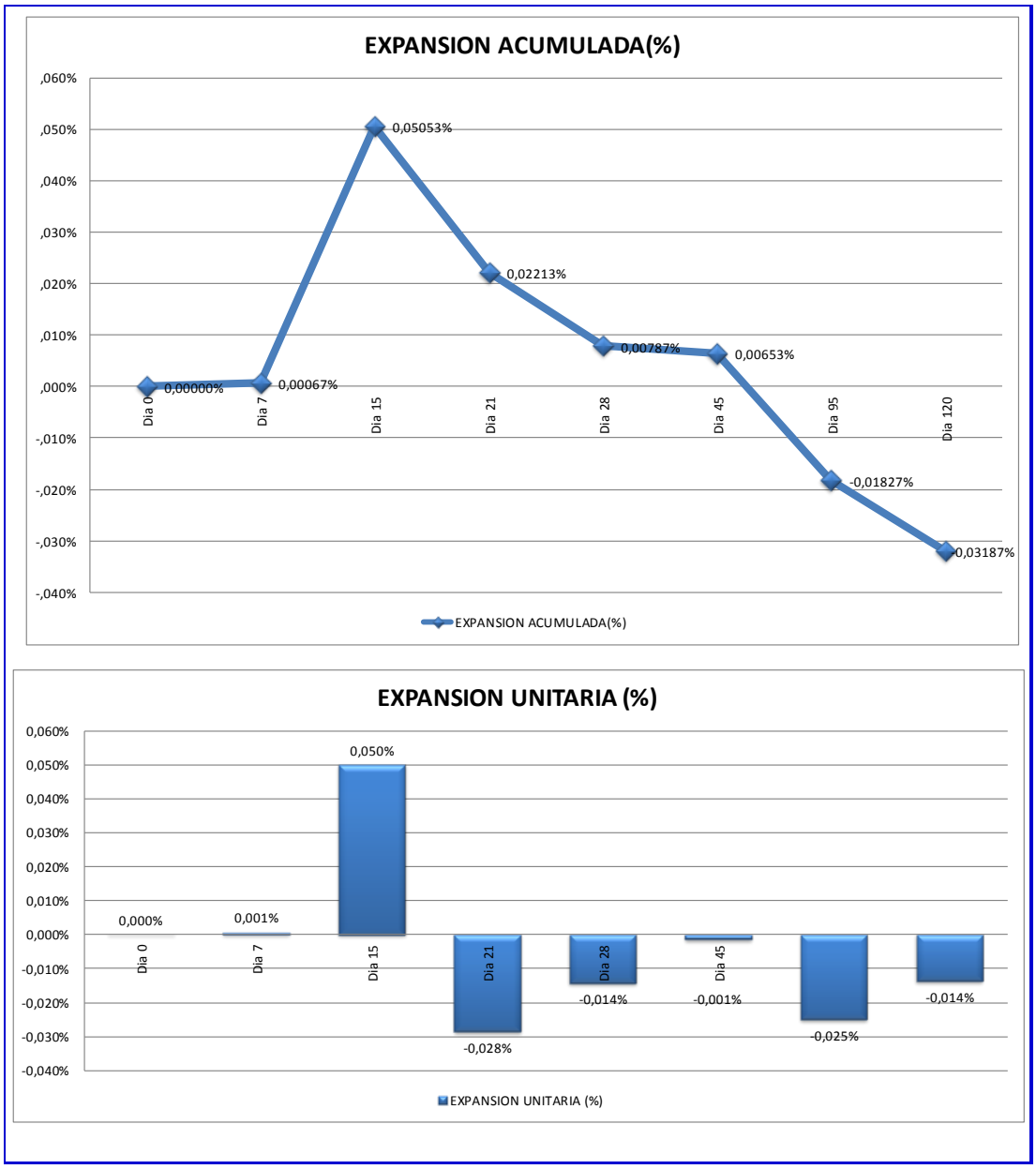
FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA (%)	OBSERVACIONES
Dia 0	3,384	2,525	3,168	0,00000%	0,000%	
Dia 7	3,386	2,527	3,169	0,00067%	0,001%	
Dia 15	3,578	2,68	3,198	0,05053%	0,050%	
Dia 21	3,444	2,599	3,2	0,02213%	-0,028%	
Dia 28	3,424	2,502	3,21	0,00787%	-0,014%	
Dia 45	3,42	2,498	3,208	0,00653%	-0,001%	
Dia 95	3,384	2,396	3,16	-0,01827%	-0,025%	
Dia 120	3,368	2,32	3,15	-0,03187%	-0,014%	
DESV. EST	0,067517194	0,111164534	0,023624669			







Anexo 0-6: Ficha Expansión individual M-04. (Continuación)



Anexo 0-7: Ficha Expansión individual M-05.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

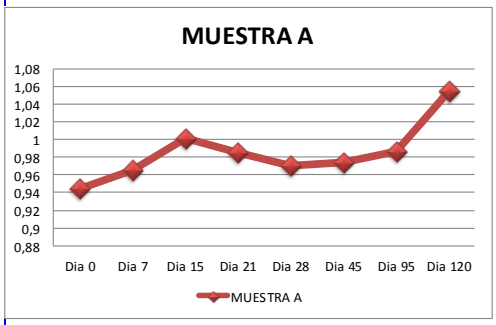
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M5

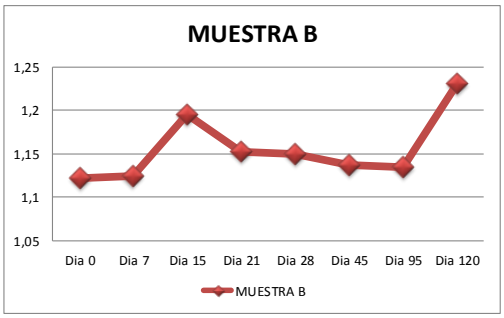
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

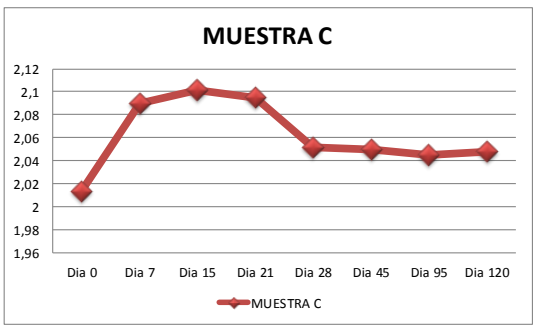
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	0%
A/C	0,53

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
5A	0,944
5B	1,122
5C	2,013

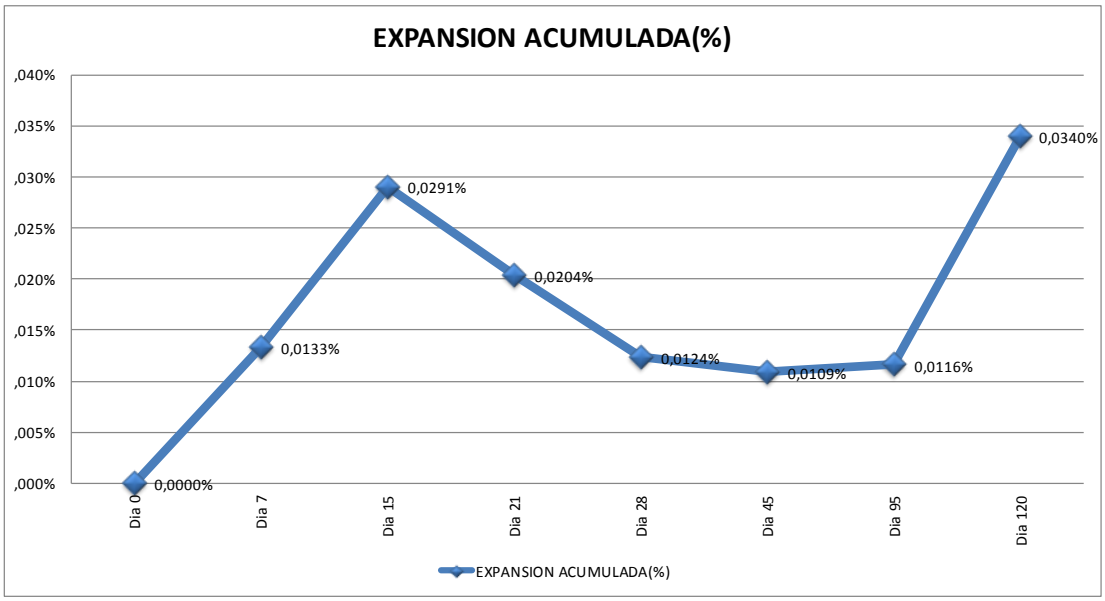
FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	0,944	1,122	2,013	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	0,965	1,124	2,09	0,0133%	0,0133%	
Dia 15	1,001	1,195	2,101	0,0291%	0,0157%	
Dia 21	0,985	1,152	2,095	0,0204%	-0,0087%	
Dia 28	0,97	1,15	2,052	0,0124%	-0,0080%	
Dia 45	0,974	1,137	2,05	0,0109%	-0,0015%	
Dia 95	0,986	1,135	2,045	0,0116%	0,0007%	
Dia 120	1,055	1,231	2,048	0,0340%	0,0224%	
DESV. EST	0,032915476	0,038134162	0,030527505			

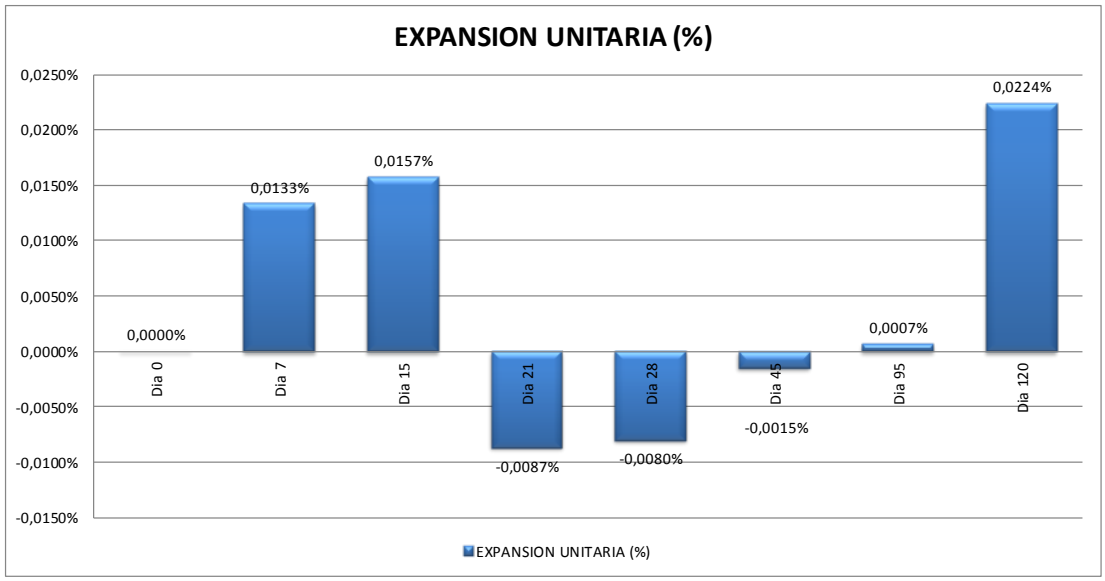






Anexo 0-8: Ficha Expansión individual M-05. (Continuación)





Anexo 0-9: Ficha Expansión individual M-07.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

IDENTIFICACION DE MEZCLA	M7

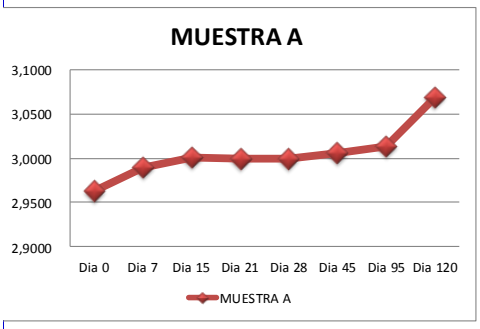
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

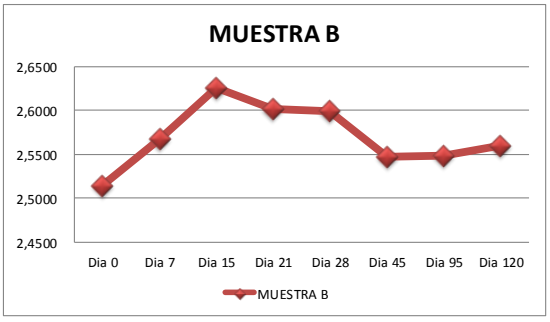
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	0%
A/C	0,58

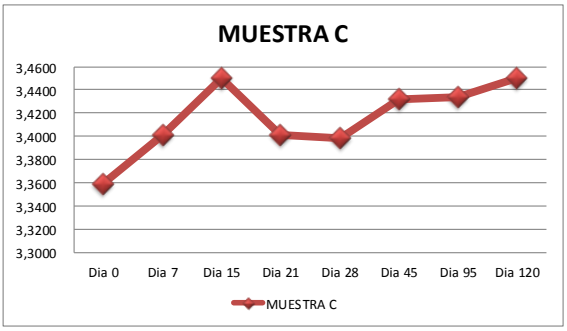
IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
7A	2,963
7B	2,515
7C	3,359

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	2,9630	2,5150	3,3590	0,00000	0,00000	
Dia 7	2,9900	2,5680	3,4010	0,0163%	0,0163%	
Dia 15	3,0010	2,6250	3,4500	0,0319%	0,0156%	
Dia 21	3,0000	2,6010	3,4010	0,0220%	-0,0099%	
Dia 28	2,9990	2,5990	3,3980	0,0212%	-0,0008%	
Dia 45	3,0060	2,5470	3,4320	0,0197%	-0,0015%	
Dia 95	3,0130	2,5480	3,4340	0,0211%	0,0013%	
Dia 120	3,0680	2,5600	3,4500	0,0321%	0,0111%	

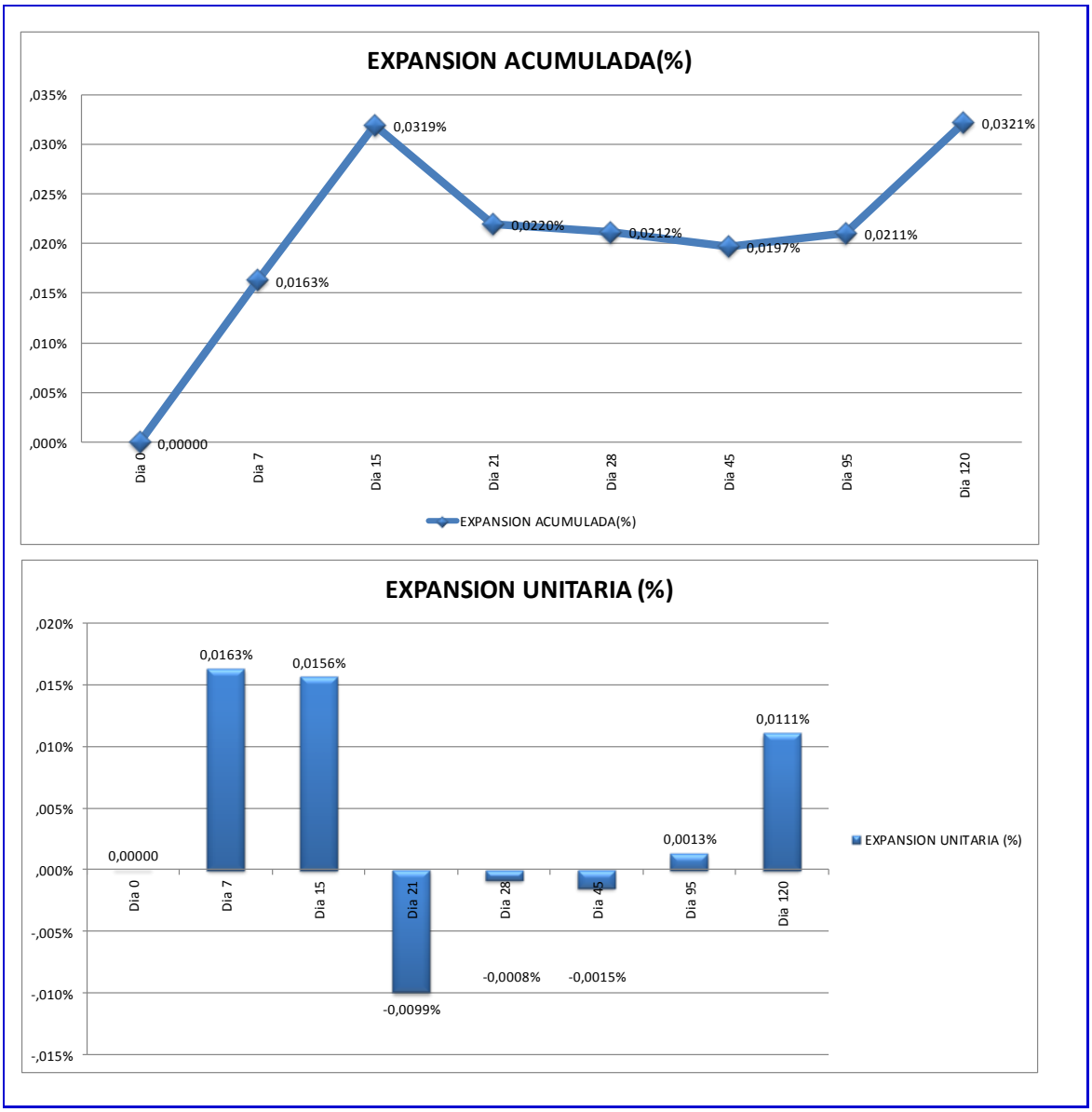
DESV. EST	0,029519969	0,035792807	0,031427638







Anexo 0-10: Ficha Expansión individual M-07. (Continuación)



Anexo 0-11: Ficha Expansión individual M-10.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

IDENTIFICACION DE MEZCLA	M10

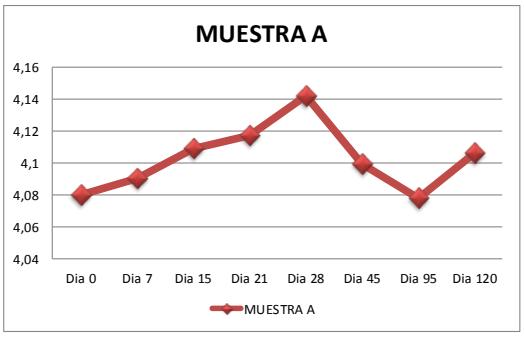
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

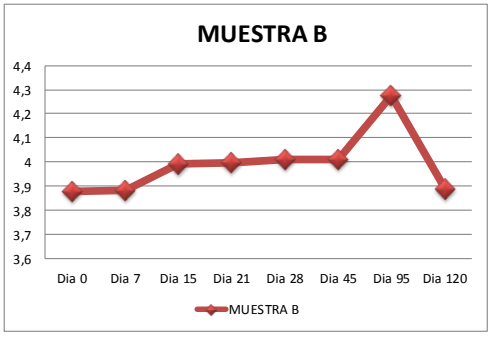
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	50%
A/C	0,48

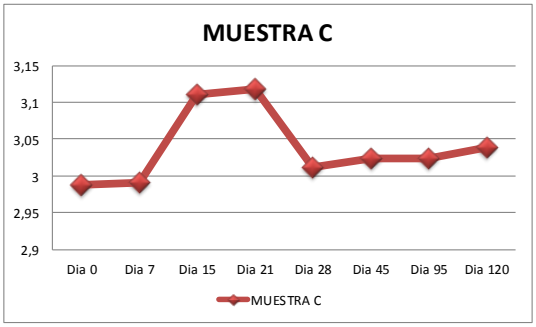
IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
10A	4,08
10B	3,877
10C	2,988

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	4,08	3,877	2,988	0,00000%	0,00000%	
Dia 7	4,09	3,882	2,99	0,00467%	0,00227%	
Dia 15	4,109	3,991	3,11	0,18173%	0,03307%	
Dia 21	4,117	3,999	3,118	0,19453%	0,00320%	
Dia 28	4,142	4,009	3,012	0,05787%	-0,00947%	
Dia 45	4,099	4,009	3,023	0,06680%	-0,00427%	
Dia 95	4,078	4,274	3,024	0,10067%	0,03267%	
Dia 120	4,106	3,887	3,039	0,01160%	-0,04587%	

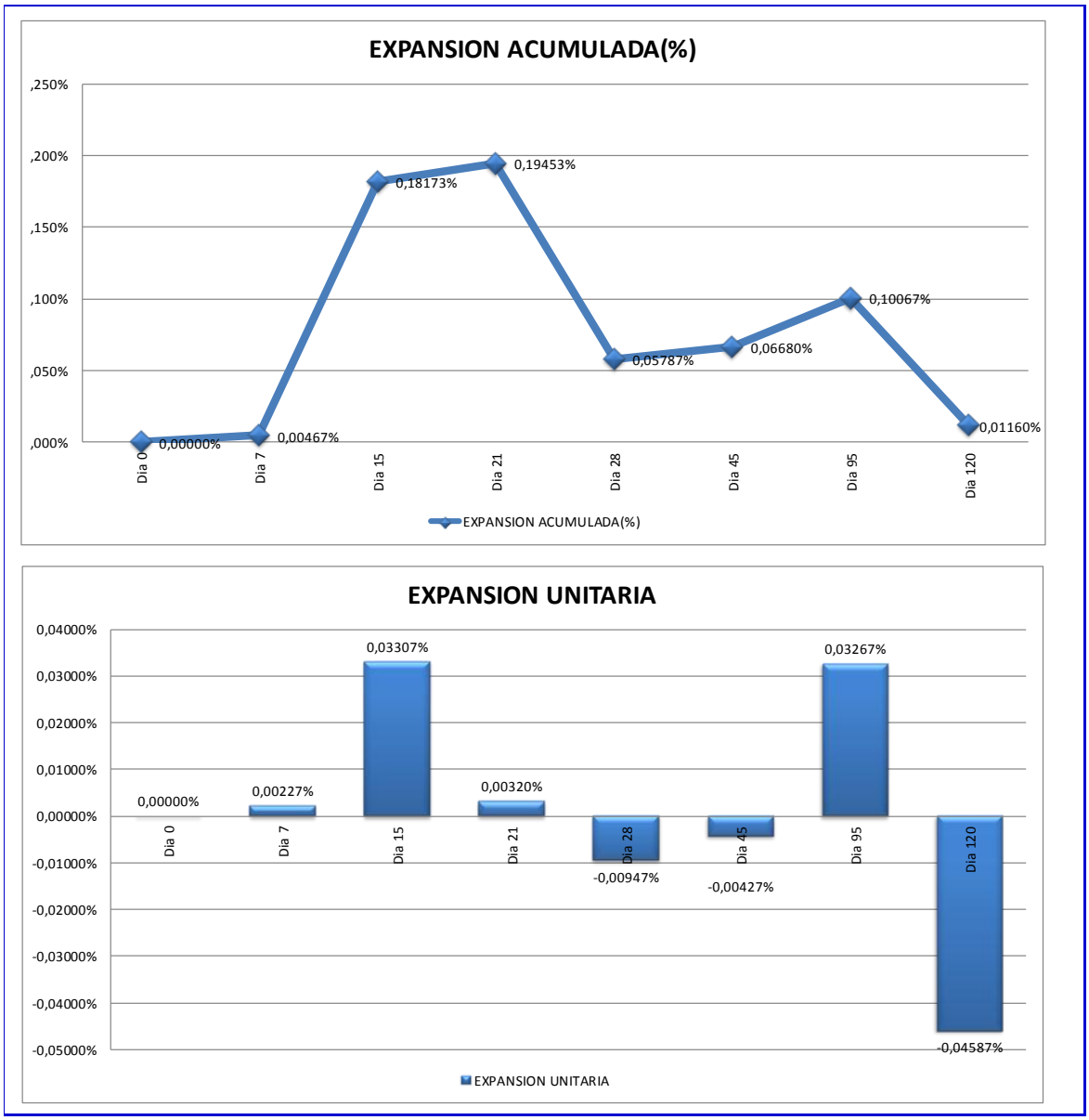
DESV. EST	0,021043747	0,129003876	0,049979996







Anexo 0-12: Ficha Expansión individual M-10. (Continuación)



Anexo 0-13: Ficha Expansión individual M-12.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

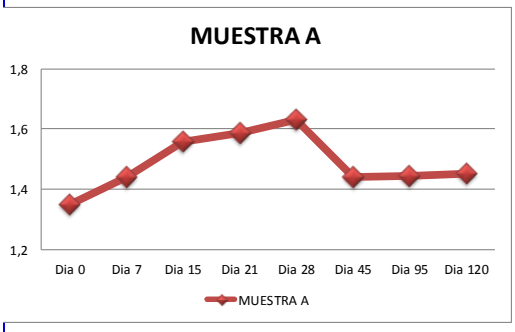
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M12

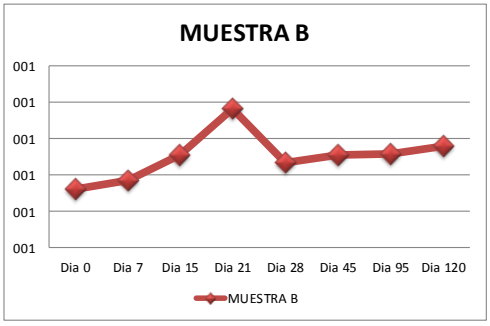
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	50%
A/C	0,53

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
12A	1,348
12B	0,86
12C	2,42

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	1,348	0,86	2,42	0,00000%	0,00000%	
Dia 7	1,442	0,88433	2,479	0,02364%	0,02364%	
Dia 15	1,556	0,955	2,503	0,05147%	0,02782%	
Dia 21	1,586	1,08	2,56	0,07973%	0,02827%	
Dia 28	1,63	0,933	2,738	0,08973%	0,01000%	
Dia 45	1,441	0,954	2,43	0,02627%	-0,06347%	
Dia 95	1,444	0,956	2,441	0,02840%	0,00213%	
Dia 120	1,452	0,977	2,445	0,03280%	0,00440%	
DESV. EST	0,093767094	0,065908479	0,105875938			





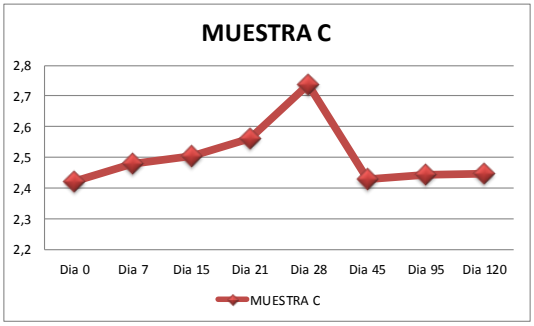


Ilustración 0-14: Ficha Expansión individual M-10. (Continuación)

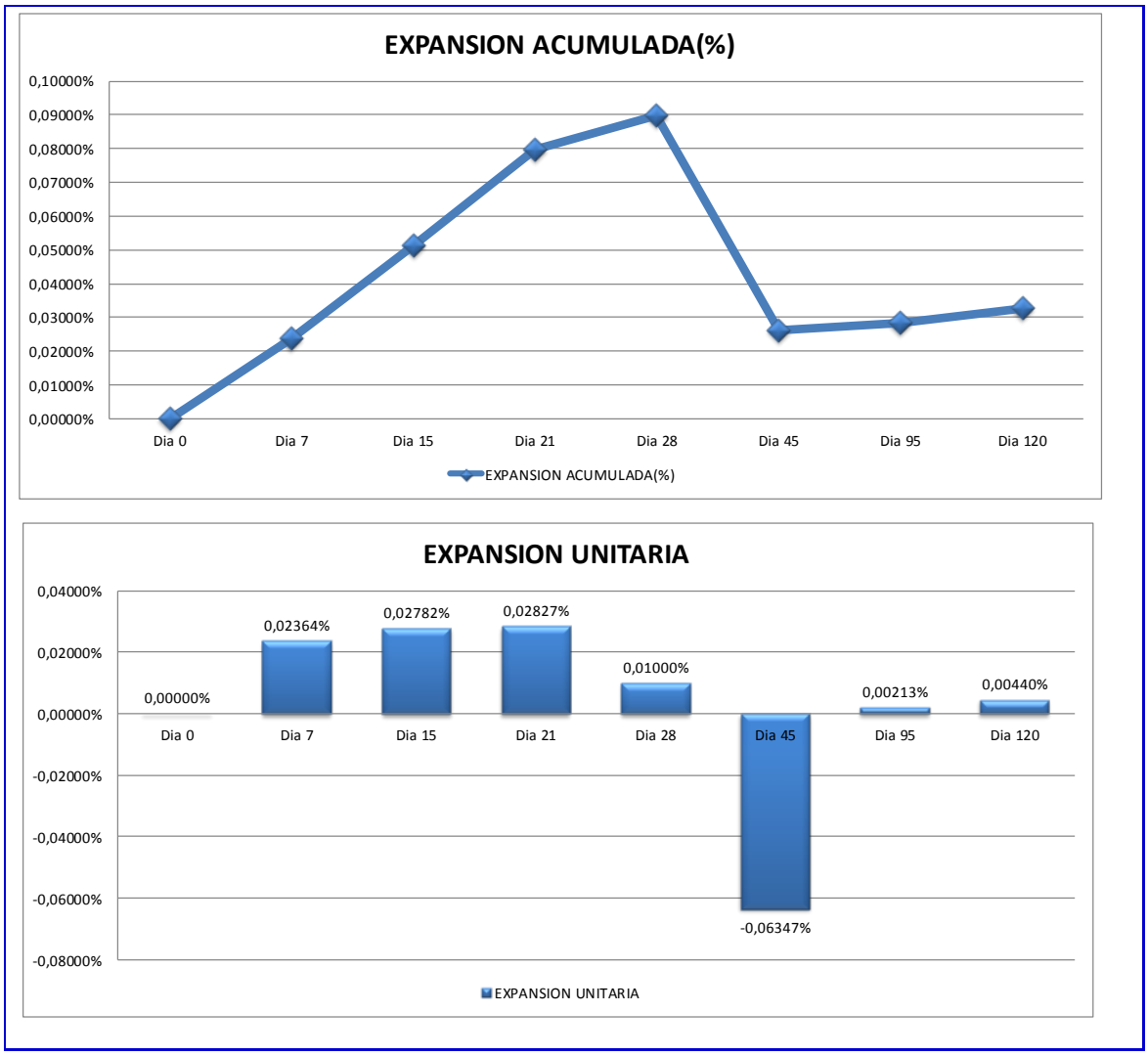


Ilustración 0-15: Ficha Expansión individual M-12.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

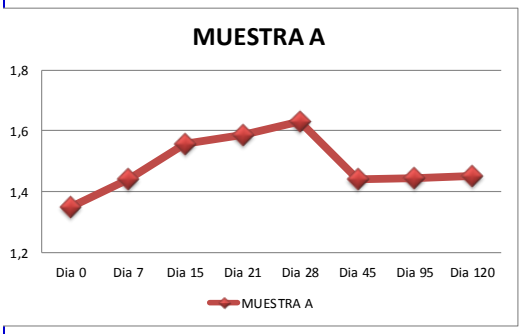
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M12

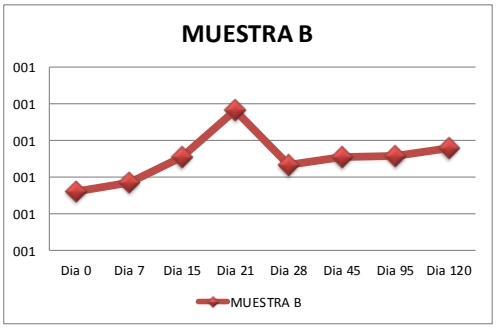
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	50%
A/C	0,53

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
12A	1,348
12B	0,86
12C	2,42

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	1,348	0,86	2,42	0,00000%	0,00000%	
Dia 7	1,442	0,88433	2,479	0,02364%	0,02364%	
Dia 15	1,556	0,955	2,503	0,05147%	0,02782%	
Dia 21	1,586	1,08	2,56	0,07973%	0,02827%	
Dia 28	1,63	0,933	2,738	0,08973%	0,01000%	
Dia 45	1,441	0,954	2,43	0,02627%	-0,06347%	
Dia 95	1,444	0,956	2,441	0,02840%	0,00213%	
Dia 120	1,452	0,977	2,445	0,03280%	0,00440%	
DESV. EST	0,093767094	0,065908479	0,105875938			





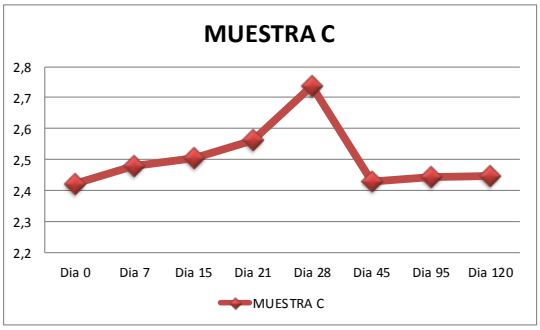


Ilustración 0-16: Ficha Expansión individual M-12. (Continuación)

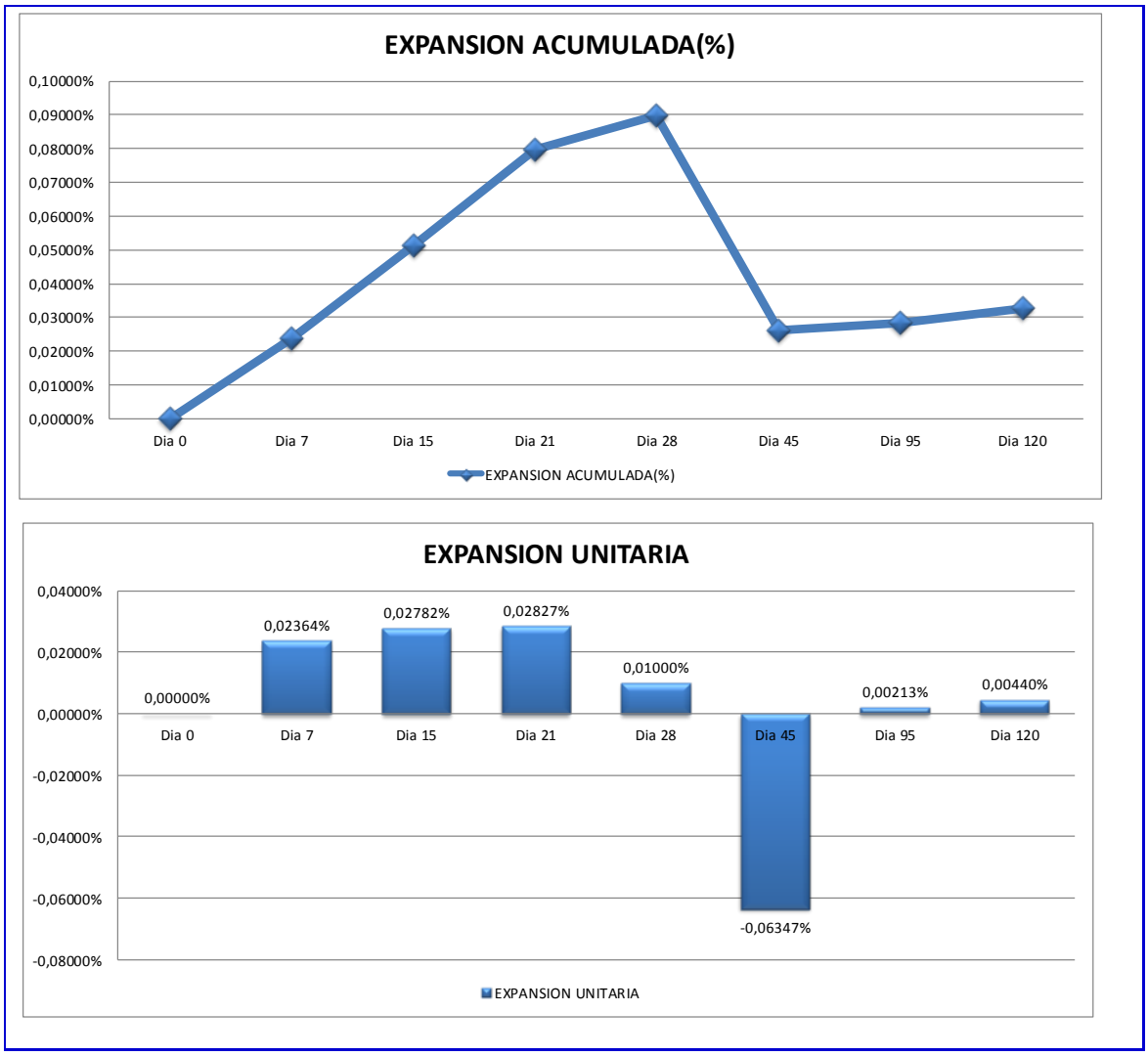


Ilustración 0-17: Ficha Expansión individual M-13.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

IDENTIFICACION DE MEZCLA	M13

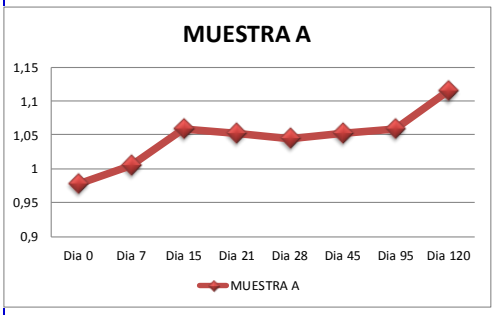
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

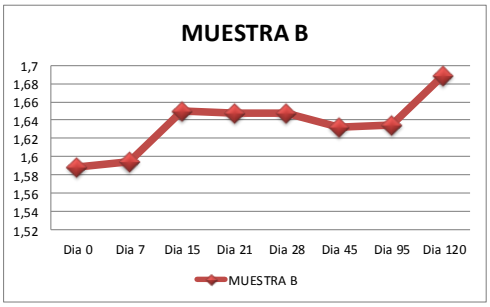
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	100%
A/C	0,48

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
13A	0,978
13B	1,589
13C	0,536

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	0,978	1,589	0,536	0,00000%	0,00000%	
Dia 7	1,005	1,595	0,663	0,02133%	0,02133%	
Dia 15	1,058	1,65	0,695	0,04000%	0,01867%	
Dia 21	1,053	1,648	0,655	0,03373%	-0,00627%	
Dia 28	1,045	1,648	0,579	0,02253%	-0,01120%	
Dia 45	1,053	1,632	0,593	0,02333%	0,00080%	
Dia 95	1,058	1,635	0,588	0,02373%	0,00040%	
Dia 120	1,115	1,689	0,602	0,04040%	0,01667%	

DESV. EST	0,040447276	0,032070235	0,05238985





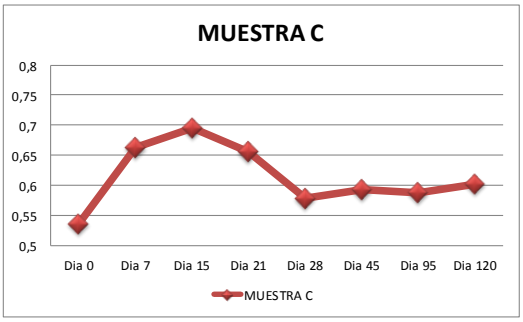


Ilustración 0-18: Ficha Expansión individual M-13. (Continuación)

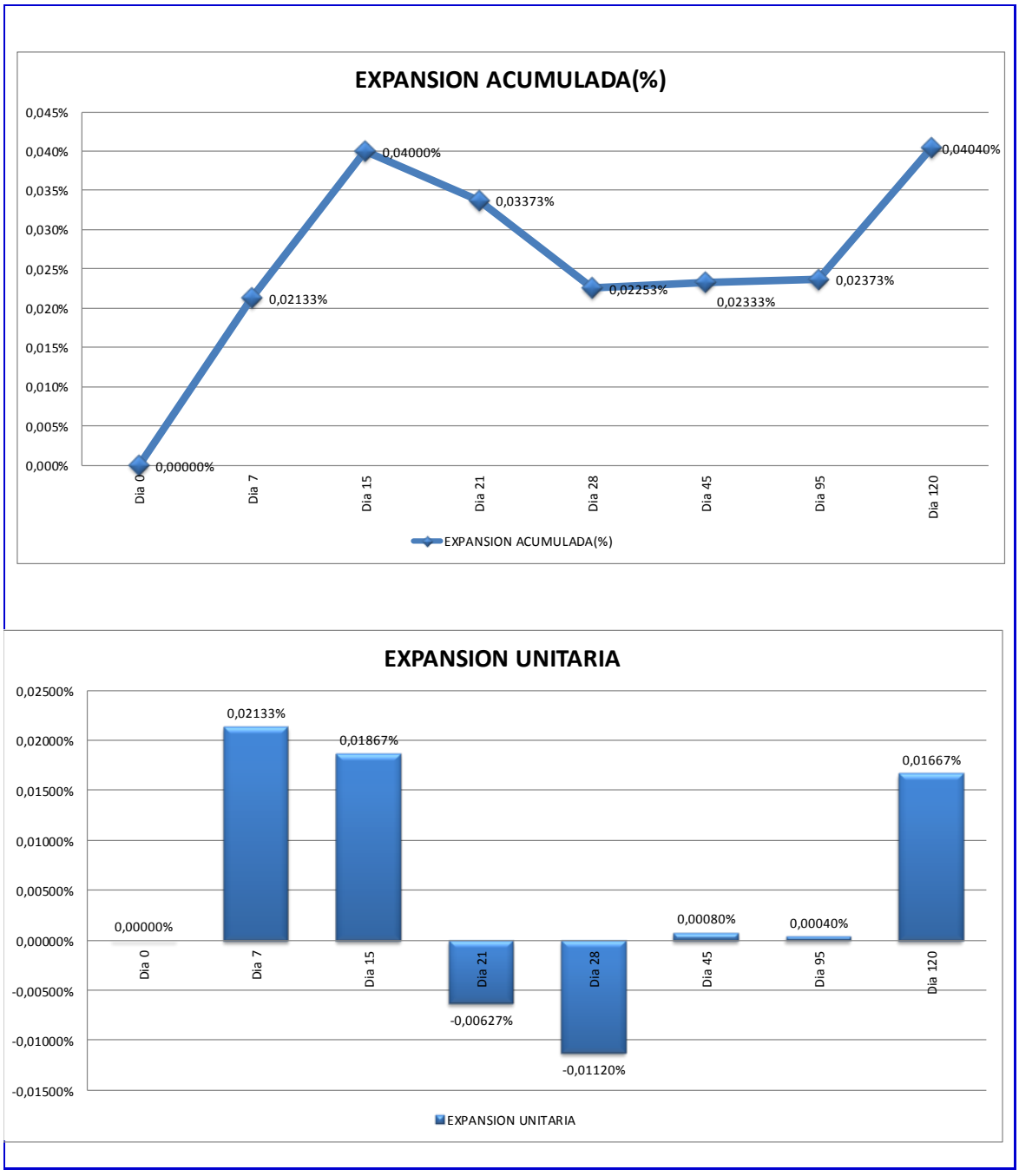


Ilustración 0-19: Ficha Expansión individual M-15.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

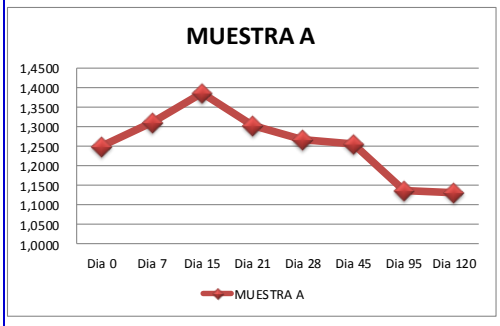
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M15

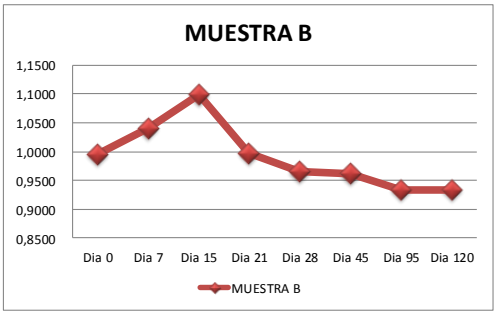
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	100%
A/C	0,48

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
15A	1,25
15B	0,995
15C	3,825

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	1,2500	0,9950	3,8250	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	1,3110	1,0400	3,9010	0,0243%	0,0243%	
Dia 15	1,3850	1,0980	3,9970	0,0547%	0,0304%	
Dia 21	1,3020	0,9980	3,9020	0,0176%	-0,0371%	
Dia 28	1,2650	0,9650	3,7520	-0,0117%	-0,0293%	
Dia 45	1,2540	0,9620	3,6980	-0,0208%	-0,0091%	
Dia 95	1,1350	0,9330	3,6700	-0,0443%	-0,0235%	
Dia 120	1,1300	0,9340	3,6800	-0,0435%	0,0008%	
DESV. EST	0,086510115	0,056117065	0,121871639			





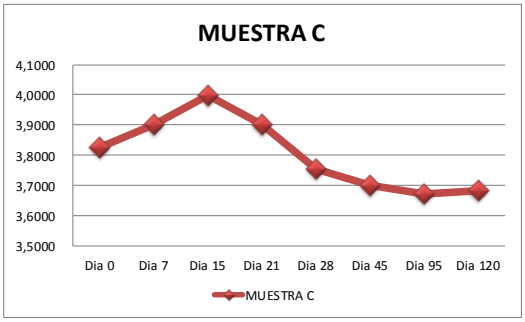


Ilustración 0-20: Ficha Expansión individual M-15. (Continuación)

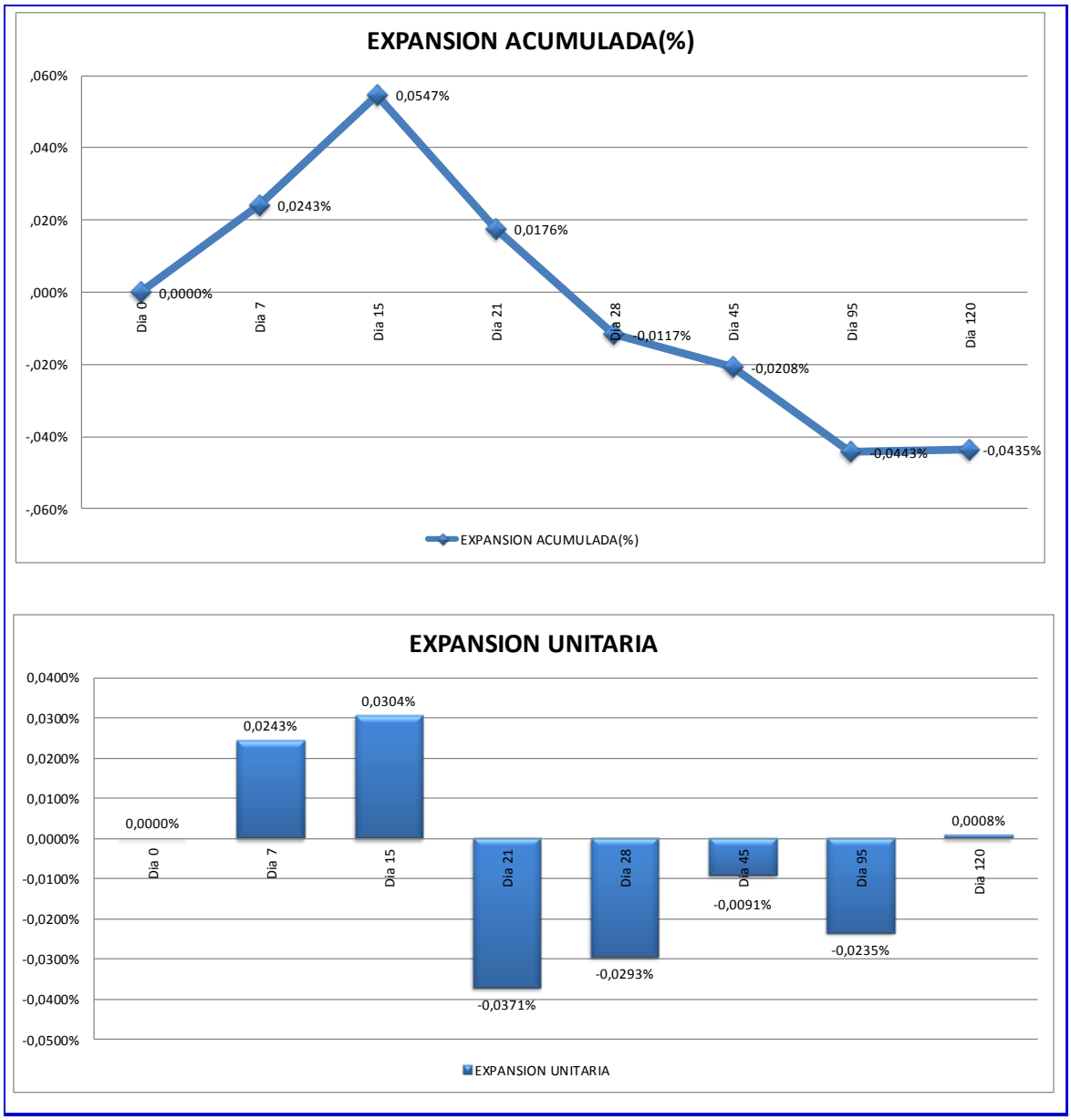


Ilustración 0-21: Ficha Expansión individual M-19.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

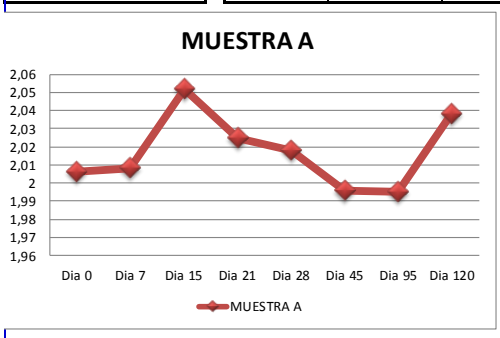
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M19

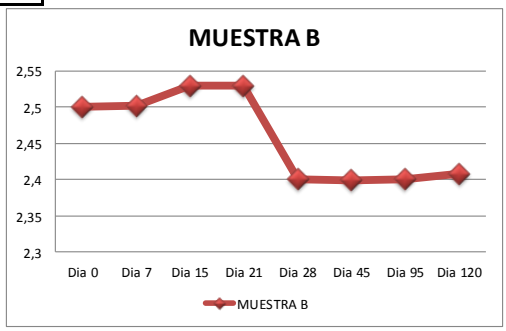
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	100%
A/C	0,53

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
19A	2,006
19B	2,5
19C	1,885

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	2,006	2,5	1,885	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	2,008	2,501	1,891	0,0012%	0,0012%	
Dia 15	2,052	2,53	1,992	0,0244%	0,0232%	
Dia 21	2,025	2,529	1,991	0,0205%	-0,0039%	
Dia 28	2,018	2,401	1,904	-0,0091%	-0,0296%	
Dia 45	1,996	2,399	1,9	-0,0128%	-0,0037%	
Dia 95	1,995	2,401	1,912	-0,0111%	0,0017%	
Dia 120	2,038	2,408	2,015	0,0093%	0,0204%	
DESV. EST	0,020204314	0,061311704	0,053349923			





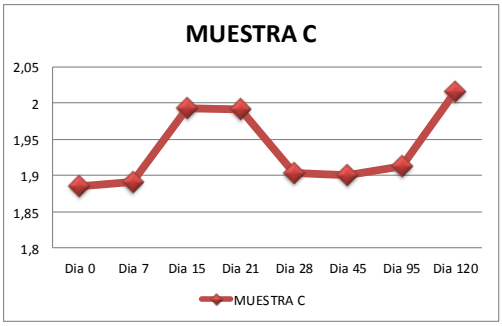


Ilustración 0-22: Ficha Expansión individual M-19. (Continuación)

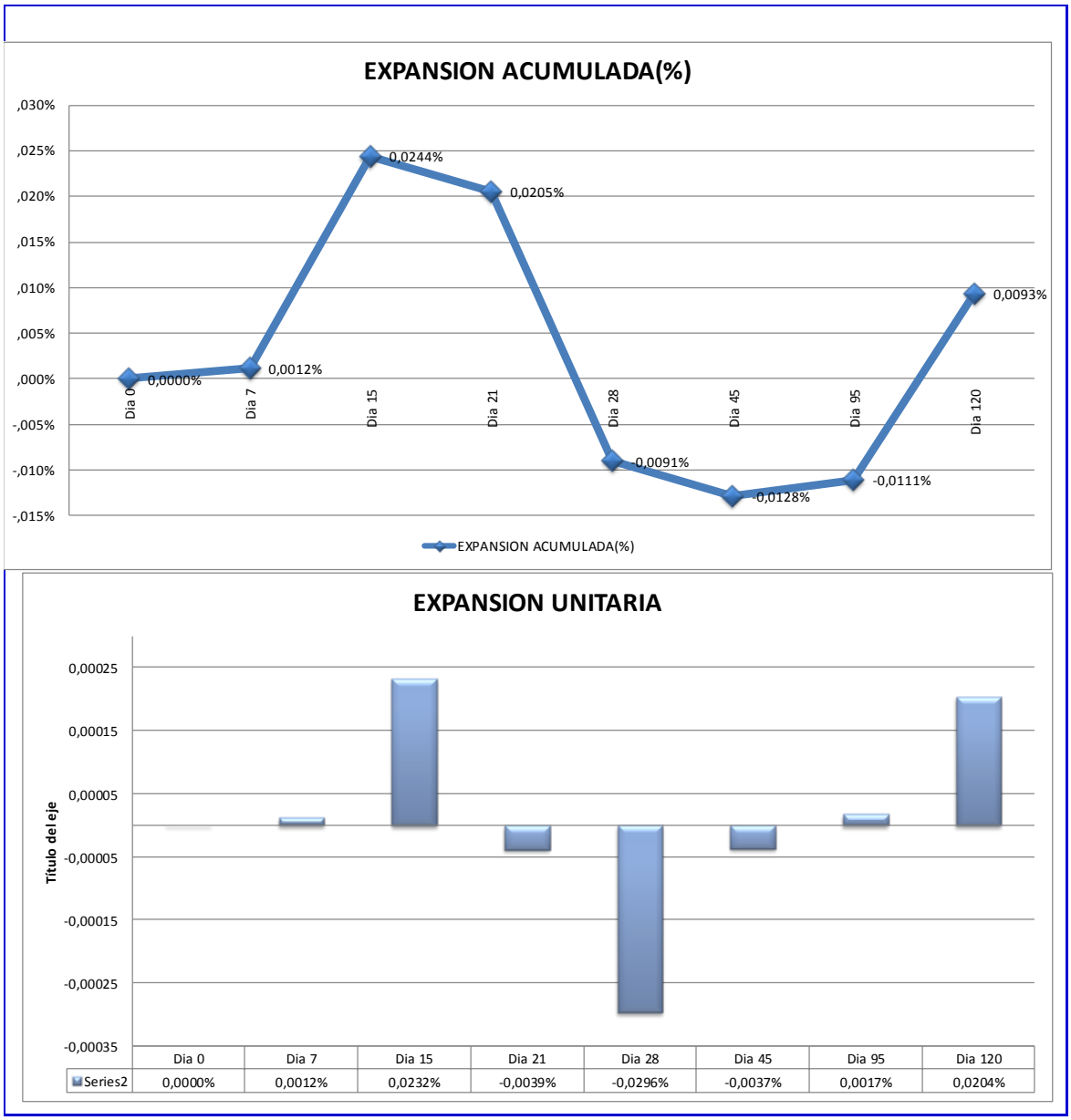


Ilustración 0-23: Ficha Expansión individual M-21.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

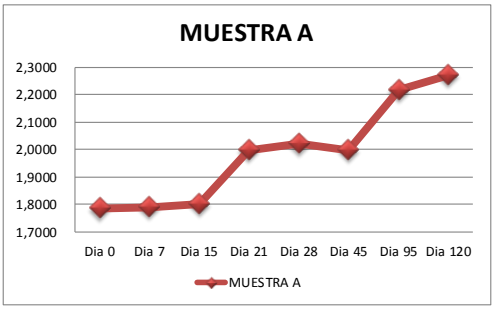
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M21

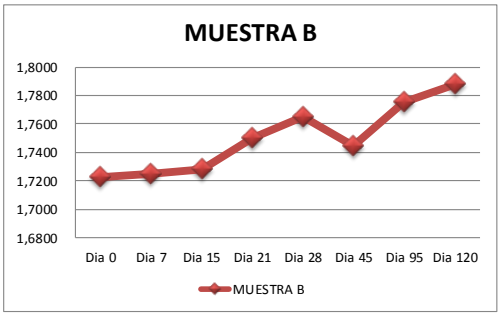
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	100%
A/C	0,53

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
21A	1,784
21B	1,723
21C	3,861

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	1,7840	1,7230	3,8610	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	1,7860	1,7250	3,8900	0,0044%	0,0044%	
Dia 15	1,8010	1,7280	3,8950	0,0075%	0,0031%	
Dia 21	1,9950	1,7500	3,9010	0,0371%	0,0296%	
Dia 28	2,0200	1,7650	3,9020	0,0425%	0,0055%	
Dia 45	1,9950	1,7450	3,9050	0,0369%	-0,0056%	
Dia 95	2,2150	1,7750	3,8790	0,0668%	0,0299%	
Dia 120	2,2700	1,7880	3,9000	0,0787%	0,0119%	
DESV. EST	0,188749078	0,024368818	0,01490865			





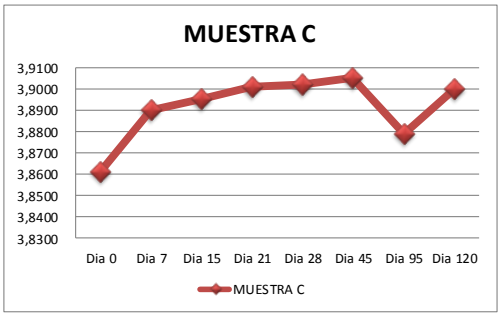


Ilustración 0-24: Ficha Expansión individual M-21. (Continuación)

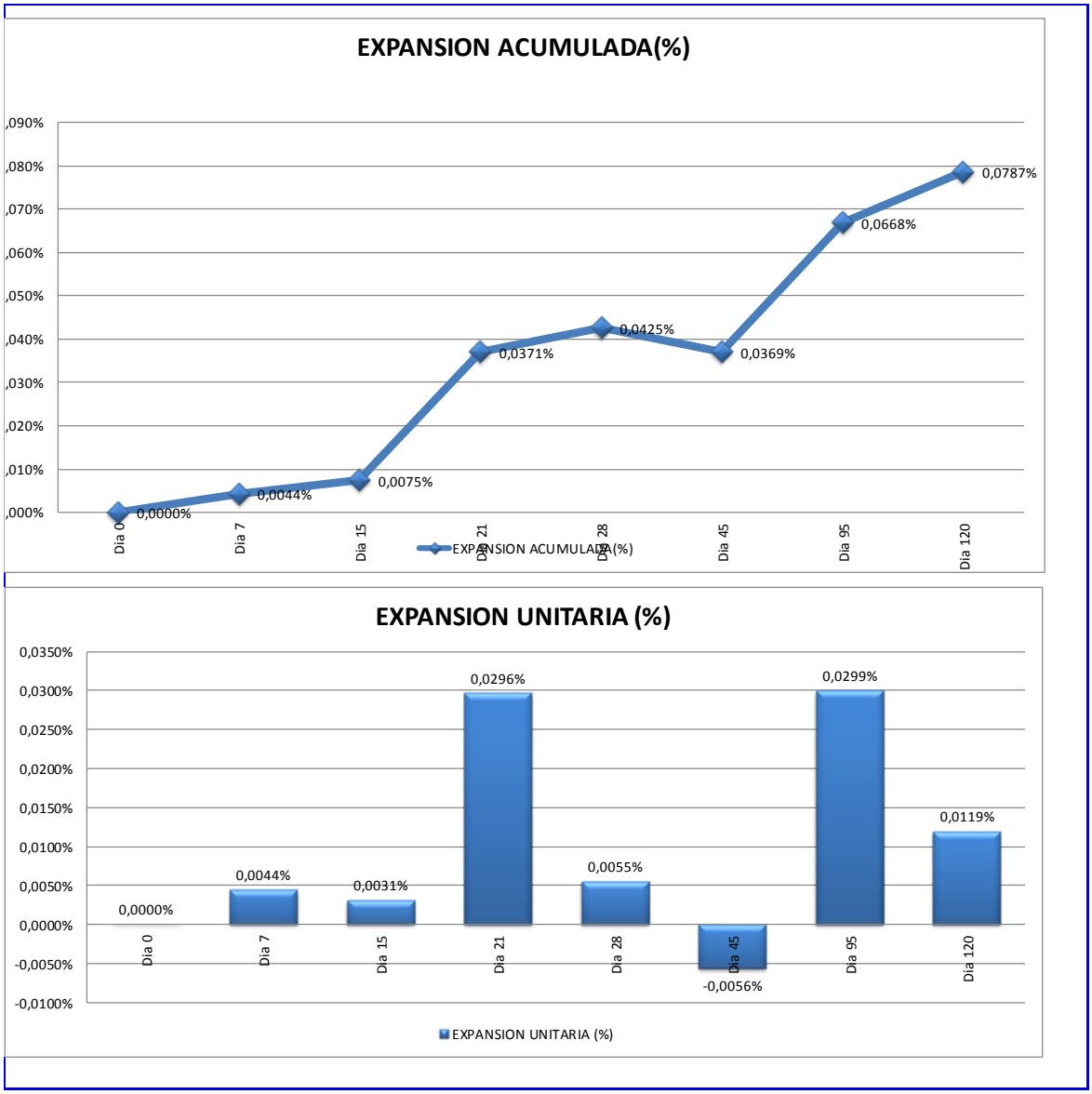


Ilustración 0-25: Ficha Expansión individual M-22.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MAESTRIA EN CONSTRUCCION
TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE
DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

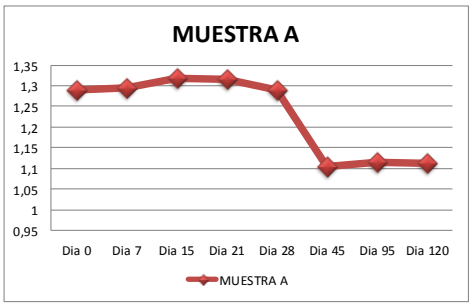
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M22

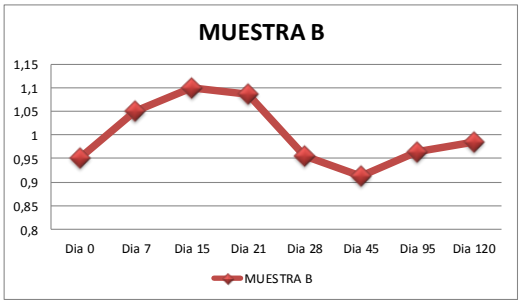
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	50%
A/C	0,58

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
22A	1,289
22B	0,95
22C	1,588

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	1,289	0,95	1,588	0,000%	0,000%	
Dia 7	1,295	1,05	1,601	0,016%	0,016%	
Dia 15	1,317	1,099	1,701	0,039%	0,023%	
Dia 21	1,315	1,085	1,687	0,035%	-0,004%	
Dia 28	1,29	0,955	1,602	0,003%	-0,032%	
Dia 45	1,105	0,913	1,506	-0,040%	-0,043%	
Dia 95	1,116	0,965	1,509	-0,032%	0,009%	
Dia 120	1,112	0,984	1,5	-0,031%	0,001%	
DESV. EST	0,099027323	0,068765518	0,078949803			





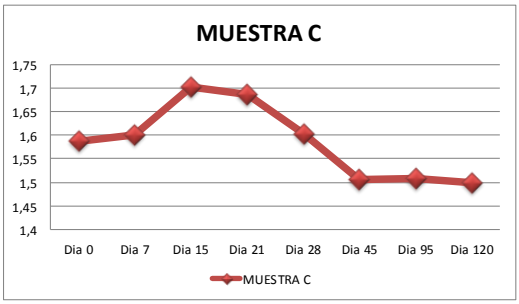


Ilustración 0-26: Ficha Expansión individual M-22 (Continuación)

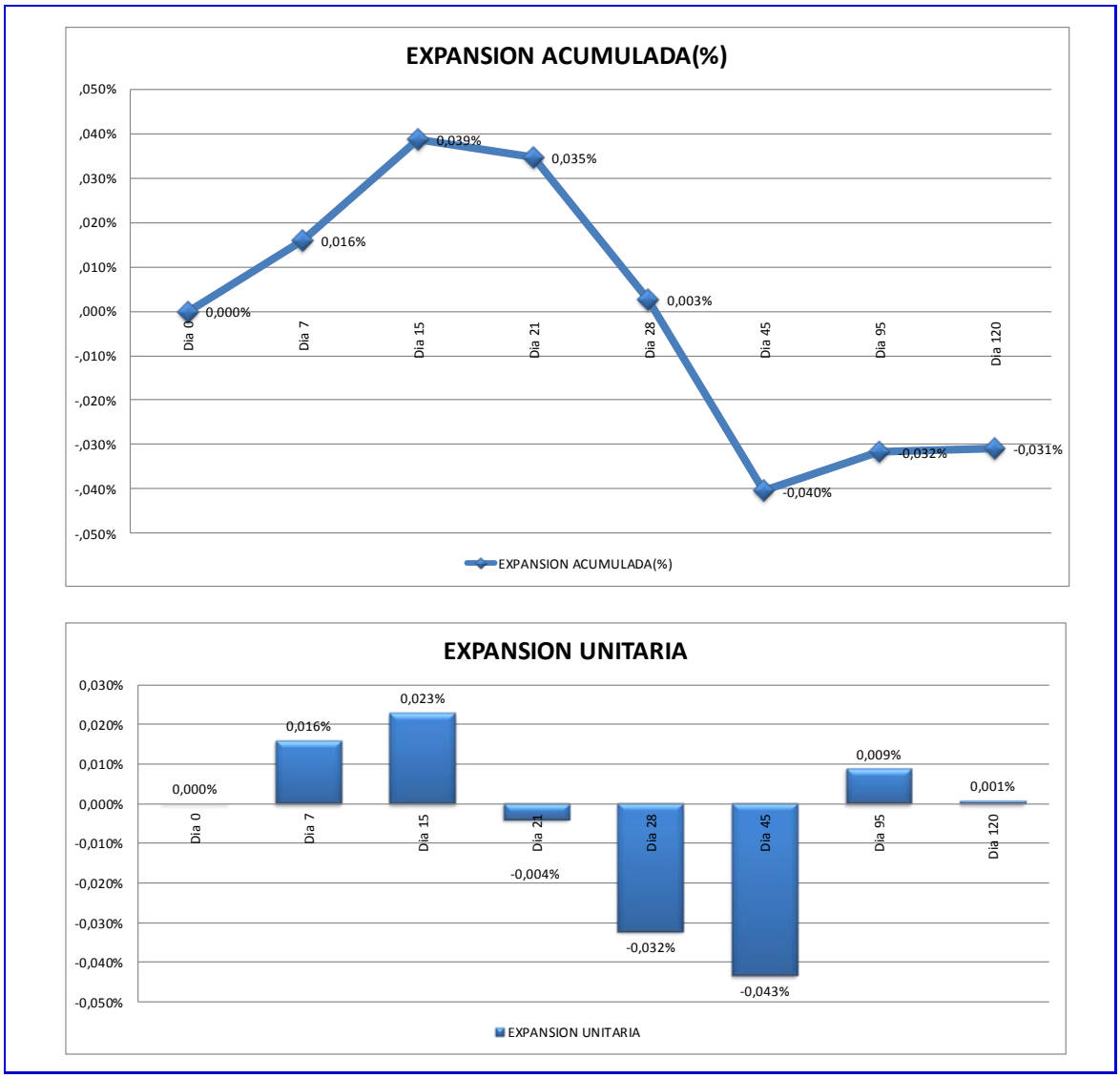


Ilustración 0-27: Ficha Expansión individual M-24.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MAESTRIA EN CONSTRUCCION

TITULO DE LA INVESTIGACION

ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS

ARQ. WILLIAM GARZON PIRE

DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

IDENTIFICACION DE MEZCLA	M24

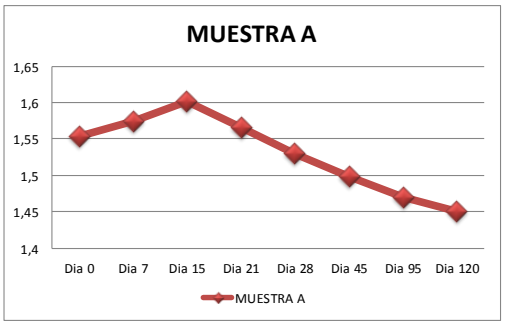
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

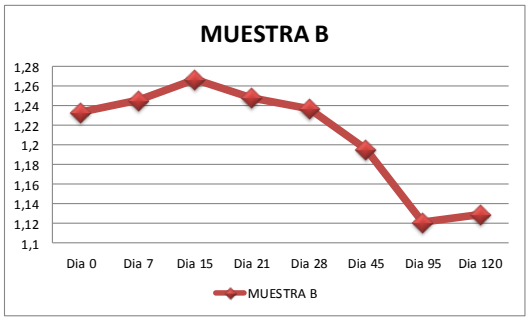
VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	50%
A/C	0,58

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
24A	1,554
24B	1,233
24C	2,556

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	1,554	1,233	2,556	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	1,574	1,245	2,595	0,0095%	0,0095%	
Dia 15	1,601	1,266	2,62	0,0192%	0,0097%	
Dia 21	1,565	1,248	2,535	0,0007%	-0,0185%	
Dia 28	1,53	1,236	2,498	-0,0105%	-0,0112%	
Dia 45	1,498	1,195	2,417	-0,0311%	-0,0205%	
Dia 95	1,47	1,121	2,398	-0,0472%	-0,0161%	
Dia 120	1,45	1,129	2,554	-0,0280%	0,0192%	

DESV. EST	0,05318633	0,055691593	0,079514487





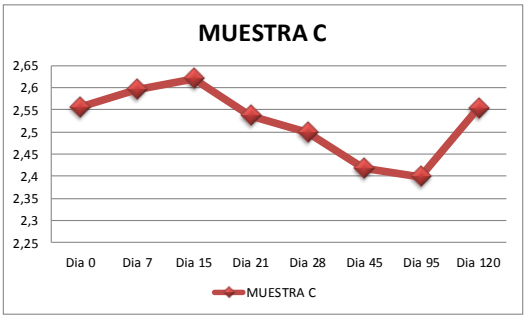


Ilustración 0-28: Ficha Expansión individual M-24 (Continuación)

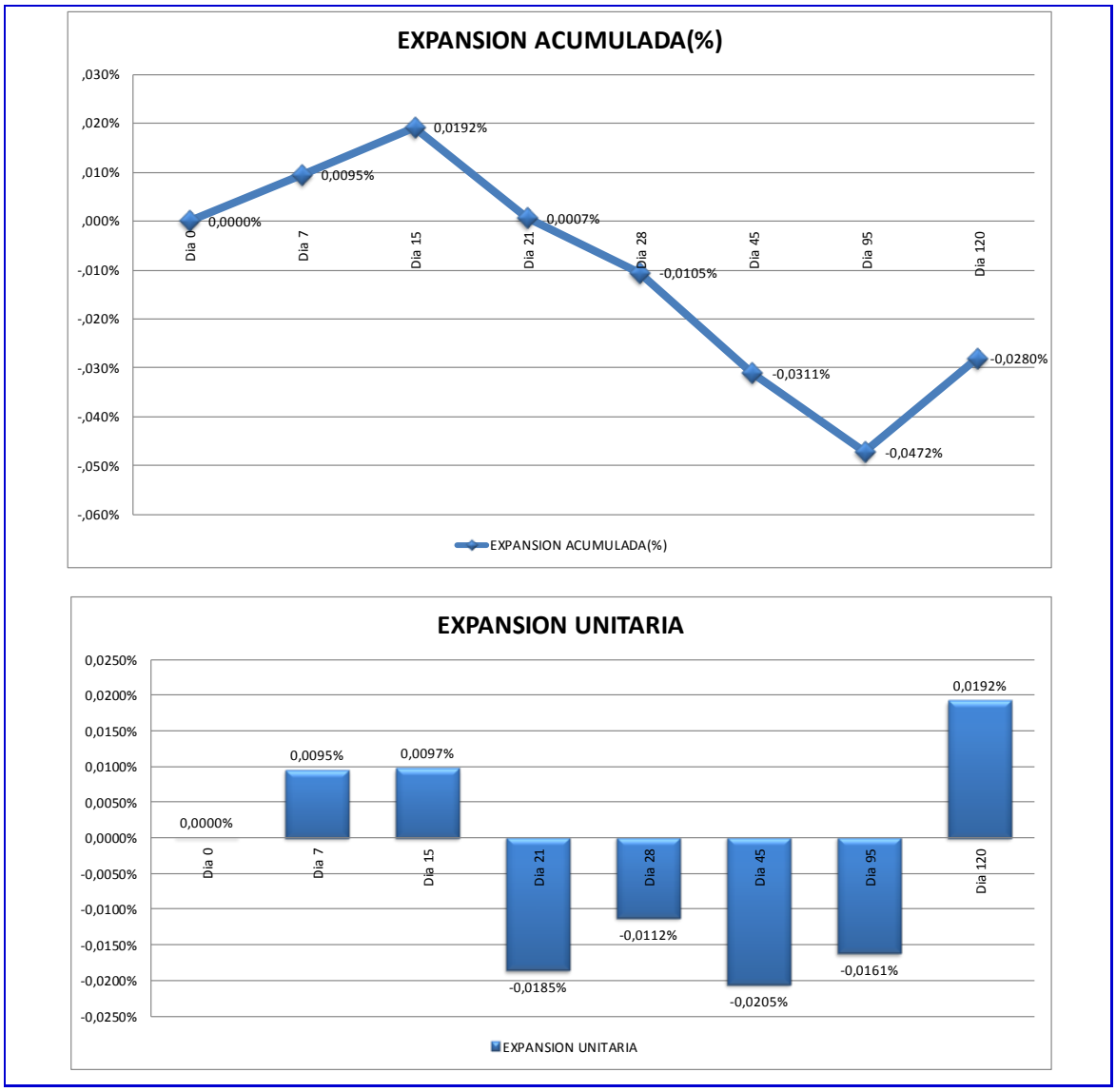


Ilustración 0-28: Ficha Expansión individual M-25.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MAESTRIA EN CONSTRUCCION
TITULO DE LA INVESTIGACION
ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS
ARQ. WILLIAM GARZON PIRE
DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

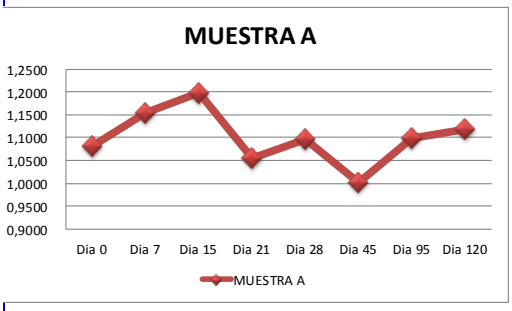
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M25

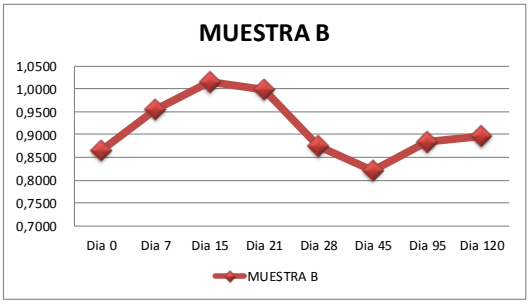
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	100%
CENIZA	0%
% REEMPLAZO AGR	100%
A/C	0,58

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
25A	1,081
25B	0,864
25C	0,009

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA (%)	OBSERVACIONES
Dia 0	1,0810	0,8640	0,0090	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	1,1540	0,9540	0,0150	0,0225%	0,0225%	
Dia 15	1,1980	1,0150	0,0250	0,0379%	0,0153%	
Dia 21	1,0540	0,9990	0,0280	0,0169%	-0,0209%	
Dia 28	1,0950	0,8750	0,0180	0,0045%	-0,0124%	
Dia 45	1,0020	0,8210	0,0070	-0,0165%	-0,0211%	
Dia 95	1,0980	0,8840	0,0057	0,0045%	0,0210%	
Dia 120	1,1170	0,8950	0,0131	0,0095%	0,0050%	
DESV. EST	0,059664389	0,068612655	0,008172505			





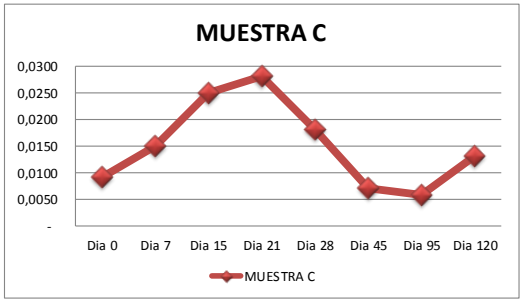


Ilustración 0-29: Ficha Expansión individual M-25 (Continuación)

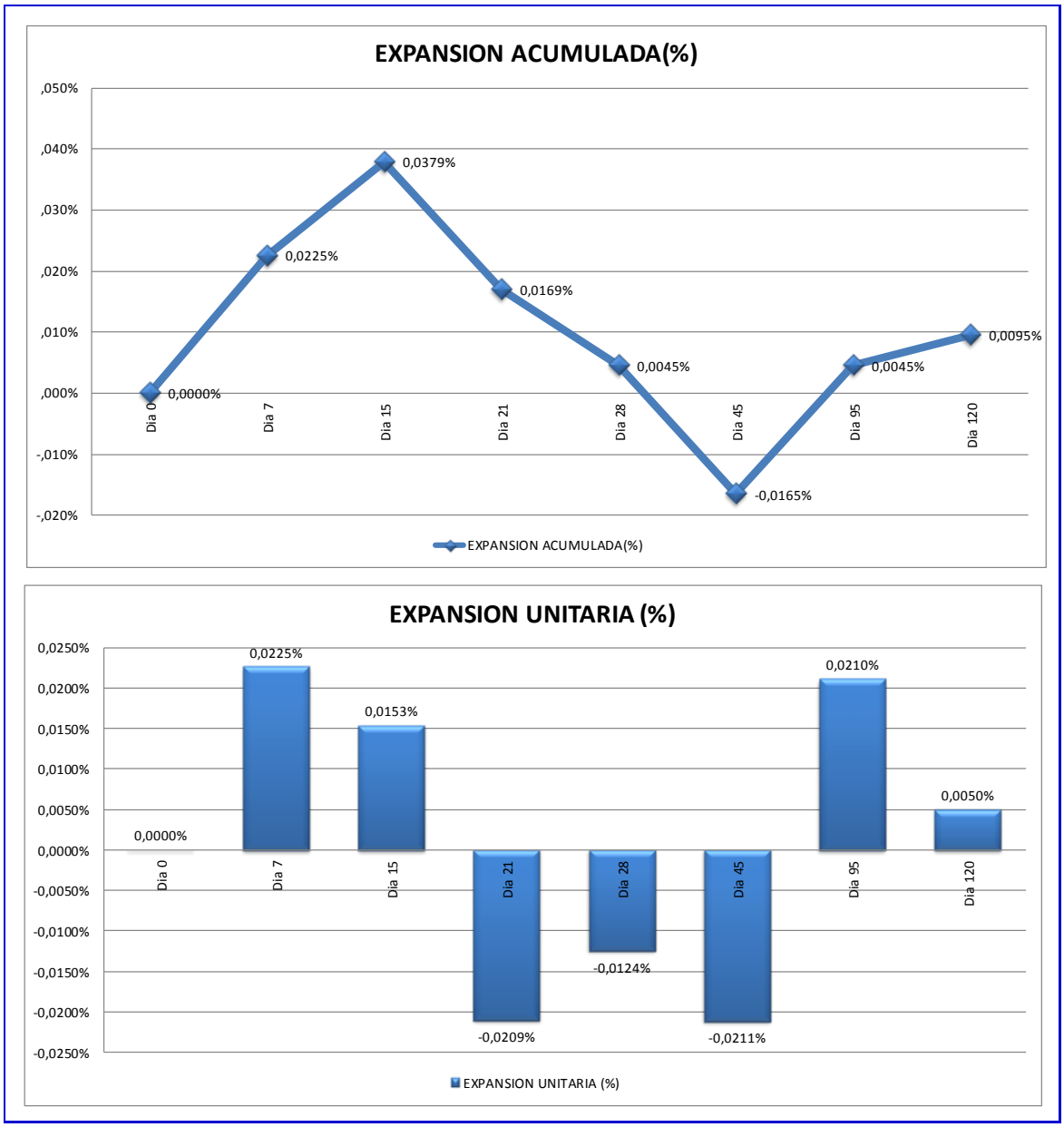


Ilustración 0-30: Ficha Expansión individual M-27.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MAESTRIA EN CONSTRUCCION
TITULO DE LA INVESTIGACION
ESTUDIO DE LA EXPANSION DE CONCRETOS CON AGREGADO RECICLADO ANTE EL ATAQUE DE SULFATOS
ARQ. WILLIAM GARZON PIRE
DIRECTORA: ARQ. MARTHA LUZ SALCEDO

FICHA DE INFORMACION

NORMAS DE REFERENCIA: **NTC 3330 - NTC 5640**

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CAMBIO LONGITUDINAL DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO EXPUESTOS A UNA SOLUCION DE SULFATOS

FORMULA:

$$\Delta L = \frac{(Lx - Li)}{Lg} \times 100$$

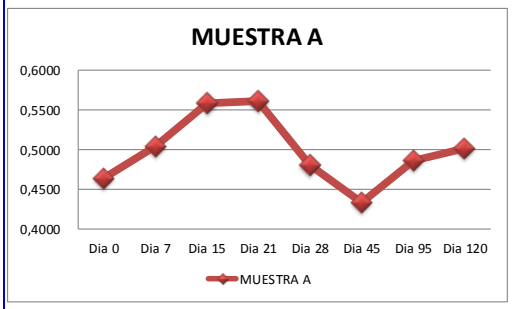
IDENTIFICACION DE MEZCLA	M27

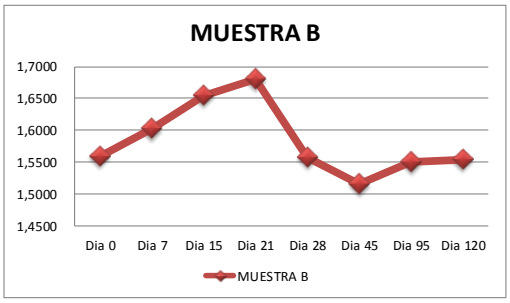
TIPOS DE ELEMENTOS:	VIGUETAS
DIMENSIONES:	0.07 X 0.7 X 0.285

VARIABLES DE MEZCLA	
CEMENTO	60%
CENIZA	40%
% REEMPLAZO AGR	100%
A/C	0,58

IDENTIFICACION DE MEZCLA	MEDICION INICIAL
27A	0,464
27B	1,558
27C	0,687

FECHA DE LECTURA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	EXPANSION ACUMULADA(%)	EXPANSION UNITARIA	OBSERVACIONES
Dia 0	0,4640	1,5580	0,6870	0,0000%	0,0000%	
Dia 7	0,5040	1,6020	0,6980	0,0127%	0,0127%	
Dia 15	0,5580	1,6540	0,7160	0,0292%	0,0165%	
Dia 21	0,5600	1,6800	0,7720	0,0404%	0,0112%	
Dia 28	0,4800	1,5570	0,6780	0,0008%	-0,0396%	
Dia 45	0,4330	1,5150	0,6140	-0,0196%	-0,0204%	
Dia 95	0,4860	1,5500	0,6220	-0,0068%	0,0128%	
Dia 120	0,5010	1,5530	0,6970	0,0056%	0,0124%	
DESV. EST	0,043650397	0,056973521	0,05057385			





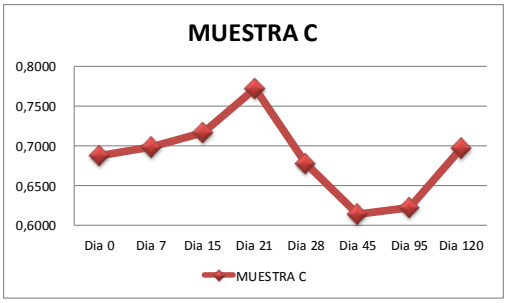
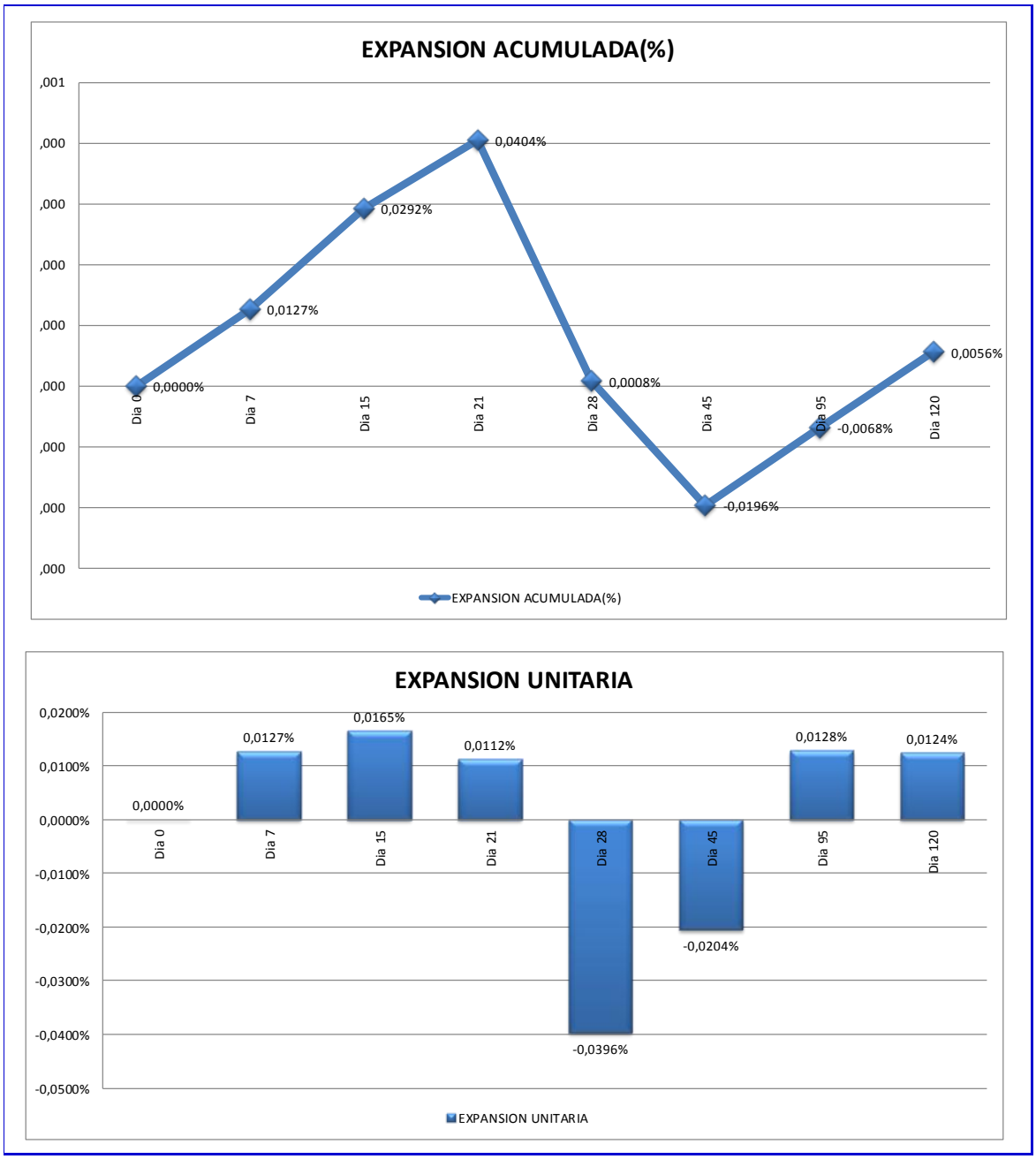


Ilustración 0-31: Ficha Expansión individual M-25 (Continuación)



BIBLIOGRAFIA

Decreto 2104 del 26 de Julio de 1983. (1983). *Decreto para la disposicion de residuos solidos*.

ACI 555R-01. (Marzo de 2001). *Removal or reuse of hardened concrete*.

NTC 3938. (26 de 04 de 2006). *Cementos. Aparatos para la determinacion de cambios de longitud en pasta de cemento*. Bogotá: ICONTEC.

NTC 5551. (21 de 12 de 2007). *Concreto. Durabilidad de estructuras de concreto*. Bogotá: ICONTEC.

NTC 5640. (26 de 11 de 2008). *Cambio Longitudinal del mortero y el concreto de cemento hidraulico endurecido.* Bogotá: ICONTEC.

ASTM 1012,. Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. (2010). ASTM (Desarrollado por el subcomite C01.29) Vol. 04.01.

ASTM C452, Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate. (2010). ASTM (Desarrollado por el subcomite C01.29) Vol. 04.01.

ACI 318S-05. (s.f.). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. y Comentario (ACI 318SR-05) (Versión en español y en sistema métrico).*

ACI Committee, 2. (2001). *ACI 201, 2R, Guide to durable concrete.* ACI.

Burak Felekoğlu, K. R. (Noviembre de 2006). Sulfate resistances of different types of Turkish Portland cements by selecting the appropriate test methods. *Construction and Building Materials*, 819-823.

Corinaldesi, V. (2009). Behavior of cementitious mortars containing diferent kinds of recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 289-294.

ESCOBAR ESPINAL, J. H., & PERERZ HINCAPIE, J. P. (2004). *Expansión cauada por el ataque de sulfato de magnesio al concreto.* Bogotá: Universidad Catolica de Colombia, Facultad de Ingenieria Civil.

FONSECA FONSECA, L. (2004). *Efecto de diferentes reemplazos de cemento por ceniza volante de termo paipa sobre resistencia a compresión.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

GOMEZ CORTES, J. G. (2002). *Materiales para ingeniería civil.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Gonzalez De La Cotera, M. (1991). Exposicion en el ciclo. *Capitulo Peruano sobre corrosion de estructuras en concreto.* Peru.

Grübi P, R. M. (November 11–12 1998). German committee for reinforced concrete (DAfStb) – Code: concrete with recycled aggregates. *Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate. Concrete Technology Unit* (p. 8). University of Dundee.

JEREZ BARBOSA, S. (2002). *Efectos del sulfato de magnesio sobre la durabilidad en concreto de alto desempeño.* Bogota: universidad Nacional de Colombia, Maestría en estructuras.

Koulouris A., L., Fried, A., & Roberts, J. (2004). Use of recycled aggregate in concrete aplication: Case studies. Sustainable waste management and recycling: Construction demolition waste. En K. University (Ed.), *International conference: Concrete and masonry research group*, (págs. 245-257).

LEON Rodríguez, Á. (2001). *Propiedades del concreto reciclado como agregado. Tesis de Maestría en Construcción.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

LORENZO GARCIA, M. (1993). *Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland.* Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

MOLINARI, J. (2011). Recuperado el 2011, de Sitio Web de la Asociación Mexicana de Concreteros Independientes, A.C.: http://www.amciac.org/index.php?permalink=mejorando-el-concreto-con-ceniza-volante_91.html

Padmini, A. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials No 23*, 829.

Poon C., C. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hon Kong., (págs. 293-305).

SANCHEZ DE JUAN, M. (2009). Study of the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and building materials*, 872-877.

SOTOR MURIEL, C. (1999). *Estudio del comportamiento mecánico de concretos con aditivos expansivos.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

SUAREZ, M. (2006). Estudio de hormigones elaborados con residuos de ladrilleras y de demolición. *Reciclados de construccion*.

TABSH, S. (2009). Influence of recycled concrete aggregate on strenght properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 1163-1167.

TAM Vivian, G. X. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials No 22*, 365.

TAM, V., Gao, X., & TAM, C. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and building materials*, 364-369.

TOSUN, K., FELEKOGLU, B., & BULENT, B. (Julio de 2009). Effects of limestone replacement ratio on the sulfate resistance of Portland limestone cement mortars exposed to extraordinary high sulfate concentrations. *Construction and Building Materials*, 2534-2544.

VALBUENA LEGUIZAMO, H. (2006). *Petrografía de concretos hidráulicos con adición de cenizas volantes de termopaipa.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

VALDERRAMA PUENTES, C. (2009). *Evaluación del desempeño durable de concretos adicionados con cenizas volantes.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Maestria en estructuras.