

**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO MECANICO A EDADES TARDIAS DEL
CONCRETO HIDRAULICO CON ADICION DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA**

**ALVARO CIFUENTES PACHON
CARLOS IVAN FERRER JARAMILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2006

**ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO MECANICO A EDADES TARDIAS DEL
CONCRETO HIDRAULICO CON ADICION DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA**

**ALVARO CIFUENTES PACHON
CARLOS IVÁN FERRER JARAMILLO**

**Trabajo de grado para optar titulo de:
INGENIERO CIVIL**

**Director
DALTON MORENO GIRARDOT
Ingeniero Civil M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2006

DEDICATORIA

A mis padres por el esfuerzo y apoyo a lo largo de toda mi vida

A mi hijo Nicolás Santiago por su amor y compañía.

A Angélica por su apoyo y amor

A mi hermano por su amistad y apoyo

A mi sobrina Juliana Fernanda por su sincero cariño

A toda mi familia por su buen ejemplo y compañía durante toda mi vida

A mi abuelita Zoila Rosa que es el ángel que cuida y guía mi vida

A mi abuelito Fortunato por su formación y ejemplo

Y a todas aquellas personas que de alguna manera me aportaron y ayudaron en algo
para el logro de mis metas

ALVARO CIFUENTES PACHON

DEDICATORIA

A mis padres Héctor Iván y Luz Marly por su amor, esfuerzo, apoyo y comprensión durante toda mi carrera, sin ello no hubiese podido alcanzar esta meta.

A mis hermanos Floralba y Juan Manuel por su amistad y apoyo a lo largo de mi vida.

A Laura Sofía por su amistad y apoyo todos estos años, por su compañía, inmenso amor y sobre todo por creer en mi y darme la confianza necesaria en la última y más difícil etapa de mi carrera.

CARLOS IVÁN FERRER JARAMILLO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Andrés Felipe Pérez, Ingeniero Civil y Director de Control de Calidad y Desarrollo de la Planta de Concreto Jorge Luis Vesga Moreno, por hacer posible este proyecto; su permanente orientación y valiosos aportes.

Dalton Moreno G., Ingeniero Civil y Director de la Investigación, por creer en la viabilidad de este proyecto y darnos vía libre para su realización.

Custodio Vásquez Q., Ingeniero Metalúrgico, por orientarnos en el enfoque del proyecto; colaboración y sobre todo por compartir con nosotros su invaluable conocimiento.

A los Técnicos Jairo Hernández (Laboratorio de Materiales, UIS), José Luis Rodríguez (Laboratorio de Materiales, Planta de Concreto JLVM), Félix Pico y Mario Torres (Laboratorio de Rocas y Fluidos, UIS) y Ambrosio Carrillo (Laboratorio de Corrosión, UIS) por su colaboración desinteresada a lo largo del proyecto y su valiosa asesoría en la realización de las pruebas.

A nuestros amigos, quienes nos ayudaron de una u otra manera en los momentos de dificultad haciendo posible la culminación de éste.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN.....	1
1 OBJETIVOS.....	3
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2 JUSTIFICACIÓN.....	6
3 FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO.....	9
3.1 INGREDIENTES DEL CONCRETO	11
3.2 CEMENTANTES	11
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO	13
3.3.1 <i>Trabajabilidad</i>	14
3.3.2 <i>Consolidación</i>	14
3.3.3 <i>Hidratación, Tiempo de Fraguado, Endurecimiento</i>	15
3.3.4 <i>Peso Unitario</i>	17
3.3.5 <i>Resistencia al Desgaste</i>	18
3.3.6 <i>Adquisición de Resistencia Mecánica</i>	19
4 PUZOLANAS.....	21
4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PUZOLANAS SEGÚN EL ORIGEN	22
4.1.1 <i>Puzolanas Naturales</i>	22
4.1.2 <i>Puzolanas Artificiales</i>	22

4.1.3	<i>Puzolanas mixtas o Intermedias</i>	23
4.2	UTILIZACIÓN DE LAS PUZOLANAS	24
4.3	CENIZAS VOLANTES	24
5	DURABILIDAD DEL CONCRETO	27
5.1	CONCEPTO DE DURABILIDAD	27
5.2	ATAQUE DE SULFATOS	29
5.3	CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO	30
5.3.1	<i>Mecanismos de la corrosión</i>	32
5.3.2	<i>Influencia de la carbonatación</i>	34
5.3.3	<i>Influencia de los cloruros</i>	36
5.4	CONGELACIÓN Y DESHIELO	37
5.5	LIXIVIACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO	39
5.6	REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO	40
6	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	42
6.1	CENIZA VOLANTE	42
6.1.1	<i>Clasificación.</i>	43
6.1.2	<i>Estudio de la ceniza volante de Paipa IV</i>	44
6.2	CEMENTO	47
6.2.1	<i>Marco conceptual.</i>	47
6.2.2	<i>Estudio del cemento Rioclaro</i>	48
6.3	ADITIVO	51
6.4	AGUA	52
6.5	AGREGADOS	53
6.5.1	<i>Estudio del agregado fino y del agregado grueso.</i>	54
6.6	DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	62
7	PRUEBAS DE LABORATORIO	66
7.1	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	67
7.2	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA	69
7.3	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION	71

7.4 ENSAYO DE POROSIDAD	73
7.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD	76
7.6 ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR.....	78
7.7 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y PERMEABILIDAD AL ANIÓN CLORURO	81
7.8 ENSAYO DE SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS.....	86
7.9 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE Y LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN	88
8 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	93
8.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	93
8.2 ENSAYO DE Tensión INDIRECTA (COMPRESIÓN DIAMETRAL)	101
8.3 ENSAYO DE Tensión POR FLEXIÓN	107
8.4 ENSAYO DE POROSIDAD	110
8.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD	113
8.6 ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR.....	116
8.7 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y PERMEABILIDAD AL ANIÓN CLORURO	125
8.8 ENSAYO DE SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS.....	132
9 CONCLUSIONES.....	136
10 RECOMENDACIONES.....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	141

LISTA DE FIGURAS

Pág.

FIGURA 1. TIEMPO DE VIDA ÚTIL DE UNA ESTRUCTURA	31
FIGURA 2. CELDA DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.....	32
FIGURA 3. CELDA DE CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO	33

LISTA DE FOTOS

	Pág.
FOTO 1. CENIZAS VOLANTES DE PAIPA IV	43
FOTO 2. CEMENTO RIOCLARO TIPO III	49
FOTO 3. AGREGADO FINO Y AGREGADO GRUESO DEL RÍO CHICAMOCHA.....	53
FOTO 4. ASENTAMIENTO DE LA MEZCLA DE CONCRETO MODIFICADO	65
FOTO 5. MÁQUINA DE CARGA ENSAYO A COMPRESIÓN.....	67
FOTO 6. MONTAJE DE ENSAYO A COMPRESIÓN.....	68
FOTO 7. MÁQUINA DE CARGA ENSAYO A Tensión INDIRECTA.....	69
FOTO 8. MONTAJE DE ENSAYO A TRACCIÓN.....	70
FOTO 9. MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS TREBEL	71
FOTO 10. MONTAJE DE ENSAYO A FLEXIÓN	72
FOTO 11. POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA	73
FOTO 12. PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA	76
FOTO 14. MONTAJE ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR.....	80

FOTO 15. MONTAJE PRUEBA RÁPIDA DE PERMEACIÓN A CLORUROS	82
FOTO 16. SOLUCIONES UTILIZADAS PRUEBA DE DIFUSIÓN DE CLORUROS Y MONTAJE TITULACIÓN.....	85
FOTO 17. PROBETA ENSAYO DE SOLIDEZ A SULFATOS PARA INMERSIÓN	87
FOTO 18. PROBETAS PARA ENSAYO A COMPRESIÓN.....	93
FOTO 19. PROBETAS FALLADAS A COMPRESIÓN.....	94
FOTO 20. PROBETAS FALLADAS A TENSIÓN POR COMPRESIÓN DIAMETRAL	101
FOTO 21. PROBETA FALLADA A FLEXIÓN	107
FOTO 22. PROBETAS PARA ENSAYO DE POROSIDAD	110
FOTO 23. PROBETAS PARA ENSAYO DE PERMEABILIDAD.....	113
FOTO 24. MATRICES DE CONCRETO NORMAL Y CONCRETO MODIFICADO	116
FOTO 25. PROBETAS PARA ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL ANIÓN CLORURO ...	126
FOTO 26. DESGASTE POR SULFATOS A LOS 7 CICLOS DE CADA UNA DE LAS MEZCLAS INVESTIGADAS.	132
FOTO 27. DESGASTE POR SULFATOS (ACERCAMIENTO).	133

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
GRÁFICO 1. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO FINO	60
GRÁFICO 2. CURVA GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO	61
GRÁFICO 3. RECETA PARA 1 M ³ DE CONCRETO RECOMENDADA POR LA PLANTA DE CONCRETOS.....	64
GRÁFICO 4. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA LA MUESTRA DE CONCRETO NORMAL.....	96
GRÁFICO 5. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA LA MUESTRA DE CONCRETO MODIFICADO	96
GRÁFICO 6. COMPORTAMIENTO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA LAS MUESTRAS INVESTIGADAS	98
GRÁFICO 7. INCREMENTO PORCENTUAL DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA LA MUESTRA CN	99
GRÁFICO 8. INCREMENTO PORCENTUAL DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA LA MUESTRA CM.....	99
GRÁFICO 9. GANANCIA PORCENTUAL DE LA MUESTRA CM FRENTE A LA MUESTRA CN	100
GRÁFICO 10. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA PARA LA MUESTRA CN	102

GRÁFICO 11. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN INDIRECTA PARA LA MUESTRA CM.....	103
GRÁFICO 12. COMPORTAMIENTO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN PARA LAS MUESTRAS INVESTIGADAS.....	104
GRÁFICO 13. GANANCIA PORCENTUAL DE LA MUESTRA CM FRENTE A LA MUESTRA CN.....	105
GRÁFICO 14. INCREMENTO PORCENTUAL DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN PARA LA MUESTRA CN.....	106
GRÁFICO 15. INCREMENTO PORCENTUAL DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN PARA LA MUESTRA CM.....	106
GRÁFICO 16. COMPORTAMIENTO COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN PARA LAS MUESTRAS INVESTIGADAS.....	108
GRÁFICO 17. AUMENTO PORCENTUAL DE LA MUESTRA CM FRENTE A LA MUESTRA CN.....	109
GRÁFICO 18. VALORES DE POROSIDAD EFECTIVA (ÚTIL) PARA LA MUESTRA CN.....	111
GRÁFICO 19. VALORES DE POROSIDAD EFECTIVA (ÚTIL) PARA LA MUESTRA CM.....	112
GRÁFICO 20. COMPORTAMIENTO COMPARATIVO DE LA POROSIDAD EFECTIVA PARA LAS MUESTRAS INVESTIGADAS.....	112
GRÁFICO 21. COMPORTAMIENTO COMPARATIVO DE LA PERMEABILIDAD PARA LAS MUESTRAS INVESTIGADAS.....	114
GRÁFICO 22. DISMINUCIÓN PORCENTUAL DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA	115
GRÁFICO 23. COMPORTAMIENTO DE LA ABSORCIÓN CAPILAR PARA LA MUESTRA CN.....	117

GRÁFICO 24. COMPORTAMIENTO DE LA ABSORCIÓN CAPILAR PARA LA MUESTRA CM.....	117
GRÁFICO 25. FASES DE LA ABSORCIÓN CAPILAR (CN).....	118
GRÁFICO 26. FASES DE LA ABSORCIÓN CAPILAR (CM).....	119
GRÁFICO 27. VALORES DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL AGUA (M) PARA CADA TIPO DE CONCRETO	120
GRÁFICO 28. VALORES DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN CAPILAR (K) PARA CADA TIPO DE CONCRETO	121
GRÁFICO 29. VALORES DE POROSIDAD (E) PARA CADA TIPO DE CONCRETO	122
GRÁFICO 30. VALORES DE ABSORTIVIDAD (S) PARA CADA TIPO DE CONCRETO	123
GRÁFICO 31. DISTRIBUCIÓN DE LOS TAMAÑOS DE PORO EN DOS MUESTRAS DE CONCRETO	124
GRÁFICO 32. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS-TIEMPO PARA LA MUESTRA CN	127
GRÁFICO 33. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS-TIEMPO PARA LA MUESTRA CM.....	127
GRÁFICO 34. VALORES DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN (DEFF) PARA CADA TIPO DE CONCRETO	130
GRÁFICO 35. VALORES DE DESGASTE COMO PERDIDA DE PESO EN % PARA CADA TIPO DE CONCRETO.	134

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO PÓRTLAND.	13
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE ALGUNAS ADICIONES	23
TABLA 3. COMPOSICIÓN TÍPICA DE LA CENIZA VOLANTE	25
TABLA 4. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LAS CENIZAS VOLANTES.....	44
TABLA 5. PESO ESPECÍFICO DE LAS CENIZAS VOLANTES.....	45
TABLA 6. FINURA DE LAS CENIZAS VOLANTES POR BLAINE Y TAMIZ 45 MICRAS	46
TABLA 7. RESULTADOS PROMEDIO DE F'C E IAR DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA.....	46
TABLA 8. VALORES TÍPICOS DE LOS COMPUESTOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO	48
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPUESTOS DEL CEMENTO	48
TABLA 10. PESO ESPECÍFICO DEL CEMENTO RIOCLARO TIPO III	50
TABLA 11. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO RIOCLARO TIPO III	50
TABLA 12. COMPOSICIÓN POTENCIAL DEL CEMENTO RIOCLARO TIPO III.....	51
TABLA 13. RESULTADOS ENSAYO DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS, PESO UNITARIO, ABSORCIÓN Y VACÍOS PARA EL AGREGADO FINO	56

TABLA 14. RESULTADOS ENSAYO DE GRAVEDADES ESPECÍFICAS, PESO UNITARIO, ABSORCIÓN Y VACÍOS PARA EL AGREGADO GRUESO	57
TABLA 15. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO	59
TABLA 16. REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO FINO PARA CONCRETO SEGÚN NTC 174	59
TABLA 17. GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO	60
TABLA 18. REQUISITOS DE GRANULOMETRÍA DE AGREGADO GRUESO PARA CONCRETO SEGÚN NTC 174, PARA TAMAÑO NOMINAL $\frac{3}{4}$ "	61
TABLA 19. DATOS DE LOS MATERIALES UTILIZADOS	63
TABLA 20. PROPORCIONES DE LOS MATERIALES DE LA MEZCLA EN PESO Y VOLUMEN PARA 1 M3 DE CONCRETO	64
TABLA 21. ENSAYOS REALIZADOS DURANTE LA INVESTIGACIÓN	66
TABLA 22. ECUACIÓN DE AJUSTE PARA LA MUESTRA CN	97
TABLA 23. ECUACIÓN DE AJUSTE PARA LA MUESTRA CM	97
TABLA 24. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DESPUÉS DE LOS 7 CICLOS.	135

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A	145
ANEXO B	154
ANEXO C	163
ANEXO D	166
ANEXO E	168
ANEXO F	170
ANEXO G	173
ANEXO H	176

TÍTULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A EDADES TARDÍAS DEL CONCRETO HIDRÁULICO CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA.*

AUTORES: CIFUENTES PACHÓN, Álvaro
FERRER JARAMILLO, Carlos Iván **

PALABRAS CLAVES: Concreto, Puzolana, Ceniza Volante, Durabilidad, Corrosión.

RESUMEN:

La industria del concreto es particularmente susceptible a las materias primas, pues de ellas depende el tipo y características del concreto. Hoy en día, en los países industrializados, la mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones que constituyen una porción del material cementante. Estos materiales son generalmente de origen natural o materiales de desecho subproductos de otros procesos, los cuales se presentan no sólo como una alternativa para la modificación de las propiedades del concreto sino también para contrarrestar el grave problema de contaminación causado por la acumulación de estos últimos en el terreno.

Un buen concreto es un material relativamente durable, es decir que mantiene su calidad y condiciones de servicio cuando es expuesto a su medio ambiente.

El procedimiento experimental consistió en la realización de pruebas físico-mecánicas y físico-químicas para determinar algunas características que permitieran deducir las propiedades de durabilidad de los materiales investigados.

El estudio reveló que la adición de cenizas volantes mejora las propiedades mecánicas del concreto (compresión, tensión, flexión) aumentando el porcentaje de ganancia de resistencia, a edades superiores a los 28 días. Igualmente se comprobó que la adición confiere al concreto propiedades tales de permeabilidad, porosidad y absorción capilar que aunadas a las características físico-químicas de la ceniza volante le dan al concreto modificado mayor durabilidad. Con los resultados obtenidos se concluyó que el material modificado cumple a cabalidad con los requerimientos de los materiales para fines estructurales y que este además puede ser utilizado en ambientes difíciles como zonas marinas e industriales con la seguridad de que su desempeño ante los agentes ambientales agresivos será mejor que el de un concreto normal.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.

Director: Ingeniero Civil Dalton Moreno G.

TITLE: ANALYSIS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR IN DELAYED AGES OF HYDRAULIC CONCRETE WITH FLY ASHES ADDITION FROM TERMOPAIPA. *

AUTHORS: CIFUENTES PACHÓN, Álvaro
FERRER JARAMILLO, Carlos Iván **

KEY WORDS: Concrete, Pozzolans, Fly Ash, Durability, Corrosion.

ABSTRACT

The industry of concrete is particularly susceptible to raw materials, because the type and characteristics of concrete itself depends on them. Nowadays, in industrialized countries, most of the mixtures of concrete contain additions that constitute a portion of the cementitious material. These generally are natural origin materials or remainder materials, by-products of other processes, which not only appear as an alternative for the modification of the properties of concrete but also to oppose the serious problem of contamination caused by the accumulation of these last ones in the land. generally

A Good concrete is a relatively durable material, this means that it maintains its quality and conditions of service when it is exposed to its environment.

The experimental procedure consisted on the development of physic-mechanical and physic-chemical tests in order to determine some characteristics that would allow the deduction of the properties of durability of the investigated materials.

The study revealed that the fly ashes addition improves the mechanical properties of the concrete (compression, tension, flexion) increasing the percentage of resistance gain, to ages above 28 days. It was also verified that the addition confers to concrete such properties of permeability, porosity and capillary absorption that, united to the physic-chemical characteristics of the fly ash, provide a greater durability to the modified concrete. With the obtained results the conclusion was that the modified material fulfills perfectly the requirements imposed to materials that are used for structural aims and that this in addition can be used in difficult atmospheres like marine and industrial zones with the certainty that its development in front of aggressive environmental agents will be better than the one of normal concrete.

* Undergraduate Thesis

** Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Civil Engineering.
Director: Civil Eng. M. Sc. Dalton Moreno G.

INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles se utilizan en plantas eléctricas modernas a través del mundo para producir energía eléctrica. El residuo inorgánico que resulta después de quemar el carbón pulverizado, se conoce como derivado de combustión. Estos derivados se acumulan rápidamente y pueden causar problemas ambientales enormes, a menos que se encuentre alguna manera de utilizarlos por medio de programas de recuperación.

Los materiales cementantes suplementarios como las cenizas volantes, le permiten a la industria del concreto utilizar centenares de millones de toneladas de subproductos que de otra forma serían vertidos en el terreno como desechos. Por otro lado su utilización reduce el consumo de cemento Pórtland por unidad de volumen de concreto y confieren a la mezcla propiedades mecánicas y de durabilidad. Las mezclas de concreto con elevados contenidos de cemento Pórtland son susceptibles a una mayor producción de calor generado durante la hidratación y a la fisuración por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse. Estos efectos pueden ser reducidos en alguna medida mediante la utilización de aditivos minerales finamente divididos los cuales pueden ser molidos conjuntamente con el clinker en la producción de cemento o agregados en la mezcla de concreto como reemplazo de una porción del cemento Pórtland.

La aplicación de cenizas volantes en la producción de concreto es escasa en nuestro medio, en cuanto la única metodología que se ha venido desarrollando, es a través de métodos de observación. La falta de caracterización de sus propiedades ha inquietado, no solo a la Planta de Concretos Jorge Luis Vesga Moreno, única concretera en nuestra región que utiliza éste tipo de adiciones, sino también a los autores del presente trabajo por la búsqueda en detalle de las características conferidas al concreto por las cenizas volantes, que favorezca el uso de esta técnica.

Este trabajo presenta un estudio acerca de la variación de las propiedades más importantes del concreto al utilizar ceniza volante como reemplazo de un porcentaje del

cemento; reportando los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia y durabilidad para el concreto modificado.

Con este estudio se busca aportar datos importantes a la empresa para mayor conocimiento de este recurso, el cual se ha implementado con el objetivo de impulsar el estudio sobre la utilización de nuevos materiales y como estrategia de competitividad.

1 OBJETIVOS

Una vez culminada la revisión de la literatura técnica existente acerca del tema del concreto de cemento Portland con adiciones puzolánicas y su ingerencia en las propiedades mecánicas y de durabilidad de este, se encontró un amplio rango en los resultados reportados; así como una gran variedad en los métodos de ensayo utilizado, razón por la cual se dificulta analizar y por ende deducir el comportamiento esperado de estos concretos modificados.

La hipótesis fundamental de esta investigación esta basada en que la incorporación de cenizas volantes (de calidad y en optimas proporciones) al cemento, le confieren a este un mayor incremento en la resistencia mecánica a edades superiores a los 28 días; de igual forma mejora su protección ante los agentes ambientales agresivos al disminuir su permeabilidad, contribuyendo así a la durabilidad de la armadura. Estos efectos dependen de factores químicos, morfológicos y de actividad propias de la adición.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico de producción con adición de cenizas volantes de Termopaipa, de la Planta de Concretos Jorge Luis Vesga Moreno; así mismo evaluar la influencia de la adición en la durabilidad del concreto estudiado.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la variación en el tiempo de la resistencia mecánica, entre el concreto sin adición y con adición de cenizas de Termopaipa.

- Desarrollar ensayos de resistencia a la compresión, tensión indirecta y flexión, al concreto sin adición y con adición de cenizas volantes de Termopaipa.
- Obtener la curva de crecimiento de resistencia del comportamiento del concreto producido en planta a las siguientes edades 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 75, 90, 120 y 150 días.
- Desarrollar una fórmula de correlación que exprese el comportamiento mecánico del concreto producido en la planta Jorge Luis Vesga Moreno.
- Determinar por medio de ensayos físico-mecánicos algunas propiedades del material como son Absorción Capilar, Porosidad y Permeabilidad.
- Determinar las propiedades de un concreto normal y compararlas con las obtenidas para el concreto con adición de cenizas volantes.
- Evaluar la permeabilidad al Ión cloruro del concreto con adición.
- Evaluar la resistencia del material a la solidez bajo la acción de sulfatos.
- Determinar la profundidad de carbonatación del concreto con adición de cenizas volantes.

Observación: La determinación de la profundidad y el coeficiente de carbonatación (ensayo acelerado de carbonatación) no pudo realizarse debido a la no disponibilidad de la cámara de carbonatación del Instituto de la Corrosión, única en la ciudad, pues se hallaba ocupada por tiempo indefinido en las investigaciones adelantadas por éste.

En vista de esto optamos por realizar la prueba rápida de permeación a cloruros, la cual no estaba contemplada originalmente, para de este modo evaluar la protección brindada por los concretos investigados al acero de refuerzo. La carbonatación y la acción de los cloruros son las dos causas principales de la corrosión de la armadura.

Para dar cumplimiento a estos objetivos, la metodología seguida en esta investigación ha comprendido las siguientes etapas:

- Selección de los materiales y diseño experimental.
- Caracterización de los materiales seleccionados.
- Dosificación y preparación de mezclas.
- Realización de ensayos Físicos, Químicos, Mecánicos y Electroquímicos.
- Evaluación de los resultados experimentales obtenidos: análisis, estudio, discusión e interpretación.

2 JUSTIFICACIÓN

La industria de la construcción es particularmente susceptible a las materias primas, pues de ellas depende el tipo y características del concreto producido y la posibilidad de optimización del proceso de fabricación. _Hoy en día la mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el concreto o reemplazan un porcentaje de el cemento en la mezcla. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural.

Algunos de estos materiales son denominados puzolanas, que por si mismos no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento Pórtland, reaccionan para formar componentes cementantes. Las puzolanas presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad de reaccionar con otras sustancias para formar nuevos compuestos más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker. Algunos materiales puzolánicos tales como las sílices geotérmicas, las cenizas volcánicas, los caolines y las cenizas volantes, vienen siendo estudiadas con particular interés por la industria local.

Las cenizas volantes son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en si las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre el 5% y el 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente y composición de la ceniza volante y del desempeño requerido al concreto. Las características de la ceniza volante pueden cambiar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema.

Las adiciones al concreto se utilizan para el mejoramiento del desempeño del concreto en su estado fresco y endurecido. Son principalmente utilizados para mejorar la

trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia. Estos materiales le permiten al productor de concreto diseñar y modificar la mezcla de concreto para satisfacer la aplicación deseada.

Un buen concreto es un material relativamente durable en una amplia variedad de exposiciones. Sin embargo, las condiciones de intemperización pueden tener efectos dañinos y causar la desintegración de un mal concreto.

La durabilidad del concreto armado es el resultado natural de la acción protectora que ejerce el concreto sobre el acero, caracterizada por su capacidad de actuar como un aislante con el medio exterior.

La resistencia a la compresión simple sigue siendo la característica mecánica más importante de los hormigones. La medida de la resistencia máxima a la compresión de las probetas de concreto, facilita un medio para mantener un estándar uniforme de calidad, y de hecho es la forma usual de hacerlo. Ya que las demás propiedades de cualquier mezcla de concreto están referidas a dicha resistencia en alguna forma, es probable que como prueba de control única sea la más conveniente e informativa.

La resistencia del concreto a la tensión usualmente no se toma en cuenta en el diseño de estructuras de concreto reforzado. La resistencia a la tensión, es sin embargo, de considerable importancia para el agrietamiento debido a cambios en el contenido de humedad o de temperatura.

La búsqueda de la durabilidad y resistencia de los materiales a base de cemento nos a llevado a analizar factores externos comprometidos como son las agresiones químicas de ácidos, sulfatos, carbonatos, álcalis y otras como los ataques mecánicos y térmicos.

Se plantea mediante este proyecto de tesis analizar el comportamiento físico-mecánico en edades tardías del concreto con adición de cenizas volantes, por medio de pruebas de laboratorio. De igual forma se aprovechará para estudiar algunas de las principales propiedades del concreto, contribuyendo de esta forma a la industria local proporcionándole datos precisos para el seguimiento del producto ofrecido.

En la exploración de nuevos materiales para la fabricación de un producto diferente y con menores costos, la Planta de Concreto Jorge Luis Vesga Moreno ha propuesto a la academia la investigación de materiales puzolánicos .

Este proyecto busca darle continuidad a la línea de proyectos impulsados por la planta de concreto en el afán de mejorar día a día, crecer y ser competitiva frente a los grandes monopolios extranjeros; así como continuar con la misión de la Escuela de Ingeniería civil en el campo de la investigación de nuevos materiales para la construcción, como soporte a la industria local.

3 FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO

El concreto de uso común, o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. La pasta, se compone de Cemento Pórtland y agua, la cual une los agregados (arena y grava o piedra triturada).

Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante representado por el aire.

La masa plástica que se produce al mezclar los componentes puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido (esto debido a la reacción química entre el Cemento y el agua).

La representación común del concreto convencional en estado fresco, lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados, característica que tiende a permanecer en el concreto ya endurecido .

Consecuentemente con ello, el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

- Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante, endurecida.
- La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.

- La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante. La pasta esta compuesta de Cemento Pórtland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto. Por lo general y después de muchas experimentaciones vemos que el volumen absoluto del Cemento esta comprendido usualmente entre el 7 y el 15 % y el agua entre el 14 y el 21 %. El contenido de aire y concretos con aire incluido puede llegar hasta el 8% del volumen del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso (pero solamente cuando se decide incluirle aire).

En cuanto a la calidad de los agregados (los cuales constituyen aproximadamente el 60 al 75 % del volumen total del concreto), es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no representen el punto débil en el comportamiento del concreto y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido. Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 4 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

Finalmente, la compatibilidad y el buen trabajo de conjunto de la matriz cementante con los agregados, depende de diversos factores tales como las características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de éstos.

3.1 INGREDIENTES DEL CONCRETO

El concreto fresco es una mezcla semilíquida de cemento Pórtland, arena (agregado fino), grava o piedra triturada (agregado grueso) y agua. Mediante un proceso llamado hidratación, las partículas del cemento reaccionan químicamente con el agua y el concreto se endurece y se convierte en un material durable. Cuando se mezcla, se hace el vaciado y se cura de manera apropiada, el concreto forma estructuras sólidas capaces de soportar las temperaturas extremas del invierno y del verano sin requerir de mucho mantenimiento. El material que se utilice en la preparación del concreto afecta la facilidad con que pueda vaciarse y con la que se le pueda dar el acabado; también influye en el tiempo que tarde en endurecer, la resistencia que pueda adquirir, y lo bien que cumpla las funciones para las que fue preparado.

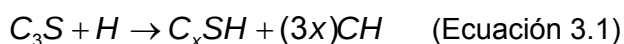
3.2 CEMENTANTES

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

Los principales cementantes hidráulicos son las cales y cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas. Bajo la denominación genérica de cementos hidráulicos existen diversas clases de cemento con diferente composición y propiedades, en cuya elaboración intervienen normalmente las materias primas.

El cemento Portland es el ingrediente ligante o adhesivo del concreto. Está compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro hasta en un 95%. Las fases presentes comprenden principalmente silicatos de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ y $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) y en menor proporción aluminato de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) y ferroaluminato de calcio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Las propiedades de endurecimiento del cemento se logran mediante la mezcla de éste con el agua. Esto resulta en la formación de productos de hidratación que poseen cualidades ligantes y baja solubilidad en agua (las estructuras de cemento

pueden subsistir aun bajo el agua). La reacción química principal se da con el silicato tricálcico y el agua, expresada en la fórmula condensada ¹ (C=CaO, S=SiO₂, H=H₂O)



El gel C-S-H (sin indicar composición específica) es el responsable de las propiedades mecánicas conocidas del cemento; el CH [Ca(OH)₂] es un subproducto de poco valor cementoso y puede ser el punto de origen de algunas reacciones degenerativas del cemento Pórtland hidratado.

El cemento Portland tiene características peculiares con respecto a otros materiales de construcción. Se requieren conocimientos en dos líneas principales para su explotación adecuada. En primer lugar sobre los procesos de fabricación, que involucran materias primas (selección y formulación), procesamiento térmico (calentamiento y enfriamiento) y molienda; sólo un cemento bien procesado tiene buen potencial de desempeño. En segundo lugar vienen los problemas involucrados en la utilización del cemento, donde se requiere tener conocimientos sobre la química de hidratación, interacción con agregados y con fibras, reacciones nocivas, resistencia al ataque químico, etc. La preparación de un buen concreto puede ser cuestión de buena suerte, pero en general la obtención de buenas propiedades y buena durabilidad (por muchos años), lejos de ser trivial está ligada al dominio del proceso.

Debido a lo heterogéneo de su composición, puede lograrse una variación muy grande en las características del cemento Portland, cambiando las proporciones de los materiales que entran en su manufactura, variando el grado de finura y con otros cambios en la técnica. Se han desarrollado varias clases de cemento Portland, puesto que para cada propósito, es ventajoso remarcar una u otra característica de sus compuestos. Existen cinco tipos de cemento Pórtland, cada uno con características físicas y químicas diferentes:

En la tabla 1 se aprecian los diferentes tipos de cemento Portland.

¹ LAWRENCE, C.D. "Chemistry of Cement and Concrete". Portland Cement Association. Skokie. 1987

Tabla 1. Características de los diferentes tipos de Cemento Pórtland.

Tipo	Característica	Ajuste principal
I	Sin características especiales	Sin ajustes específicos en este aspecto
II	Moderados calor de hidratación y resistencia a los sulfatos	Moderado C_3A ²
III	Alta resistencia rápida	Alto C_3S ³
IV	Bajo calor de hidratación Alto C_2S	Moderado C_3A
V	Alta resistencia a los sulfatos	Bajo C_3A

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

La capacidad intrínseca del concreto, como material de construcción, para prestar un buen servicio permanente, depende substancialmente de que posea las características y propiedades adecuadas para resistir satisfactoriamente y por largo tiempo, los efectos de las solicitudes mecánicas y las acciones detrimentales inherentes a las condiciones en que opera la estructura.

La propiedad básica que se procura obtener en el concreto endurecido es una determinada resistencia mecánica; además de esta resistencia, también se requiere propiciar otras características y propiedades del concreto, que lo hagan resistente y durable al verse sometido a las acciones añinas específicamente previstas. Al realizar el diseño de la mezcla de concreto, debe aplicarse el criterio de resistencia o durabilidad, conforme lo recomienda en su informe el Comité ACI 211⁴.

² Fórmula condensada del $3CaO \cdot Al_2O_3$ (Aluminato tricálcico)

³ Fórmula condensada del $3CaO \cdot SiO_2$ (Silicato tricálcico)

⁴ ACI Committee 211. Report 211.1 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1981

3.3.1 Trabajabilidad

La facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado. se denomina trabajabilidad.

Prácticamente, la finura es la única característica del cemento que puede aportar beneficio a la cohesión y la manejabilidad de las mezclas de concreto, por tanto, los cementos de mayor finura como el Pórtland tipo III o los Pórtland-puzolana serían recomendables en este aspecto. Sin embargo, existen otros factores con efectos más decisivos para evitar que las mezclas de concreto segreguen durante su manejo y colocación. Entre tales factores puede mencionarse la composición granulométrica y el tamaño máximo del agregado, el consumo unitario de cementante, los aditivos inclusores de aire y el diseño de la mezcla de concreto.

El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar excesivamente. El sangrado es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales Sólidos -Cemento, arena y piedra- dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado del la vibración y de la gravedad.

Un sangrado excesivo aumenta la relación agua/cemento cerca de la superficie superior, pudiendo dar como resultado una capa superior débil de baja durabilidad, particularmente si se lleva acabo las operaciones de acabado mientras esta presente el agua de sangrado. Debido a la tendencia del concreto recién mezclado a segregarse y sangrar, es importante transportar y colocar cada carga lo mas cerca posible de su posición final. El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto de segregarse y sangrar.

3.3.2 Consolidación

La vibración pone en movimiento a las partículas en el concreto recién mezclado, reduciendo la fricción entre ellas y dándole a la mezcla las cualidades móviles de un fluido denso. La acción vibratoria permite el uso de la mezcla dura que contenga una mayor

proporción de agregado grueso y una menor proporción de agregado fino. Empleando un agregado bien gradado, entre mayor sea el tamaño máximo del agregado en el concreto, habrá que llenar con pasta un menor volumen y existirá una menor área superficial de agregado por cubrir con pasta, teniendo como consecuencia que una cantidad menor de agua y de cemento es necesaria. con una consolidación adecuada de las mezclas mas duras y ásperas pueden ser empleadas, lo que tiene como resultado una mayor calidad y economía.

Si una mezcla de concreto es lo suficientemente trabajable para ser consolidada de manera adecuada por varillado manual, puede que no exista ninguna ventaja en vibrarla. De hecho, tales mezclas se pueden segregar al vibrarlas. Solo al emplear mezclas mas duras y ásperas se adquieren todos los beneficios del vibrado.

El *vibrador mecánico* tiene muchas ventajas. Los vibradores de alta frecuencia posibilitan la colocación económica de mezclas que no son fáciles de consolidar a mano bajo ciertas condiciones.

3.3.3 Hidratación, Tiempo de Fraguado, Endurecimiento

Mediante el proceso llamado hidratación, las partículas del cemento reaccionan químicamente con el agua y el concreto se endurece y se convierte en un material durable.

El cemento Pórtland no es un *compuesto químico* simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o mas de el peso del cemento Pórtland y son: *el silicato tricálcico, el silicato dicalcico, el aluminiato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico*. Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento Pórtland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Cuando el *Clinker* (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Pórtland) se examina al microscopio, la mayoría de los compuestos individuales del cemento se pueden identificar y se puede determinar sus cantidades. Sin embargo, los granos mas pequeños evaden la detección visual. El diámetro promedio de una partícula de cemento

típica es de aproximadamente 10 micras, o una centésima de milímetro. Si todas las partículas de cemento fueran las promedio, el cemento Pórtland contendría aproximadamente 298,000 millones de granos por kilogramo, pero de hecho existen unos 15 billones de partículas debido al alto rango de tamaños de partícula. Las partículas en un kilogramo de cemento Pórtland tienen un área superficial aproximada de 400 metros cuadrados.

Los dos *silicatos* de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento Pórtland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: *el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio*. Este ultimo es con mucho el componente cementante mas importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, (fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional) principalmente depende del *gel del hidrato de silicato de calcio*. Es la medula del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO_2), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. el área superficial del hidrato de silicato de calcio es de unos 3000 metros cuadrados por gramo. Las partículas son tan diminutas que solamente ser vistas en microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia esta en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho mas resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aun entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa

hidratación del cemento. La relación mínima agua/cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25.

El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudara a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. Sin embargo, el calor puede ser nocivo en estructuras masivas, tales como presas, porque puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurecer. El cemento Pórtland tipo 1 libera un poco mas de la mitad de su calor total de hidratación en tres días. El cemento tipo 3, de alta resistencia temprana, libera aproximadamente el mismo porcentaje de su calor en mucho menos de tres días. El cemento tipo 2, un cemento de calor moderado, libera menos calor total que los otros y deben pasar mas de tres días para que se libere únicamente la mitad de ese calor. El uso de cemento tipo 4, cemento Pórtland de bajo calor de hidratación, se debe de tomar en consideración donde sea de importancia fundamental contar con un bajo calor de hidratación.

Es importante conocer la velocidad de reacción entre el cemento y el agua porque la velocidad determina el tiempo de fraguado y de endurecimiento. La reacción inicial debe ser suficientemente lenta para que conceda tiempo al transporte y colocación del concreto. Sin embargo, una vez que el concreto ha sido colocado y terminado, es deseable tener un endurecimiento rápido. El yeso, que es adicionado en el molino de cemento durante la molienda del Clinker, actúa como regulador de la velocidad inicial de hidratación del cemento Pórtland. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

3.3.4 Peso Unitario

El concreto convencional, empleado normalmente en pavimentos, edificios y en otras estructuras tiene un peso unitario dentro del rango de 2,240 y 2,400 Kg/m³. El peso unitario (densidad) del concreto varia, dependiendo de la cantidad y de la densidad relativa del agregado, de la cantidad del aire atrapado o intencionalmente incluido, y de los contenidos de agua y de cemento, mismos que a su vez se ven influenciados por el

tamaño máximo del agregado. Para el diseño de estructuras de concreto, comúnmente se supone que la combinación del concreto convencional y de las barras de refuerzo pesa 2400 kg/m³.

El peso del concreto seco iguala al peso del concreto recién mezclado menos el peso del agua evaporable. Una parte del agua de mezclado se combina químicamente con el cemento durante el proceso de hidratación, transformando al cemento en gel de cemento. También un poco de agua permanece retenida herméticamente en poros y capilares y no se evapora bajo condiciones normales. La cantidad de agua que se evapora al aire a una humedad relativa del 50% es de aproximadamente 2% a 3% del peso del concreto, dependiendo del contenido inicial de agua del concreto, de las características de absorción de los agregados, y del tamaño de la estructura.

3.3.5 Resistencia al Desgaste

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas están sujetos al desgaste; por tanto, en estas aplicaciones el concreto debe tener una resistencia elevada a la abrasión. Los resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión o desgaste esta estrechamente relacionada con la resistencia la compresión del concreto. Un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja. Como la resistencia a la compresión depende de la relación Agua – Cemento baja, así como un curado adecuado son necesarios para obtener una buena resistencia al desgaste. El tipo de agregado y el acabado de la superficie o el tratamiento utilizado también tienen fuerte influencia en la resistencia al desgaste. Un agregado duro es mas resistente a la abrasión que un agregado blando y esponjoso, y una superficie que ha sido tratada con llana de metal resistente mas el desgaste que una que no lo ha sido.

Se pueden conducir ensayos de resistencia a la abrasión rotando balines de acero, ruedas de afilar o discos a presión sobre la superficie (ASTM 779) ⁵.

⁵ ASTM D 779: Standard Test Method for Water Resistance of Paper, Paperboard, and Other Sheet Materials by the Dry Indicator Method.

3.3.6 Adquisición de Resistencia Mecánica

La adquisición de resistencia de los diversos tipos de cemento Pórtland depende básicamente de la composición química del clinker y de la finura de molienda. De esta manera, un cemento con alto contenido de silicato tricálcico (C_3S) y elevada finura puede producir mayor resistencia a corto plazo, y tal es el caso del cemento tipo III de alta resistencia rápida. En el extremo opuesto, un cemento con alto contenido de silicato dicálcico (C_2S) y finura moderada debe hacer más lenta la adquisición inicial de resistencia y consecuente generación de calor en el concreto, siendo este el caso del cemento tipo IV. Dentro de estos límites de comportamiento, en cuanto a la forma de adquirir resistencia, se ubican los otros tipos de cemento Pórtland.

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) a una edad de 28 días se le designa con el símbolo f'_c . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas en especímenes de mortero o de concreto; en Colombia, a menos de que se especifique de otra manera, los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de 5 cm. en tanto que los ensayos a compresión del concreto se efectúan sobre cilindros que miden 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, o si es necesario con otras dimensiones pero manteniendo una relación de 1:2 entre el diámetro y la altura. La resistencia mecánica del concreto frecuentemente se identifica con su resistencia a compresión, porque ésta representa la condición de carga en que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos, de modo que la mayoría de las veces los elementos estructurales se diseñan con el fin de utilizar esta propiedad del concreto. El concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 210 y 350 kg/cm^2 . un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de cuando menos 420 kg/cm^2 , resistencias de 1,400 kg/cm^2 se ha llegado a utilizar en aplicaciones de construcción .

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente al diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido la relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión, también llamada modulo de ruptura, para un concreto de peso normal se aproxima

a menudo de 1.99 a 2.65 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

El valor de la resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión y a menudo se estima como 1.33 a 1.99 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

La resistencia a la torsión para el concreto esta relacionada con el modulo de ruptura y con las dimensiones del elemento de concreto.

La resistencia al cortante del concreto puede variar desde el 35% al 80% de la resistencia a compresión. La correlación existe entre la resistencia a la compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión, y cortante, de acuerdo a los componentes del concreto y al medio ambiente en que se encuentre.

El modulo de elasticidad, denotando por medio del símbolo E, se puede definir como la relación del esfuerzo normal, la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del limite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal, E fluctúa entre 140,600 y 422,000 kg/cm², y se puede aproximar como 15,100 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua/cemento y la edad, o el grado a que haya progresado la hidratación. Estos factores también afectan a la resistencia a flexión y a tensión, así como a la adherencia del concreto con el acero.

Para las relaciones Edad-Resistencia a compresión, cuando se requiera de valores mas precisos para el concreto, se deberán desarrollar curvas para los materiales específicos y para las proporciones de mezclado que se utilicen en el trabajo.

Para una trabajabilidad y una cantidad de cemento dadas, el concreto con aire incluido necesita menos agua de mezclado que el concreto sin aire incluido. La menor relación agua/cemento que es posible lograr en un concreto con aire incluido tiende a compensar las resistencias mínimas inferiores del concreto con aire incluido, particularmente en mezclas con contenidos de cemento pobres e intermedios.

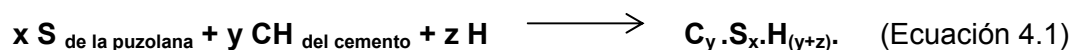
4 PUZOLANAS

Son productos naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminosos que en si mismos poseen poca o ninguna propiedad aglomerante ni de actividad hidráulica, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 a temperatura ambiente y forman compuestos de propiedades aglomerantes y cementantes

Las puzolanas presentan en virtud de su inestabilidad química, reflejo del desorden estructural, alta susceptibilidad para reaccionar con otras sustancias para formar nuevos componentes más estables, es así como atrapan la cal libre en el clinker.

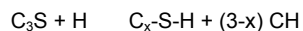
Las puzolanas engloban materiales de diferente naturaleza, por esto cuando se habla de ellas se está haciendo alusión a rocas, suelos, sedimentos o productos artificiales que presentan propiedades puzolánicas.

Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación el cemento, principalmente $[\text{Ca(OH)}_2]$; la reacción que describe tal proceso es llamada “*reacción puzolánica*”.



La generación de más C-S-H y la eliminación el CH ⁶ producido por el cemento explica el incremento en las propiedades mecánicas de cementos reemplazados. Además de su composición química, sus características físicas, como tamaño de partículas y morfología, influyen también considerablemente en las propiedades del cemento substituido.

⁶ la reacción química principal se da con el silicato tricálcico y el agua, expresada en la fórmula condensada



donde C= CaO, S= SiO₂, H= H₂O.

El CH $[\text{Ca(OH)}_2]$ es un subproducto de poco valor cementoso y puede ser el origen de algunas reacciones degenerativas del cemento Pórtland hidratado.

4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PUZOLANAS SEGÚN EL ORIGEN

Se clasifican en dos grandes grupos: naturales y artificiales, aunque existe un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que necesitan tratamientos térmicos de activación, con el objeto de aumentar su reactividad.

4.1.1 Pozolanas Naturales

Son productos minerales con características composicionales (sílico-aluminosos), estructurales (estructura imperfecta o amorfa) y texturales (grano fino) que los hacen aptos para su uso como aditivos activos en la industria del cemento, entre éstas están:

- Las acumulaciones de cenizas acumuladas durante las erupciones volcánicas explosivas, que por su alto contenido de materiales vítreos son propensas a sufrir reacciones como las requeridas para las puzolanas.
- Rocas o minerales sedimentareos ricos en sílice hidratada y formadas en yacimientos submarinos por acumulación de esqueletos y caparazones de radiolarios y diatomeas.
- Existen algunas rocas y minerales no puzolánicos de origen pero que al descomponerse generan productos de naturaleza puzolánica, los cuales son muy escasos en el mundo.

4.1.2 Pozolanas Artificiales

Son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos o desechos de la industria. Pertenecen a este grupo las cenizas volantes (fly ash), obtenidas durante la combustión en centrales termoeléctricas de carbón pulverizado, el humo de sílice (silica fume), obtenido en el horno de arco de las industrias de aleaciones de ferrosilicio, las arcillas naturales activadas mediante procesos térmicos adecuados, la ceniza de la cascarilla del arroz (Rice Husk Ash, RHA), obtenida mediante la combustión controlada de la cascarilla del arroz.

Las de mayor peso en la actualidad, en el mundo, son las cenizas volantes en función de las ventajas económicas y técnicas que ofrecen ya que es un material de desecho y los cementos aumentan la trabajabilidad y disminuyen el calor de hidratación porque son muy buenas puzolanas.

4.1.3 Puzolanas mixtas o Intermedias

Son aquellas puzolanas que, naturales por su origen, se someten a un tratamiento térmico con el objeto de cambiar sus propiedades para aumentar su reactividad química.

En la tabla 2 se presentan las características químicas de algunas adiciones, correspondientes a las clases mencionadas anteriormente

Tabla 2. Características Químicas de algunas adiciones ^{7/8/}

Componente	Toba Volcánica	Ceniza Volante	Arcilla Calcinada	Harina de Cuarzo	Caliza Marga	RHA
SiO₂	78.08	53.74	59.20	96.57	16.56	94.38
Al₂O₃	8.67	33.17	17.95	-	1.84	1.00
Fe₂O₃	2.94	2.98	12.95	-	3.28	.041
CaO	0.90	1.34	7.57	-	38.15	2.00
MgO	-	0.95	0.60	3.42	1.43	0.20
SO₃	3.80	-	0.19	-	-	-
P.F	3.98	6.39	0.29	-	3.57	1.90

^{7/} MEJÍA DE GUTIERREZ, R. , y DEL VASTO, S., "Production of high Strength cements from Rice Husk Ash", Journal of Resource Management and Technology, V22, N°3, Sept. 1994, p. 127-130.

^{8/} MEJÍA DE GUTIERREZ, R. , y DEL VASTO, S., "Sinergismo en las Propiedades del Cemento Pórtland por efecto de Adiciones", Memorias de Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Cali, 1989, p. 29-34.

4.2 UTILIZACIÓN DE LAS PUZOLANAS

El primer criterio que apoyó la producción de cementos puzolánicos fue el corregir el cemento Pórtland tipo I y II fijando la cal libre, generada durante la formación de los silicatos bi y tricálcicos, la cual es inestable a pH menores de 12, para formar compuestos estables que no son vulnerables a la acción lixiviante de las aguas ácidas. Pero adicionalmente estos materiales tienen otros efectos sobre el cemento y el concreto.

- Reemplazan una buena porción del cemento Pórtland del 20 al 40%, disminuyendo los costos de producción porque esta adición es mucho más barata que el clinker y más económica de moler.
- Reduce el calor generado durante la hidratación, la cual es una reacción bastante exotérmica.
- Evita el agrietamiento del concreto por la acción expansiva de la cal al hidratarse y compresiva al secarse.
- Rebajan en cierto porcentaje los aluminatos que son inestables en medios sulfatados y absorben álcalis, los cuales normalmente entran a reaccionar de manera perjudicial con los agregados del concreto.
- Dependiendo de las propiedades del cemento se define el porcentaje que se puede adicionar para que las resistencias a la compresión no caigan por debajo de los valores permitidos en las normas del ICONTEC. Porque las puzolanas al ser materiales muy finos, normalmente recubren los áridos en el concreto impidiendo el contacto con el cemento creando zonas de debilidad.

4.3 CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en sí las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. Las cenizas volantes utilizadas deben tener conformidad con la norma ASTM C 618 ⁹. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre el 5 y el 65% en peso de los materiales cementantes según la fuente y la composición de la ceniza volante y del desempeño requerido al concreto.

⁹ ASTM C 618: Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. 1989.

Las propiedades de las cenizas volantes dependen, tanto del tipo de carbón, como de los procesos sufridos en la combustión del mismo; tipo de horno, continuidad en su funcionamiento, sistema de captación, velocidad a la que se realiza el enfriamiento, etc.

La ceniza se presenta en diferentes condiciones: la ceniza seca, tomada directamente del precipitador o del depósito seco y la ceniza depositada a cielo abierto a la cual es necesario adicionarle agua para evitar que se disperse. Los componentes primarios de la ceniza son el sílice y la alúmina (Ver tabla 3). El carbón y los óxidos de hierro, calcio, magnesio y azufre son ingredientes secundarios. También pueden estar presentes óxidos de potasio, titanio, magnesio y fósforo.

Tabla 3. Composición típica de la ceniza volante ¹⁰

Constituyentes Principales	Porcentaje
SiO ₂	30-50
Al ₂ O ₃	15-34
Fe ₂ O ₃	5-25
CaO	2-10
MgO	0-2
SO ₃	0-4

Las norma ASTM C 618 considera tres diferentes clases de puzolanas identificadas como:

- **Clase N:** Puzolanas naturales, calcinadas o crudas, que cumplen con los requisitos indicados en la norma, aplicables a puzolanas como: algunas tierras diatomáceas; pedernales y esquistos opalinos, tobas y cenizas volcánicas o piedra pómez, cualquiera de las cuales pudo haber sido o no procesada por calcinación; así como varios materiales que requieren de este proceso para inducirles propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y esquistos.
- **Clase F:** Cenizas volantes normalmente producidas en la quema del carbón antracítico o bituminoso, que cumpla con los requisitos aplicables para esta clase,

¹⁰ KRELL C., William. "Flowable Fly Ash a New Cement Stabilized Backfill", 1984.

especificados en la norma. Esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas.

- **Clase C:** Cenizas volantes producidas a partir de carbón lignítico o sub bituminoso, que cumple con los requisitos aplicables de esta clase, especificados en la norma. Esta clase de cenizas volantes, además de poseer propiedades puzolánicas, tienen algunas propiedades cementantes. Algunas cenizas de la clase C pueden tener contenidos de cal, mayores que el 10%.

Las características de las cenizas volantes pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema. Las cenizas de clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio. Las cenizas de clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas y cementantes.

Las cenizas colombianas están dentro de la clase o tipo F, con más del 70% de la suma de los siguientes óxidos: SiO_2 (dióxido de Sílice), Al_2O_3 (alúmina), Fe_2O_3 (óxido de hierro). Su contenido de inquemados (porcentaje de pérdidas por incineración) puede llegar a sobrepasar los límites dados por la norma debido a la ineficiencia en los sistemas de combustión de las centrales térmicas colombianas.

5 DURABILIDAD DEL CONCRETO

El concreto ha sido el material de construcción más utilizado en el mundo desde el siglo XX; las dos ventajas que ha tenido sobre su principal competidor, el acero, han sido: un menor valor del costo inicial y un menor requerimiento de desarrollo industrial para su producción; lo anterior lo ha hecho especialmente ventajoso en los países de menor desarrollo.

Durante muchos años se pensó que las construcciones hechas con concreto tendrían una vida ilimitada, y los diseñadores y constructores estuvieron principalmente interesados en las características asociadas con la resistencia mecánica del material. A partir de la década de los 80 se empezó a analizar con seriedad el hecho de que muchas construcciones no estuvieran manteniendo la seguridad y utilidad requeridas durante un tiempo suficientemente largo ¹¹. Actualmente se puede considerar que el problema de las construcciones de concreto que más preocupa es la falta de durabilidad de las estructuras por cargas ambientales.

5.1 CONCEPTO DE DURABILIDAD

El ACI 201 ¹² define la durabilidad del concreto como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, que el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales, cambian con el tiempo. El material alcanza el final de su vida de servicio

¹¹ MEHTA, P.K., SCHIESEL, P. and RAUPACH, M. "Performance and Durability of Concrete Sistem". Proceedings Int. Congress on the Chemistry of Cement, 9th. New Delhi. 1992

¹² ACI Committee 201. "Proposed Revision of Guide to Durable Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1991

cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto que continuar utilizándolo se considera inseguro o antieconómico ¹³.

El deterioro anticipado del concreto, operando en condiciones ordinarias, puede ser propiciado por factores estructurales y no estructurales. Independientemente de las fallas estructurales, repentinas o graduales, provocadas por sobrecargas o por esfuerzos excesivos de cualquier procedencia, es conveniente no perder de vista la interrelación que con frecuencia entre ambos tipos de factores. Hay ocasiones en que un deterioro aparentemente no estructural tiene como punto de partida un agrietamiento de origen estructural; lo cual pone de relieve la importancia que tiene la detección oportuna de los primeros síntomas, o probables fuentes de deterioro, para prolongar la vida útil de las estructuras mediante la inspección y el mantenimiento adecuados ¹⁴.

Los principales efectos que influyen adversamente en la durabilidad del concreto pueden clasificarse como agentes físicos o químicos.

Las acciones físicas de deterioro pueden deberse a

- Abrasión, erosión o cavitación.
- Heladas.
- Fenómenos de Impacto.
- Fuego.
- Sobrecargas estáticas o dinámicas.

El segundo tipo de factores ocasionan reacciones químicas entre los agentes agresivos presentes en el ambiente externo y los constituyentes de la pasta de cemento, o incluso entre los mismos constituyentes del concreto. Pertenecen a esta clase los fenómenos de:

- Ataque de Sulfatos
- Carbonatación
- Ataque de Cloruros
- Reacción árido – álcali
- Ataque de sustancias ácidas

¹³ RATAY, R. "Forensic Structural Engineering Handbook". Mc Graw-Hill. New York. 2000

¹⁴ COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. "Manual de Mantenimiento para Concreto". Subgerencia de Ingeniería Civil. Limusa Noriega Editores. México D.F. 1991

Entre todos estas cabe destacar las siguientes por su frecuencias y por la importancia de sus efectos en la duración de las estructuras: 1) Ataque de sulfatos, 2) Corrosión del acero de refuerzo, 3) Congelación y deshielo, 4) Lixiviación del hidróxido de calcio, 5) Reacciones álcali – agregado.

5.2 ATAQUE DE SULFATOS

Los sulfatos que afectan la durabilidad, se hallan usualmente en el suelo en contacto con el concreto, en solución en agua de lluvia, en aguas contaminadas por desechos industriales o por flujos en suelos agresivos. Por lo general consisten en sulfatos de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio.

La acción agresiva de los sulfatos sobre el concreto de cemento Pórtland es consecuencia de dos reacciones químicas: una con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) que se libera durante la hidratación del cemento, y la otra con los compuestos hidratados que provienen del aluminato tricálcico (C_3A) del propio cemento. De la reacción de los sulfatos con el hidróxido de calcio resulta sulfato de calcio (yeso) y de la reacción con los hidratos de aluminato cálcico se produce sulfoaluminato de calcio (etringita). En ambas reacciones, el volumen sólido de los productos resultantes (yeso y etringita) representa más del doble de la suma de los volúmenes sólidos de los compuestos originales que reaccionan. De este modo, dicho aumento de volumen que no puede acomodarse en el espacio original de los poros del concreto, genera esfuerzos internos de tensión en éste, que primero lo microfisuran y a continuación lo desintegran gradualmente.

Para que los sulfatos ataquen al concreto es necesario que penetren en sus poros, y para ello se requiere que se hallen en estado de solución; es decir, si los sulfatos se encuentran en estado sólido (como puede ser el caso de un terreno permanentemente seco) el riesgo de ataque es mínimo, pues al no penetrar en el concreto sus efectos se limitan a la superficie de concreto. Sin embargo, la primera condición es la más frecuente, dando una gran importancia a la influencia que tiene la permeabilidad del concreto en su resistencia a los sulfatos.

Control de la agresión química

Ya que la agresividad de los sulfatos es consecuencia de las reacciones químicas con el C_3A y el $Ca(OH)_2$, como se describió anteriormente, una medida pertinente consiste en moderar sus contenidos. Lo primero se puede hacer mediante el uso de un cemento adecuado, como el Portland tipo II ($C_3A \leq 8\%$) cuando se requiere moderada resistencia a los sulfatos o el tipo V ($C_3A \leq 5\%$) en caso de requerirse mayor resistencia a los sulfatos, en función del grado de concentración de estos. Lo segundo, moderar el contenido de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) en el concreto, un procedimiento apropiado consiste en utilizar un material puzolánico que sea suficientemente apto para reaccionar con el hidróxido de calcio, a fin de convertirlo a compuestos útiles que no reaccionen con los sulfatos.

Además del uso del cemento indicado, es necesario proveer al concreto de mayor permeabilidad y resistencia, para lo cual suele requerirse una relación agua/cemento no mayor de 0.45.

5.3 CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

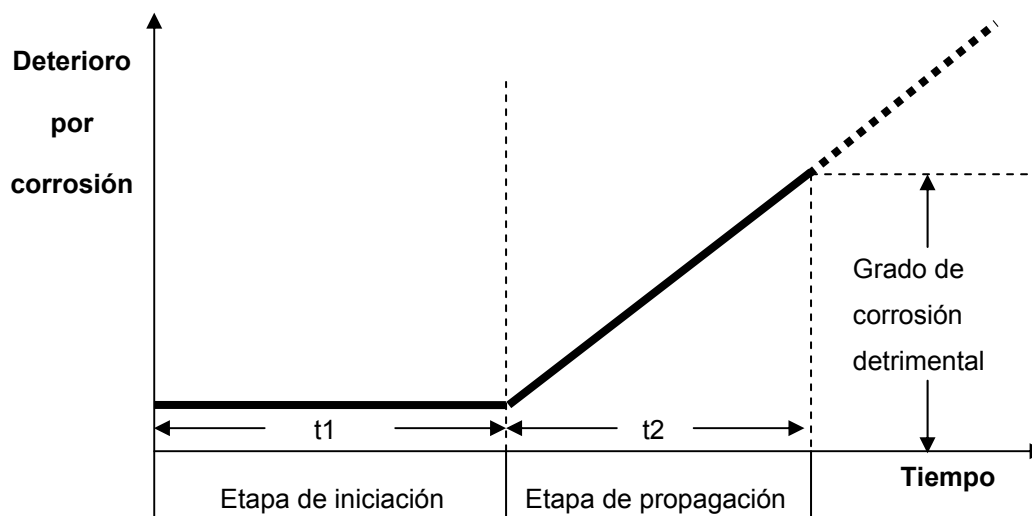
La corrosión del acero de refuerzo tiene dos consecuencias principales que afectan la duración de las estructuras: 1) por efecto de la corrosión se reduce la sección de las varillas de acero, merma su adherencia con el concreto y se degradan sus propiedades mecánicas, demeritando su capacidad de trabajo estructural, y 2) como resultado de la corrosión, se originan productos (herrumbre) cuyo volumen es varias veces superior al de los elementos que les dan origen, y este aumento de volumen trae como consecuencia tensiones internas que agrietan progresivamente el recubrimiento de concreto e incluso lo desprenden totalmente en situaciones de corrosión avanzada. Debido a la elevada frecuencia con que ocurre este fenómeno, puede decirse que la corrosión del acero de refuerzo es una de las principales causas de que las estructuras de concreto reforzado sufran deterioro prematuro.

Desde el punto de vista de la corrosión del acero en el concreto, Tuutti ¹⁵ definió un modelo muy sencillo que representa el tiempo que tarda una estructura de concreto proporcionando servicios para los cuales ha sido diseñada. Este modelo se divide en dos periodos.

- **Periodo de iniciación:** Tiempo en que tarda el agente agresivo en atravesar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar el rompimiento de la capa de óxido protector.
- **Periodo de propagación:** Comprende la acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable.

Estos periodos se ilustran en la Figura 1.

Figura 1. Tiempo de vida útil de una estructura



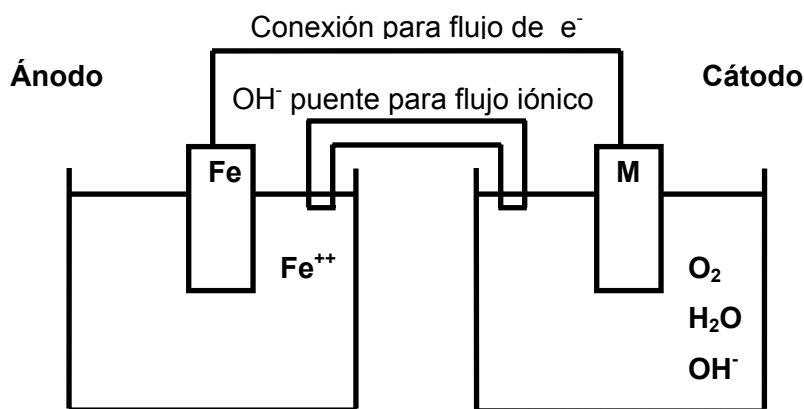
Durante el periodo de iniciación los agentes agresivos llegan a la superficie del metal e inician el proceso de corrosión. Los agentes mas comunes son los iones cloruro y la neutralización de la pasta de concreto conocida como carbonatación.

¹⁵ TUUTTI, K. "Corrosion of Steel in Concrete". The Swedish Cement and Concrete Association. Stockholm. 1982

5.3.1 Mecanismos de la corrosión

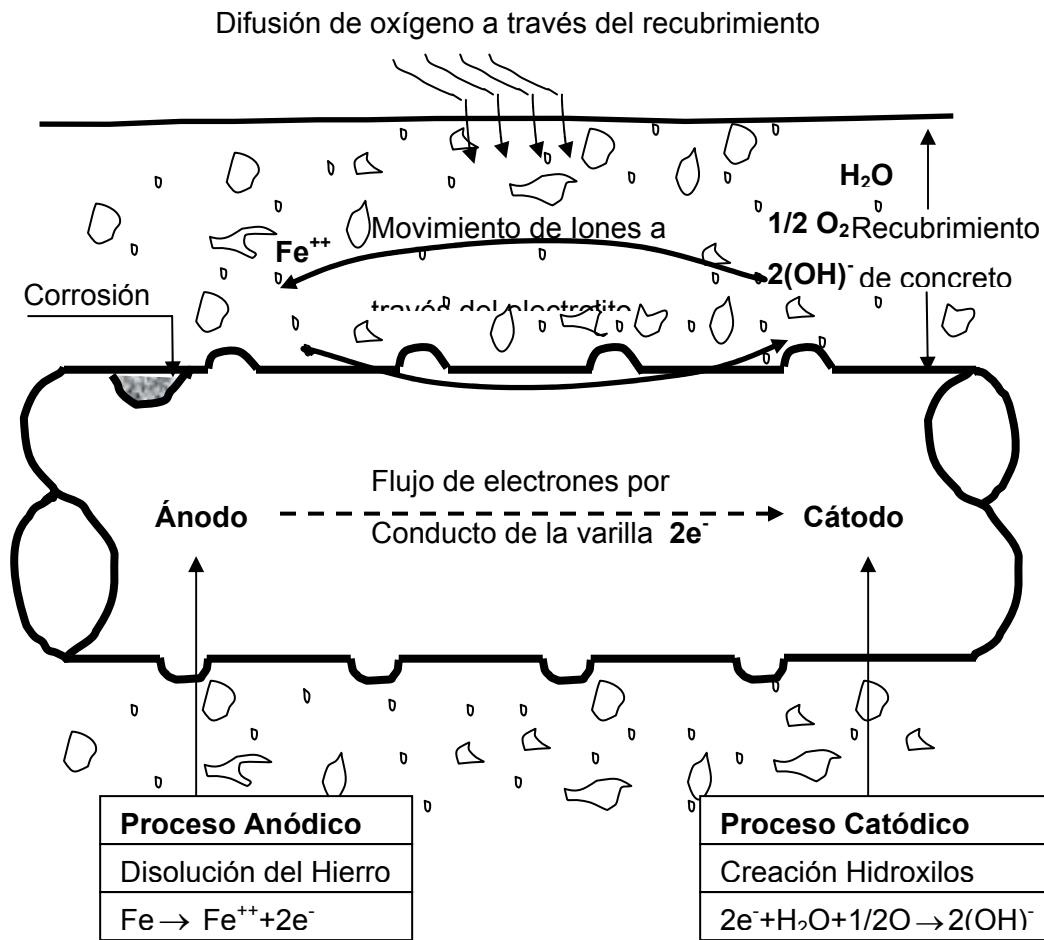
En la figura 2 se describe el esquema típico de la celda electroquímica; que consiste en dos metales de diferente potencial eléctrico (designados como ánodo y cátodo) conectados entre si por un conductor eléctrico e inmersos en una solución (llamada electrolito) de composición química adecuada ¹⁶. En tales condiciones se crea un flujo de electrones del ánodo al cátodo por conducto de la conexión eléctrica, que descompone químicamente el electrolito y genera un movimiento de iones a través de este, cuya manifestación es la corrosión y desintegración paulatina del ánodo. En el caso del acero de refuerzo no se requiere la presencia de dos metales para formar la celda, pues el ánodo y el cátodo son constituidos por zonas de diferente potencial electroquímico sobre la misma varilla, el electrolito corresponde a la solución acuosa de sales que normalmente existen en los poros del concreto, y el conductor eléctrico lo constituye la propia varilla de acero, presentándose un desplazamiento de los electrones desde las zonas anódicas a las catódicas, mientras que los iones resultantes de la reducción lo hacen en sentido contrario a través del hormigón, tal y como se muestra en la figura 3.

Figura 2. Celda de corrosión electroquímica



¹⁶ BICZOCK, I. "Concrete Corrosion and Concrete Protection". Chemical Publishing Co., Inc. New York. 1988

Figura 3. Celda de corrosión en concreto reforzado



Las varillas de acero de refuerzo ahogadas en el concreto, suelen recibir de este una adecuada protección contra la corrosión electrolítica por dos conceptos:

- Para que se genere la corrosión es indispensable la presencia del electrolito, esto es, que en los poros del concreto exista humedad, y que además exista oxígeno para que se produzcan las reacciones químicas inherentes al proceso electrolítico. La sola falta de uno de estos dos participantes (agua y oxígeno) es suficiente para inhibir la corrosión; es decir que el acero de refuerzo no se corroe sensiblemente si el concreto que lo circunda permanece seco, ni tampoco si el concreto se halla continuamente inmerso en agua, ya que no hay suministro de oxígeno.

- El cemento Portland al hidratarse libera hidróxido de calcio, y esto, aunado a la presencia de otras sales alcalinas, le confiere al concreto un alto nivel de basicidad (pH cercano a 13). En un medio así, los primeros productos de la corrosión electrostática están constituidos por una forma de óxido férrico que origina una delgada película de recubrimiento sobre las varillas de acero y las protege de corrosión ulterior. A dicho fenómeno se le conoce como “pasivación” del acero de refuerzo, y se dice ¹⁷ que esta película sólo subsiste mientras el concreto conserva un pH mayor de 11.5; es decir, si por cualquier motivo se reduce el grado de alcalinidad del concreto por debajo de este valor, la película de pasivación se deteriora y pierde su capacidad de protección contra la corrosión.

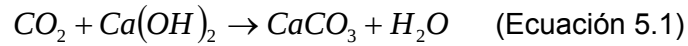
De acuerdo con lo anterior, es posible considerar que la protección natural que el acero de refuerzo recibe del concreto, a fin de no ser afectado por la corrosión electrolítica, esta en función directa de la integridad de la película de pasivación que recubre las varillas, la cual puede ser alterada por diversas acciones perjudiciales, entre las que destacan por su frecuencia la carbonatación del concreto y la existencia de cloruros en el medio de contacto con las varillas.

5.3.2 Influencia de la carbonatación

Se define como carbonatación del concreto el proceso que resulta del contacto de este con el bióxido de carbono, CO_2 , que generalmente se encuentra en el aire. Según este proceso, el CO_2 externo en forma de gas se combina con la humedad del concreto para convertirse a la forma de ácido carbónico y reacciona así con los hidróxidos contenidos en la pasta de cemento, particularmente con el de calcio Ca(OH)_2 que se libera en la hidratación, para dar lugar a la formación de carbonatos. En el caso del hidróxido de calcio, se forma carbonato de calcio y se libera agua conforme a la siguiente reacción ¹⁸.

¹⁷ ERLIN, B. and VERBECK, G.J. “Corrosion of Metal in Concrete – Needed Research”. ACI Publication SP-49. American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1975

¹⁸ INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM y COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. “Manual de Tecnología del Concreto”. Limusa Noriega Editores. México. 1994



El resultado de esta reacción tiene doble consecuencia: 1) la conversión del hidróxido de calcio a carbonato disminuye la alcalinidad original del concreto y con ello reduce su efecto de protección al acero de refuerzo contra la corrosión y 2) la extracción del agua del hidróxido propicia una disminución de volumen del concreto, consecuencia que se manifiesta por una contracción gradual el concreto, que evoluciona a la par de la carbonatación.

La rapidez con que evoluciona la carbonatación, y la consiguiente contracción y disminución de la alcalinidad del concreto, depende de manera sustancial de tres factores principales: 1) el contenido de CO_2 en el aire de contacto, 2) la permeabilidad del concreto y 3) el grado de humedad en el ambiente y en el concreto.

La corrosión del acero de refuerzo por carbonatación se da ya que ésta reduce la alcalinidad ($pH < 9$) destruyendo el estado de pasivación del acero de refuerzo, y ni bien el “frente de carbonatación” alcanza el acero de refuerzo, éste último comienza a oxidarse. Dado que la formación de óxido se acompaña siempre con un aumento de volumen, esto acarrea generalmente la disgregación del hormigón que cubre al acero. A este punto, el acero de la armadura no está más protegido y el hormigón armado comienza a perder su capacidad portante.

Control de la agresión

No se debe olvidar que la carbonatación se inicia después del fraguado, ni bien el hormigón es desencofrado. El objetivo final es el de impedir que el frente de carbonatación alcance al acero de refuerzo.

Como se vio, para que se de el ingreso es necesario que el concreto sea lo suficientemente permeable para que los carbonatos lleguen hasta donde se encuentre el acero de refuerzo, por lo que se aplica las mismas recomendaciones que para la agresividad de los sulfatos, con la condición adicional de la importancia extrema del concreto de recubrimiento, que es la barrera principal para el ingreso en los casos de ambientes agresivos con altos contenidos de CO_2 deben especificarse recubrimientos

mayores de los normales ¹⁹ y calidades de concreto que aseguren baja permeabilidad.

5.3.3 Influencia de los cloruros

Los cloruros se hallan en el ambiente en las zonas cercanas al mar, en el agua marina, y en ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial.

Los cloruros tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa, pero erradamente se le considera en muchas oportunidades causantes del deterioro que es producido por otros agentes. En este sentido hay que tener perfectamente claro que el concepto de que los cloruros no tiene acción perjudicial directa sobre el concreto, sino a través de su participación en el mecanismo de la corrosión de metales embebidos en el concreto, produciéndose compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y agregados. El no entender a cabalidad este fenómeno lleva muchas veces a confusión pues con frecuencia se descartan materiales con cloruros para su empleo en concreto simple sin ser necesario.

El efecto dañino de los cloruros consisten básicamente en impulsar la corrosión del acero de refuerzo. Como en el caso de los sulfatos, para que la presencia de los cloruros represente riesgo de daño, es necesario que se hallen en estado de solución y con un cierto grado de concentración en el medio que tiene contacto directo con el acero de refuerzo.

La difusión del ión cloruro en el concreto se reduce por la capacidad del cemento para combinarlo química o físicamente, en cuanto reacciona con los productos de hidratación. Los componentes del cemento que reaccionan son el aluminato tricálcico (C3A) que forma cloro-aluminatos cálcicos de composición aproximada : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ y la fase ferrita reaccionando el ferroaluminato tetracálcico (C4AF) con la formación del cloroferrito cálcico, de composición $3\text{CaO} \cdot \text{FeO}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Al primero de estos

¹⁹ GUIRGUIS, S. "A basis for determining Minimum Cover Requirement for Durability". Paper 26, ACI SP-100. American Concrete Institute, Detroit, Mich. 1987

compuestos, llamado “Sal de Friedel” se le atribuye un mayor efecto en la reducción de la movilidad del anión cloruro.

Control de la agresión

El cloro Es uno de los elementos más comunes en la naturaleza. En consecuencia, se encuentra en los agregados del concreto, en el agua de mezclas, en el crudo del cemento y en el medio externo. De todos ellos , el cemento es el que aporta el contenido menos significativo, generalmente por debajo del 0.05%. Cuando los cloruros se incorporan en el agua de mezclado tienen acceso directo e inmediato al acero de refuerzo; esto es fácilmente controlado utilizando agua potable. La otra forma como pueden incluirse es entrando en solución a través de fisuras y otras discontinuidades.

Como se vio anteriormente, utilizar cementos con alto contenido de C_3A , ayuda a fijar los cloruros. Además los cementos con alto contenido de álcalis producen una medio alcalino más elevado.

En cuanto al riesgo de corrosión por concepto del medio externo, ya que estos entran en el concreto por medio del agua, es de especial cuidado el grado de permeabilidad del concreto, siendo indispensable en ambientes de alta exposición un concreto de buena calidad y baja permeabilidad.

5.4 CONGELACIÓN Y DESHIELO

La degradación del hormigón derivada de los ciclos de congelamiento y deshielo es causada esencialmente por la transformación en hielo del agua contenida en los agregados o en los capilares de la pasta de cemento. La formación de hielo implica un aumento de volumen aproximado del 10%. Este aumento de volumen asociado con el movimiento del agua aún no congelada en los capilares del hormigón, causa un aumento considerable de las presiones internas. Dado que la resistencia del hormigón es a menudo superada resultan ciertos daños: la repetición frecuente de los ciclos de congelamiento y de deshielo causa la aparición de una red muy densa de microfisuras en

la zona superficial del hormigón. La red de microfisuras evoluciona más o menos rápidamente transformándose en resquebrajaduras y disgregaciones de la superficie²⁰.

Al producirse el descongelamiento o deshielo se liberan las presiones y al repetirse este ciclo muchas veces se produce la rotura por fatiga de la estructura de la pasta.

Control frente al congelamiento y deshielo

Al momento existen dos filosofías distintas en la lucha contra los efectos del hielo:

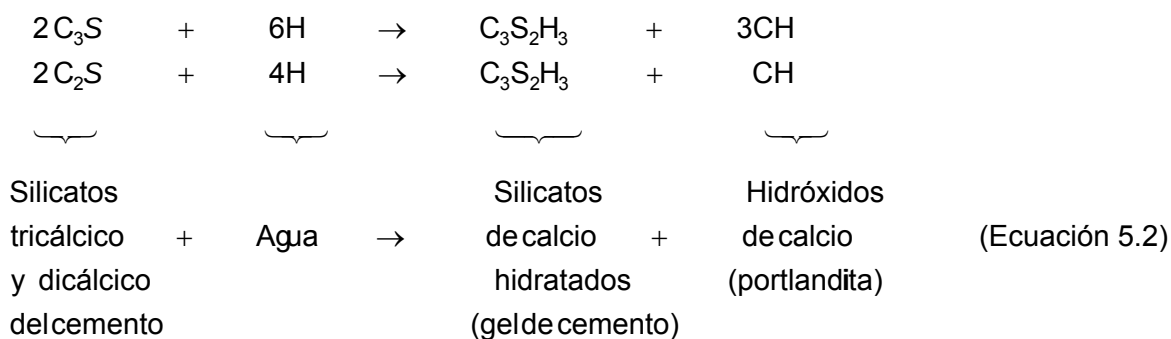
- **Hormigón denso:** La primera posibilidad consiste en confeccionar y poner en uso hormigones muy compactos (contenido de aire inferior a 1%) para reducir al mínimo la circulación del agua y la formación de hielo en los poros capilares. Este método es válido en la mayor parte de los casos.
- **Hormigón con aire incorporado:** En concretos normales, existe un promedio de 1% de poros de aire atrapado, los cuales no son suficientes para evitar el deterioro del concreto cuando el agua llega a congelarse en los poros saturados del mismo. Ello es debido a que los poros de aire atrapado no se encuentran lo suficientemente cerca de todos los poros capilares, en los que el hielo puede formarse y por tanto no son una ayuda segura en el control de los esfuerzos resultantes. La alternativa está dada por la presencia de micro-burbujas de aire en el hormigón, de manera de que se formen zonas de “descompresión” para la circulación del agua y por lo tanto para la formación del hielo. Disminuye también la presión en exceso debida al hielo en los capilares y entonces el riesgo de disgregación de la superficie. Este método es por cierto más eficaz pero presupone el uso de aditivos incorporadores de aire el uso de estos aditivos no sólo es delicado y necesita de una atención particular, sino que también causa una pérdida de resistencia a la compresión. Cada 1% de aire incorporado provoca una merma de la resistencia a compresión de 10-30 kg/cm².

²⁰ POWERS, T.C. "Freezing Effects in concrete". Paper 1, ACI SP-47. American Concrete Institute Detroit, Mich. 1975

5.5 LIXIVIACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO

La lixiviación es el proceso mediante el cual un líquido, al penetrar a través de un material, disuelve y extrae las sustancias solubles que dicho material contiene; incrementando de esta forma la porosidad del material y afectando las propiedades que dependen de ésta. En el caso del concreto endurecido, éste puede perder por lixiviación el hidróxido de calcio que contiene, cuando se halla en contacto con agua capaz de penetrar a través de sus poros.

El hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , es un compuesto soluble en agua (aproximadamente 1 gr por litro) que se forma durante el endurecimiento de la pasta de cemento Portland, como resultado de la hidratación de los silicatos de calcio (C_3S y C_2S) conforme a las siguientes reacciones expresadas en la notación simplificada:



En condiciones ordinarias, se estima ²¹ que en una pasta de cemento completamente hidratada, el contenido de Ca(OH)_2 representa entre el 20 y 25 por ciento de los productos sólidos de hidratación, y está constituido por cristales que se desarrollan junto con el gel de cemento y se alojan progresivamente en los poros de la pasta conforme endurece; de este modo, la posibilidad de el agua externa penetre hasta estos cristales para disolverlos, depende de la presión con que actúa y de la permeabilidad del concreto. De acuerdo a todo ello, el riesgo de que el concreto sufra deterioro por efecto de la lixiviación del hidróxido de calcio, se acrecienta en condiciones tales que 1) la presión

²¹ RAMACHANDRAN, V.S., and FELDMAN, R.F. "Cement Science". Concrete Admixtures Handbook. Noyes Publications. New York. 1984

hidráulica sea más alta, y/o 2) el concreto sea más permeable, y/o 3) el agua posea mayor poder de disolución (bajo contenido de sales disueltas)

Medidas de protección

En condiciones operativas que lo justifiquen pueden adoptarse tres tipos de medidas principalmente:

- Procurar la obtención de un concreto, que ya colocado en la estructura, exhiba suficiente impermeabilidad.
- Aplicar un tratamiento superficial al concreto expuesto, para restringir la penetración del agua externa.
- Emplear una puzolana, o cemento puzolánico, que sea eficaz para reaccionar con el hidróxido de calcio, a fin de convertirlo a compuestos insolubles en agua.

5.6 REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

La reacción álcali-agregado es una reacción química de evolución lenta entre determinados agregados llamados “reactivos” y las sustancias alcalinas normalmente presentes en el hormigón, lo cual representa un verdadero ejemplo de incompatibilidad química cuando ambos componentes del concreto poseen determinadas características que los hacen inconciliables para operar en contacto permanente. Aunque existen tres tipos de reacciones de esta índole, que se distinguen por la naturaleza de los agregados involucrados, los efectos de todas ellas coinciden en manifestarse por un aumento de volumen consecuente de la reacción que se traduce en tensiones internas capaces de agrietar el concreto y, con el tiempo, deteriorar significativamente la estructura. El diagnóstico es difícil y la aparición puede variar de 1 hasta 40 años.

Esta reacción puede tener lugar sólo si se dan además estas condiciones:

- Presencia de agregados reactivos con los álcalis, en las cantidades que sean más desfavorables de acuerdo a su naturaleza.
- La solución de poro del concreto debe tener suficiente álcalis para generar una reacción deletérea con esos agregados alcalino del hormigón.

- La estructura debe prestar servicio en condiciones tales que representen un alto contenido de humedad en el concreto, ya sea en forma permanente o alternada con periodos de secado
- Elevada porosidad del hormigón.

Medidas preventivas

La prevención de la reacción álcali – agregado se inicia con la colocación de un hormigón muy compacto con el objeto de frenar la entrada de agua al interior del hormigón. En caso de duda, y en particular si contienen sílice amorfa, los agregados pueden ser sometidos a varias pruebas para determinar su reactividad potencial. Si el resultado de las pruebas evidenciara el peligro de una reacción álcali – agregado, se recomiendan las siguientes medidas de precaución:

- Evitar el empleo de estos agregados para los elementos expuestos (ambiente húmedo).
- Utilizar cementos con resistencia a la reacción álcali-agregado o con cantidades significativas de escoria o de una puzolana no alcalina.

6 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En su forma básica, el concreto es una mezcla de cemento Pórtland, arena, triturado y agua, pero hoy en día la mayoría de las mezclas contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante en el concreto. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural, que pueden o no ser procesados antes de ser utilizados en los concretos. Algunos de estos materiales son denominados puzolanas, que por si mismos no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento Pórtland, reaccionan para formar componentes cementantes. Estas adiciones pueden ser añadidas a la mezcla de concreto, ya sea formando parte de un cemento Pórtland-puzolana o bien dosificándolo por separado durante la elaboración de la mezcla.

En la presente investigación, se utilizó la ceniza volante, subproducto de la incineración del carbón de la central termoeléctrica de Paipa IV, como material cementante adicionante en la dosificación por separado de la mezcla directa en concreto.

Para la aplicación de la ceniza volante en el concreto, se necesitó de la caracterización de los materiales presentes en las mezclas, como son cemento, agregado grueso, agregado fino, agua, aditivo y ceniza. A continuación se dará una identificación en detalle de cada uno de ellos.

6.1 CENIZA VOLANTE

Las cenizas volantes (ver foto 1) son puzolanas artificiales, que se definen como los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de Centrales Termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.

Foto 1. Cenizas volantes de Paipa IV



6.1.1 Clasificación.

Existen dos formas de emplear las puzolanas en el concreto, ya se formando parte de un cemento Pórtland-puzolana, o bien como un ingrediente dosificado separadamente en la planta de concreto premezclado.

Cuando se requiere verificar la calidad de un material puzolánico que se emplea en la elaboración de un cemento Pórtland-puzolana, son empleados los requerimientos considerados en las especificaciones correspondientes ASTM C 595 ²¹ o NTC 31 ²². Conforme a estas, la adición se puede obtener mediante la pulverización conjunta del clinker Pórtland y puzolana, o mediante una mezcla íntima y uniforme de los dos, con adición de sulfato de calcio.

Para las cenizas volantes puzolánicas que se emplean y dosifican por separado, como componentes individuales del concreto de cemento Pórtland, son aplicables las especificaciones técnicas y los requerimientos en cuanto a sus propiedades químicas y

²¹ ASTM C595: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. 1989

²² NTC 31: Cemento. Definiciones.

físicas descritos en la ASTM C 618 ²³ o NTC 3493 ²⁴. En el estudio, las cenizas volantes adicionadas en el concreto, son suministradas por la Termoeléctrica de Paipa IV, debido a su cercanía con la ciudad de Bucaramanga.

Las características del tamaño, forma y color de las cenizas volantes son dependientes sobre la fuente y la uniformidad del carbón, grado de pulverización antes de quemarse y el tipo del sistema de colección utilizado. Asimismo, el porcentaje de pérdida a la incineración es un indicador de la eficiencia de combustión de una central termoeléctrica.

6.1.2 Estudio de la ceniza volante de Paipa IV

A continuación se presentan los requisitos de la norma NTC 3493 en relación al análisis químico propio de cada una de las cenizas. Los datos de las propiedades químicas de la ceniza volante ha sido suministrado por el laboratorio químico de la central, como se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Caracterización química de las cenizas volantes

Requisitos	Clase de aditivo mineral			Resultados
	N	F	C	Paipa IV
Dióxido de Sílice (SiO_2)				61.3
óxido de aluminio (Al_2O_3)				23.5
óxido de hierro (Fe_2O_3).				4.78
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%mín.)	70	70	50	89.58
Trióxido de azufre (SO_3) (%máx)	4	5	5	0.75
Contenido de humedad (% máx)	3	3	3	0.38
Pérdida al fuego (%máx.)	10	6	6	13

²³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. op.sit. p 24

²⁴ NTC 3493: Cenizas Volantes y Puzolanas Naturales, Calcinadas o Crudas, Utilizadas Como Aditivos Minerales en el Concreto de Cemento Portland.

Teniendo en cuenta la clasificación de las cenizas en la norma NTC 3493, las cenizas estudiadas corresponden a la clase F, normalmente conocidas como residuos, producto de la quema del carbón bituminoso.

Los porcentajes de los requisitos químicos analizados arrojaron valores acordes en comparación con los de la norma, es decir, éstas cenizas satisfacen ampliamente las especificaciones para ser usadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. En cuanto a las pérdidas por incineración, éstas reflejan las grandes deficiencias de las termoeléctricas colombianas en su sistema de combustión.

La caracterización física de la ceniza volante se fijó en los requisitos tales como: finura, peso específico e índice de actividad de resistencia.

6.1.2.1 La densidad. Es la relación entre la masa de una cantidad dada y volumen desalojado por esa masa. La densidad en el cemento varía entre 2.90 a 3.15 g/cm³. En la investigación, la densidad de las cenizas volantes arrojó como resultado valores cercanos a 2 g/cm³. (Ver tabla 5).

La determinación del ensayo de densidad no indica de una forma directa la calidad de la ceniza pero es un factor indispensable para el diseño y control de calidad de las mezclas de concreto.

Tabla 5. Peso específico de las cenizas volantes

Muestra	Peso	Volumen	Peso Especifico	
	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(Kg/m ³)
Ceniza Paipa IV	50	24,6	2,03	2033

6.1.2.2 La finura. Es una de las propiedades más importantes de los materiales cementantes, ya que esta íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor y aumento de resistencia. La finura se puede medir por métodos directos e indirectos y se expresa por el área superficial de las partículas contenidas en un gramo del material, lo cual se denomina superficie específica y se mide en cm²/g. En la

investigación se estudiaron los dos métodos; como método directo, se desarrolló el tamizado 45 micras (No 325), exigido por la NTC 3493 y descrito en la norma NTC 294²⁵. Como método directo se desarrolló el ensayo del permeabilímetro de Blaine, descrito en la norma NTC 33²⁶. Ver tabla 6.

Tabla 6. Finura de las cenizas volantes por Blaine y tamiz 45 micras

Muestra	Blaine (cm ² /g)	Tamiz No 325	
		% máximo retenido	% Resultado
Ceniza Paipa IV	6836	34	19

6.1.2.3 Índice de actividad de resistencia (IAR) con el cemento Portland. Se determina mediante un ensayo acelerado, a través del cual se intenta evaluar la contribución que se espera de la ceniza volante al mayor desarrollo de la resistencia del concreto, como lo especifica la norma ASTM C 311²⁷. En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para la ceniza volante de Paipa IV.

Tabla 7. Resultados promedio de f'c e IAR de ceniza volante de Termopaipa

Termopaipa IV			
%	Día	f'c (Kg/cm ²)	IAR
10	7	473	112
15	7	452	107
20	7	429	102
25	7	334	80
30	7	303	72
50	7	176	42

²⁵ NTC 294: Método de Ensayo para Determinar la Finura del Cemento Hidráulico sobre el Tamiz 45 AEM (NO. 325).

²⁶ NTC 33: Método para Determinar la Finura del Cemento Hidráulico por Medio del Aparato Blaine de Permeabilidad al Aire.

²⁷ ASTM C 311: Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. 1990

- Todas las muestras de mortero con adición de ceniza volante de Paipa, excepto el 30% y 50% de adición, superaron el índice de actividad de resistencia requerido en la norma NTC 3493, que indica como mínimo el cumplimiento del 75% de resistencia de la muestra sin adición con cemento Pórtland a los siete días.
- Es importante resaltar las primeras adiciones de ceniza volante de Paipa por su excelente comportamiento como material cementante, ya que la resistencia a compresión a los siete días, superó considerablemente la muestra patrón; es decir el índice de actividad de resistencia en los morteros con 10%, 15% y 20% de adición, además de cumplir con el 75% especificado en la norma NTC 3493, sobrepasa el 100%. Esto significa que las muestras adicionadas con 10%, 15% y 20% desarrollaron mejor comportamiento mecánico que la muestra patrón.

6.2 CEMENTO

El material cementante utilizado en el estudio, adjunto a la ceniza volante para la mezcla de concreto y mortero fue el cemento Rioclaro tipo III, este en conformidad con los materiales usados en la planta de concretos Jorge Luis Vesga Moreno.

6.2.1 Marco conceptual.

El cemento Pórtland tipo III se conoce por el desarrollo de altas resistencias a edades tempranas, normalmente a una semana o menos. Físicamente es similar al cemento Pórtland tipo I, exceptuando que sus partículas son más finas. Químicamente el cemento Pórtland tipo III, a diferencia de los otros tipos de cemento Pórtland, tiene alto contenido de silicato tricálcico (C_3S), que reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial.

El cemento Pórtland está constituido por cuatro compuestos principales, conocidos normalmente como silicato tricálcico C_3S , Silicato dicálcico C_2S , Aluminato tricálcico C_3A y Ferroaluminato tetracálcico C_4AF . Las características de desarrollo de los diferentes tipos de cemento Pórtland, dependen del porcentaje de cada uno de estos compuestos químicos. Ver tabla 8 y 9.

Tabla 8. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos de cemento ²⁸

Cemento Portland	Composición química en %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Tipo 1	48	27	12	8
Tipo 2	40	35	5	13
Tipo 3	62	13	9	8
Tipo 4	25	50	5	12
Tipo 5	38	37	4	9

Tabla 9. Características de los compuestos del cemento ²⁹

Propiedad	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Resistencia	Buena	Buena	Pobre	Pobre
Intensidad de reacción	Media	Lenta	Rápida	Rápida
Calor de Hidratación	Medio	Bajo	Alto	Bajo
Resistencia a sulfatos	Buena	Buena	Pobre	Media

6.2.2 Estudio del cemento Rioclaro

La producción del cemento Rioclaro se hace por medio del proceso de vía seca, donde se cuenta con la siguiente técnica. Los datos fueron suministrados por Cementos Rioclaro S.A.

- **Cantera:** explotación de caliza por perforación y voladura, transporte por medio de camiones roqueros hasta la trituration, reservas para 70 años de operación.
- Trituración y Pre-homogeneización.
- **Molino crudo:** horizontal y vertical, con circuitos cerrados y silo de homogeneización para almacenamiento.
- **Hornos:** control centralizado, torre precalentadora y enfriador de parrillas.

²⁸ MURDOCK, L.J. "Elaboración del Concreto y sus Aplicaciones". Compañía Editorial Continental S.A, México, 1964 p.104.

²⁹ MURDOCK, L.J. ibid.

- **Molinos de cemento:** horizontales con separadores de alta eficiencia y sistema automático de control.
- **Ensacadoras:** rotativas con control de peso electrónico y cargue directo a los camiones.
- **Sala de Control y Laboratorio:** Alta tecnología. Equipos de análisis de rayos gamma y rayos x para garantizar la calidad del producto.

El cemento Rioclaro (ver foto 2) es transportado a Bucaramanga, por medio de carros cisterna desde la ciudad de Medellín donde se encuentra ubicada la cementera.

Foto 2. Cemento Rioclaro tipo III



La caracterización física se fijó en los requisitos tales como: finura y peso específico. La composición química fue suministrada por cemento Rioclaro S.A.

6.2.2.1 Peso específico. El peso específico del cemento en el estudio arrojó como resultado 3.1g/cm^3 , utilizando el ensayo descrito en la NTC 221³⁰. De igual forma, por su alta densidad se confirma que el cemento no posee ningún tipo de adición. Ver tabla 10.

³⁰ NTC 221: Cementos. Método de Ensayo para Determinar la Densidad del Cemento Hidráulico.

Tabla 10. Peso específico del cemento Rioclaro tipo III

Muestra	Peso	Volumen	Peso Especifico	
	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(Kg/m ³)
Rioclaro	64	20,65	3,10	3100

6.2.2.2 Finura Blaine. Para el cemento Pórtland tipo III, fue de 5141 cm²/g. El valor de la superficie específica fue suministrado por la planta de producción de cemento Rioclaro.

6.2.2.3 Composición química. La composición química está basada en el porcentaje de los principales óxidos del cemento Portland tipo III. Ver tabla 11.

Tabla 11. Composición química del cemento Rioclaro tipo III

COMPOSICIÓN ESTEQUIOMERICA										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	R.I	P.P.C
Prom	20.42	4.53	3.85	65.3	2.56	0.25	0.13	2.01	0.68	1.47
NTC 121 máx	...	...	...	...	7	...	...	4.5	3	4

A partir de la composición estequiométrica de los óxidos, es posible calcular la composición potencial de los compuestos del cemento. Esto es conocido como cálculo de Bogue, indicado en la norma ASTM C 150³¹.

Existen dos casos: 1) $A/F \geq 0.64$ y 2) $A/F < 0.64$. Para el cemento Rioclaro tipo III se determina la composición potencial según el caso 1, tal como se ilustra a continuación.

Caso 1. $A/F \geq 0.64$

$$\%C3S = 4,071 C - 7,6 S - 6,718 A - 1,43 F - 2,852 \bar{S}$$

$$\%C2S = 2,867 S - 0,7544 C3S$$

$$\%C3A = 2,650 A - 1,692 F$$

$$\%C4AF = 3,043 F$$

³¹ ASTM C 150: Specification for Portland Cement. 1989

donde C, A, F, S, $\bar{S}$ son las notaciones cortas de los óxidos CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂, SO₃ y representan los porcentajes en peso de los distintos óxidos. En la tabla 12 se dan los porcentajes de los diferentes compuestos del cemento para el cemento Rioclaro tipo III.

Tabla 12. Composición potencial del cemento Rioclaro tipo III

COMPOSICIÓN POTENCIAL DE BOQUE			
Nombre Químico	Fórmula Química	Notación Corta	% en peso
Silicato Tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	68.87
Silicato Dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	6.51
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	5.49
Ferroaluminato Tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	11.75

6.3 ADITIVO

El aditivo utilizado en el estudio, adjunto al agua para la mezcla de concreto fue el aditivo *Plastiment TM5* de Sika, que trabaja como plastificante-retardante, en conformidad con los materiales usados en la planta de concretos Jorge Luis Vesga Moreno, ya que su utilización responde a las exigencias dadas para que se cumplan los requisitos y especificaciones particulares de la producción de concreto premezclado.

Ficha técnica: Sika ³², describe *Plastiment TM5*, como un aditivo plastificante-retardante para el concreto, es un líquido, color café oscuro, reductor de agua; plastificante retardador del tiempo de fraguado del concreto, además es un aditivo sin contenido de cloruros. Su densidad es de 1200Kg/m³. *Plastiment TM5* cumple la Norma Técnica Colombiana NTC 1299 ³³ y la ASTM C 494 ³⁴ como aditivo Tipo D.

Este aditivo se recomienda especialmente para la elaboración, transporte y bombeo de concreto en clima medio a cálido, para concretos con largo tiempo de transporte y para

³² Sika. "Manual de productos". 2003. p. 42.

³³ NTC 1299: Concretos. Aditivos Químicos para Concreto.

³⁴ ASTM C494/C494M: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2005

evitar juntas frías, cuando se colocan grandes volúmenes de concreto. Plastiment TM 5 tiene tres usos básicos:

- **Como Plastificante:** Adicionándola a una mezcla de consistencia normal se consigue incrementar notablemente su asentamiento sin tener que agregar agua. Plastiment TM 5 extiende el tiempo de manejabilidad y retarda el fraguado de la mezcla, facilitando el transporte, colocación, vibrado y acabado del concreto.
- **Como Reductor de agua:** Adicionándolo disuelto en el agua de amasado permite reducir hasta un 14% el agua de amasado, sin variar la manejabilidad inicial, obteniéndose un incremento notable de las resistencias mecánicas a todas las edades. La impermeabilidad y durabilidad del concreto se ven incrementadas.
- **Como economizador de cemento:** Se puede aprovechar el incremento de resistencia logrado con la reducción de agua, para disminuir el contenido de cemento y hacer más económico el diseño de la mezcla.

Su modo de empleo consiste en adicionarlo disuelto en la última porción del agua de amasado de la mezcla o directamente a la mezcla ya preparada. Su dosificación varía del 0,2 al 0,6% del peso del cemento de la mezcla.

6.4 AGUA

El agua es el ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero, debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física.

El agua usada para el lavado de materiales, mezclado y curado del mortero y concreto, es agua proveniente del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, AMB, que cumple con los estándares de calidad de acuerdo a la norma NTC 3459³⁵.

³⁵ NTC 3459: Concretos. Agua para la Elaboración de Concreto.

6.5 AGREGADOS

El agregado fino utilizado en el estudio, junto con el agregado grueso para la mezcla de concreto y mortero, fue arena y triturado $\frac{3}{4}$ ".

La procedencia de la arena utilizada en esta investigación es Pescadero; este punto de extracción se encuentra a 1.6 Km. del Puente Pescadero sobre el Cañón del Río Chicamocha.

La procedencia de la grava es de una planta trituradora ubicada en Pescadero. Este material se encuentra en excelentes condiciones, totalmente limpio, libre de residuos orgánicos o contaminado con otros materiales nocivos como arcillas, etc.

Estos materiales provenientes del río Chicamocha, se identifican por su excelente calidad aluvial y comportamiento mecánico, en conformidad con los materiales usados en la planta de concretos Jorge Luis Vesga Moreno. En la foto 3 se observan las muestras de los agregados utilizados.

Foto 3. Agregado fino y agregado grueso del Río Chicamocha



6.5.1 Estudio del agregado fino y del agregado grueso.

La caracterización física de los agregados, se fijó en los requisitos tales como: contenido de materia orgánica, peso específico, absorción y vacíos, masa unitaria y granulometría. Estos ensayos fueron los de mayor importancia para el comportamiento mecánico en la mezcla de concreto.

6.5.1.1 Contenido de materia orgánica

Se empleó el método para determinar el contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros y hormigones, descrito en la NTC 127 ³⁶. Después de colocar una cantidad de arena (aproximadamente 130 cm³) en un frasco y añadir solución de hidróxido de sodio, se tapó el frasco, se agitó vigorosamente y se dejó reposar por 24 horas. Después de este período se comparó el color de la solución normal de referencia (hidróxido de sodio) con la del líquido contenido en el frasco con arena. El color obtenido fue el mismo de la muestra de referencia, lo que indica:

- **Contenido de Materia Orgánica = 0%**

6.5.1.2 Gravedad específica aparente. Se denomina a la relación entre la masa de las partículas y su volumen aparente, que incluye el volumen de los poros saturables y no saturables que hay dentro de las partículas. Por medio de este ensayo, se determina la masa de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, teniendo en cuenta los poros interiores dentro de las partículas de agregados ocupan un volumen dentro de la masa de concreto y que el agua que se aloja dentro de los poros saturables no hace parte del agua de mezcla; entendiéndose por agua de mezcla tanto el agua de hidratación del cemento como el agua libre que en combinación con el mismo, produce la pasta lubricante de los agregados.

6.5.1.3 Porosidad superficial. Es una característica muy importante para la elección de los materiales, ya que se entiende que entre más porosos es un material, menos resistencia mecánica tiene, asimismo en cuanto menor sea su absorción, es más

³⁶ NTC 127: Concretos. Método de Ensayo para Determinar las Impurezas Orgánicas en Agregado Fino para Concreto.

compacto y de mejor calidad. La absorción también resulta de gran importancia en la etapa de ajustes de las condiciones reales de los materiales, ya que por su valor es posible hacer las correcciones necesarias en la cantidad de agua que se debe incorporar en el diseño de mezcla del concreto.

El procedimiento para la determinación de la gravedad específica aparente del agregado fino se basó en la NTC 237³⁷. La porosidad saturable o superficial se midió mediante el ensayo indirecto de absorción de agua con el mismo procedimiento. Los datos obtenidos en el estudio de densidad y absorción se muestran en la tabla 13.

6.5.1.4 Masa unitaria. Se define como la conexión entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste. Si la colocación del agregado dentro del recipiente se hace por simple efecto de gravedad, desde cierta altura de caída, se denomina masa unitaria suelta. Cuando la colocación se hace en capas, posteriormente compactadas se le denomina masa unitaria compactada.

Las masas unitarias sueltas pueden relacionarse con la densidad y dar una idea del volumen natural de vacíos que produce el agregado en su acomodo, y al mismo tiempo se relaciona con aspectos de la forma y textura. Por otro lado, la masa unitaria compacta es un buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría, mejor es la acomodación de los agregados, por tanto mayor es su valor numérico, es decir a mayor masa unitaria, mayor calidad del material.

El procedimiento para la determinación de la densidad aparente y absorción del agregado grueso se basó en la NTC 176³⁸. Los datos obtenidos en el estudio de densidad y absorción se muestran en la tabla 14.

Para el estudio, se siguió el procedimiento descrito en la NTC 92³⁹. En las tablas 13 y 14 se muestran los resultados de los ensayos de gravedades específicas, peso unitario, absorción y vacíos para los agregados utilizados.

³⁷ NTC 237: Método para Determinar el Peso Específico de los Agregados Finos.

³⁸ NTC 176: Método de Ensayo para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Grueso.

³⁹ NTC 92: Método para Determinar la Masa Unitaria de los Agregados.

Tabla 13. Resultados ensayo de gravedades específicas, peso unitario, absorción y vacíos para el agregado fino

GRAVEDADES ESPECIFICAS					
Datos					
A	=	Peso del Frasco + Agua hasta la marca, en el aire	835,6	Gramos	
B	=	Peso de la Muestra en condición S.S.S en el aire	500	Gramos	
C	=	Peso de la Muestra, Frasco y Agua agregada hasta la marca, en el aire	1127,5	Gramos	
D	=	Peso de la Muestra secada al horno	487,7	Gramos	
CALCULOS					
Gravedad especifica real		$\frac{D}{(A - C + D)}$	$= \frac{487,7}{195,8}$	=	2,49
Gravedad especifica aparente		$\frac{D}{(A + B - C)}$	$= \frac{487,7}{208,1}$	=	2,34
Gravedad especifica aparente S.S.S		$\frac{B}{(A + B - C)}$	$= \frac{500}{208,1}$	=	2,40 (E)
PESO UNITARIO					
CALIBRACION DEL MEDIDOR					
P1	=	Peso del Medidor + vidrio	3110	Gramos	
P2	=	Peso del Medidor + vidrio + agua	8080	Gramos	
V	=	Volumen del medidor	$\frac{(P2 - P1)}{1000} = \frac{8080-3110}{1000}$	=	4,97 dcm3
DATOS					
Pm	=	Peso del medidor vacio	3113		
Pc	=	Peso del medidor + material S.S.S compactado	11910		
Ps	=	Peso del medidor + material S.S.S suelto.....	11160		
Peso unit. agreg.S.S.S compactado		$\frac{(Pc - Pm)}{V}$	$= \frac{11910-3113}{4,97}$	=	1770,0 Kg/m ³ (F)
Peso unit. agreg.S.S.S suelto		$\frac{(Ps - Pm)}{V}$	$= \frac{11160-3113}{4,97}$	=	1619,1 Kg/m ³
% de absorción		$\frac{(B - D) * 100}{D}$	$= \frac{(500 - 487,7) * 100}{487,7}$	=	2,52 %
% de Vacios		$\frac{(E*1000 - F)}{E*10}$	$= \frac{(2,4*1000) - 1770}{2,16 * 10}$	=	26,33 %

Tabla 14. Resultados ensayo de gravedades específicas, peso unitario, absorción y vacíos para el agregado grueso

GRAVEDADES ESPECIFICAS					
Datos					
A	=	Peso de la muestra en condicion S.S.S. en el aire	4394	Gramos	
Pa	=	Peso de la canasta sumergida en agua	1548	Gramos	
Pb	=	Peso de la canasta + muestra S.S.S. en agua	4255	Gramos	
B	=	Peso de la Muestra en agua = Pb - Pa	2707	Gramos	
C	=	Peso de la muestra secada al horno	4303		
CALCULOS					
Gravedad especifica real	$\frac{C}{(C - B)}$	=	$\frac{4303}{4302,8 - 2707}$	=	2,70
Gravedad especifica aparente	$\frac{C}{(A - B)}$	=	$\frac{4302,8}{4394 - 2707}$	=	2,78
Gravedad especifica aparente S.S.S.....	$\frac{A}{(A - B)}$	=	$\frac{4394}{4394 - 2707}$	=	2,60 (D)
PESO UNITARIO					
CALIBRACION DEL MEDIDOR					
P1	=	Peso del Medidor + vidrio	3110	Gramos	
P2	=	Peso del Medidor + vidrio + agua	8080	Gramos	
V	=	Volumen del medidor	$\frac{(P2 - P1)}{1000} = \frac{8080 - 3110}{1000}$	=	4,97 dcm3
DATOS					
Pm	=	Peso del medidor vacio	2709,2		
Pc	=	Peso del medidor + material S.S.S compactado	10860		
Ps	=	Peso del medidor + material S.S.S suelto.....	10350		
Peso unit. agreg.S.S.S compactado	$\frac{(Pc - Pm)}{V}$	=	$\frac{10860 - 2709,2}{4,97}$	=	1640,0 Kg/m3 (E)
Peso unit. agreg.S.S.S suelto	$\frac{(Ps - Pm)}{V}$	=	$\frac{10350 - 2709,2}{4,97}$	=	1537,4 Kg/m3
% de absorción	$\frac{(A - C) * 100}{C}$	=	$\frac{(4394 - 4303) * 100}{4303}$	=	2,1 %
% de Vacios	$\frac{(D * 1000 - E)}{D * 10}$	=	$\frac{(2,6 * 1000) - 1640}{2,6 * 10}$	=	37,04 %

Las masas unitarias de los agregados en estudio, arrojaron datos superiores al común de los agregados; 1400Kg/m^3 . Esto resalta la alta calidad de los mismos, provenientes del Río Chicamocha.

6.5.1.5 Granulometría. Se define como la composición en porcentaje, de los diversos tamaños de agregado en una muestra. Esta proporción se suele indicar de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan para tal medición.

Para obtener un buen concreto, es necesario que la mezcla de la arena y de la piedra logre una granulometría que proporcione masa unitaria máxima, puesto que con esta condición el volumen de los espacios entre partículas es mínimo y por consiguiente la cantidad necesaria para pegarlas y llenar los espacios entre ellas será mínimo, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y económicas.

Se denomina agregado grueso a las partículas con tamaño superior a 4.76mm (tamiz No 4) y agregado fino a las partículas con tamaño inferior a 4.76mm (tamiz No 4). Se denomina gravilla a las partículas con tamaños que oscilan entre 4.76mm (tamiz No 4) y 19.1mm (tamiz No $\frac{3}{4}$ ") y arenas con tamaños que oscilan entre 0.075mm (tamiz No 200) y 4.76mm (tamiz No 4).

Los áridos usados para la mezcla de concreto fueron extraídos del Río Chicamocha, y su gradación no cumple en su totalidad la norma NTC 174 ³⁹ para el uso en el concreto. Para continuar con el ajuste de mezcla de concreto por el método del *American Concrete Institute*, ACI, fue necesario optimizar la granulometría por el método de la *Road Note Laboratory*, RNL.

Para el ensayo de análisis granulométrico de los agregados, se usó el procedimiento descrito en la NTC 77 ⁴⁰. Los datos obtenidos de los ensayos se muestran en las tablas 15 y 17.

³⁹ NTC 174: Concretos. Especificaciones de los Agregados para Concreto.

⁴⁰ NTC 77: Método para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos.

Tabla 15. Granulometría del agregado fino

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ	TAMAÑO mm	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1/2"	12,7	7,2	0,72	0,72	99,28
3/8"	9,52	2,1	0,21	0,93	99,07
4	4,75	35,2	3,52	4,45	95,55
8	2,38	112,2	11,22	15,67	84,33
16	1,19	254	25,4	41,07	58,93
30	0,595	288,3	28,83	69,9	30,1
50	0,297	162,5	16,25	86,15	13,85
100	0,149	111,8	11,18	97,33	2,67
FONDO		26,4			
TOTAL		997,3			
				PESO MUESTRA	1000 gr

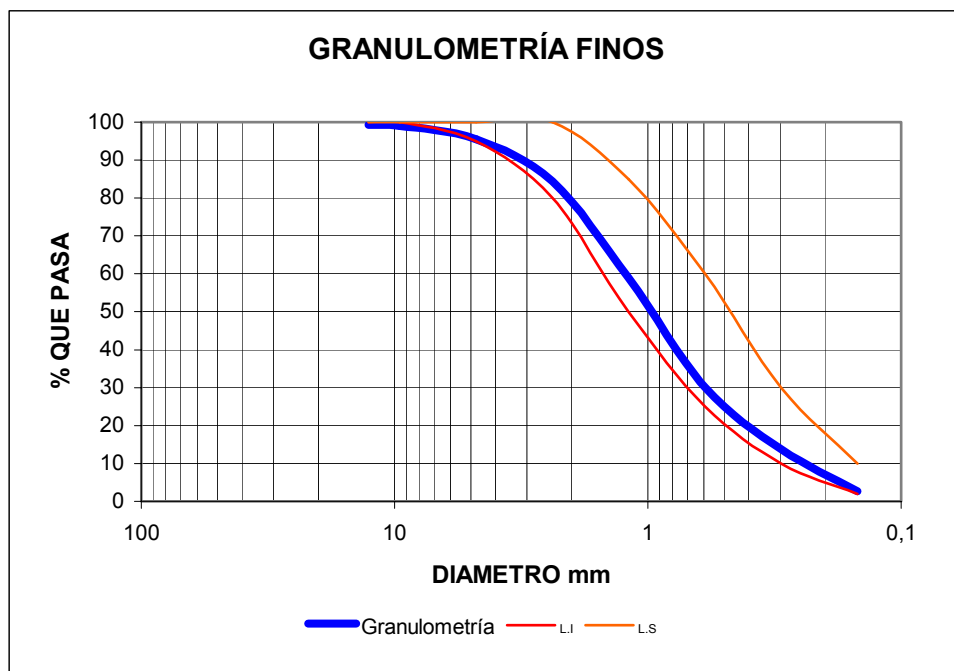
MODULO DE FINURA	3,1622
------------------	--------

La NTC 174 define los rangos en porcentajes que pasan, para los requerimientos de agregados en el concreto. Para el estudio fue necesario conocer el cumplimiento de éste requisito. Ver tablas 16 y 18. Ver gráficos 1 y 2.

Tabla 16. Requisitos de granulometría de agregado fino para concreto según NTC 174

TAMIZ		% PASA	
mm	Pulgadas	Límite Inferior	Límite Superior
9,51	3/8"	100	100
4,76	Nº 4	95	100
2,38	Nº 8	80	100
1,19	Nº 16	50	85
0,595	Nº 30	25	60
0,297	Nº 50	10	30
0,149	Nº 100	2	10

Gráfico 1. Curva granulométrica del agregado fino



La tabla 17 muestra los porcentajes retenidos en cada uno de los tamices para el agregado grueso.

Tabla 17. Granulometría del agregado grueso

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
TAMIZ	TAMAÑO mm	PESO RETENIDO	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
1 1/2"	38,1	0	0,00	0,00	100
1"	25,4	33,8	1,03	1,03	98,97
3/4"	19,05	235,2	7,14	8,16	91,84
1/2"	12,7	819,8	24,88	33,04	66,96
3/8"	9,52	594,8	18,05	51,09	48,91
No 4	4,75	1362,7	41,36	92,45	7,55
FONDO		246,9			
TOTAL		3293,2			
				PESO MUESTRA	2295,1

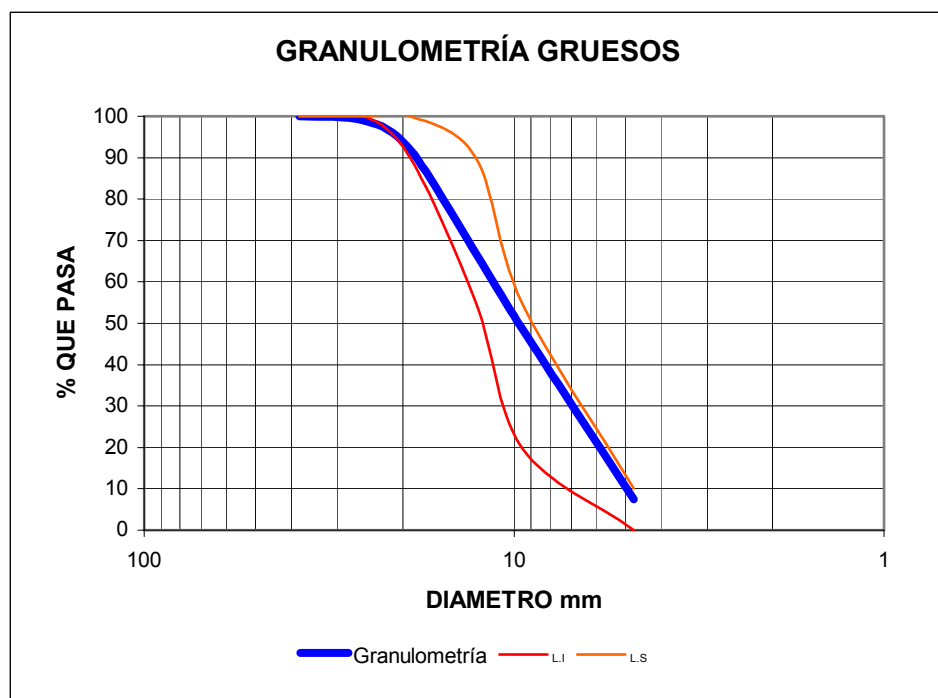
TAMAÑO MÁXIMO	3/4"
---------------	------

Tabla 18. Requisitos de granulometría de agregado grueso para concreto según NTC 174, para tamaño nominal $\frac{3}{4}$ "

TAMIZ		% PASA	
mm	Pulgadas	Límite Inferior	Límite Superior
25.4	1"	100	100
19	$\frac{3}{4}$ "	90	100
12.7	$\frac{1}{2}$ "	55	90
9.51	$\frac{3}{8}$ "	20	55
4.76	Nº 4	0	10
2.38	Nº 8	0	5

El gráfico 2 muestra la curva granulométrica del agregado grueso utilizado en la investigación.

Gráfico 2. Curva granulometría del agregado grueso



6.6 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

Con el interés de realizar un control de calidad al concreto en relación a la resistencia a la compresión, el diseño de mezcla se convierte en el paso inicial para predecir la resistencia de concreto con adición de ceniza volante e igualmente ajustar la mezcla a los requerimientos que cada obra exige.

El diseño de mezcla se fundamenta en la receta 3034 recomendada por la planta de concretos Jorge Luis Vesga Moreno para concreto premezclado ya que la investigación se basa en el comportamiento del concreto modificado utilizado por la planta en condiciones reales de operación.

La mezcla elegida para el estudio corresponde a un concreto de resistencia especificada a los 28 días $f'c$ de 3000 psi para bombeo, con resistencia requerida $f'cr$ de 3550 psi ⁴¹; en ésta se utiliza 15% de ceniza volante como reemplazo del cemento para lograr la consistencia y la trabajabilidad adecuadas de una mezcla fluida sin afectar sus características de resistencia. Por otro lado, el reemplazo de este porcentaje de cemento por cenizas volantes le reporta a la planta un beneficio económico considerable ⁴².

En la tabla 19 se dan los datos más relevantes de los materiales utilizados para el diseño de la mezcla.

⁴¹ El estándar de control de la planta de la resistencia a compresión del hormigón se considera "Muy bueno", es decir con desviaciones estándar de 28.1 a 35.2 en los resultados. Se estima que la probabilidad de tener resultados inferiores a $f'c$ es como máximo de un 8.1% (El ACI recomienda que esta probabilidad no exceda el 10%).

(ACI Comité 311. "Manual of Concrete Inspection". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1981)

⁴² El precio del cemento Rioclaro tipo III es de \$ 290 el kilo, mientras que un kilo de cenizas volantes tiene un costo de \$ 50 el kilo (correspondiente a su transporte, ya que estas no tienen costo, pues se trata de material de desecho de las plantas de energía eléctrica).

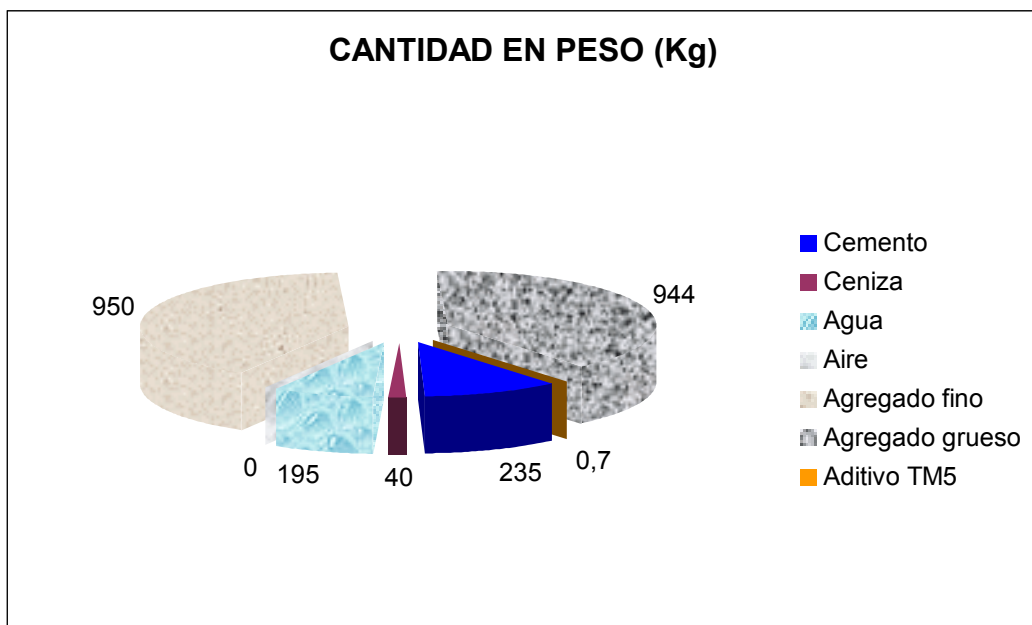
Haciendo una estimación aproximada de la producción mensual de concreto (2800 m^3) que utiliza 15% de ceniza volante como reemplazo del cemento, se tiene que la planta de concreto JLVM ha reportado un ahorro mensual de \$ 26'880.000; es decir un total de \$ 322'560.000 en su producción anual.

Tabla 19. Datos de los materiales utilizados

AGREGADO FINO	
Módulo de Finura	3,16
Densidad Aparente S.S.S (g/cm³)	2.4
Absorción (%)	2,52
Masa Unitaria suelta (kg/m³)	1619,1
Masa Unitaria Compactada (kg/m³)	1770
Pasa Tamiz N° 200 (%)	2,64
AGREGADO GRUESO	
Tamaño máximo nominal (mm)	19.05
Densidad Aparente S.S.S (g/cm³)	2,6
Absorción (%)	2,12
Masa Unitaria suelta (kg/m³)	1537.4
Masa Unitaria Compactada (kg/m³)	1640
Pasa Tamiz N° 200 (%)	7,5
CEMENTO	
Cemento	Portland
Tipo	III
Marca	Rioclaro
Peso Específico (g/cm³)	3,1
Finura Blaine (cm²/g)	5163
CENIZA	
Peso Específico (g/cm³)	2.033
Finura Blaine (cm²/g)	6836

En el gráfico 3 se muestra la dosificación en peso de los materiales utilizados en la receta 3034 de la planta de concreto JLVM.

Gráfico 3. Receta para 1 m³ de concreto recomendada por la planta de concretos



Finalmente, con las cantidades en peso y las densidades aparentes de los componentes de la mezcla, encontramos los volúmenes de cada material para 1 m³ de concreto. Ver tabla 20.

Tabla 20. Proporciones de los materiales de la mezcla en peso y volumen para 1 m³ de concreto

MATERIAL	CN CANTIDAD Kg	CM CANTIDAD Kg	DENSIDAD Kg/m ³	VOLUMEN m ³
Cemento	275	235	3100	0.0758
Ceniza	-	40	2033	0.0196
Agua	195	195	1000	0.1950
Aire	-	-	-	0.0200
Agregado fino	950	950	2160	0,4390
Agregado grueso	944	944	2600	0.3630
Aditivo TM5	0,7	0,7	1200	0,0006
TOTAL	2369.7	2369.7		1,0

Mediante el ensayo del cono de Abrams se comprobó la consistencia de la mezcla utilizada para la fundición de los especímenes a ser analizados, dando como resultado un asentamiento de 8" (20.32 cm) para la mezcla con adición de ceniza volante, es decir una mezcla de buena fluidez que satisface las exigencias de concreto fluido para obras donde se requiera bombeo (ver foto 4). Para la mezcla sin adición se obtuvo un asentamiento de 4.5" (11.43 cm), correspondiente a una consistencia semi seca, difícil de compactar.

Foto 4. Asentamiento de la mezcla de concreto modificado



7 PRUEBAS DE LABORATORIO

El desarrollo de la fase experimental de esta investigación comprende diversos ensayos (Ver Tabla 21) que permiten la caracterización del concreto modificado mediante la adición de cenizas volantes lo más completa posible, frente a su comportamiento físico mecánico, y físico químico.

Tabla 21. Ensayos realizados durante la investigación

PRUEBAS DE LABORATORIO	
FÍSICO-MECANICAS	COMPRESION
	TRACCION INDIRECTA
	FLEXION
	POROSIDAD
	PERMEABILIDAD
	ABSORCION CAPILAR
FÍSICO-QUIMICAS	DIFUSION ANIÓN CLORURO
	SOLIDEZ A SULFATOS
	CARBONATACIÓN

A continuación se da una breve explicación de las bases aceptadas para cada ensayo y el procedimiento seguido para la evaluación de las muestras.

7.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Este ensayo mide el comportamiento del concreto de cemento hidráulico, bajo cargas de compresión.

Se emplearon probetas de forma cilíndrica de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura cumpliendo la norma que dicta una relación de 1:2 entre el diámetro y la altura, las cuales fueron fundidas conforme a la norma NTC 1377 ⁴³. En los procedimientos de mezclado, preparación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la prensa digital de la Planta de Concreto (Foto 5), dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos conforme a la norma NTC 673 ⁴⁴; en la evaluación de los resultados se debieron tomar en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto a los cilindros defectuosos y sus correspondientes valores de aceptación.

Foto 5. Máquina de carga ensayo a compresión



⁴³ NTC 1377: Hormigón. Elaboración y curado de muestras en el laboratorio.

⁴⁴ NTC 673: Ensayo de resistencia y compresión de cilindros normales de hormigón.

Se elaboraron 5 muestras para cada tipo de concreto (normal y modificado) por cada edad, para un total de 110 cilindros.

La resistencia a compresión de los morteros se evaluó para 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 75, 90, 120 y 150 días, para determinar la ganancia de resistencia a los 28 días (edad en que debe cumplir con los requerimientos de resistencia), la curva de comportamiento a edades tardías de hasta 150 días, la resistencia a cada edad como aporte en porcentaje de la resistencia a los 28 días y el comportamiento comparativo entre los dos tipos de concreto.

En la foto 6 se muestra un cilindro listo para el ensayo a compresión

Foto 6. Montaje de ensayo a compresión



7.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA

Este ensayo determina el comportamiento del concreto de cemento hidráulico, bajo cargas de tensión por el método de compresión diametral.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la prensa hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil (Foto 7), dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos conforme a la norma NTC 722 ⁴⁵.

Foto 7. Máquina de carga ensayo a tensión indirecta



⁴⁵ NTC 722: Ensayo de tracción indirecta de cilindros normales de hormigón.

Las probetas utilizadas en este ensayo se fundieron de acuerdo a la norma NTC 1377. Fueron probetas cilíndricas de 10 cms de diámetro y 20 cms de altura, se elaboraron 5 muestras para cada tipo de concreto por cada edad (las edades son las mismas del ensayo a compresión). La máquina de ensayo cumple con los requerimientos establecidos en la norma NTC 722 y se debe verificar que las placas de apoyo de la maquina para colocar las probetas sean de mayor dimensión que la longitud de los cilindros; en nuestro caso se cumple este parámetro; para el efecto de ensayo a la tracción indirecta se deben tener en cuenta la colocación de dos listones de apoyo que en este caso fueron de madera laminada, obtenidos en la carpintería de la U.I.S., estos listones deben estar libres de imperfecciones, tener un espesor de 3 mm, 25 mm de ancho y de largo ligeramente mayor que la longitud de la probeta. Los listones de apoyo se deben colocar entre el cilindro y las placas superior e inferior de la máquina de ensayo. Los listones de madera deben usarse solamente una vez. (Ver foto 8)

Las probetas se deben ensayar en estado húmedo tan pronto sea posible después de sacadas de la pila de curado. En los procedimientos de mezclado, preparación, llenado, compactación y almacenamiento de las probetas se respetaron cuidadosamente los requerimientos de la norma.

Foto 8. Montaje de ensayo a tracción



7.3 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXION

Esta prueba determina la resistencia a la tensión por flexión en especímenes prismáticos (vigas) de un concreto de cemento hidráulico.

Las probetas empleadas son viguetas de una longitud de 50 cm y una sección cuadrada de 15 cm, las cuales fueron fundidas y ensayadas conforme a la norma ASTM C293⁴⁶.

El procedimiento de ensayo de las probetas se realizó en la máquina universal de ensayos TREBEL (Foto 9), dentro de los rangos de velocidad y carga permitidos

Foto 9. Máquina universal de ensayos Trebel



⁴⁶ ASTM C 293 : Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam UIT Center-Point Loading). 1979

El ensayo consiste esencialmente en colocar la viga en posición horizontal, apoyada libremente en sus extremos, y transmitirle a todo lo ancho de la viga una carga en el centro del claro (Ver foto 10), tomando precauciones para que tanto las reacciones en los apoyos como las cargas en los tercios actúen verticalmente; en la evaluación de los resultados se debieron tomar en cuenta las indicaciones complementarias de la misma norma en cuanto a las probetas defectuosas y sus correspondientes valores de aceptación, buscando siempre que la cara mejor moldeada se colocará directamente sobre los apoyos (esta observación se realiza debido a que en el momento del desencofrado, algunas puntas de la vigueta pueden sufrir daños).

Para el ensayo a flexión se fundieron únicamente 5 especímenes por cada concreto estudiado, para un tiempo de curado de 28 días; lo anterior se debió a la limitación en el número de moldes existentes y la dificultad para transportar las viguetas (por su gran peso y volumen). Se realizaron un total de 10 viguetas.

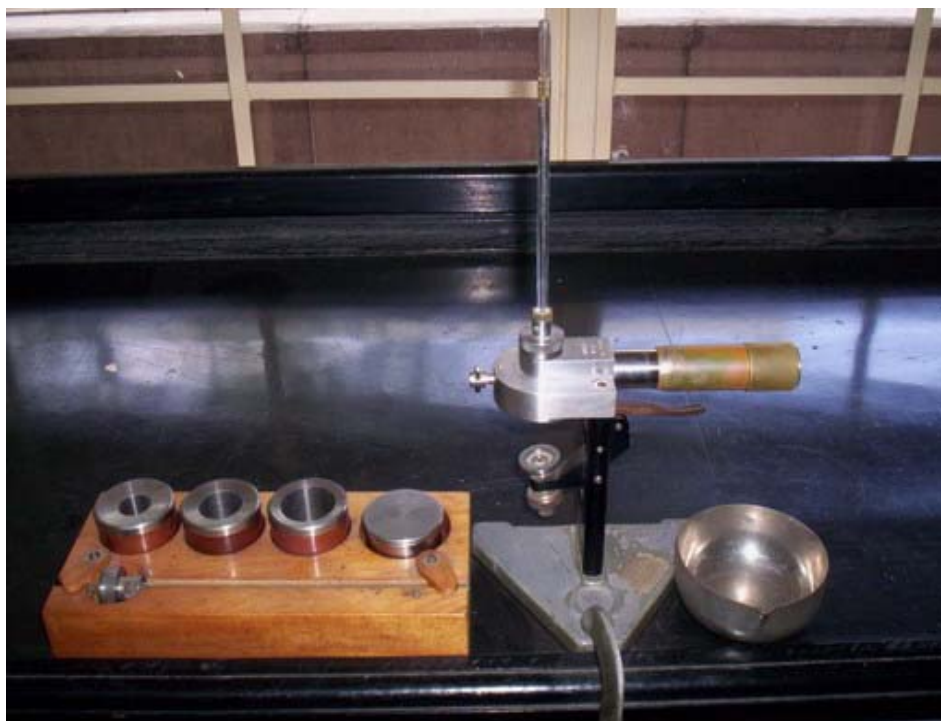
Foto 10. Montaje de ensayo a flexión



7.4 ENSAYO DE POROSIDAD

Esta prueba permite determinar la porosidad de muestras de concretos empleando el Porosímetro de campo Ruska (Foto 11), máquina que se encuentra en el Laboratorio de Petróleos que se encuentra en la Escuela de Petróleos de la U.I.S.

Foto 11. Porosímetro de campo Ruska



Principio del Método:

Esta práctica se basa en la ley de Boyle para determinar la porosidad. Las medidas obtenidas son valores de porosidad efectiva (es decir la porosidad para poros interconectados). La determinación de la porosidad consiste en la medida del volumen de sólidos o granos de la muestra seguida por una medida del volumen total de la muestra. Los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Porosímetro de campo Ruska, frasco con mercurio, picnómetro y vasija metálica, guantes profilácticos y muestras de concreto previamente cortadas (de probetas cilíndricas), preparadas y reseñadas.

Procedimiento Experimental:

Se fabricaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cms de alto y se sometieron a un curado de 28 días por cada tipo de concreto. De cada cilindro se cortaron tres probetas cúbicas de 2 cm de lado, previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta.

- Quitar la copa del manómetro y llenar el pozo con unas pocas gotas de mercurio triple destilado y ajustar nuevamente el manómetro.
- Chequear que el Porosímetro esté en buenas condiciones de operación (que no haya fugas en el sistema al colocar presión).
- Seleccionar la copa más pequeña que pueda alojar la muestra y ajustarla vacía al Porosímetro.
- Con la válvula de descarga abierta llevar el pistón un poco más atrás de la posición de operación. Cada copa tiene su propia posición de inicio según sea: copa pequeña: 150, copa media: 250, copa grande: 400.
- Llevar el mecanismo del pistón hacia delante hasta su posición de inicio y no retroceder para evitar el *backlash*.
- Cerrar la válvula de descarga y llevar el pistón hacia delante hasta que la lectura de la manga micrométrica sea cero (0). El nivel de mercurio alcanzado es tomado como referencia: lleve la marca del nivel hasta este punto.
- Abrir la válvula de alivio suavemente para evitar que el mercurio caiga abruptamente y se salga del manómetro.
- Colocar el corazón o muestra dentro de la copa ajustada a cero y anclarla al bloque del *manifold*.

- Con la válvula de alivio abierta llevar el pistón hacia atrás hasta su posición de inicio correspondiente, sin retroceder. (Todas las lecturas durante la operación se deben hacer con el pistón moviéndose hacia delante para evitar el efecto backlash y el ajuste a cero debe repetirse para cada copa y ocasionalmente durante la operación del instrumento).
- Cerrar la válvula de alivio y llevar el pistón suavemente hacia delante hasta alcanzar el nivel de mercurio de referencia anterior, se debe registrar la medida del micrómetro como R_{core} que es proporcional al volumen de sólidos de la muestra. Abrir la válvula de alivio y retirar la copa del manifold.
- Colocar el picnómetro dentro de la vasija y llenarlo de mercurio. Luego se introduce la muestra dentro del picnómetro y se mide el volumen bruto de la muestra. El volumen de mercurio recogido de la vasija (desalojado del picnómetro) se lleva a la respectiva copa usada para obtener el R_{core} y se ajusta la copa al bloque del manifold.
- Se repiten los pasos anteriores y se obtiene un estimativo proporcional al volumen de mercurio en la copa, el volumen bruto de la muestra se designa como R_{Hg} ⁴⁷.

⁴⁷ ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS . "MANUAL DE ROCAS Y FLUIDOS". UIS.

7.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

Este ensayo permite determinar la permeabilidad de concretos, mediante la utilización del Permeámetro de Gas Ruska (Foto 12).

Foto 12. Permeámetro de gas Ruska



Principio del Método:

La permeabilidad al gas de una muestra de concreto se determina con base en la ley de Darcy (flujo de fluidos), midiendo en un rotámetro la tasa de flujo de un gas que se hace pasar a través de la muestra bajo un gradiente de presión. El gas a utilizar es de viscosidad conocida.

El valor de permeabilidad que se determina en este equipo es de permeabilidad absoluta. La permeabilidad se calcula utilizando el caudal de gas que pasa a través del núcleo, las dimensiones del mismo, el gradiente de presión y la viscosidad del gas.

Los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Permeámetro de gas Ruska con todos sus accesorios y muestras de concreto previamente cortadas, preparadas y reseñadas.

Procedimiento Experimental:

Se fabricaron 3 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cms de alto y se sometieron a un curado de 28 días por cada tipo de concreto. De cada cilindro se cortaron tres probetas cúbicas de 2 cm de lado, previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta (ver foto 13).

- ◆ Colocar la muestra en el receptor de caucho adecuado (el más preciso), insertar en la copa y ajustar en el Permeámetro.
- ◆ Se debe comenzar por probar la posición de “*large*” de la válvula selectora del *flowmeter* y fijar una presión de 0.25 atmósferas en el manómetro. Si el flotador se encuentra en el rango de lectura entre 20 y 140 divisiones, tomar la lectura estimando el centro del flotador suspendido; de lo contrario probar la posición “*medium*” y fijar una presión de 0.50 atmósferas, verificar si se puede tomar la lectura, de lo contrario probar la siguiente posición “*small*”, fijando para esta una presión de 1 atmósfera y tomar la lectura.
- ◆ Cerrar la válvula reguladora y retirar la muestra ⁴⁸✍.

⁴⁸✍ ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS. op.sit. p. 75

7.6 ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

Este ensayo permite medir la cinética de absorción de agua en morteros y hormigones.

El proceso de absorción capilar se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida y transmitida por los poros capilares del hormigón cuando éste se encuentra en contacto con el agua⁴⁹.

Principio del Método:

El método aplicado para evaluar las características de absorción en concretos está basado en la normativa Sueca, mediante Fagerlound quien describe el proceso de absorción de agua en morteros y hormigones a través de tres coeficientes: m (resistencia a la penetración del agua), k (coeficiente de absorción capilar) y ε_e (porosidad efectiva).

El ensayo se debe realizar sobre probetas de espesor menores a $H = 50\text{mm}$ (20 - 30 mm), después de un preacondicionamiento para reducir la humedad inicial.

Independientemente de la forma de succión capilar, horizontal o vertical, se define la relación entre la profundidad de penetración, z (m), y el tiempo t (seg), como:

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (\text{Ecuación 7.1})$$

donde m representa la resistencia a la penetración del agua, s/m^2 . El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la prueba, es decir cuando z corresponde al espesor de la probeta.

La resistencia a la penetración del agua, m , se considera que es función de la estructura del poro más no de la porosidad total. Así con poros más finos, la penetración del agua es más lenta y “ m ” será mayor.

⁴⁹ MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. “Contribución al estudio analítico y físico químico del sistema cemento-puzolana y escorias siderúrgicas-cloruros y agua”. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, España. Universidad del Valle, Colombia. Madrid. 1996

El coeficiente de absorción capilar ,k, en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, está dado por:

$$k = \frac{Q_n - Q_o}{A} * \frac{1}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ecuación 7.2})$$

7.6.1.1.1.1.1

El coeficiente de absorción capilar, k, es función de la porosidad total, del estado de humedad inicial y de la estructura de los poros.

La porosidad efectiva , ε_e , se puede calcular como:

$$\varepsilon_e = (k \sqrt{m}) / 1000 \quad (\text{Ecuación 7.3})$$

Con la anterior información la absorptividad (absorción capilar), S en $(\text{mm/h}^{1/2})$ ó $(\text{m/s}^{1/2})$, puede calcularse como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{Ecuación 7.4})$$

Procedimiento Experimental:

Se fabricaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y se sometieron a un curado de 28 días. De cada cilindro se cortó una probeta de espesor (3 cm), previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta.

- ◆ Cada probeta fue sometida a un preacondicionamiento inicial de secado a 105°C durante 6 horas, posteriormente se sellaron las caras laterales de cada probeta mediante la aplicación de un producto impermeabilizante (en este caso se utilizó la colocación de una capa de parafina); finalmente se secaron las muestras a temperatura ambiente durante 48 horas, antes de registrar su peso inicial.
- ◆ El método de ensayo consiste en colocar las muestras sobre una esponja, de aproximadamente 5 mm de espesor, saturada de agua, que en un recipiente cubierto para evitar la evaporación. El nivel del agua deberá estar 3 mm. por encima de la cara

inferior de la probeta y se registró el peso a intervalos de 5, 10, 15, 30 (minutos), 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 168 horas. (Ver foto 14)

Foto 14. Montaje ensayo de absorción capilar



7.7 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y PERMEABILIDAD AL ANIÓN CLORURO

Esta prueba nos permite evaluar el coeficiente de difusión y la permeabilidad al anión cloruro en pastas de morteros y concretos, parámetros que determinan la durabilidad de las estructuras que pueden estar sometidas a agentes corrosivos y que deben ser estudiados especialmente para el diseño y construcción de éstas.

El método de ensayo en celda de difusión manual ⁵⁰ es considerado como el método más apropiado para estudiar a escala de laboratorio la velocidad de difusión del ión cloruro; pero presenta como desventaja el excesivo tiempo de ensayo, que puede tomar hasta años según el material evaluado.

Esta técnica consiste en colocar un disco del material que separa un sistema de doble celda, que contiene en los dos compartimentos una solución de prueba (o solución simulada en poro de concreto), recomendándose la utilización de una solución saturada de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 ; una de las semiceldas contiene además de la solución de prueba, la fuente de cloruros (NaCl).

MÉTODO DEL ENSAYO MODIFICADO DE PERMEACIÓN A CLORUROS EN MATERIALES CEMENTÍTICOS

En 1983 se adoptó como norma AASHTO T 277 ⁵¹, el uso de voltaje para acelerar el transporte de los iones cloruro en la celda de difusión; posteriormente esta técnica fue aceptada como norma ASTM C 1202 ⁵².

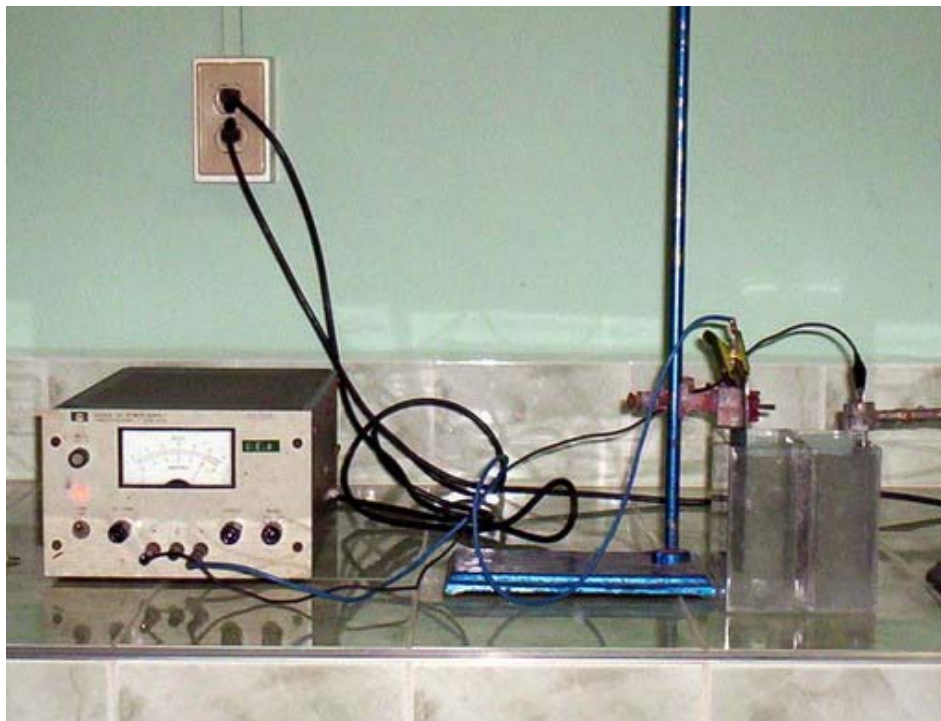
La prueba rápida de permeación a cloruros, mediante la aplicación de un campo eléctrico externo, consiste en una pequeña celda de difusión a la que se suministra una diferencia de potencial constante de 12 voltios a través de un disco de concreto y se registra la corriente en función del tiempo, al igual que la concentración de cloruros mediante titulación química (ver foto 15).

⁵⁰ QUINTERO P., Francisco J. "Corrosión del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto". Empresa colombiana de Petróleos. Instituto Colombiano del Petróleo, División de tecnologías Complementarias. Piedecuesta, Santander. 1997

⁵¹ AASHTO T 277: Standard Method of test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete.

⁵² ASTM C 1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

Foto 15. Montaje prueba rápida de permeación a cloruros



Principio del Método:

El transporte de los iones a través del concreto depende del tipo de mecanismo: sí es por difusión o conducción (migración), según las bases de la electroquímica.

La *difusión* está sujeta a un gradiente de concentración y puede describirse mediante las leyes de Fick de la siguiente manera:

A condición de estado estacionario la primera ley de Fick:

$$J = -D \frac{dC}{dX} \quad (\text{Ecuación 7.5})$$

donde J representa el Flujo iónico, moles/m²s; D la difusividad del ión, m²/s; dC/dX el gradiente de concentración, mol/m³ m, pudiendo asumirse un coeficiente de actividad de 1

A condición de estado no estacionario, tenemos la segunda ley de Fick:

$$\frac{dC}{dt} = D \left(\frac{d^2C}{dX^2} \right) \quad (\text{Ecuación 7.6})$$

donde t es el tiempo en segundos. Esta segunda condición se ajusta en mayor grado a la realidad práctica del concreto en obra.

La *conducción* se refiere a la movilidad de los iones bajo un campo eléctrico, en cuyo caso el flujo puede determinarse según:

$$J = C \mu \Delta E \quad (\text{Ecuación 7.7})$$

siendo μ la movilidad del ión, m²/ V.s; y E el gradiente de voltaje, V/m. La movilidad puede expresarse como:

$$\mu = zFD/RT \quad (\text{Ecuación 7.8})$$

donde z es la carga del ion (-1 para el anión cloruro), eq/mol; F es la constante de Faraday (23063 cal/V.eq); R es la constante de los gases (1.9872 cal/ mol°K) y T es la temperatura en °K.

La ecuación de Nernst-Planck combina dos conceptos para calcular el flujo iónico como son la acción del campo eléctrico y el gradiente de concentración, y se expresa como:

$$J = D \frac{zFE(x)C(x)}{RT} - D \frac{dC}{dX} \quad (\text{Ecuación 7.9})$$

donde E(x) y C(x) representan el potencial y la concentración respectivamente, como función de x.

Un ensayo en celda manual de difusión, es decir sin aplicación de voltaje y con espesor reducido, podrá considerarse como una prueba de difusión en condición de estado estacionario.

Al aplicar voltaje se incrementa la conducción, y si las probetas son de espesor reducido (menor de 10 mm.) el estado estacionario se alcanzará relativamente rápido. En este caso podemos aplicar la ecuación anterior de Nernst-Planck asumiendo que la difusión es prácticamente despreciable; por lo tanto, el coeficiente de difusión (D_{eff}) se puede calcular como:

$$D_{\text{eff}} = \frac{JRTL}{zFC \Delta E \gamma} \quad (\text{Ecuación 7.10})$$

Ecuación en la cual se expresa $E(x)$ como $\Delta E / L$, donde L representa el espesor del espécimen (cm), γ es el coeficiente de actividad que se asume como 1.0.

Para el desarrollo del ensayo, los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Fuente de voltaje de 12 voltios, multímetro digital, celda de difusión de acrílico de dimensiones 12x12x11 cm., electrodos de acero inoxidable, cables y conexiones, solución saturada de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, cloruro de sodio $[\text{NaCl}]$, dicromato de potasio, nitrato de plata.

Procedimiento Experimental:

- ◆ Se utilizaron probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y se sometieron a un curado de 28 días. De cada cilindro se cortó una probeta de aproximadamente 1 cm de espesor, previo descarte de la parte superior e inferior de la probeta. Se sellaron con parafina las zonas no expuestas directamente a las disoluciones. Se ensayaron un total de 6 muestras (3 por cada tipo de concreto).
- ◆ Para el montaje de las celdas de difusión, se utilizaron disoluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (1.85 g/L) de elevada alcalinidad, y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de igual concentración + NaCl al 3%, se llenaron las celdas por encima del borde superior de la muestra; se montaron los

electrodos de acero inoxidable y se aplicó una diferencia de potencial eléctrico constante de 12 Voltios. Se mantuvo el sistema a temperatura ambiente a lo largo de las 72 horas que duró el ensayo.

- ◆ Se tomó una parte de alícuota, del compartimiento de Ca(OH)_2 , para análisis del contenido del anión cloruro, mediante titulación química (ver foto 16). El volumen en la celda se mantuvo constante, a lo largo del ensayo, mediante la reposición permanente del volumen consumido de la disolución.

Foto 16. Soluciones utilizadas prueba de difusión de cloruros y montaje titulación



7.8 ENSAYO DE SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS

Este ensayo permite determinar la resistencia a la desintegración de los agregados y la solidez ante cambios de temperatura, por la acción de soluciones saturadas de sulfatos (de sodio o de magnesio), simulando el probable desgaste que pueden presentar las estructuras de morteros y hormigones en presencia de diferentes condiciones ambientales y ataques físico químicos. Norma INVÍAS 713 ⁵³, ASTM C88 ⁵⁴.

Los equipos, elementos y accesorios empleados fueron: Horno, balanza con aproximación de 0.1g., mallas de material sintético, sulfato de sodio.

Procedimiento Experimental:

Las probetas utilizadas fueron cilindros de 10 cm de diámetro y 10 cms de altura cortadas de los cilindros de 20 cms de altura descartando las caras superior e inferior, curados durante un período de 28 días. Por cada tipo de concreto se tomaron 3 especímenes, para un total de 6 probetas.

- La solución saturada de sulfato de sodio se prepara disolviendo 350 g. de sal anhidra por litro de agua y añadiéndola a intervalos de tiempo de tal manera que permitan diluir la cantidad de sulfato agregada al agua, sin quedar cristales en la solución. Se debe dejar en reposo por 48 horas.
- Las muestras se introducen individualmente dentro de una malla sintética (ver foto 17), se marcan y se sumergen en la solución de sulfato de sodio, durante un período no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas. El recipiente se debe cubrir para evitar la evaporación y la contaminación de sustancias externas

⁵³ INVÍAS E 713 : Solubilidad de Materiales Asfálticos en tricloroetileno.

⁵⁴ ASTM C 88 : Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.

Foto 17. Probeta ensayo de solidez a sulfatos para inmersión



- Después del período de inmersión se sacan las muestras de la solución, se dejan escurrir durante 15 ± 5 minutos y se introducen en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener peso constante. Se toma el nuevo peso.
- Se sumergen de nuevo las muestras en la solución y se repite el procedimiento durante 7 días. Al finalizar los ciclos se deben lavar las probetas para retirar los residuos de sulfatos y se deben llevar al horno hasta obtener peso constante.

7.9 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE Y LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN

Este ensayo permite determinar el coeficiente de carbonatación en una muestra de concreto mediante la aceleración artificial del proceso de corrosión por carbonatación mediante el aumento de la concentración de Carbono en una atmósfera controlada.

Principio del Método:

Los ensayos de carbonatación acelerados se basan en la aplicación de la ecuación (7.11), que relaciona la profundidad de penetración de la carbonatación X_c con el tiempo (t). Si se expone un determinado espécimen de concreto a la atmósfera natural, donde la concentración de CO_2 en promedio es 0,035% molar, se obtendrá un tiempo $t_{x(0,035\%)}$ necesario para alcanzar la penetración una profundidad x , si el mismo espécimen se expone a una concentración exterior de CO_2 mucho mayor (por ejemplo 4% molar), el tiempo necesario para alcanzar esta misma profundidad de carbonatación será 100 veces menor que el anterior ($t_{x(4\%)} = 100 \cdot t_{x(0,035\%)}$), tal como lo predice la ecuación (7.19). Investigaciones realizadas usando un ambiente a 4% y 7% de CO_2 ⁵⁵, concluyeron que aun a estas altas concentraciones la profundidad de carbonatación mantiene su relación proporcional con la raíz cuadrada del tiempo. Sin embargo, otras investigaciones realizadas con altas concentraciones de CO_2 , advierten que se deben tomar precauciones cuando se extrapolen los resultados de pruebas aceleradas a ambientes atmosféricos normales ⁵⁶.

⁵⁵ OHGA, H. and NAGATAKI, S. "Prediction of Carbonation Depth of Concrete with Fly Ash". Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-114. American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1998

⁵⁶ DE CEUKELAIRE, L., and VAN NIEUWENBURG, D. "Accelerated Carbonation of a Blast-Furnace Cement Concrete." Cement and Concrete Research. Vol. 23 . 1993

Modelo matemático del proceso de carbonatación

La mayoría de las ecuaciones que describen el progreso de la carbonatación del concreto como función del tiempo, están basadas en la primera ley de Fick⁵⁷, la cual puede ser usada para describir cualquier proceso de naturaleza difusional:

$$X_c = k \cdot t^{1/2} \quad (\text{Ecuación 7.11})$$

Donde x_c es la profundidad de carbonatación, t es el tiempo y k , está definido como el coeficiente de carbonatación:

$$k = \left(\frac{2D \cdot C_s}{M} \right) \quad (\text{Ecuación 7.12})$$

donde D es el coeficiente de difusión efectiva del CO_2 , C_s es la concentración de CO_2 sobre la superficie externa del concreto (en moles por unidad de volumen de aire), y M es el número de moles de CO_2 necesarios para carbonatar un volumen unitario de concreto. Este resultado indica (bajo las suposiciones realizadas anteriormente), que la distancia del frente carbonatado x_c es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo.

Cuando un elemento es sometido primero a un ambiente de una concentración C_{s1} , y luego esta concentración cambia a C_{s2} , la ecuación 7.11 predice:

$$(X_{c2}^2 - X_{c1}^2) = k^2(t_2 - t_1) \quad (\text{Ecuación 7.13})$$

Esta ecuación puede utilizarse como primera aproximación para estimar el nuevo coeficiente de carbonatación de datos experimentales, simplemente como la relación de diferencias de profundidad a tiempo:

⁵⁷ CYTED – DURAR. "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de la Corrosión en Estructuras de Hormigón armado". Reporte Final. Maracaibo. 1997

$$k = \frac{(X_{c2}^2 - X_{c1}^2)^{1/2}}{T_c^{1/2}} \quad (\text{Ecuación 7.14})$$

donde: $(X_{c2}^2 - X_{c1}^2)$ es la distancia alcanzada por el frente carbonatado entre t_1 y t_2 , y $T_c = (t_2 - t_1)$ es la duración del periodo de estabilización.

Con este valor inicial de k , se utiliza la ecuación 7.11 para estimar el tiempo necesario (t_1) para que el frente carbonatado alcance la posición de la barra dentro del concreto (x_c), resultando:

$$t_1 = \frac{X_c^2}{k^2} \quad (\text{Ecuación 7.15})$$

Este tiempo de exposición puede ser correlacionado con el cambio en la concentración de CO_2 en el medio, aplicando las ecuaciones 7.12 y 7.14 como sigue:

Para una concentración inicial C_{s1} :

$$T_1 = k_1(X_c^2 - X_0^2) \quad (\text{Ecuación 7.16})$$

donde $k_1=1/k^2$, y para la concentración C_{s2} :

$$T_2 = k_2(X_c^2 - X_0^2) \quad (\text{Ecuación 7.17})$$

donde $k_2=1/k^2$. Resolviendo para la misma profundidad :

$$(X_c^2 - X_0^2) = \frac{T_1}{k_1} = \frac{T_2}{k_2} \quad (\text{Ecuación 7.18})$$

Sustituyendo k por la ecuación 7.12 y simplificando:

$$T_1 = T_2 \frac{C_{s2}}{C_{s1}} \quad (\text{Ecuación 7.19})$$

lo cual quiere decir, que el tiempo de exposición es inversamente proporcional a la relación de concentración de CO₂ en ambos ambientes.

Procedimiento Experimental:

Preparación de los especímenes para su evaluación: Para las medidas de profundidad de carbonatación se prepararan probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura.

Periodos de prueba: Cada probeta elaborada para ensayos de carbonatación debe pasar por períodos específicos de exposición que dependerán de los materiales utilizados en su elaboración en función de los objetivos de la investigación.

- **Proceso de Curado:** En este proceso se pierde agua tanto por las reacciones de hidratación de la pasta del cemento como por evaporación, esta agua debe ser reemplazada inmediatamente mediante un rocío continuo. La extensión de este periodo varía dependiendo del objetivo para el cual se elaboró la probeta, pero se recomienda sin embargo para estudios de carbonatación un periodo de curado de 3 a 7 días ⁵⁸.
- **Exposición Cámara:** El periodo de exposición es el tiempo necesario (T) para que el frente de carbonatación alcance una profundidad lineal (x_c), a una mayor concentración de CO₂ en el medio (C_s = 4% molar en este caso). Este periodo es variable para cada mezcla de concreto y dependerá de la constante de carbonatación, según la ecuación 7.14, sin embargo, por anteriores investigaciones se sabe que en condiciones de humedades relativas indicadas y altas concentraciones de CO_a se presentarán profundidades de carbonatación apreciables con períodos de exposición menores a 7 días ⁵⁹. Al finalizar el periodo de exposición acelerada, se cierra la alimentación de CO₂ permitiendo a

⁵⁸ FDOT "Section 400—Concrete Structures". Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction. Tallahassee. 1996

⁵⁹ LINARES, Douglas y SÁNCHEZ Miguel. Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada . Centro de estudios de Corrosión. Universidad del Zulia. 2002

la cámara alcanzar condiciones normales de concentración. La humedad relativa en la cámara de aceleración es del 50%⁶⁰.

Velocidad de carbonatación: Las primeras medidas de la profundidad de carbonatación se realizan el día 1, tomando como resultado el promedio de por lo menos diez mediciones en diferentes posiciones angulares con ayuda de un calibrador de precisión, sucesivas mediciones se realizan hasta alcanzar los 7 días de edad. Con estos datos se procede a calcular el coeficiente de carbonatación (k) para la concentración de 4% Molar, el cual se sabe es 10 veces mayor que el coeficiente k⁶¹ para la concentración 0.04% Molar. Por último tomando en cuenta que el recubrimiento mínimo debe ser de 30 mm⁶² se puede predecir, mediante la ecuación 7.15, el tiempo necesario para que la carbonatación llegue a esa profundidad para la concentración normal de Dióxido de Carbono en la atmósfera (0.04% Molar).

Parámetros aceptados: Si se supone una vida útil igual al tiempo t consumido por los agentes corrosivos para llegar a la profundidad del acero de refuerzo, tendremos un tiempo t de n años para que el frente carbonatado llegue a la profundidad de refuerzo sugerida de 30 mm, siendo posible determinar el mínimo valor de k para esta condición:

$$k \ll \frac{30}{\sqrt{n}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}^{1/2}} \right] \quad (\text{Ecuación 7.20})$$

⁶⁰ En condiciones de baja humedad el hidróxido de calcio reacciona más lentamente con el CO₂, tal vez debido a que no existe en el concreto suficiente agua para que se forme ácido carbónico, y en condiciones de alta humedad el proceso también se hace más lento, debido a la presencia de agua libre en el interior de los poros de concreto, ya que la velocidad de difusión del CO₂ a través del agua es menor que a través del aire.

⁶¹ Ya que C_(0.4%) es 100 veces mayor que C_(0.04%) y el tiempo t_(0.4%) es 100 veces menor que t_(0.04%) según la ec. 7.19, tenemos:

$$k_{(0.4\%)} = \frac{X_{(0.4\%)}}{t_{(0.4\%)}^{1/2}} = \frac{100 \cdot X_{(0.04\%)}}{(100 \cdot t_{(0.04\%)})^{1/2}} = \frac{10 \cdot X_{(0.04\%)}}{t_{(0.04\%)}^{1/2}} = 10 \cdot k_{(0.04\%)}$$

⁶² GUIRGUI, S. op.sit. p. 36

8 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los datos medidos en cada uno de los laboratorios, serán presentados como anexos en el presente libro, esto debido al gran volumen que ocupan y a que su importancia radica en su función de consulta para las personas interesadas, por lo tanto en este capítulo trataremos únicamente los resultados como tal, es decir ya tabulados, representados y desarrollados, y sus respectivos análisis.

8.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN

Para el análisis de la resistencia a compresión en concretos con adición de ceniza volante, se fabricaron 5 probetas por cada tipo de concreto y para cada período de curado: 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 75, 90, 120 y 150 días, para un total de 110 probetas ensayadas. (Ver foto 18)

Foto 18. Probetas para ensayo a Compresión



Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de resistencia ultima (Kg/cm^2), calculándolos de la ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (\text{Ecuación 8.1})$$

donde, σ es la resistencia ultima (Kg/cm^2), F es la fuerza aplicada (Kgf) y A es el área de la probeta en estudio, 78.54 cm^2 (correspondiente a cilindros de 4 pulg. de diámetro y 8 pulg. de longitud)

La falla del concreto se produce por el crecimiento progresivo de microfisuras y otras discontinuidades que existen en el concreto (principalmente en el contacto pasta-agregado) desde el momento de su colocación y compactación en los moldes. De tal forma que cuando este se somete a esfuerzos que se incrementan progresivamente, dichas discontinuidades crecen en número y extensión hasta provocar la falla del mismo.

Las líneas de falla generadas en las probetas, se presentan a través de planos inclinados respecto del eje de aplicación de la carga (eje y); esta inclinación se debe a la restricción de movimiento en el sentido perpendicular a la carga (eje x), en las placas de apoyo (ver foto 19).

Foto 19. Probetas falladas a Compresión



La relación agua/cemento es tal vez el factor más influyente en la resistencia mecánica, de ahí que sea de especial cuidado su determinación en el diseño de mezclas.

El concreto puede ganar resistencia con el paso del tiempo (en la mayoría de casos durante varios años) siempre y cuando exista una humedad óptima y temperatura favorable, esto debido a la presencia de partículas de cemento aún no hidratado en la pasta endurecida. Estas partículas continúan absorbiendo humedad del aire aún después de que el agua de mezclado ha desaparecido, continuando así la reacción química. Es la presencia de partículas no hidratadas lo que causa el fenómeno de autosellamiento, esto es, el sellado de las microfisuras.

Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados de los concretos utilizados en la investigación ensayados a compresión.

Las lecturas obtenidas en este ensayo mediante la prensa digital se presentan en el anexo A.

Analizando los gráficos 4 y 5 se puede concluir que el mejor comportamiento a compresión lo presentó la muestra CM.

El esfuerzo a la compresión para la mezcla de concreto modificado a los 28 días fue de 275.22 kg/cm^2 (3892.6 p.s.i), representando un incremento del 2.33% comparado con la muestra de concreto normal, cuyo valor a los 28 días fue de 268.81 kg/cm^2 (3802 p.s.i).

Los valores máximos de resistencia a la compresión, medidos a los 150 días, fueron de 278.21 kg/cm^2 (3935 p.s.i) para la muestra CN y de 318.44 kg/cm^2 (4504 p.s.i) para la muestra CM, lo cual representa un incremento del 10.85% y del 26.87% respectivamente con respecto a la resistencia promedio requerida f'_{cr} (3550 p.s.i).

Gráfico 4. Comportamiento de la resistencia a Compresión para la muestra de Concreto Normal

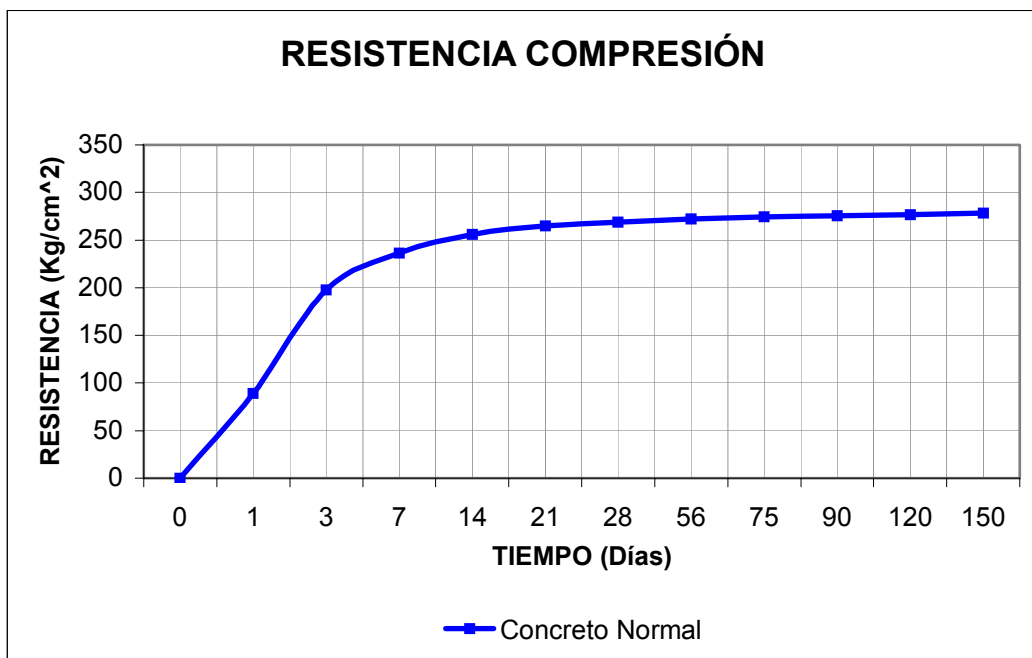
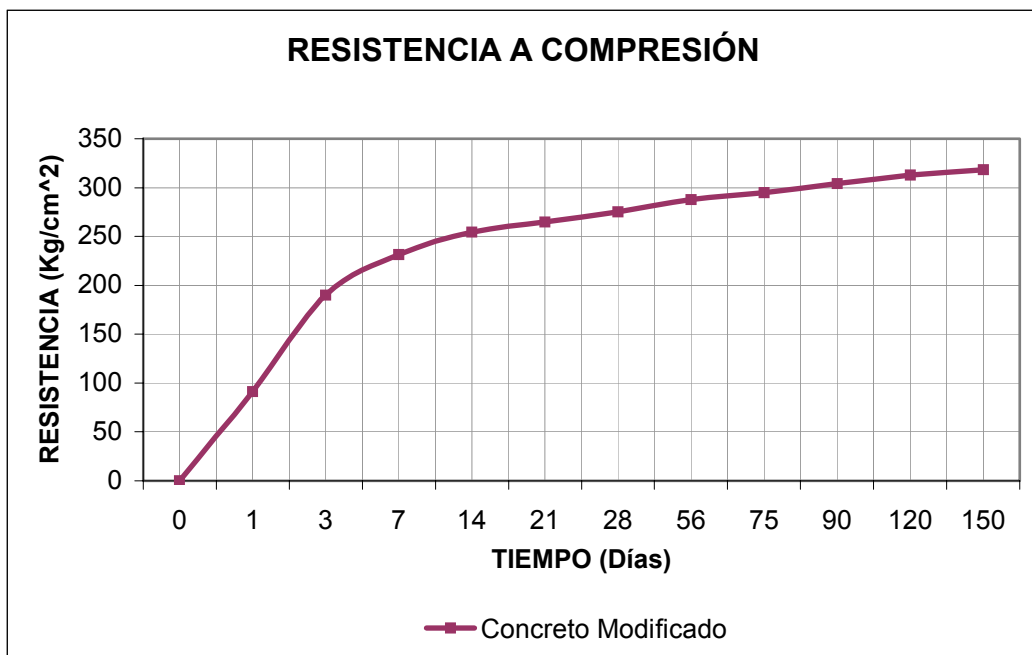


Gráfico 5. Comportamiento de la resistencia a Compresión para la muestra de Concreto Modificado



De los gráficos 4 y 5, y mediante el uso de herramientas estadísticas se obtuvieron las ecuaciones características del comportamiento de la resistencia a la compresión para cada tipo de concreto investigado.

Se dividió el comportamiento en tres regiones para un mejor ajuste de las curvas, ya que al utilizar una sola ecuación se obtuvieron coeficientes de correlación demasiado bajos (< 0.7), ver tablas 22 y 23.

Tabla 22. Ecuación de ajuste para la muestra CN

Concreto tipo	Región I (1-3 días)	Región II (3-21 días)	Región III (21-150 días)
CN	$-11.501x^2 + 100.42x - 3E-13$	$34.432\ln(x) + 163.54$	$6.434\ln(x) + 246.27$

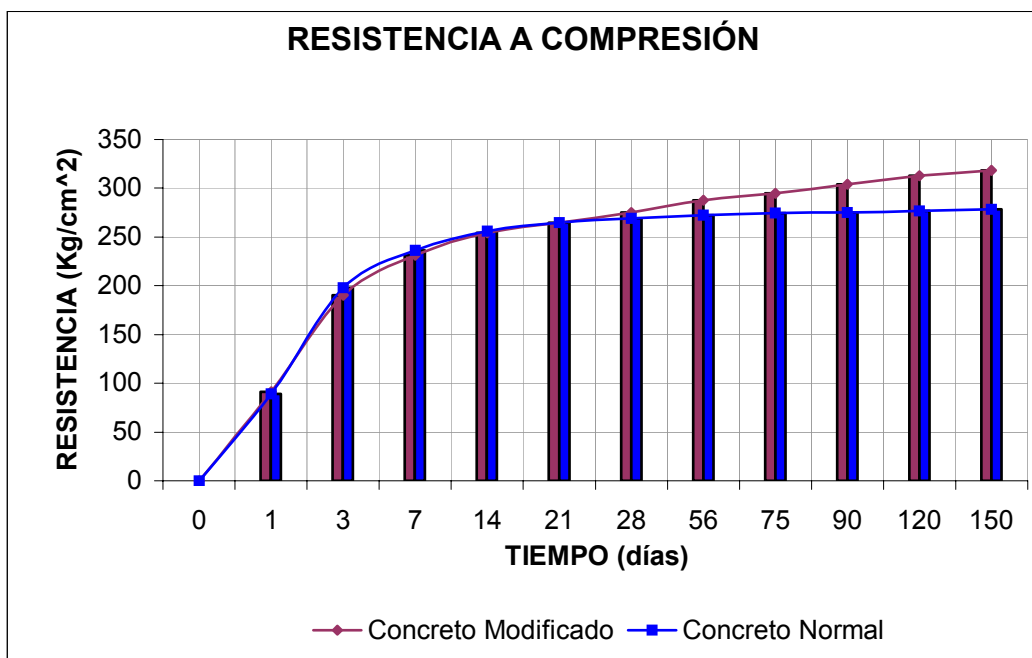
Tabla 23. Ecuación de ajuste para la muestra CM

Concreto tipo	8.1.1.1.1.1 Región I (1-14 días)	Región II (14-150 días)
CM	$-0.0427x^4 + 1.52x^3 - 19.41x^2 + 109.1x - 2E-09$	$26.238\ln(x) + 183.95$

En el gráfico 6 se puede observar la evolución de la resistencia de la muestra CM frente a la CN en la cual el esfuerzo a la compresión es menor hasta el día 21, lo cual esta acorde con lo esperado para un concreto con este tipo de características ya que se retarda el fraguado inicial y el endurecimiento ⁶³. Después de el día 21 la muestra de concreto modificado supera a la de concreto normal y su ganancia de resistencia a la compresión se extiende por más tiempo.

⁶³ MURDOCK, L.J. op.cit. p. 48

Gráfico 6. Comportamiento comparativo de la resistencia a Compresión para las muestras investigadas



En el gráfico 7 se puede ver que la muestra CN a los 7 días ya presenta un 87.98% de la resistencia a los 28 días y que a la edad de 150 días sólo ha incrementado su resistencia en un 3.5% con relación a esta. En contraste en el gráfico 8 se observa una muestra CM cuya resistencia a los 7 días es un 84.53% de su resistencia a los 28 días, (siendo similar su comportamiento al de la muestra CN) pero cuyo incremento alcanza un 16.36% a los 150 días. Esto se da en virtud a la tardía actividad puzolánica de la cenizas volantes y a su capacidad de fijar la cal libre, en este sentido Hansen ⁶⁴ informó que concretos con cenizas volantes, sufrieron un incremento notable de su resistencia después de la edad de 28 días, edad esta, que fue tomada como referencia para la definición de “calidad”. Así, en concretos con un 46.6% de ceniza volante, después de 7 años de curado bajo el agua, se midieron resistencia mecánicas superiores al doble de la resistencia a los 28 días.

⁶⁴ HANSEN, T.C. “Long-term Strength of high fly Ash Concretes”, Cement and Concrete Research, 20, 1990, p. 193-196

Gráfico 7. Incremento porcentual de la resistencia a compresión para la muestra CN

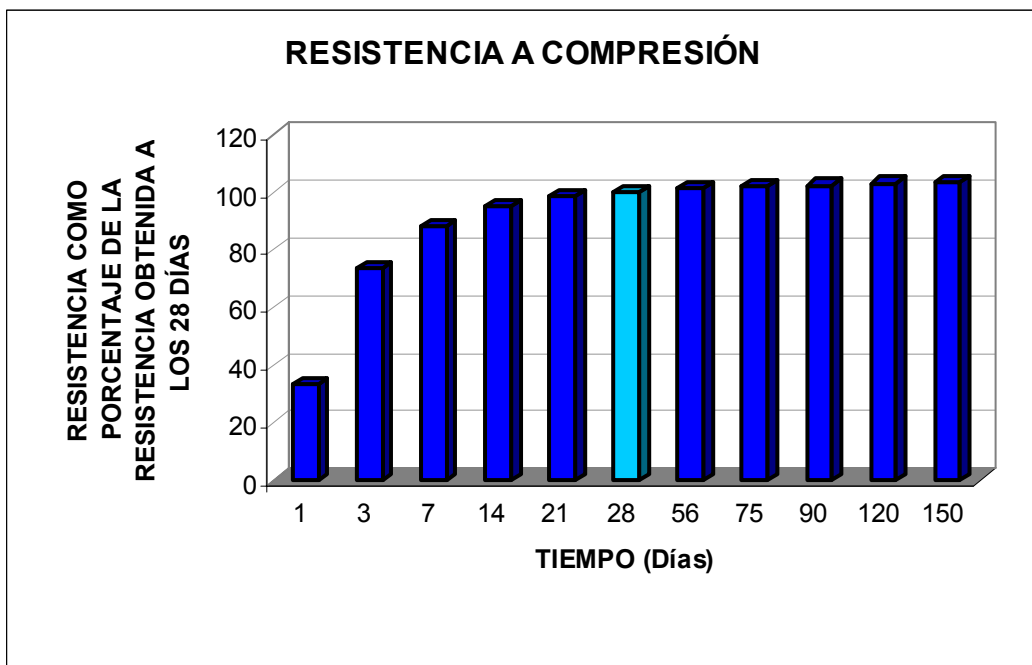
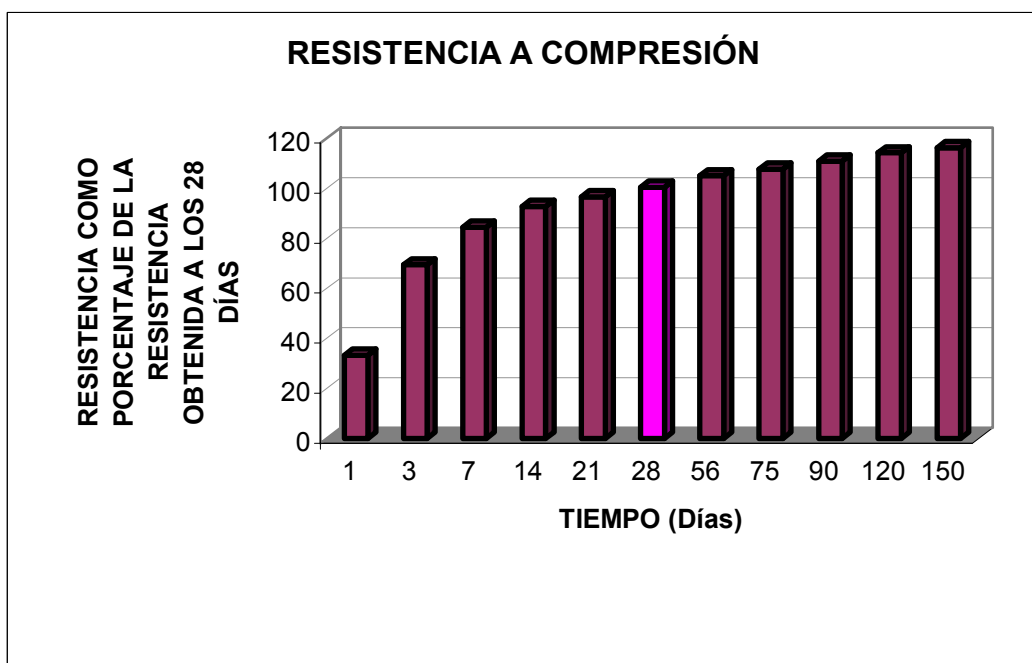
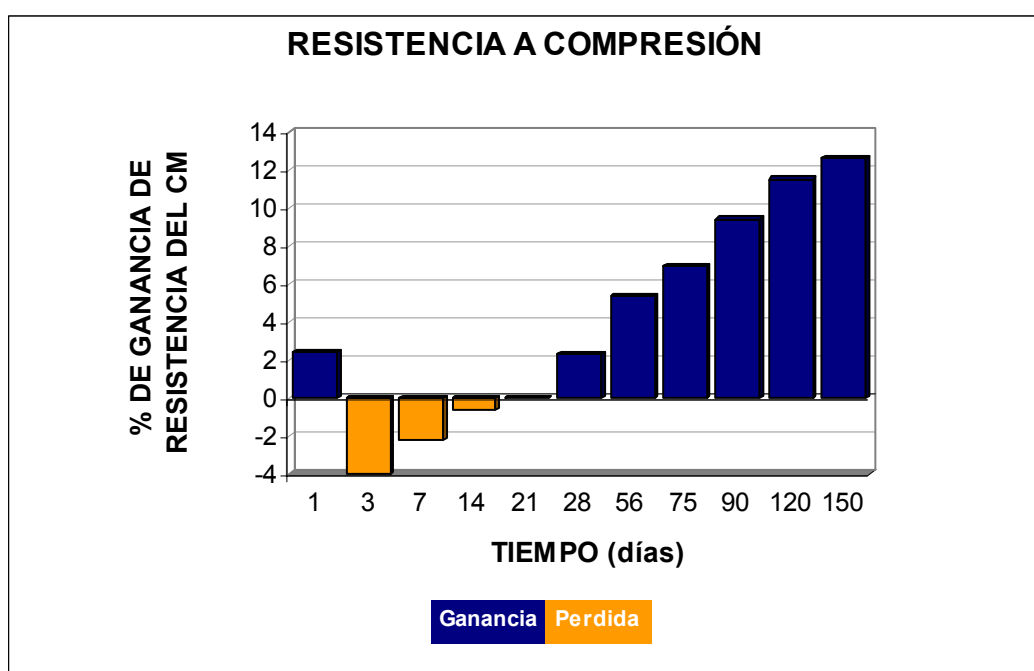


Gráfico 8. Incremento porcentual de la resistencia a compresión para la muestra CM



En el gráfico 9 se observa un pequeño aumento en la resistencia de la muestra CM frente a la muestra CN a la edad de 1 día, pero a partir de esta y hasta la edad de 21 días su resistencia es ligeramente menor a la de la muestra CN, corroborándose lo reportado en la literatura; a partir del día 28 esta empieza una ganancia de resistencia que culmina en un 12.63% con respecto a la muestra CN. En una proyección hecha a un año el concreto con adición de cenizas volantes incrementaría su resistencia en un 23.78% de la obtenida a los 28 días y en un 16.09% respecto a la que alcanzaría el concreto normal.

Gráfico 9. Ganancia porcentual de la muestra CM frente a la muestra CN



8.2 ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA (COMPRESIÓN DIAMETRAL)

Para el análisis de la resistencia a tensión en concretos con adición de ceniza volante, se fabricaron 5 probetas por cada tipo de muestra y para el mismo período de curado de el ensayo a compresión, para un total de 110 probetas ensayadas.

Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de resistencia ultima (Kg/cm^2), calculándolos de la ecuación:

$$\sigma = \frac{2 * F}{\pi * L * D} \quad (\text{Ecuación 8.2})$$

donde, σ es la resistencia ultima del concreto, F es la fuerza aplicada y D es el diámetro de la sección transversal de la probeta en estudio y L su longitud.

El tipo de falla generado es característico de un sistema sometido a esfuerzos de tracción, donde se presenta una línea de falla perpendicular a la línea de aplicación de la carga. (Ver foto 20).

Foto 20. Probetas falladas a Tensión por compresión diametral



Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados de los concretos utilizados en la investigación ensayados a compresión.

Las lecturas obtenidas en este ensayo por medio de la prensa hidráulica se presentan en el anexo B.

Analizando los gráficos 10 y 11 se puede concluir que la muestra CM presento un mejor comportamiento a tensión que la muestra CN.

El esfuerzo a tensión para la mezcla de concreto normal a los 28 días fue de 22.35 kg/cm^2 (316.05 p.s.i) y para la mezcla de concreto modificado con adición de cenizas volantes fue de 29.92 kg/cm^2 (425.58 p.s.i), esto representa un 8.31% y un 10.87% de sus respectivas resistencias a la compresión.

Gráfico 10. Comportamiento de la resistencia a tensión indirecta para la muestra CN

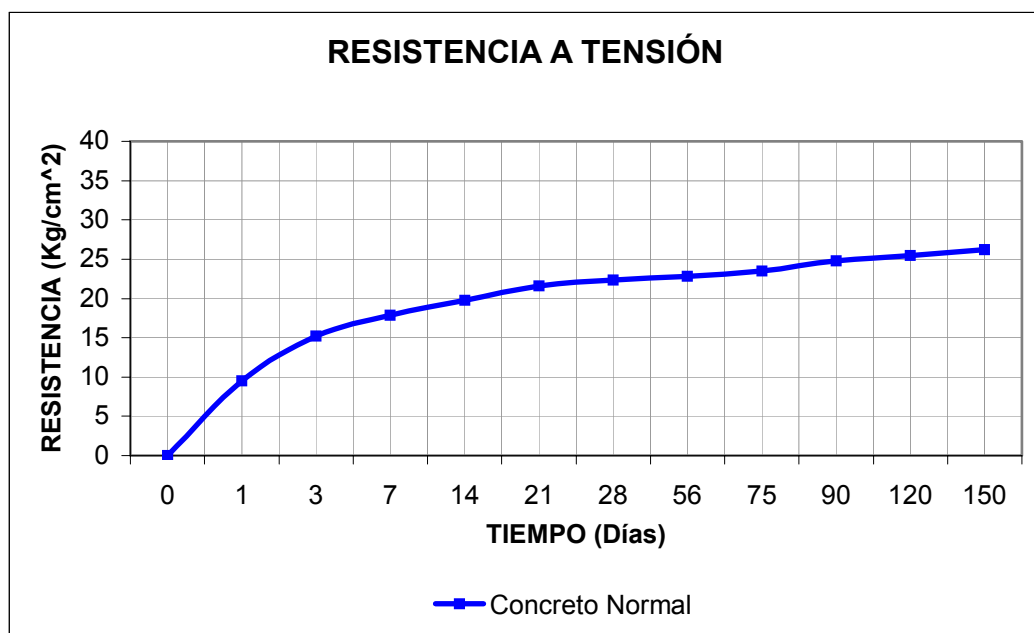
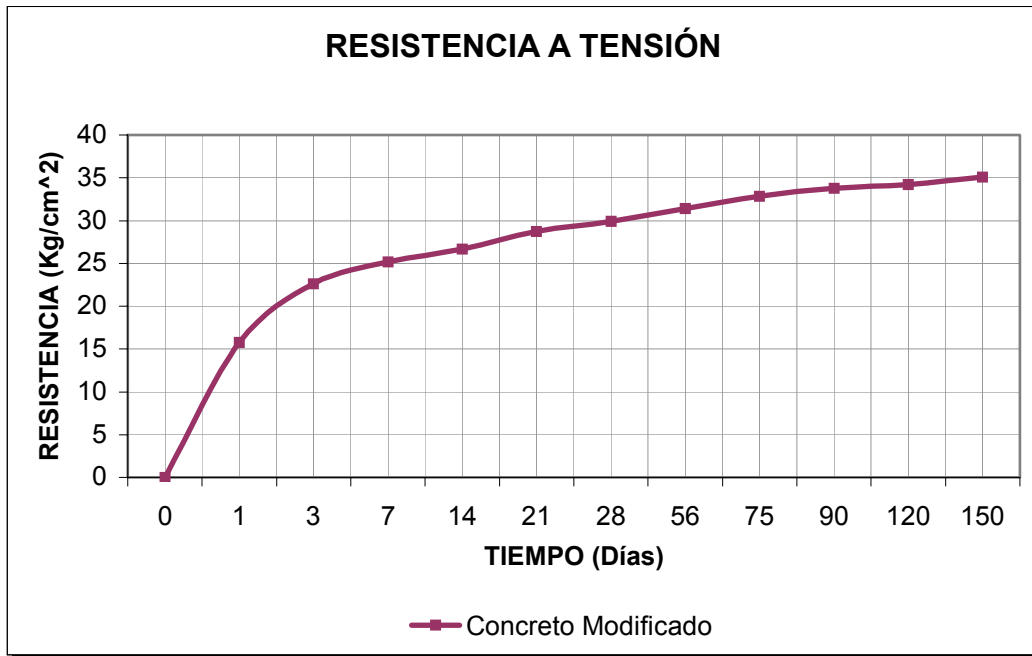


Gráfico 11. Comportamiento de la resistencia a tensión indirecta para la muestra CM



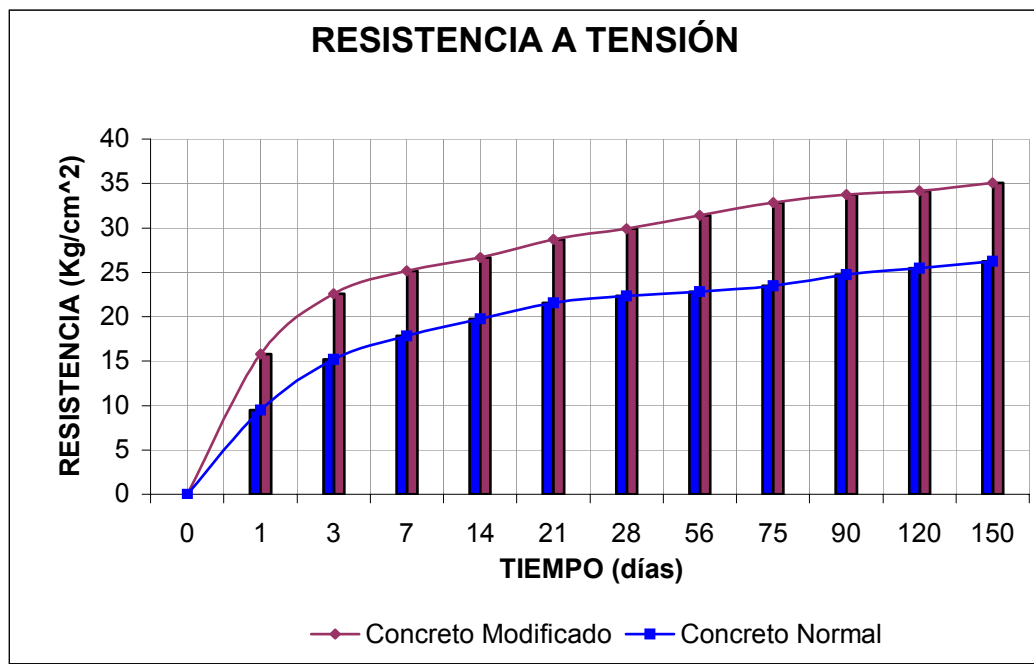
Al expresar la resistencia a la tensión como un factor ($\chi\sqrt{f_c}$) de su resistencia a la compresión se tiene que para la muestra CN este corresponde a $1.36\sqrt{f_c}$ y $1.8\sqrt{f_c}$ para la muestra CM; algunas investigaciones sugieren un factor de proporcionalidad de $1.2\sqrt{f_c}$ para concretos elaborados con grava de roca triturada y $1.5\sqrt{f_c}$ para los elaborados con grava natural de origen piroclástico⁶⁵.

Ya que la resistencia a la tensión indirecta se puede expresar como un porcentaje o factor de la resistencia a la compresión, se podría esperar que el aumento de la resistencia para la muestra CM fuera del mismo orden que el presentado en el ensayo a compresión; sin embargo en el gráfico 12 se pudo ver que el comportamiento de ganancia de resistencia a tensión de la muestra CM frente a la muestra CN es diferente al exhibido en el ensayo a compresión, ya que esta es superior desde el principio y su diferencia es mucho más

⁶⁵ INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM y COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Op.cit. p. 34

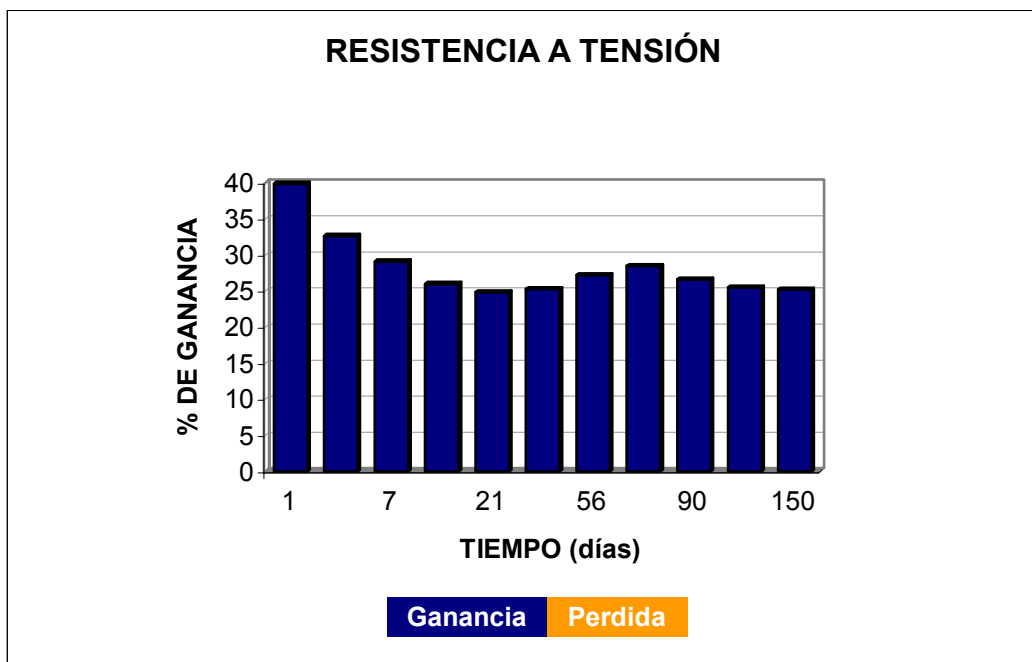
marcada (ver grafico 13); esto significa que la resistencia del concreto a tensión indirecta no sigue el mismo comportamiento de la resistencia a la compresión a través del tiempo. Este aumento se puede explicar debido a su menor porosidad –como se vera más adelante- y a la mayor incidencia de las microfisuras y otras discontinuidades originales sobre la resistencia a la tensión, las cuales se disminuyen en número y extensión debido al mayor grado de homogeneidad de la pasta por la adición de la puzolana. La influencia de las microfisuras y otras discontinuidades sobre la resistencia de la pasta endurecida y por ende sobre el concreto es más importante a tensión que a compresión, porque cuando existe una discontinuidad en un material frágil (como la pasta) que se halla sometido a tensión, se producen concentraciones de esfuerzos en los bordes de la discontinuidad con una magnitud varias veces superior al esfuerzo medio de tensión que actúa nominalmente⁶⁶.

Gráfico 12. Comportamiento comparativo de la resistencia a Tensión para las muestras investigadas



⁶⁶ NEVILLE, A.J. , AND BROOKS, J.J. "Concrete Technology". Longman Scientific and Technical. Longman Group, Essex, Londres. 1987

Gráfico 13. Ganancia porcentual de la muestra CM frente a la muestra CN



Por último en los gráficos 14 y 15 se puede observar el desarrollo de la ganancia de resistencia a la tensión para cada una de las muestras investigadas. Para la muestra CN se tiene una resistencia a la tensión a los 7 días equivalente al 79.78% de su resistencia a los 28 días y un incremento a los 150 días del 17.36% con respecto a ésta. La muestra CM presenta un comportamiento similar a la muestra CN, con resistencias correspondientes al 84.06% y 117.25% a los 7 y 150 días respectivamente.

Se puede ver que la muestra de concreto normal tiene una ganancia de resistencia a la tensión indirecta a edades tardías de hasta 150 días, mucho mayor que la obtenida a compresión, 17.36% frente a un 3.5%, siendo evidente una vez más la diferencia entre el comportamiento de la resistencia a tensión indirecta y la resistencia a compresión para el concreto.

Gráfico 14. Incremento porcentual de la resistencia a tensión para la muestra CN

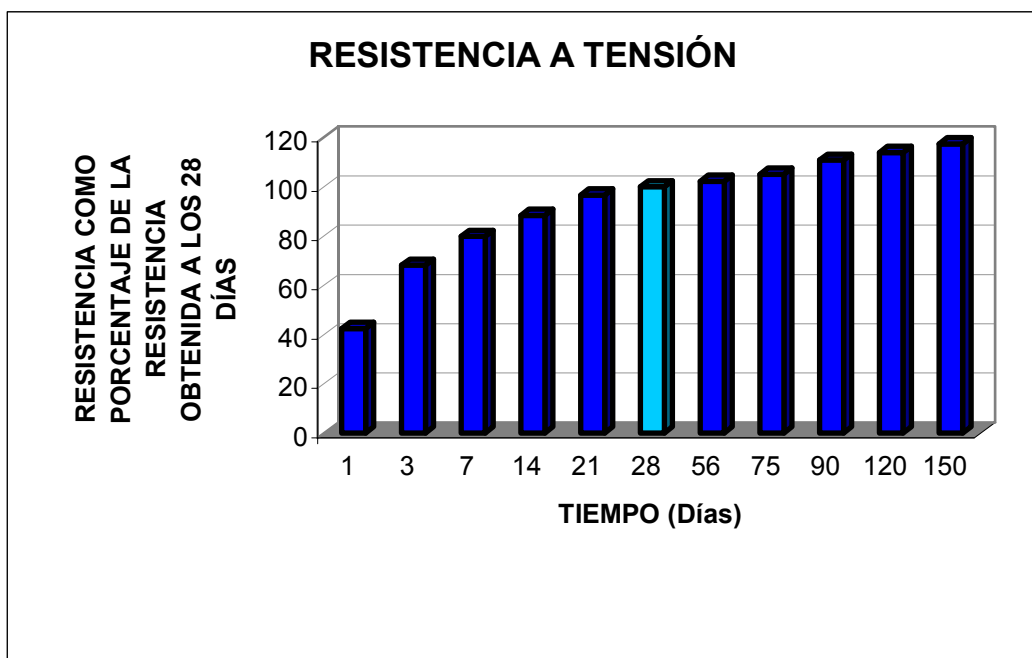
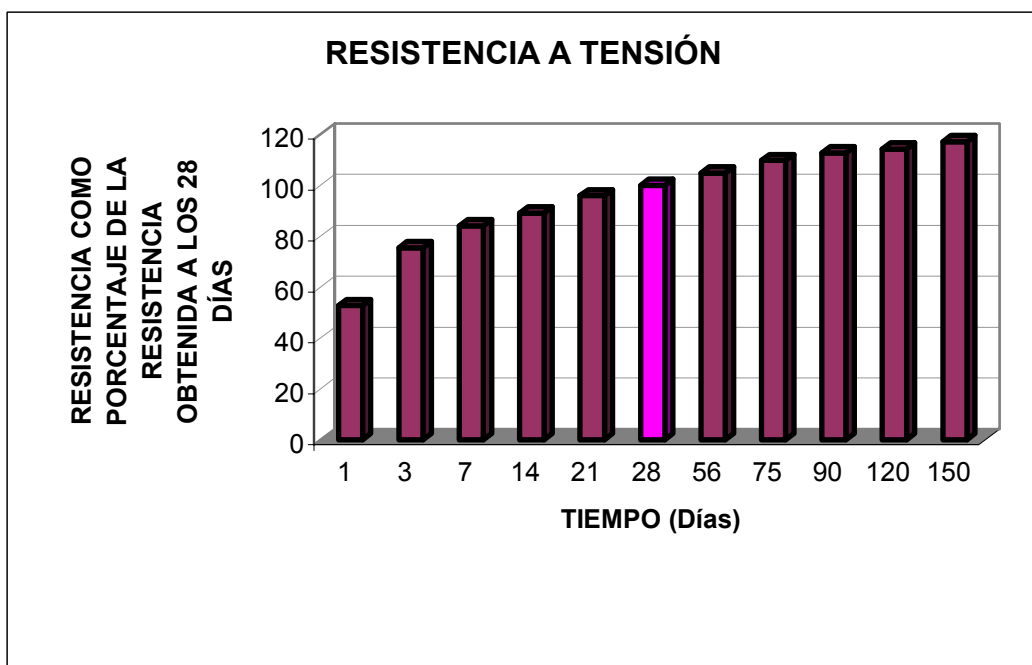


Gráfico 15. Incremento porcentual de la resistencia a tensión para la muestra CM



8.3 ENSAYO DE TENSION POR FLEXIÓN

Para el análisis de la resistencia a flexión en concretos con adiciones de caucho, se fabricaron 5 probetas por cada tipo de concreto y para un período de curado de 7 y 28 días, esto debido al gran volumen de concreto que emplea cada probeta (ver foto 21), para un total de 20 probetas ensayadas.

Foto 21. Probeta fallada a Flexión



Los resultados de este ensayo se expresarán en unidades de resistencia ultima (Kg/cm^2); el valor de resistencia responde al comportamiento de una viga simplemente apoyada con una carga central y se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{3PL}{2a^3} \quad (\text{Ecuación 8.3})$$

donde: σ : Resistencia a tensión por flexión (Kg/cm^2)

F: Fuerza aplicada al sistema (Kg)

L: Longitud Efectiva entre apoyos (50 cm)

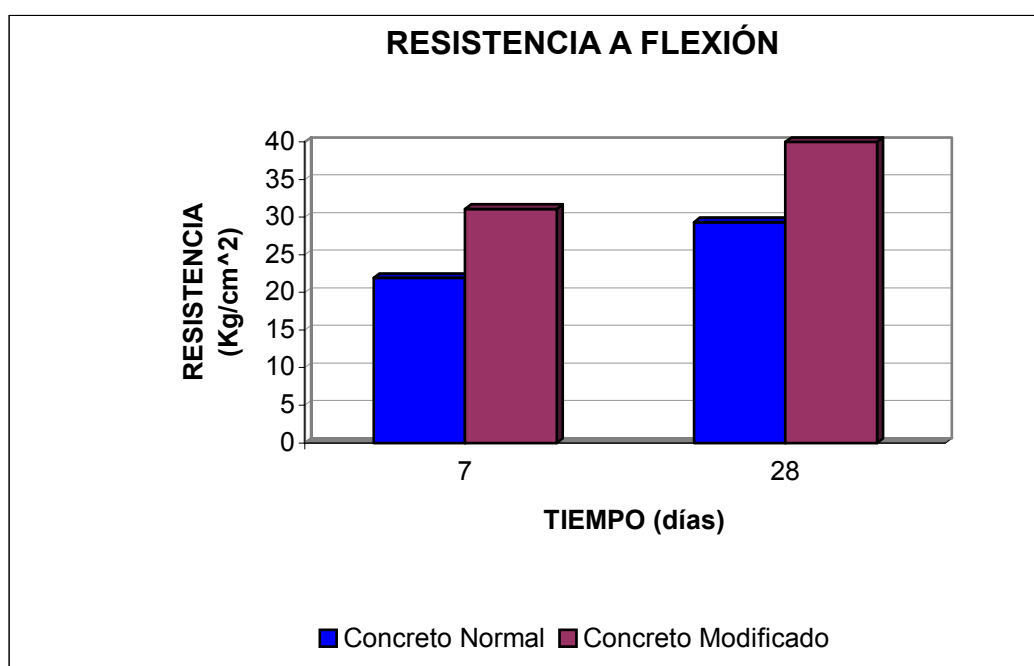
a: Longitud del lado de sección transversal de la viga (15 cm)

Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados de los concretos utilizados en la investigación ensayados a flexión.

El esfuerzo a tensión por flexión para la mezcla de concreto normal a los 28 días fue de 29.33 kg/cm^2 (414.88 p.s.i) y para la mezcla de concreto modificado con adición de cenizas volantes fue de 40.67 kg/cm^2 (575.18 p.s.i); estos representan un 10.91% y un 14.77% de su resistencia a la compresión. En el gráfico 16 se puede observar el valor de la resistencia para cada tipo de concreto a las edades de 7 y 28 días.

Gráfico 16. Comportamiento comparativo de la resistencia a Flexión para las muestras investigadas



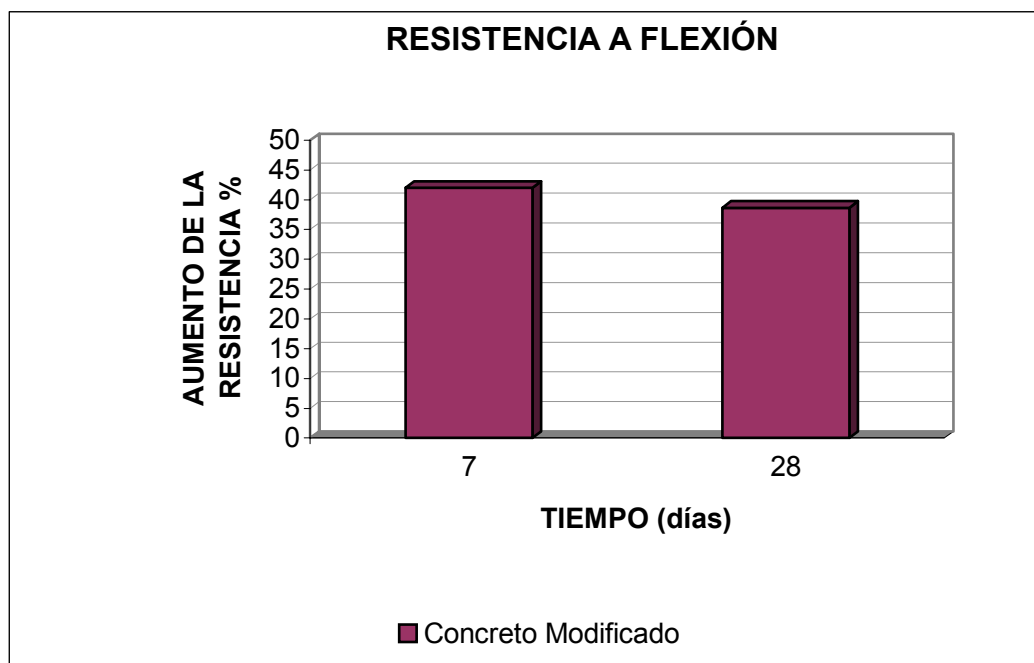
Al compararse estos resultados con los obtenidos en el ensayo de compresión diametral, se puede ver que son 31.23% y 35.93% mayores respectivamente; esto concuerda con la literatura recopilada, ya que se sabe que la determinación de la resistencia a tensión puede conducir a resultados diferentes, según el procedimiento que se utilice para medirla: en condiciones comparables, la prueba de tensión directa produce el valor de resistencia más bajo y la prueba de tensión por flexión el más alto, quedando en una

posición intermedia la resistencia a tensión determinada por compresión diametral. Esto ocurre debido a la diferencia en la distribución de esfuerzos para cada una de las pruebas ⁶⁷.

Según ACI 363 ⁶⁸ el módulo de ruptura, M_r para concretos de peso normal es aproximadamente de $1.99\sqrt{f_c}$. Las muestras investigadas dieron como resultado módulos de ruptura de $1.79\sqrt{f_c}$ para la muestra CN y $2.47\sqrt{f_c}$ para la muestra CM.

En el gráfico 17 se observa el aumento en la resistencia para la muestra CM con respecto a la muestra CN; este fue del 41.98% a los 7 días y del 38.63% a los 28 días. La variación en el módulo de ruptura conforme cambia el nivel de la resistencia a compresión, sigue la misma tendencia de la resistencia a tensión indirecta, pero manifestando valores un poco más altos.

Gráfico 17. Aumento porcentual de la muestra CM frente a la muestra CN



⁶⁷ INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM y COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. Op.sit. p. 34

⁶⁸ ACI Committee 363. "State of the Art Report on High Strength Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich.1984

8.4 ENSAYO DE POROSIDAD

El Porosímetro de campo Ruska como se había mencionado anteriormente mide volúmenes del desplazamiento del pistón que corresponden al volumen de sólidos o granos de la muestra, y el volumen total de la muestra; posteriormente estas medidas son convertidas a cm^3 usando curvas de calibración.

Después de convertir la lecturas de R_{core} y R_{Hg} a cm^3 , aplicamos la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de porosidad de cada muestra:

$$\text{Porosidad}\% = \left[1 - \left(\frac{R_{\text{core}}}{R_{\text{Hg}}} \right) \right] * 100 \quad (\text{Ecuación 8.4})$$

En la foto 22 se muestran las probetas cúbicas utilizadas en el ensayo de porosidad.

Foto 22. Probetas para ensayo de porosidad



Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados de porosidad efectiva del ensayo de porosidad mediante el Porosímetro de Campo Ruska de los concretos utilizados en la investigación.

Al analizar los gráficos 18, 19 y 20 se puede concluir que la adición de cenizas volantes disminuye la porosidad, esto se atribuye a la modificación en la micro estructura del concreto por parte de éstas, ya que los productos de la reacción puzolánica se depositan en los poros capilares, llegando incluso a obstruirlos, modificando así la red de poros capilares continua, en discontinua.

El porcentaje de porosidad para la mezcla CN fue del 10.43% y para la muestra CM fue del 8.59%, representando una disminución del 17.64%. Aunque no se obtuvieron datos de la porosidad total en esta investigación, se sabe por la literatura recopilada que en algunos casos llega a ser superior para los concretos con adiciones puzolánicas. La importancia de la determinación de la porosidad efectiva o útil, radica en que ésta es la de los poros interconectados, es decir el volumen susceptible a ser ocupado por fluidos.

Gráfico 18. Valores de porosidad efectiva (útil) para la muestra CN

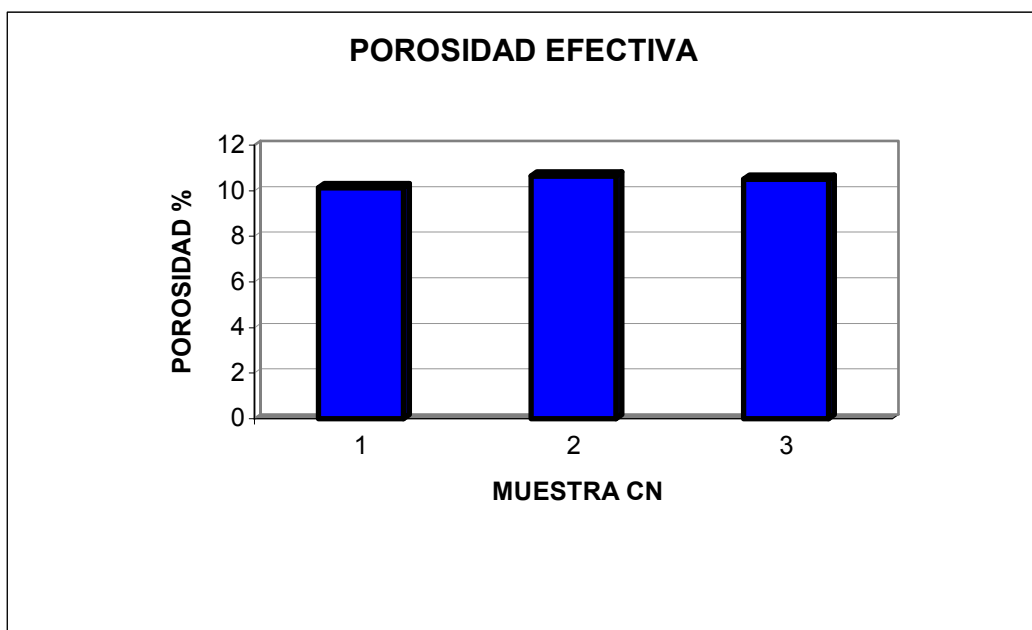


Gráfico 19. Valores de porosidad efectiva (útil) para la muestra CM

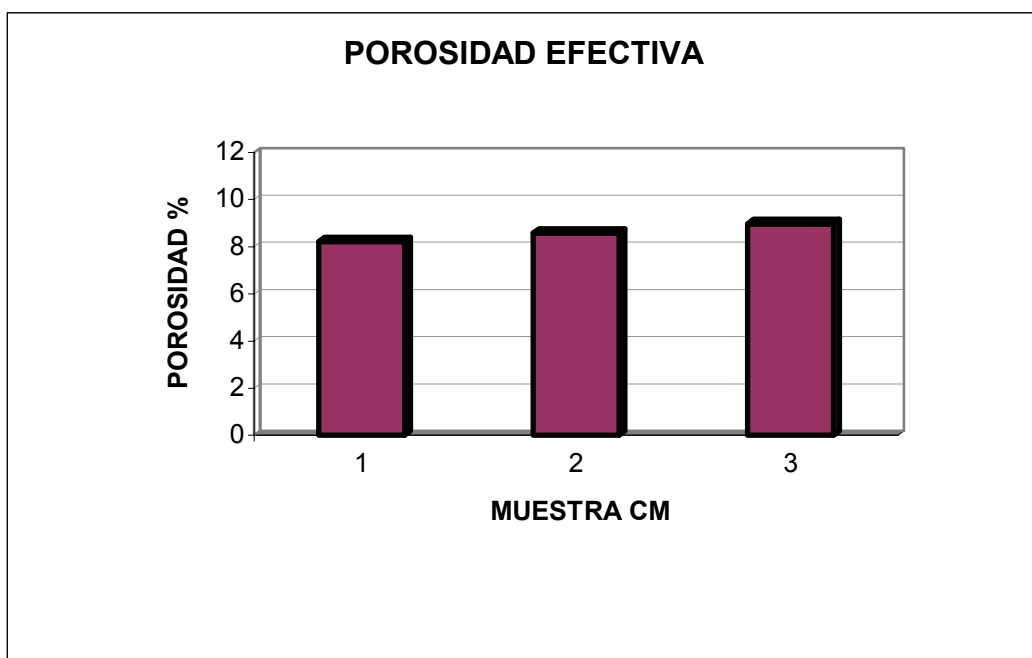
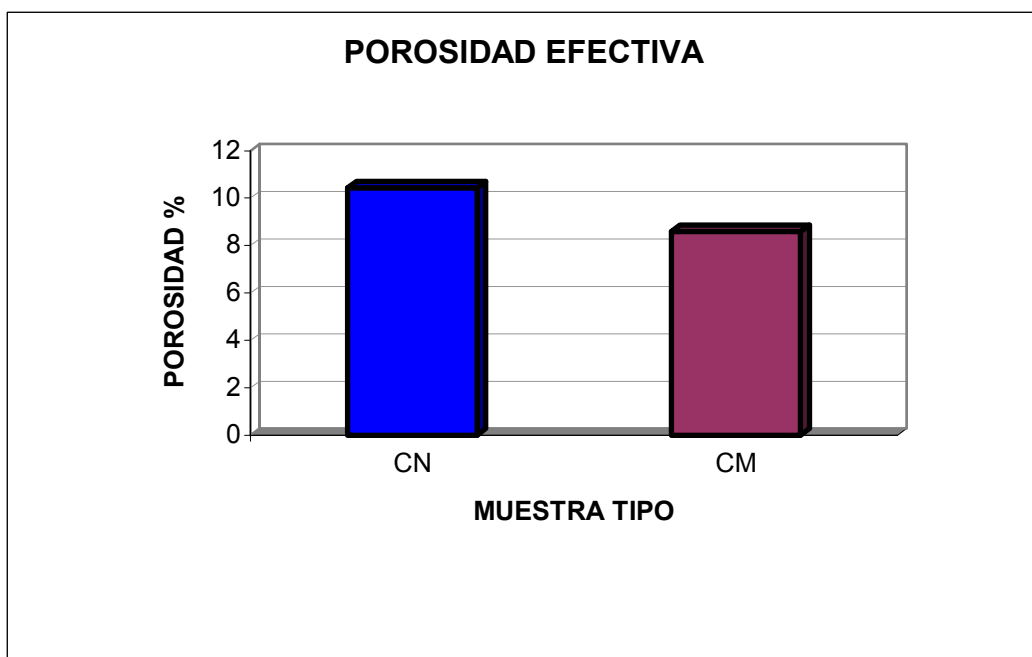


Gráfico 20. Comportamiento comparativo de la porosidad efectiva para las muestras investigadas



8.5 ENSAYO DE PERMEABILIDAD

La permeabilidad obtenida mediante el Permeámetro de gas Ruska se calculó utilizando el caudal de gas que pasa a través del núcleo, el gradiente de presión, la viscosidad del gas y las dimensiones de la probeta.

La viscosidad del gas (centipoises, μ) se obtiene a partir de la temperatura ambiente al momento de analizar la muestra. Con las lecturas flowmeter, R_f , y la escala de flowmeter (S, M, o L) se obtienen los datos de la Tasa promedio de flujo, Q (cm/seg), mediante gráficos de conversión; estos valores y junto con los datos de gradiente de presión P (atm), área de la sección transversal de la muestra, A (cm²), y longitud de la muestra, L (cm), procedemos a hallar la permeabilidad (milidarcys) utilizando la siguiente expresión:

$$K = \frac{\mu \times Q \times L}{A \times P} \quad (\text{Ecuación 8.4})$$

En la foto 23 se muestran las probetas cúbicas utilizadas en los ensayos de porosidad y permeabilidad (adelante).

Foto 23. Probetas para ensayo de permeabilidad

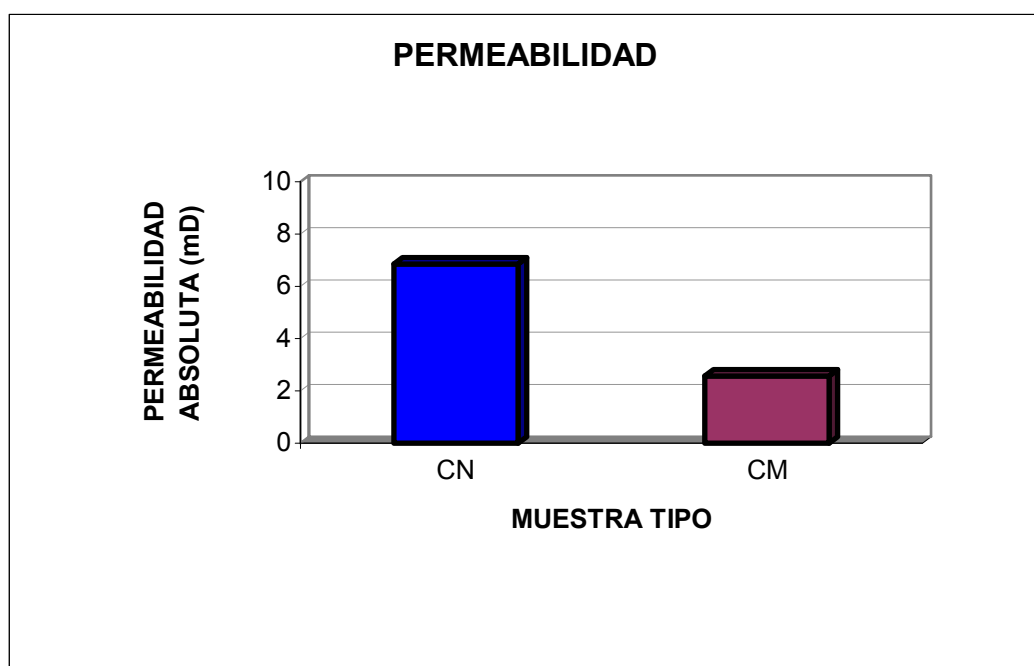


Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados del ensayo de permeabilidad, mediante el Permeámetro de gas Ruska de los concretos utilizados en la investigación.

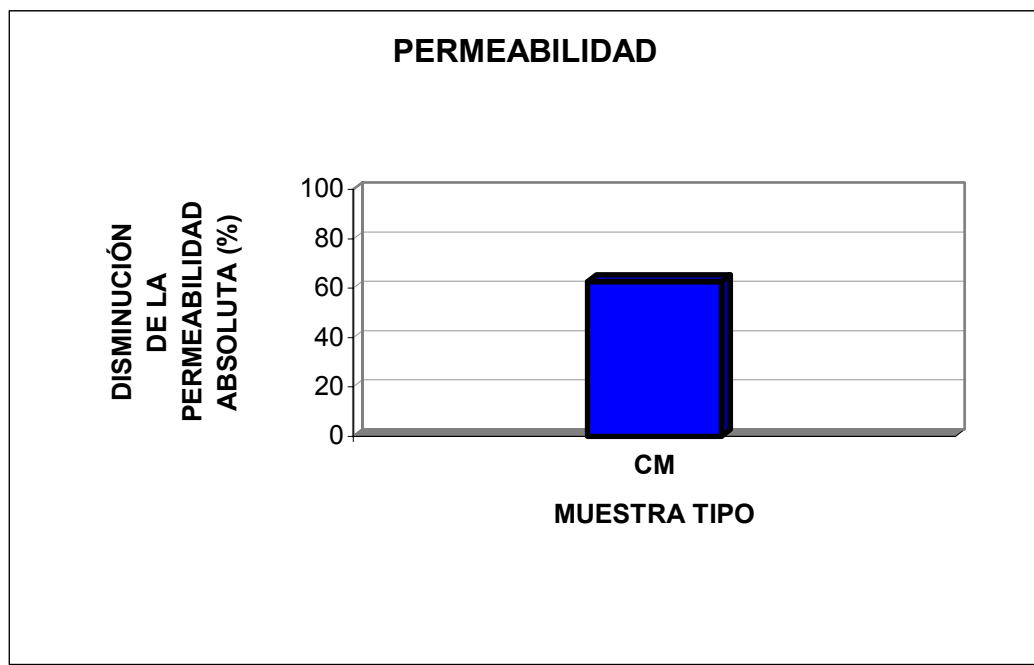
Los gráficos 21 y 22 ilustran el comportamiento de los diferentes tipos de concretos sometidos a los ensayos de permeabilidad utilizando el Permeámetro Ruska. De éstos se puede inferir que el mejor comportamiento lo tuvo la muestra de concreto con adición de cenizas volantes (CM), cuya permeabilidad absoluta fue de 2.57 mD, representando una disminución del 62.59%. Cabe resaltar que aunque la disminución de la permeabilidad absoluta en la muestra CM es bastante representativa, los valores tanto de ésta como de la muestra de concreto normal (CN) están en el rango de baja permeabilidad ⁶⁹ (< 30 mD).

Gráfico 21. Comportamiento comparativo de la permeabilidad para las muestras investigadas



⁶⁹ ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS. op.sit. p. 75

Gráfico 22. Disminución porcentual de la permeabilidad absoluta



La importancia de la determinación de la permeabilidad al gas (en este caso aire) radica en que ésta favorece el fenómeno de carbonatación, con sus consiguientes efectos perjudiciales sobre la contracción del concreto, como se mencionó en el Capítulo 5.

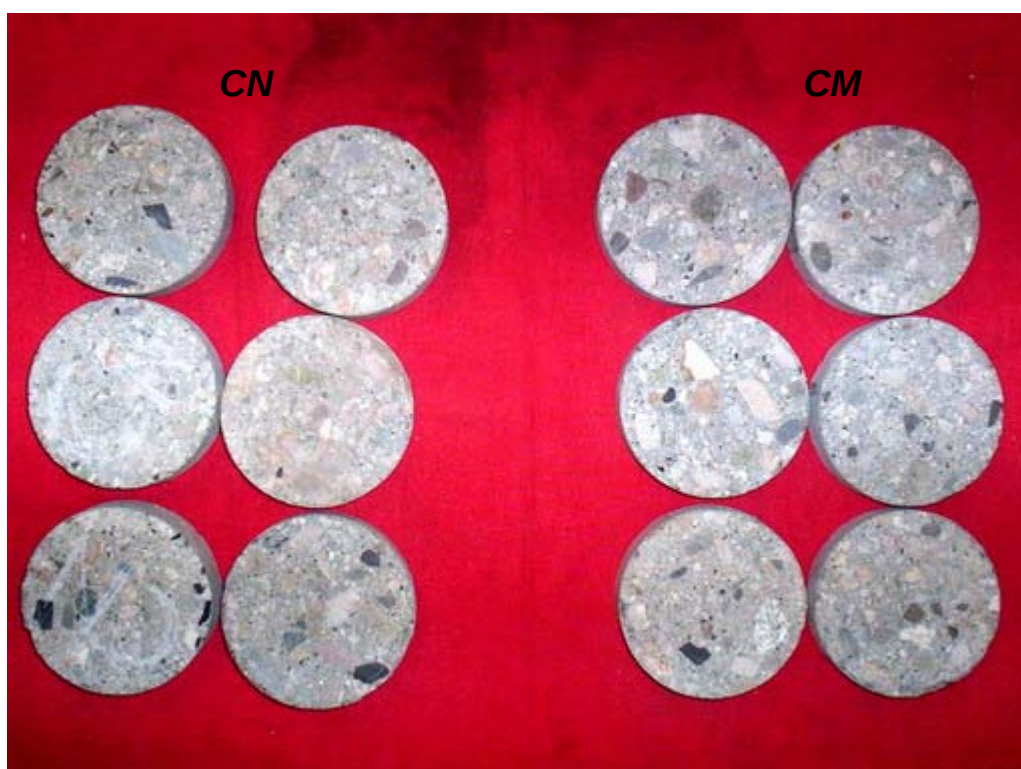
Debido a que frecuentemente estas pruebas presentan un alto grado de dispersión, no se acostumbra su ejecución regular como medio de verificación de la calidad del concreto, sino más bien se les utiliza con carácter comparativo para la selección de entre mezclas opcionales, o como en este caso para evaluar los efectos de alguna adición.

8.6 ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

Este ensayo permite interpretar el proceso de absorción de agua por los poros capilares del concreto a través del tiempo, analizando diversos parámetros como la resistencia a la penetración del agua, el coeficiente de absorción capilar y la porosidad efectiva. Con este laboratorio se podrá de forma razonable determinar el recubrimiento de un concreto para proteger el acero de acuerdo a la solicitud de servicio prestada, es decir al medio al que este expuesto el concreto.

En las foto 24, se muestra las diferentes matrices, para los diferentes tipos de concreto.

Foto 24. Matrices de concreto normal y concreto modificado



Para el análisis de los resultados, se trazaron los gráficos 23 y 24, a partir de los datos de peso de agua absorbida (anexo F), por unidad de área de cada muestra (78.54 cm^2) respecto a la raíz del tiempo.

Gráfico 23. Comportamiento de la absorción capilar para la muestra CN

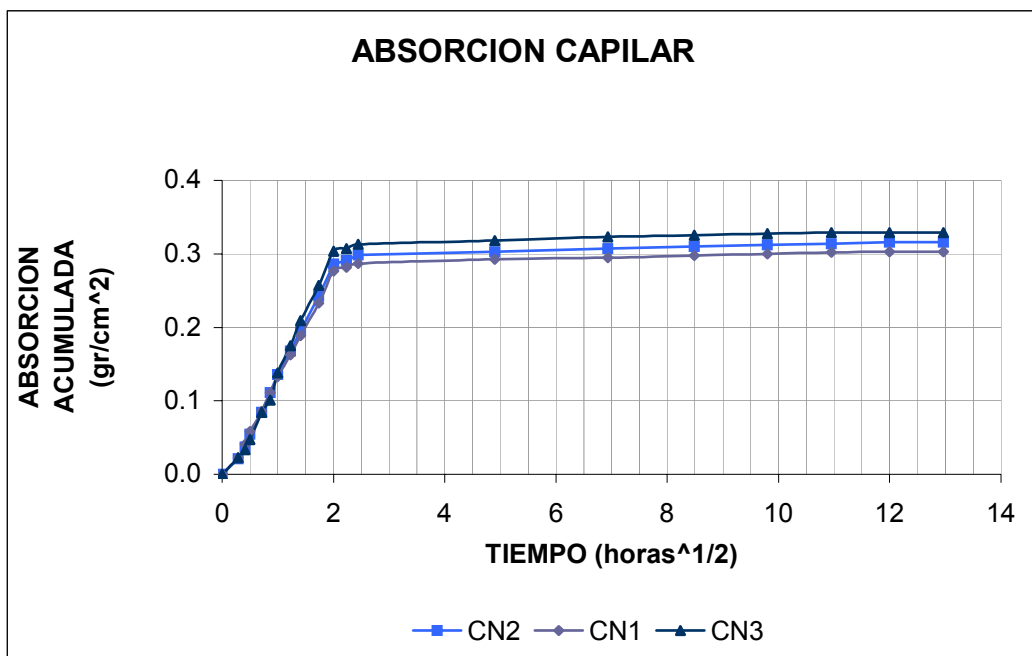
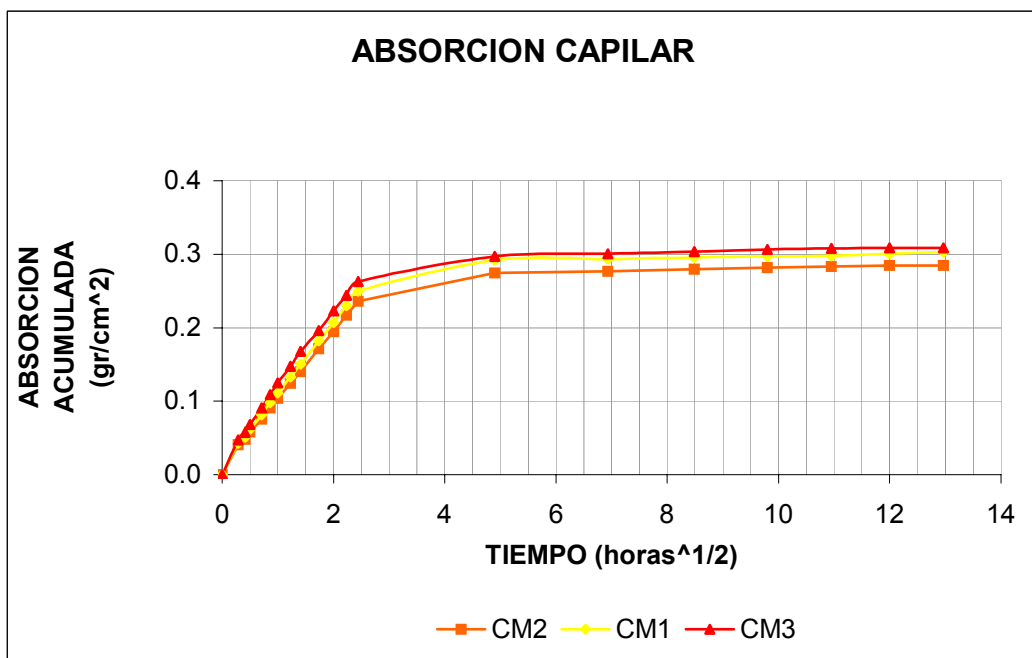


Gráfico 24. Comportamiento de la absorción capilar para la muestra CM



En éstas se pudieron apreciar dos fases: La fase 1, que corresponde al avance del frente de absorción representado por el llenado de los poros capilares y la fase 2, que corresponde a la saturación; es decir una vez que los poros capilares se han llenado, la saturación está relacionada principalmente con los poros capilares, que corresponden a espacios vacíos generalmente interconectados y abiertos hacia el exterior, por lo cual son considerados la principal vía de acceso de agentes agresivos desde el exterior. El tamaño de estos poros depende de la relación A/C y del tiempo de hidratación de la mezcla de concreto, ya que un exceso de agua causa un incremento en los poros capilares, mientras que lo contrario ocurre al avanzar el grado de hidratación del cemento.

En los gráficos 25 y 26 se observan las dos fases del proceso de absorción capilar para las dos muestras investigadas.

Gráfico 25. Fases de la absorción capilar (CN)

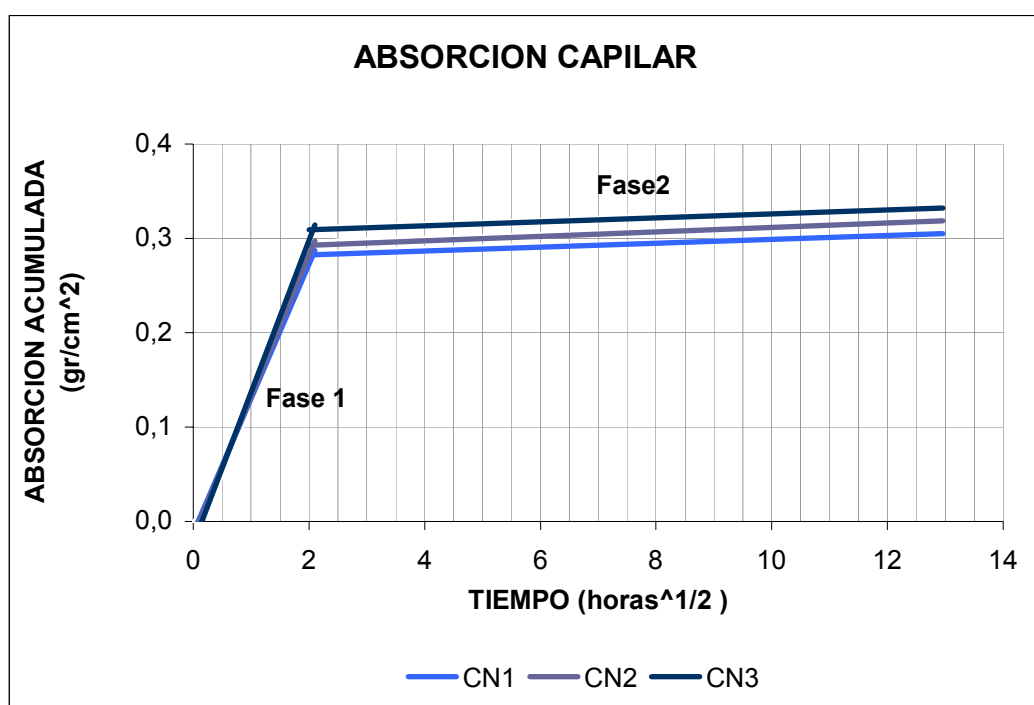
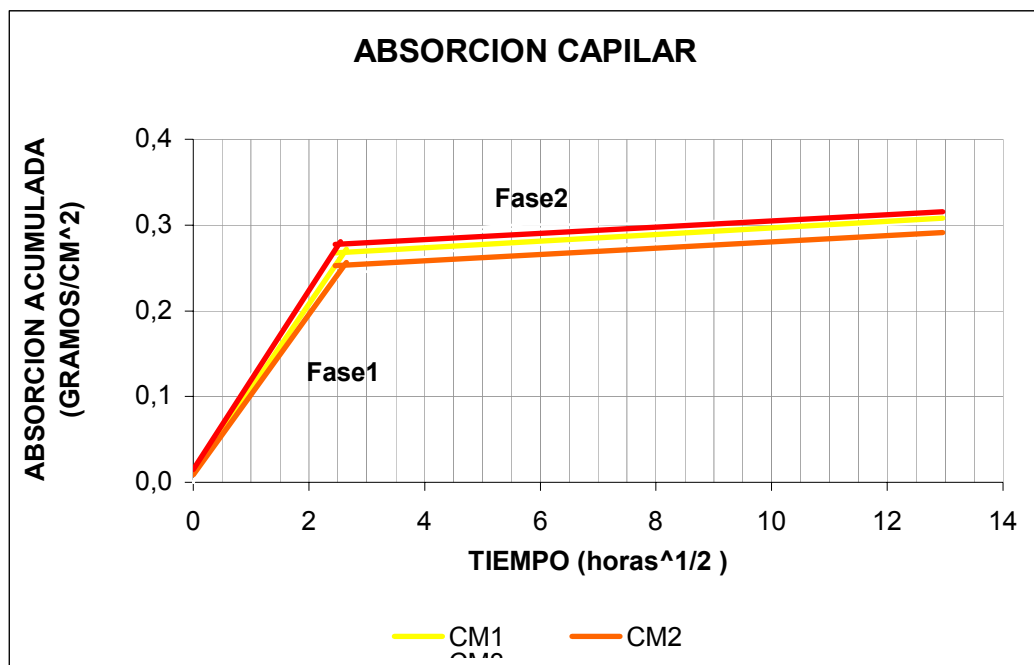


Gráfico 26. Fases de la absorción capilar (CM)



A partir de las gráficas descritas se obtuvo la intercepción de las líneas correspondientes a cada fase, que representa el tiempo t_n , al cual el frente de agua ha alcanzado la cara superior de la probeta. Posteriormente se calcularon la Resistencia a la penetración del agua (m), el coeficiente de absorción capilar (k) dado por la pendiente en la fase 1; la porosidad (ε) y la absortividad (S). Los resultados obtenidos se presentan en el anexo F y en los gráficos 27, 28, 29 y 30.

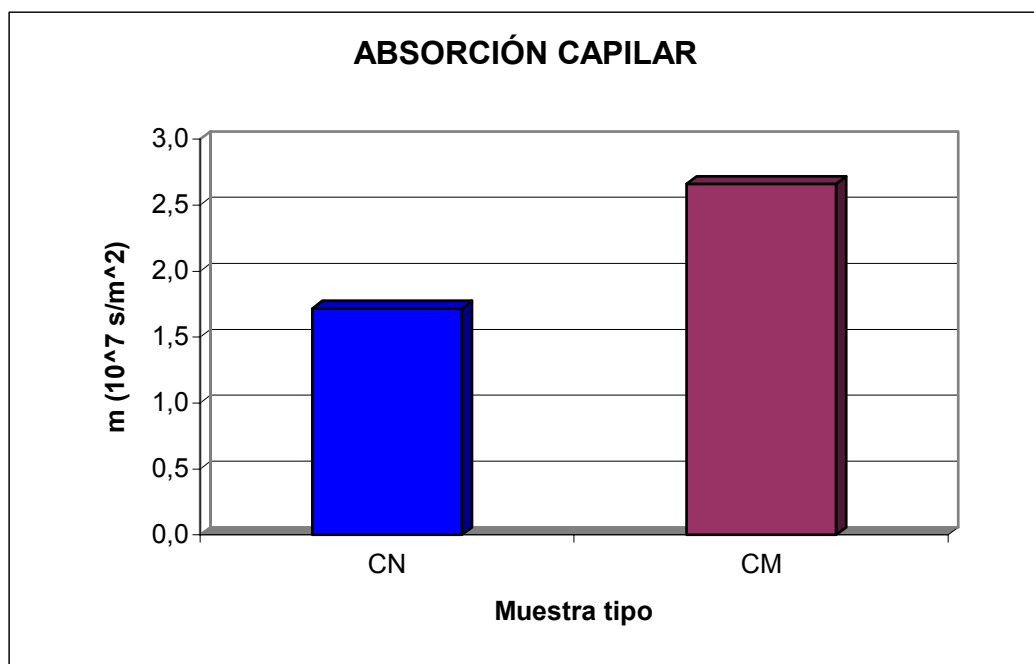
Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados del ensayo de absorción capilar de los concretos utilizados en la investigación.

La resistencia a la penetración del agua m (ver gráfico 27) para la muestra CN fue de $1.716 (10^7) \text{ s/m}^2$ y para la muestra CM fue de $2.66 (10^7) \text{ s/m}^2$, representando un aumento del 55% frente a la muestra patrón. Esto es un indicativo del taponamiento de poros producido por parte de la adición de cenizas volantes.

Estos valores de resistencia a la penetración del agua están acorde con los obtenidos en otras investigaciones, las cuales utilizaron cenizas volantes como adición ⁷⁰.

Gráfico 27. Valores de resistencia a la penetración del agua (m) para cada tipo de concreto

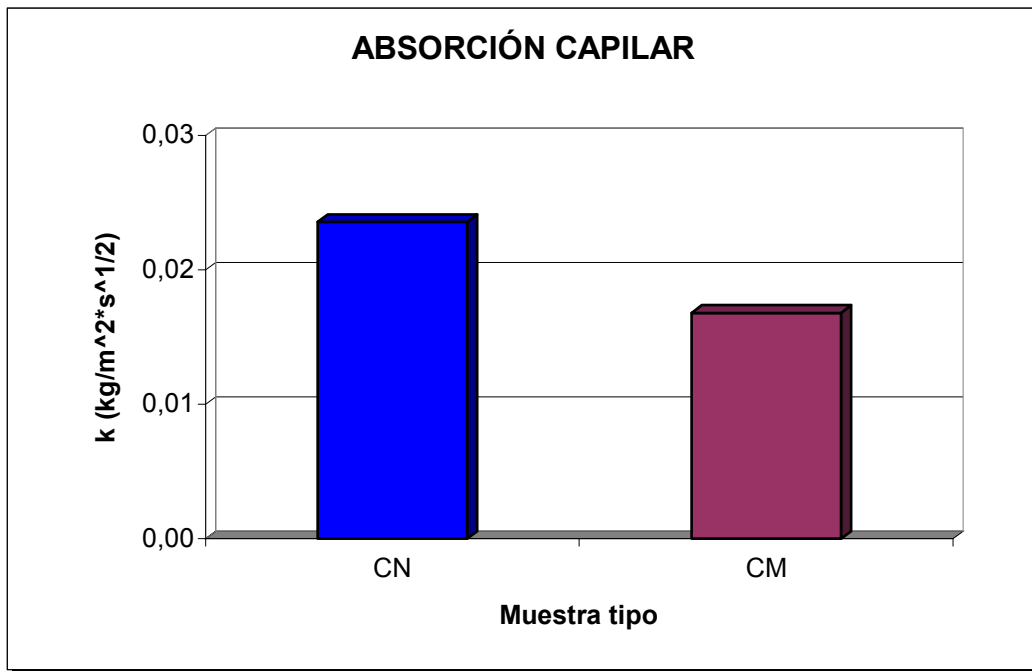


Los coeficientes de absorción capilar (ver gráfico 28) para los concretos investigados fueron de 0.0236 kg/m²s^{1/2} para la muestra CN y 0.0168 kg/m²s^{1/2} para la muestra CM. Aunque el coeficiente k está relacionado con el coeficiente m, la disminución de aquel no se dio en el mismo orden en que aumento su resistencia a la penetración del agua (m), debido tal vez a que el coeficiente m es función exclusiva de la estructura de los poros, pero no de porosidad total; mientras k está relacionado al contenido de agua en la muestra y a la porosidad total, que como ya se dijo anteriormente podría ser superior para la muestra de concreto modificado (CM).

En estudios anteriores ⁷¹ para mezclas de cemento Rioclaro y ceniza volante al 20% con relaciones de A/C de 0.65 se han obtenido coeficientes de absorción de 0.0148 kg/m²s^{1/2}.

⁷⁰ MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. op.sit. p. 78

Gráfico 28. Valores del coeficiente de absorción capilar (k) para cada tipo de concreto



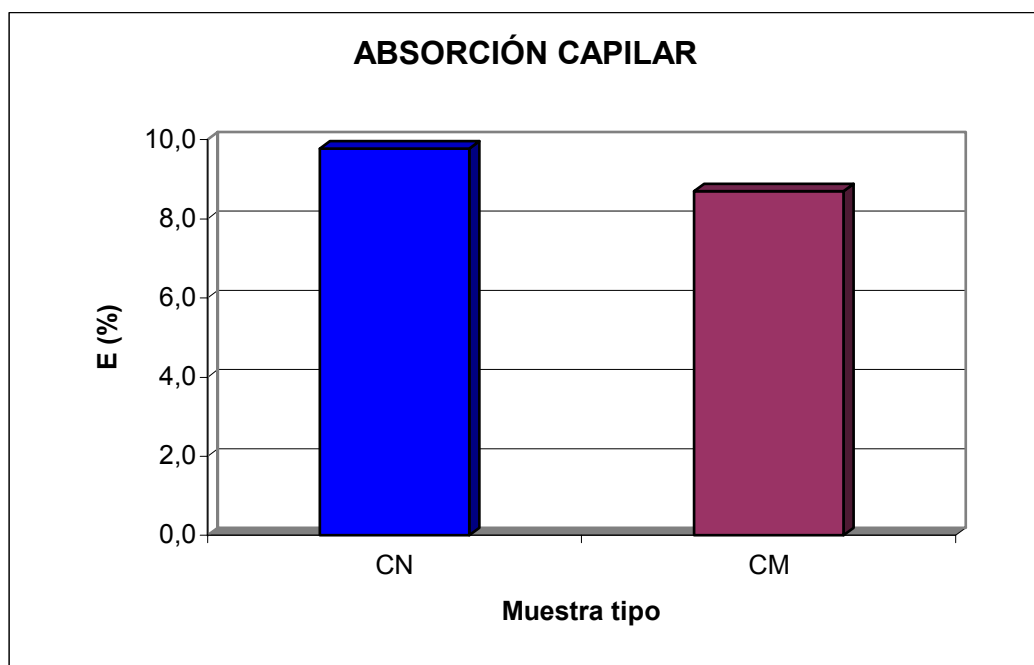
Del gráfico 29 podemos concluir que la muestra que presentó menor porosidad (ϵ) fue la de concreto modificado con 8.69% de porosidad frente a un 9.77% de la muestra de concreto normal. Los valores máximos especificados por los manuales y códigos constructivos permiten catalogar las muestras CN y CM como concretos de adecuada durabilidad (10% máx.).

Teniendo en cuenta los resultados de porosidad (Ensayo de Absorción Capilar y Ensayo de Porosidad por el Porosímetro de Campo Ruska) se puede concluir que el grado de confiabilidad de los resultados de porosidad es elevado, ya que están en el mismo rango, su diferencia radica en que en el ensayo de absorción capilar la porosidad se mide a partir de la propiedad de los materiales porosos para absorber y transmitir agua por capilaridad

⁷¹ MEJÍA DEGUTIÉRREZ, Ruby. "Propiedades y Comportamiento de Cementos Nacionales". Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad del Valle, Colombia. 1991

(absortividad), mientras que con el equipo Ruska la porosidad encontrada es la que puede ser ocupada por fluidos móviles (gases).

Gráfico 29. Valores de porosidad (ϵ) para cada tipo de concreto



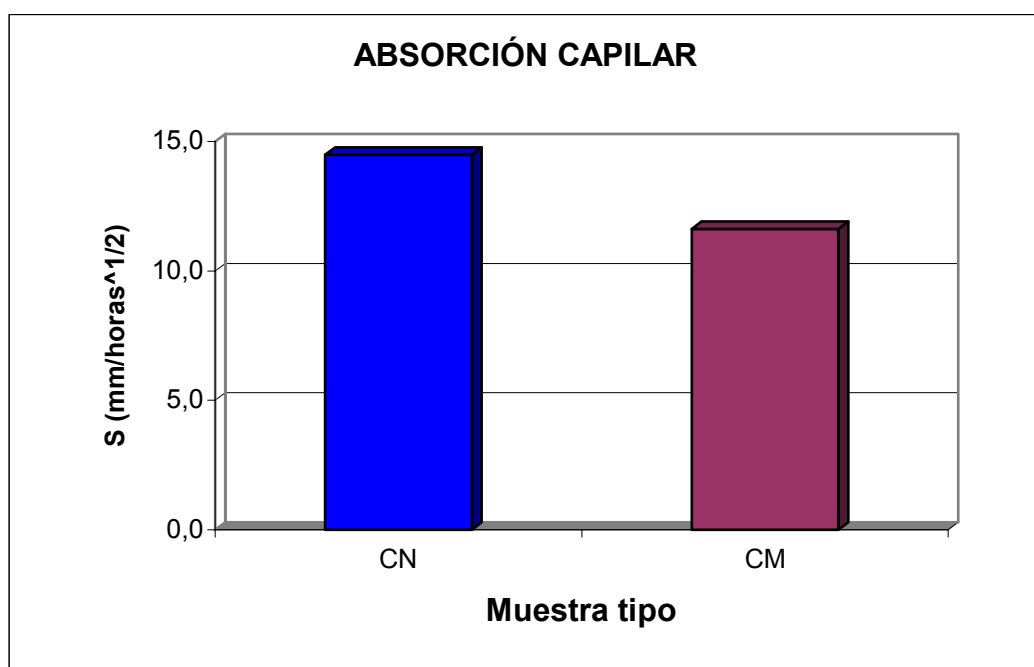
La absorptividad para la muestra CN fue de $14.48 \text{ mm/horas}^{1/2}$ ($0.00024 \text{ m/s}^{1/2}$), mientras para la muestra CM fue de $11.62 \text{ mm/horas}^{1/2}$ ($0.00019 \text{ m/s}^{1/2}$), lo que representa una disminución del 19.75%.

Según los parámetros de absorción capilar se tiene que ninguna de las muestras cumple con el valor máximo permisible para concretos de buena calidad (adecuada durabilidad) ya que éste es de $1 (10^{-4}) \text{ m/s}^{1/2}$. Es de resaltar, que según la literatura consultada, muchos de los concretos investigados, aunque cumplían los parámetros de calidad referentes a porosidad, absorción capilar y de resistencia a la penetración, tenían valores de absorptividad muy por encima de los máximos permisibles.

En cuanto a la absorptividad reportada por algunos autores para concretos de similares características a los que son objeto de esta investigación se tienen valores de 12.97 mm/horas^{1/2} para mezclas de concreto normal y 10.40 mm/horas^{1/2} para mezclas de concreto con un 20% de adición de cenizas volantes, el mejor comportamiento de estos puede deberse a su menor relación A/C (0.45-0.6).

En el gráfico 30 se muestran los valores de absorptividad para los concretos estudiados.

Gráfico 30. Valores de Absortividad (S) para cada tipo de concreto

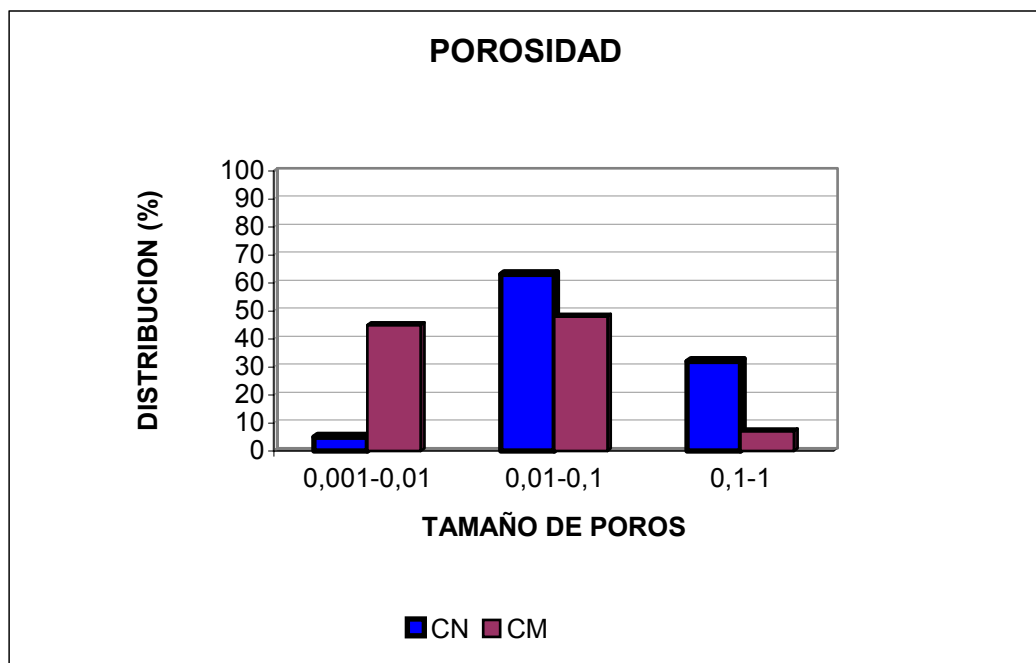


Al analizar los gráficos 27, 28, 29 y 30 y el anexo F; y teniendo en consideración que el mejor comportamiento corresponde a aquel material cuya resistencia a la penetración del agua (m) sea elevada, su coeficiente de absorción k relativamente bajo, porosidad (ϵ) reducida y absorptividad (S) menor, se puede decir sin lugar a dudas que la muestra de concreto modificado (CM) tuvo un mejor desempeño, lo cual corrobora los resultados de los ensayos de porosidad y permeabilidad realizados con los equipos Ruska.

Como complemento a este ensayo se mencionan los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, por la técnica de Porosimetría de Mercurio en cuanto al

tamaño de los poros y su distribución porcentual por rangos de tamaño sobre algunas de las muestras estudiadas en los ensayos de absorción. Se pudo observar en todos los casos, que las mezclas adicionadas con puzolanas (entre ellas la ceniza volante), independientemente de su proporción, presentaban un menor tamaño de los poros que las correspondientes muestras patrón. En cuanto a los rangos de tamaño se reportó una distribución de poros superior en los rangos de 0.001-0.01 μm y 0.01-0.1 μm y por tanto inferior en el rango de 0.1-1 μm con distribuciones porcentuales típicas del 45, 48 y 7%; mientras que las muestras de concreto normal reportaron distribuciones del 5, 63 y 32% para los mismos rangos. En el gráfico 31 se muestran algunos valores típicos de la proporción de los diferentes rangos de tamaños de poros para una muestra de concreto normal y una de concreto adicionado con ceniza volante.

Gráfico 31. Distribución de los tamaños de poro en dos muestras de concreto



Con base en lo anterior y en los resultados obtenidos puede afirmarse que la incorporación de ceniza volante lleva a un refinamiento en la estructura de los poros y un incremento en la tortuosidad del sistema lo cual conduce a reducir la absorción de agua por acción capilar.

8.7 ENSAYO PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN Y PERMEABILIDAD AL ANIÓN CLORURO

Este ensayo permite evaluar la penetración del anión cloruro en cada una de las probetas de las mezclas investigadas, teniendo una mediada de la Resistividad del concreto cuando se hace pasar corriente a través de él, durante su exposición a una disolución del ión cloruro. Se ha demostrado que existe una estrecha correlación entre la resistividad y la permeabilidad de un concreto.

Mediante titulación química se determinaron periódicamente la concentración de cloruros totales equivalentes de la siguiente manera:

- Se midieron en una pipeta volumétrica 25 ml. del reactivo titulante (Nitrato de plata de normalidad $N = 0.01$). el cual fue donado en el laboratorio de Corrosión de la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la universidad, Se tomaron muestras de 1 ml. (con una pipeta volumétrica) de la semicelda a la cual pasaban los cloruros mediante conducción por un campo eléctrico (solución prueba Ca(OH)_2). Cada muestra se vació en un erlenmeyer y se diluyó en 20 ml de agua destilada para poder medir la concentración, se agregó unas gotas de dicromato de potasio (reactivo indicador), tomando un color amarillo claro
- Se procedió a titular hasta que la muestra tomara un color rojizo-pardo, momento en el cual se detuvo la titulación y se midió el volumen gastado de titulante.

Para el cálculo de la concentración de cloruros en mg/l se utilizó la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{Cl}^- = \frac{V_t * N_t * P_{eq} \text{Cl}^-}{V_m} * (F.D) \quad (\text{Ecuación 8.5})$$

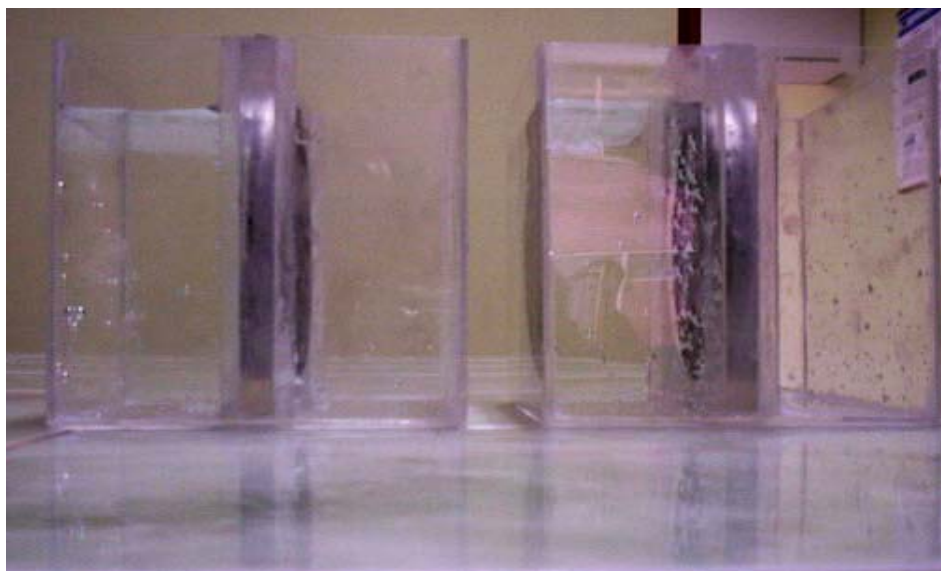
donde (mg/L) de Cl^- , es la concentración de cloruros, V_t es el volumen de titulante gastado, N_t es la normalidad del titulante ($N = 0.009$), $P_{eq} \text{Cl}^-$ es el peso equivalente para

el Cloro (35000 mg) , V_m es el volumen de la muestra en estudio y F.D es el factor de dilución (21). En el anexo G se encuentran las concentraciones de cada muestra.

Para la mejor comprensión de los resultados obtenidos en este ensayo (ver anexo G) se optó por la transformación de las unidades de concentración mg/L a mol/m^3 , ya que se encontraron errores en los cálculos del flujo iónico y del coeficiente de difusión, por el mal manejo de las unidades involucradas en este ensayo, en tesis de pregrado anteriores, al ser comparadas con la literatura técnica recopilada.

En la foto 25 se muestran las celdas y las probetas (centro) utilizadas en la prueba rápida de permeación a cloruros

Foto 25. Probetas para ensayo de permeabilidad al anión cloruro



Para realizar la evaluación del coeficiente de difusión, se trazaron dos gráficos de Concentración-tiempo (uno para cada tipo de muestra) y mediante regresión lineal, se determinó la pendiente en la zona lineal de cada una de las curvas obtenidas, para el cálculo del flujo iónico (J).

En los gráficos 32 y 33 se muestra la variación en la concentración de las semiceldas a través del tiempo para las muestras investigadas.

Gráfico 32. Concentración de cloruros-Tiempo para la muestra CN.

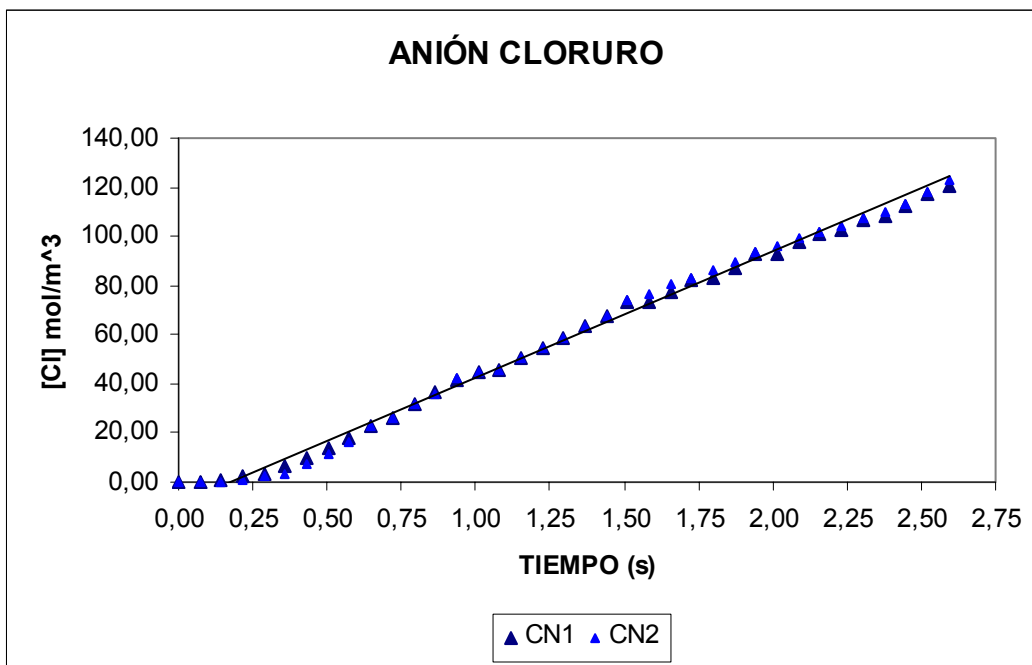
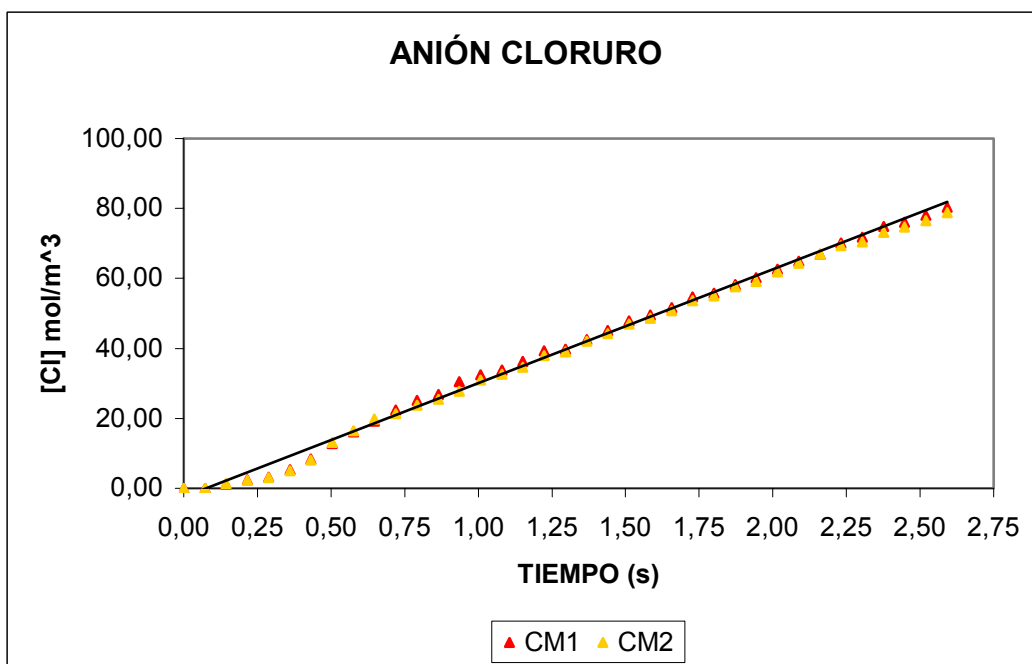


Gráfico 33. Concentración de cloruros-Tiempo para la muestra CM.



Con base en esta información, se calculó el valor del coeficiente de difusión D_{eff} para los dos tipos de concreto (ver anexo G).

A modo de facilitar al lector la comprensión de los cálculos involucrados, se muestra un ejemplo del cálculo tipo del coeficiente de difusión D_{eff} para la muestra de concreto normal CN. La duración del ensayo fue de 72 horas como lo recomienda la norma ^{72, 73}.

En el cálculo de D_{eff} se utilizaron los siguientes valores:

T = 298 °K; **R** = 1.9872 cal/mol °K; **F** = 23063 cal/V.eq; **ΔE** = 12 V; **z** = -1 para el anión cloruro; **C** = 0.51 eq/L (3% NaCl); **γ** = 1; **L** = 1 cm y **J** calculado con base en la pendiente del gráfico “concentración de cloruros-tiempo” en unidades de mol/cm²s.

Teniendo en cuenta la cinética de transporte del cloruro, J puede expresarse como:

$$J = -\frac{V}{A} * \left(\frac{dC}{dt} \right) \quad (\text{Ecuación 8.6})$$

donde V es el volumen de la disolución (270 ml = 0.00027 m³); A es el área de la probeta (63.617 cm²); dC/dt es la pendiente m del gráfico.

De acuerdo con el gráfico 32, se tiene:

m1= 5.053 (10⁻⁴) mol/m³s; por lo tanto:

$$J = -\frac{0.00027}{63.61} * 5.053(10^{-4}) = -2.145(10^{-9}) \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \text{s}}$$

Reemplazando J y los valores antes mencionados en la ecuación 7.10.

^{72, 73} AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. op.sit. p. 81

$$D_{eff} = \frac{-2.145(10^{-9})\left(\frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right) * 1.9872\left(\frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot ^\circ \text{K}}\right) * 298(^{\circ} \text{K}) * 1(\text{cm})}{(-1) * 23063\left(\frac{\text{cal}}{\text{V} \cdot \text{eq}}\right) * 0.51\left(\frac{\text{eq}}{\text{L}}\right) * 12(\text{V}) * 1} = 8.978(10^{-12}) \frac{\text{L}}{\text{cm} \cdot \text{s}}$$

$$D_{eff} = 8.978(10^{-12}) \frac{\text{L}}{\text{cm} \cdot \text{s}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} = 0.898(10^{-12}) \text{ m}^2 / \text{s}$$

Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados del ensayo para determinar el coeficiente de difusión y permeabilidad al ion cloruro de los concretos utilizados en la investigación.

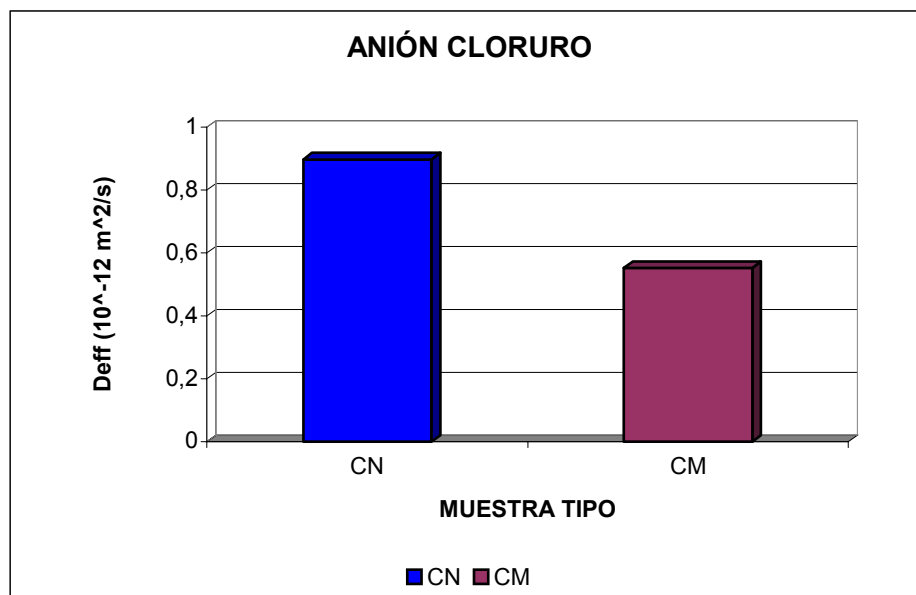
En cuanto a la concentración de cloruros presente en la semicelda, obtenida por titulación se reportó para la muestra CN una concentración de 121.78 mol/m³ (4323.19 mg/L) y 79.53 mol/m³ (2823.31 mg/L) para la muestra CM, lo cual representa una disminución del 34.69% respecto a la muestra patrón. (Ver anexo G)

Los valores de flujo iónico (J) fueron de 2.145 (10⁻⁹) mol/cm²s para la muestra de concreto normal y de 1.38 (10⁻⁹) mol/cm²s para la muestra de concreto modificado. (ver anexo G).

El coeficiente de difusión (D_{eff}) para las muestras investigadas fue de 0.898 (10⁻¹²) m²/s para la muestra de concreto normal y de 0.553 (10⁻¹²) m²/s para la muestra de concreto modificado, que representa una disminución del 61.6%. Los coeficientes de difusión para las muestras CN y CM presentan valores similares a los reportados en investigaciones anteriores ⁷³ para la mezcla de concreto normal y la mezcla de concreto adicionado con metacaolin (20%). En el gráfico 34 se presentan los valores del coeficiente de difusión para las muestras investigadas.

⁷³ TORRES, J., SILVA, J. DELVASTO, S. y otros. "Desempeño de Morteros y Concretos Adicionados con Metacaolin". Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad del Valle. Colombia. 1993

Gráfico 34. Valores del Coeficiente de Difusión (D_{eff}) para cada tipo de concreto.



La mayor resistencia a la penetración de cloruros para la muestra de concreto adicionado con cenizas volantes puede atribuirse a la disminución del tamaño de los poros (refinamiento) y a la modificación de la distribución de la red de poros, lo que incrementa la tortuosidad en el sistema, tal como se pudo verificar en los ensayos de porosidad y absorción capilar; así como al elevado contenido de Alúmina (Al_2O_3) de la adición ⁷⁴, compuesto que confiere a la mezcla cemento – ceniza volante una mayor capacidad de enlace con los iones cloruro para producir la sal de Friedel a la que se le atribuye un mayor efecto en la reducción de la movilidad del anión cloruro; con base en lo cual, para reducir el efecto de los aniones cloruro se recomienda la utilización de mezclas con elevado contenido en C_3A ⁷⁵.

⁷⁴ 4.53% para el cemento Pórtland y 23.5% para la ceniza volante. Esto conlleva a una mayor producción de C_3A para la mezcla CM.

⁷⁵ Los componentes de la hidratación del cemento que se enlazan químicamente con el anión cloruro son: El aluminato tricálcico, C_3A y el ferritoaluminato tetracálcico, C_4AF , dando lugar a los siguientes compuestos:



(MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby. op.sit. p. 78)

Es significativo, desde el punto de vista de la durabilidad, referenciar los datos obtenidos en investigaciones ⁷⁶ en probetas, después de una inmersión de 90 días en una solución de NaCl. El coeficiente de difusión para la mezcla de control de cemento Pórtland fue entre 3 y 5 veces más grande que los coeficientes para las mezclas que contenían cualquiera de dos puzolanas estudiadas (ceniza volante ultra fina y humo de sílice).

Existe un gran debate en cuanto a la validez de los resultados obtenidos por este método, debido a la variación de resultados en probetas “compañeras” de ensayo. La norma ASHTO T 277 dice que los valores de muestras compañeras ensayadas por un mismo operador no deben variar en su resultado en más de un 19.5%; lo que de por sí ya es una variación extremadamente grande en resultados permisibles. El método ASTM a mostrado que los resultados de dos pruebas conducidas por el mismo operador sobre muestras de concreto de una misma tanda pueden diferir tanto como un 42%. Sobre probetas “compañeras” ensayadas por diferentes laboratorios, este porcentaje puede llegar hasta un 51% ⁷⁷. A pesar de esto, en este momento es el único ensayo ampliamente aceptado por la industria del concreto para determinar el comportamiento de una mezcla en presencia de cloruros.

Debido a lo anterior no se deben interpretar los resultados obtenidos en la presente investigación como parámetros de calidad y durabilidad, sino más bien de selección entre mezclas.

⁷⁶ REVISTA CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Febrero del 2001.

⁷⁷ GRACE. Technical Bulletin Tb – 0100. “Understanding ASHTO T277 and ASTM C 1202 Rapid Chloride Permeability Test”. GRACE Constructions Products. 2006

8.8 ENSAYO DE SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS

Mediante este método se puede obtener información útil para juzgar la calidad de los materiales que han de estar expuestos a soluciones de sulfatos, ya que estos forman parte de las sales inorgánicas que normalmente están presentes en el terreno y en las aguas freáticas y superficiales, ya que conforme aumenta su concentración en el medio de contacto se incrementa su agresividad potencial al concreto.

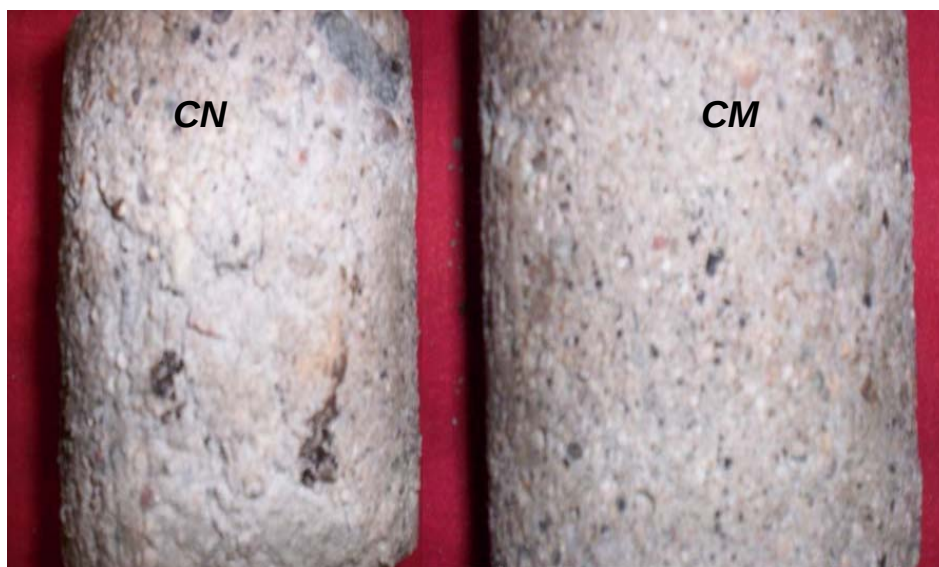
El ataque de sulfatos puede manifestarse en la forma de expansión, agrietamiento, pérdida de masa, desintegración, resquebrajamiento, desmenuzamiento, formación de lajas y/o descascaramiento.

En las Fotos 26 y 27 se puede apreciar el desgaste producido por los siete ciclos de exposición a sulfatos.

Fotos 26. Desgaste por Sulfatos a los 7 ciclos de cada una de las mezclas investigadas.



Fotos 27. Desgaste por sulfatos (Acercamiento).



Análisis de Resultados

A continuación se muestran los resultados del ensayo de solidez a sulfatos de los concretos utilizados en la investigación.

En el anexo H se muestran los resultados obtenidos de desgaste para las dos mezclas de concreto. Para el análisis de los resultados se trazó el gráficos 35 que ilustra el comportamiento ante el ataque por sulfatos.

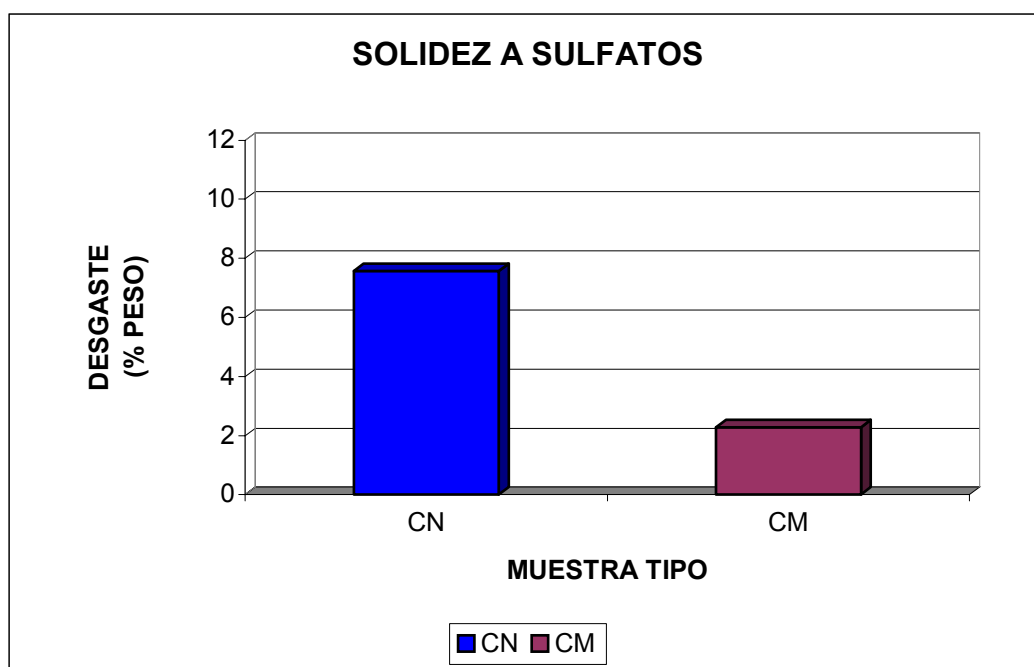
El mejor comportamiento después de 7 ciclos de inmersión y secado lo tuvo la muestra CM con un porcentaje de desgaste frente a su peso inicial del 2.28%, lo que representa una disminución del 30.11% comparado con la muestra de concreto normal.

Además de obtener la perdida de peso ocasionada por el ataque de los sulfatos, se hizo un análisis de tipo cualitativo para cada una de las muestras:

- Para las muestras de concreto normal se observó:
Presencia de grietas, descascaramiento y expansión volumétrica.

- Para las muestras de concreto modificado se observó:
Disminución de grietas (en tamaño y número), poco descascaramiento y baja expansión.

Gráfico 35. Valores de desgaste como pérdida de peso en % para cada tipo de concreto.



Al analizar los resultados de este ensayo y tomando en cuenta la literatura técnica, podría pensarse que estos contradicen lo que allí se expone ⁷⁸ en relación con el mejor comportamiento al ataque de sulfatos por parte de los concretos elaborados con cemento

⁷⁸ La acción agresiva de los sulfatos externos sobre el concreto es consecuencia de dos reacciones químicas: una con el hidróxido de calcio ($\text{Ca(OH}_2\text{)}$) que se libera durante la hidratación del cemento, y la otra con los compuestos hidratados que provienen del aluminato tricálcico (C_3A) del propio cemento.

(INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM y COMISIÓN FEDERAL DE ELCTRICIDAD. op.sit. p. 36)

de bajos contenidos de aluminato tricálcico y silicato tricálcico ⁷⁹. El mejor comportamiento presentado por la muestra de concreto modificado debe ser atribuido a la modificación de la estructura porosa de la pasta de cemento hidratada, reduciendo el tamaño de los poros más grandes, con lo cual se reduce la permeabilidad intrínseca de la pasta y se hace menos propenso el concreto a ser penetrado por el agua y por ende a las sustancias solubles en ella que propician el deterioro.

Como dato adicional se evaluó la resistencia a compresión de cada una de las muestras después de los 7 ciclos (ver tabla 24) . El concreto normal presento una disminución promedia de su resistencia a la compresión del 23.4% comparada con la registrada a los 28 días en el ensayo a compresión (excluyendo la probeta que se desintegro bajo carga); por su parte la muestra de concreto modificado presento una disminución del 13.66%. La validez de estos resultados no se analizará en esta investigación, ya que no se encuentran normalizados ni se cuenta con parámetros de referencia.

Tabla 24. Resistencia a la compresión después de los 7 ciclos.

MUESTRA	RESISTENCIA A COMPRESION	
	CUALITATIVO	CUANTITATIVO (kg/cm ²)
CN	sin novedad	209,67
	sin novedad	217,73
	desintegración	---
CM	sin novedad	242,19
	sin novedad	233,93
	sin novedad	236,45

⁷⁹ Compuesto del cemento Portland que aporta mayor resistencia mecánica a corto y mediano plazo y por tanto es el que comparativamente libera mayor cantidad de hidróxido de calcio Ca(OH₂) en las primeras edades.

9 CONCLUSIONES

En el capítulo anterior se presentaron las conclusiones para cada uno de los ensayos, a partir de los resultados experimentales obtenidos en la presente investigación; se dan las siguientes conclusiones generales:

- Las alteraciones que produjeron las cenizas volantes estudiadas, en las propiedades del concreto en estado fresco, se traducen en mayor manejabilidad, menor segregación y exudación debido a que la ceniza volante es un material más fino que el cemento y por lo tanto retiene mayor cantidad de agua. Igualmente, la ceniza volante, por tener mayor superficie específica, da al concreto fresco mayor velocidad de hidratación y así mismo, regula la cantidad de calor de hidratación, evitando la retracción y por lo tanto, el concreto adicionado es menos susceptible a la fisuración.
- En cuanto al comportamiento mecánico a compresión de los concretos estudiados, se puede concluir que es factible diseñar concretos adicionados con ceniza volante con la misma resistencia especificada con la certeza que a edades mayores a los 28 días su incremento resistente será mayor que en los concretos normales.
- La prueba a tensión dejó claro que el concreto con adición de ceniza volante presenta un comportamiento mucho mejor que el del concreto patrón. Ya que las microfisuras y otras discontinuidades tienen más influencia en el comportamiento a tensión que a compresión, el concreto adicionado se ve favorecido por la acción modificante que tienen las cenizas volantes sobre la micro estructura del concreto.
- La adición de ceniza volante al concreto le confiere a éste una menor permeabilidad en la matriz al reducir su porosidad útil, debido al refinamiento de los poros y a la modificación de la distribución de la red de poros, lo cual se

refleja en un mejor desempeño frente a ambientes agresivos, tales como los cloruros y sulfatos.

- La alúmina reactiva presente en las cenizas volantes posee la capacidad de reaccionar químicamente con los aniones cloruros dando lugar a la *Sal de Friedel*. La literatura técnica y los resultados obtenidos apoyan la conclusión de que la captación de cloruros por parte de la adición se debe llevar a cabo con mayor rapidez y proporción que la correspondiente al Aluminato Tricálcico del cemento Portland.
- Ya que no se puede explicar químicamente el mejor comportamiento del concreto adicionado con cenizas volantes al ataque de los sulfatos, pues es sabido que altos contenidos de Silicato Tricálcico (como el contenido en el cemento tipo III) y Aluminato Tricálcico (debido al aumento del contenido de alúmina por acción de la adición) no son favorables, pues la reacción química de los sulfatos con éstos produce yeso y estringita, productos de carácter negativo para el concreto; se concluye que su comportamiento al ataque de sulfatos ha de ser atribuido a la modificación de la estructura porosa de la pasta de cemento hidratada, disminuyendo el tamaño de los poros más grandes, con lo cual se reduce la permeabilidad intrínseca de la pasta y se hace menos propenso el concreto a ser penetrado por el agua y por ende a las sustancias solubles en ella, que propician la corrosión.
- La ceniza volante de Termopaipa cumple satisfactoriamente las características de un material para ser utilizado en mezclas de concreto en cuanto incrementa las resistencias mecánicas a compresión a edades tardías y contribuye a un mejor desempeño del material en ambientes agresivos tanto en presencia de cloruros como de sulfatos.
- Las cenizas volantes hoy en día no tienen ningún costo por sí solas, éste está dado por concepto de su transporte; el reemplazo del cemento por ceniza volante de Termopaipa representa un ahorro en costo de \$240 kilo (el precio del cemento Rioclaro tipo III es de \$290 kilo, y la ceniza volante se cotiza a \$50, costo del transporte), lo cual representa una cantidad significativa en el balance de la

producción anual de la planta (se estima en \$ 322'000.000). Existe otro ahorro que difícilmente se puede valorar en precio, pues las cenizas volantes se constituyen en un residuo ecológicamente problemático que deben eliminar las centrales termoeléctricas evitando que permanezcan en los depósitos donde son amontonadas y ubicadas al aire libre. Esta práctica se convierte en un peligro ambiental, ya que su contacto con el agua, el suelo y el aire, genera graves problemas de contaminación.

- La incorporación de materiales de desecho puede permitir extender la capacidad de producción de materiales cementosos que pueden ofrecer mejores propiedades que el cemento Pórtland y a un menor costo; coadyuvan en la reducción de emisión de contaminantes y requerimientos energéticos; reducen la acumulación de desechos en tiraderos industriales o rellenos sanitarios. Las ventajas potenciales están allí; se requiere invertir tiempo, dinero y recursos humanos para llevar a nuestro país a un mejor nivel de explotación de sus recursos con una orientación de respeto al medio ambiente.
- Finalmente, se concluye que la ceniza volante más que un residuo como lo define la norma NTC 3493, es un subproducto, que se convierte en una excelente alternativa para su utilización como materia prima en la industria de la construcción.

10 RECOMENDACIONES

Los autores se permiten realizar las siguientes recomendaciones de acuerdo con los alcances obtenidos en este proyecto:

- Ya que se consideran satisfactorios los resultados y alcances en cuanto a las pruebas de resistencia, se recomienda realizar periódicamente estas pruebas para la verificación de las propiedades mecánicas obtenidas en la presente investigación.
- Realizar pruebas diferentes a las utilizadas para la obtención de parámetros que permitan tener una idea de la permeabilidad de los concretos estudiados, las cuales no se implementaron en esta investigación debido a su complejidad o al tiempo que éstas requieren para la obtención de resultados. Tales pruebas podrían ser: prueba de absorción capilar por medio de una cámara de presión, ensayo para medir la absorción de los materiales aplicando agua mediante rocío a una presión de 0.5 KPa durante 24 horas y evaluación de la profundidad de penetración, aplicación de la norma británica BS1881-Parte 5 en la cual se somete a los especímenes estudiados a la acción del agua con una presión aplicada. Como se ve todas estas pruebas requieren medios mecánicos poco asequibles en nuestro entorno.
- Como complemento de las pruebas de permeabilidad sería de gran valor un estudio comparativo de la porosidad mediante el análisis del diámetro y distribución de los poros, por Porosimetría de Mercurio, de los concretos con y sin adición de ceniza volante. Este estudio permite comprender mejor la modificación de la microestructura del concreto por parte de la adición.
- Verificar los datos obtenidos en cuanto a la permeabilidad al anión cloruro, pues como se dijo anteriormente, los resultados obtenidos en este ensayo son materia

de discusión debido a la gran variabilidad de éstos en ensayos conducidos en diferentes laboratorios. Además se recomienda llevar a cabo la prueba de extracción electroquímica de cloruros, para la determinación del contenido máximo de cloruros tolerables en el concreto mediante la determinación de los cloruros por disolución o suspensión de la muestra sólida en ácido nítrico (cloruros totales) y en agua (cloruros libres) según las recomendaciones del ACI 201 (*Guide to Durable Concrete*).

- Llevar a cabo un ensayo a la solidez de sulfatos por inmersión de la muestra en el medio de sulfatos (Na_2SO_4 al 5%), y evaluar el cambio dimensional a diferentes intervalos de tiempo hasta un año de exposición, así como la variación resistente de las muestras.
- Realizar el ensayo de carbonatación acelerada para la determinación del coeficiente y la profundidad de carbonatación.
- Realizar pruebas electroquímicas de corrosión de largo plazo al acero de refuerzo embebido en concreto con y sin adición de cenizas volantes. La más acertada sería la prueba de resistencia de Polarización mediante la cual se puede obtener una medida fiable de la velocidad de corrosión (I_{corr}) brindando una información precisa acerca del riesgo de corrosión.
- Continuar con la línea de investigación de materiales puzolánicos, para la obtención de la mejor mezcla según los parámetros de resistencia requeridos, pues estos han probado ser un material adicionante de incalculable valor.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO T 277: Standard Method of test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete. 1986

ACI Committee 201. "Proposed Revision of Guide to Durable Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1991

ACI Committee 211. Report 211.1 "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1981

ACI Comité 311. "Manual of Concrete Inspection". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1981

ACI Committee 363. "State of the Art Report on High Strength Concrete". American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1984

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM, Section 4 "Construction"

BICZOCK, I. "Concrete Corrosion and Concrete Protection". Chemical Publishing Co., Inc. New York. 1988

CYTED – DURAR. "Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de la Corrosión en Estructuras de Hormigón armado". Reporte Final. Maracaibo. 1997

DE CEUKELAIRE, L. and VAN NIEUWENBURG, D.. "Accelerated Carbonation of a Blast-Furnace Cement Concrete." Cement and Concrete Research. Vol. 23 . 1993

ERLIN, B. and VERBECK, G.J. "Corrosion of Metal in Concrete – Needed Research". ACI Publication SP-49. American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1975

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS. "Manual de Rocas y Fluidos". UIS

FDOT "Section 400–Concrete Structures". Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction. Tallahassee. 1996

GRACE . Technical Bulletin Tb – 0100. "Understanding ASHHTO T277 and ASTM C 1202 Rapid Chloride Permeability Test.". GRACE Constructions Products. 2006

GUIRGUI, S. "A Basis for determining Minimum Cover Requirement for Durability". Paper 26, ACI SP-100. American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1987

HANSEN, T.C. "Long-term Strength of high fly Ash Concretes", Cement and Concrete Research, 20, 1990

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC, Sector 4 "Ingeniería Civil y Arquitectura".

INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM y COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. "Manual de Tecnología del Concreto". Limusa Noriega Editores. México. 1994

INVIAS E 713 : Solubilidad de Materiales Asfálticos en tricloroetileno

KRELL C., William. "Flowable Fly Ash a New Cement Stabilized Backfill". Londres. 1984

LAWRENCE, C.D. "Chemistry of Cement and Concrete". Portland Cement Association. Skokie. 1987

LINARES, Douglas y SÁNCHEZ, Miguel. "Construcción, operación y puesta en funcionamiento de una cámara para carbonatación acelerada". Centro de estudios de Corrosión. Universidad del Zulia. 2002

MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. "Contribución al estudio analítico y físico químico del sistema cemento-puzolana y escorias siderúrgicas-cloruros y agua". Tesis Doctoral.

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, España. Universidad del Valle, Colombia. Madrid. 1996

MEJÍA DE GUTIERREZ, R. y DEL VASTO, S., "Production of high Strength cements from Rice Husk Ash". Journal of Resource Management and Technology, V22, N°3, Sept. 1994

MEJÍA DEGUTIÉRREZ, Ruby. "Propiedades y Comportamiento de Cementos Nacionales". Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad del Valle, Colombia. 1991

MEJÍA DE GUTIERREZ, R. y DEL VASTO, S., "Sinergismo en las Propiedades del Cemento Pórtland por efecto de Adiciones", Memorias de Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Cali, 1989

MEHTA, P.K., SCHIESEL, P. and RAUPACH, M. "Performance and Durability of Concrete System". Proceedings Int. Congress on the Chemistry of Cement, 9th. New Delhi. 1992

MURDOCK, L.J. "Elaboración del Concreto y sus Aplicaciones". Compañía Editorial Continental S.A. México D.F. 1964

NEVILLE, A.J. , AND BROOKS, J.J. "Concrete Technology". Longman Scientific and Technical. Longman Group. Londres. 1987

OHGA, H. and NAGATAKI, S. "Prediction of Carbonation Depth of Concrete with Fly Ash". Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP-114. American Concrete Institute. Detroit, Mich. 1998

POWERS, T.C. "Freezing Effects in concrete". Paper 1, ACI SP-47. American Concrete Institute Detroit, Mich. 1975

QUINTERO P., Francisco J. "Corrosión del Acero de Refuerzo en Estructuras de Concreto". Empresa colombiana de Petróleos. Instituto Colombiano del Petróleo, División de tecnologías Complementarias. Piedecuesta, Santander. 1997

RAMACHANDRAN, V.S. and FELDMAN, R.F. "Cement Science". Concrete Admixtures Handbook. Noyes Publications. New York. 1984
REVISTA CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Febrero del 2001.

RATAY, R. "Forensic Structural Engineering Handbook". Mc Graw-Hill. New York. 2000
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. "Manual de Mantenimiento para Concreto". Subgerencia de Ingeniería Civil. Limusa Noriega Editores. México D.F. 1991

SIKA. "Manual de productos". 2003

TORRES, J., SILVA, J. DELVASTO, S. y otros. "Desempeño de Morteros y Concretos Adicionados con Metacaolin". Escuela de Ingeniería de Materiales. Universidad del Valle. Colombia. 1993

TUUTTI, K. "Corrosion of Steel in Concrete". The Swedish Cement and Concrete Association. Stockholm. 1982

ANEXO A

TOMA DE DATOS ENSAYO RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Resultados Ensayo de Resistencia a Compresión Concreto Normal

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION

CANTIDAD DE CENIZA 0%
 NOMENCLATURA CN
 AREA 78.54 cm²

TIEMPO 1 DIA							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coefficiente Variación
1	6908	87,95	1244	88,92	1257,60	3,923	4,412
2	7419	94,46	1336				
3	6580	83,78	1185				
4	7108	90,50	1280				
5	6902	87,88	1243				

TIEMPO 3 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coefficiente Variación
1	15376	195,77	2769	197,74	2796,80	4,203	2,125
2	15576	198,32	2805				
3	15537	197,83	2798				
4	16031	204,12	2887				
5	15132	192,66	2725				

TIEMPO 7 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coefficiente Variación
1	18680	237,84	3364	236,50	3345,00	4,610	1,949
2	18258	232,47	3288				
3	18597	236,78	3349				
4	18225	232,05	3282				
5	19113	243,36	3442				

TIEMPO 14 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coefficiente Variación
1	20068	255,52	3614	255,69	3616,40	4,471	1,748
2	20335	258,91	3662				
3	19902	253,40	3584				
4	20496	260,96	3691				
5	19608	249,65	3531				

TIEMPO 21 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coefficiente Variación
1	21035	267,82	3788	264,77	3744,80	3,833	1,448
2	20740	264,07	3735				
3	20457	260,47	3684				
4	21168	269,52	3812				
5	20574	261,95	3705				

TIEMPO 28 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	21012	267,54	3784	268,81	3802,00	3,963	1,474
2	21240	270,44	3825				
3	20724	263,86	3732				
4	21024	267,68	3786				
5	21562	274,54	3883				

TIEMPO 56 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	21279	270,93	3832	272,18	3849,60	4,201	1,543
2	21573	274,68	3885				
3	20857	265,56	3756				
4	21707	276,38	3909				
5	21468	273,34	3866				

TIEMPO 75 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	21035	267,82	3788	274,52	3882,80	4,725	1,721
2	21334	271,64	3842				
3	21707	276,38	3909				
4	21956	279,56	3954				
5	21773	277,22	3921				

TIEMPO 90 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	21851	278,21	3935	275,31	3894,00	5,095	1,851
2	21401	272,49	3854				
3	21051	268,03	3791				
4	21745	276,87	3916				
5	22067	280,97	3974				

TIEMPO 120 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	22179	282,39	3994	276,81	3915,20	4,436	1,603
2	21235	270,37	3824				
3	21640	275,53	3897				
4	21906	278,92	3945				
5	21745	276,87	3916				

TIEMPO 150 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	21768	277,15	3920	278,21	3935,00	4,278	1,538
2	21595	274,96	3889				
3	22012	280,26	3964				
4	22351	284,58	4025				
5	21529	274,11	3877				

Resultados Ensayo de Resistencia a Compresión Concreto Modificado

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION

CANTIDAD DE CENIZA 15%
 NOMENCLATURA CM
 AREA 78.54 cm²

TIEMPO 1 DIA

Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	6775	86,26	1220	91,16	1289,40	3,329	3,652
2	7202	91,70	1297				
3	7535	95,94	1357				
4	6986	88,94	1258				
5	7302	92,97	1315				

TIEMPO 3 DIAS

Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	14632	186,30	2635	190,18	2689,80	3,882	2,041
2	15337	195,28	2762				
3	15276	194,50	2751				
4	14738	187,64	2654				
5	14699	187,15	2647				

TIEMPO 7 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	18414	234,45	3316	231,35	3272,20	4,596	1,986
2	17481	222,57	3148				
3	18480	235,30	3328				
4	18164	231,27	3271				
5	18314	233,18	3298				

TIEMPO 14 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	20268	258,06	3650	254,17	3595,00	4,548	1,789
2	19741	251,35	3555				
3	19880	253,11	3580				
4	20457	260,47	3684				
5	19469	247,88	3506				

TIEMPO 21 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	21190	269,80	3816	264,72	3744,20	4,680	1,768
2	20774	264,50	3741				
3	20690	263,44	3726				
4	21135	269,09	3806				
5	20168	256,79	3632				

TIEMPO 28 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	20985	267,18	3779	275,22	3892,60	4,239	1,540
2	21923	279,13	3948				
3	21668	275,88	3902				
4	21645	275,60	3898				
5	21856	278,28	3936				

TIEMPO 56 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	22962	292,35	4135	287,65	4068,40	4,593	1,597
2	22828	290,66	4111				
3	22179	282,39	3994				
4	22129	281,75	3985				
5	22862	291,08	4117				

TIEMPO 75 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	23539	299,71	4239	295,00	4172,40	4,882	1,655
2	22795	290,23	4105				
3	22756	289,74	4098				
4	23061	293,63	4153				
5	23694	301,69	4267				

TIEMPO 90 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	23400	297,94	4214	303,94	4298,80	4,297	1,414
2	24328	309,75	4381				
3	23606	300,56	4251				
4	23889	304,16	4302				
5	24133	307,27	4346				

TIEMPO 120 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	24777	315,47	4462	312,86	4425,00	4,446	1,421
2	24055	306,28	4332				
3	24389	310,52	4392				
4	25088	319,43	4518				
5	24550	312,58	4421				

TIEMPO 150 DIAS							
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (p.s.i)	Media (Kg/cm ²)	Media (p.s.i)	Desviación Estándar	Coeficiente Variación
1	24250	308,76	4367	318,44	4504,00	4,887	1,535
2	25149	320,21	4529				
3	25227	321,20	4543				
4	25144	320,14	4528				
5	25283	321,91	4553				

ANEXO B

**TOMA DE DATOS ENSAYO RESISTENCIA A TENSIÓN POR COMPRESIÓN
DIAMETRAL (TENSIÓN INDIRECTA)**

Resultados Ensayo de Resistencia a Tensión Indirecta Concreto Normal

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TENSION INDIRECTA (Compresión Diametral)

CANTIDAD DE CENIZA 0%
 NOMENCLATURA CN
 AREA 200 cm²

TIEMPO 1 DIA					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	3100	9,87	10,67	9,49	1,01
2	2800	8,91			
3	3100	9,87			
4	2900	9,23			
5	3000	9,55			

TIEMPO 3 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	4800	15,28	7,69	15,22	1,08
2	4700	14,96			
3	4700	14,96			
4	5100	16,23			
5	4600	14,64			

TIEMPO 7 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	6300	20,05	7,54	17,83	1,16
2	5700	18,14			
3	5400	17,19			
4	5100	16,23			
5	5500	17,51			

TIEMPO 14 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	6500	20,69	7,72	19,74	1,23
2	6300	20,05			
3	6100	19,42			
4	6300	20,05			
5	5800	18,46			

TIEMPO 21 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	6700	21,33	8,15	21,58	1,33
2	6500	20,69			
3	6900	21,96			
4	6800	21,65			
5	7000	22,28			

TIEMPO 28 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	6900	21,96	8,31	22,35	1,36
2	7200	22,92			
3	7300	23,24			
4	6800	21,65			
5	6900	21,96			

TIEMPO 56 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	7300	23,24	8,40	22,85	1,39
2	7500	23,87			
3	7100	22,60			
4	7500	23,87			
5	6500	20,69			

TIEMPO 75 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	7200	22,92	8,56	23,49	1,42
2	7700	24,51			
3	7600	24,19			
4	7200	22,92			
5	7200	22,92			

TIEMPO 90 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	8100	25,78	8,99	24,76	1,49
2	7400	23,55			
3	7600	24,19			
4	8000	25,46			
5	7800	24,83			

TIEMPO 120 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	8000	25,46	9,20	25,46	1,53
2	8200	26,10			
3	8100	25,78			
4	7800	24,83			
5	7900	25,15			

TIEMPO 150 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f' C}$
1	8200	26,10	9,43	26,23	1,57
2	8500	27,06			
3	8200	26,10			
4	8400	26,74			
5	7900	25,15			

Resultados Ensayo de Resistencia a Tensión Indirecta Concreto Modificado

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA

CANTIDAD DE CENIZA 15%
 NOMENCLATURA CM
 AREA 200 cm²

TIEMPO 1 DIA					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	4900	15,60	17,32	15,79	1,65
2	5200	16,55			
3	4600	14,64			
4	5000	15,92			
5	5100	16,23			

TIEMPO 3 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	6800	21,65	11,88	22,60	1,64
2	7200	22,92			
3	7100	22,60			
4	7000	22,28			
5	7400	23,55			

TIEMPO 7 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	8000	25,46	10,87	25,15	1,65
2	7700	24,51			
3	7800	24,83			
4	7900	25,15			
5	8100	25,78			

TIEMPO 14 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	8500	27,06	10,49	26,67	1,67
2	8700	27,69			
3	8300	26,42			
4	8200	26,10			
5	8200	26,10			

TIEMPO 21 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	9100	28,97	10,85	28,71	1,76
2	9300	29,60			
3	9200	29,28			
4	8500	27,06			
5	9000	28,65			

TIEMPO 28 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	9700	30,88	10,87	29,92	1,80
2	9200	29,28			
3	9600	30,56			
4	9100	28,97			
5	9400	29,92			

TIEMPO 56 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	10100	32,15	10,91	31,39	1,85
2	10000	31,83			
3	9800	31,19			
4	9900	31,51			
5	9500	30,24			

TIEMPO 75 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	9700	30,88	11,14	32,85	1,91
2	10600	33,74			
3	10500	33,42			
4	10300	32,79			
5	10500	33,42			

TIEMPO 90 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	10800	34,38	11,10	33,74	1,94
2	10600	33,74			
3	10200	32,47			
4	10300	32,79			
5	11100	35,33			

TIEMPO 120 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	10800	34,38	10,93	34,19	1,93
2	11200	35,65			
3	10900	34,70			
4	10200	32,47			
5	10600	33,74			

TIEMPO 150 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	% Resistencia Compresión	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	10900	34,70	11,02	35,08	1,97
2	10800	34,38			
3	11000	35,01			
4	10600	33,74			
5	11800	37,56			

ANEXO C

TOMA DE DATOS ENSAYO RESISTENCIA A TENSIÓN POR FLEXIÓN

Resultados Ensayo de Resistencia a Tensión por Flexión Concreto Normal

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

CANTIDAD DE CENIZA 0%
NOMENCLATURA CN
LONGITUD EFECTIVA 50 cm
AREA 225 cm²

TIEMPO 7 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Media (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	980	986	21,78	21,91	1,42
2	1000		22,22		
3	1100		24,44		
4	950		21,11		
5	900		20,00		

TIEMPO 28 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Media (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	1400	1320	31,11	29,33	1,79
2	1350		30,00		
3	1300		28,89		
4	1250		27,78		
5	1300		28,89		

Resultados Ensayo de Resistencia a Tensión por Flexión Concreto Modificado

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

CANTIDAD DE CENIZA 15%
NOMENCLATURA CM
LONGITUD EFECTIVA 50 cm
AREA 225 cm²

TIEMPO 7 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Media (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	1350	1400	30,00	31,11	2,05
2	1400		31,11		
3	1350		30,00		
4	1400		31,11		
5	1500		33,33		

TIEMPO 28 DIAS					
Probeta No.	Fuerza (Kg)	Media (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Media (Kg/cm ²)	Factor de Proporcionalidad $\times \sqrt{f'c}$
1	1900	1830	42,22	40,67	2,47
2	1700		37,78		
3	1900		42,22		
4	1850		41,11		
5	1800		40,00		

ANEXO D

TOMA DE DATOS ENSAYO DE POROSIDAD (POROSÍMETRO DE CAMPO RUSKA)

Resultados Ensayo de Porosidad

DETERMINACIÓN DE LA POROSIDAD							
MÉTODO POROSIMETRO DE CAMPO RUSKA							
TIPO DE MUESTRA Concreto Normal (CN)							
DATOS Y/O CARACTERÍSTICAS		Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
		Lectura	Volumen	Lectura	Volumen	Lectura	Volumen
TAMAÑO COPA	Large		cm³		cm³		cm³
R Core		46,5	6,3	48	6,5	53	7,2
R Hg		52	7,1	54	7,3	59,5	8,0
POROSIDAD							
P(%)= (1-(R Core/R Hg))*100		10,13		10,66		10,52	
% PROMEDIO POROSIDAD		10,43					
TIPO DE MUESTRA CONCRETO MODIFICADO (CM)							
DATOS Y/O CARACTERÍSTICAS		Muestra 1		Muestra 2		Muestra 3	
		Lectura	Volumen	Lectura	Volumen	Lectura	Volumen
TAMAÑO COPA	4.1.3 Large		cm³		cm³		cm³
R Core		48	6,5	51	6,9	53,5	7,3
R Hg		52,5	7,1	56	7,6	59	8,0
POROSIDAD							
P(%)= (1-(R Core/R Hg))*100		8,21		8,58		8,97	
% PROMEDIO POROSIDAD		8,58					

ANEXO E

TOMA DE DATOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD (PERMEÁMETRO DE GAS RUSKA)

Resultados Ensayo de Permeabilidad

DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON GASES			
MÉTODO PERMEAMETRO DE GAS RUSKA			
TIPO DE MUESTRA Concreto Normal (CN)			
	MUESTRA		
DATOS	1	2	3
AREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4	4	4
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2	2	2
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,01815	0,01815	0,01815
FLOWMETER (S,M,L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	1	1	1
LECTURA FLOWMETER, Rf	12	11,8	12,2
TASA PROM. FLUJO, Q (cc/s)	0,76	0,73	0,78
PERMEABILIDAD, K (mD)	6,897	6,62475	7,0785
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	6,87		
TIPO DE MUESTRA Concreto Normal (CN)			
	MUESTRA		
DATOS	1	2	3
AREA SECCIÓN TRANSVERSAL, A (cm ²)	4	4	4
LONGITUD MUESTRA, L (cm)	2	2	2
VISCOSIDAD DEL GAS, μ (cp)	0,01815	0,01815	0,01815
FLOWMETER (S,M,L)	S	S	S
GRADIENTE DE PRESIÓN, P (atm)	1	1	1
LECTURA FLOWMETER, Rf	6,3	6,8	6,6
TASA PROM. FLUJO, Q (cc/s)	0,26	0,31	0,28
PERMEABILIDAD, K (mD)	2,3595	2,81325	2,541
PROMEDIO PERMEABILIDAD, K (mD)	2,57		

ANEXO F

TOMA DE DATOS ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

Resultados Ensayo de Absorción Capilar

TIEMPO HORAS	$T^{1/2}$	MASA DE AGUA ABSORBIDA (gramos)					
		CN			CM		
		1	2	3	1	2	3
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,083	0,29	1,75	1,65	1,75	3,35	3,20	3,70
0,167	0,41	3,20	2,90	2,60	4,00	3,75	4,50
0,250	0,50	4,55	4,30	3,70	4,85	4,55	5,35
0,500	0,71	6,70	6,60	6,60	6,40	5,95	7,15
0,750	0,87	8,75	8,70	7,90	7,70	7,15	8,55
1,000	1,00	10,45	10,65	10,85	8,75	8,15	9,80
1,500	1,22	12,80	13,15	13,75	10,45	9,75	11,55
2,000	1,41	14,80	15,35	16,40	11,80	11,00	13,15
3,000	1,73	18,30	19,05	20,20	14,30	13,45	15,40
4,000	2,00	21,70	22,45	23,85	16,25	15,30	17,50
5,000	2,24	22,15	22,85	24,10	18,05	17,05	19,15
6,000	2,45	22,50	23,45	24,60	19,60	18,55	20,65
24,000	4,90	22,95	23,80	25,00	22,90	21,55	23,30
48,000	6,93	23,15	24,10	25,35	23,05	21,70	23,60
72,000	8,49	23,35	24,35	25,55	23,20	21,95	23,85
96,000	9,80	23,55	24,50	25,70	23,30	22,10	24,05
120,000	10,95	23,70	24,65	25,80	23,40	22,25	24,15
144,000	12,00	23,75	24,80	25,80	23,60	22,35	24,25
168,000	12,96	23,75	24,80	25,80	23,75	22,35	24,25

Resultados Ensayo de Absorción Capilar

Muestra	Ecuaciones de ajuste		Tiempo para alcanzar la cara superior	Resistencia a la Penetración del agua	Coefficiente de Absorción Capilar	Porosidad	Absortividad	Velocidad de absorción
	Fase 1	Fase 2	$t_n^{1/2}$ (horas)	m (10^7 s/m ²)	k (kg/m ² *s ^{1/2}))	E (%)	S (mm/horas ^{1/2})	q (kg/m ² *s)
CN1	0.1423x-0.012	0.0021x+0.2784	2,07133	1,7162	0,02305	9,55	14,48	0,0056
CN2	0.1493x-0.0164	0.0024x+0.288	2,07229	1,7178	0,02401	9,95	14,48	0,0058
CN3	0.1609x-0.0238	0.0021x+0.305	2,0705	1,7148	0,02373	9,83	14,49	0,0057
CM1	0.0988x+0.0102	0.0038x+0.258	2,6084	2,7215	0,01900	9,91	11,50	0,0036
CM2	0.0934x+0.0089	0.0037x+0.2434	2,6142	2,7336	0,01977	10,33	11,48	0,0038
CM3	0.1041x+0.995	0.0036x+0.2684	2,5223	2,5448	0,01994	10,06	11,89	0,0040

ANEXO G

TOMA DE DATOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL ANIÓN CLORURO

Resultados Ensayo de Permeabilidad al Anión cloruro

Tiempo Horas	Concentración Cl (mg/l)				T (10 ⁵ s)	Concentración Cl (mol/m ³)			
	CN		CM			CN		CM	
0	--	--	--	--	0,000	--	--	--	--
2	--	--	--	--	0,072	--	--	--	--
4	31,95	--	40,84	47,72	0,144	0,90	--	1,15	1,34
6	79,21	40,52	85,15	83,14	0,216	2,23	1,14	2,40	2,34
8	103,42	87,34	115,22	107,75	0,288	2,91	2,46	3,25	3,04
10	221,23	107,04	189,43	178,12	0,360	6,23	3,02	5,34	5,02
12	360,33	273,71	298,56	287,14	0,432	10,15	7,71	8,41	8,09
14	481,12	415,46	454,71	463,46	0,504	13,55	11,70	12,81	13,06
16	623,68	591,52	572,86	585,89	0,576	17,57	16,66	16,14	16,50
18	805,48	797,98	681,01	701,03	0,648	22,69	22,48	19,18	19,75
20	921,84	923,84	795,15	756,48	0,720	25,97	26,02	22,40	21,31
22	1133,57	1125,29	892,29	846,53	0,792	31,93	31,70	25,13	23,85
24	1297,67	1265,23	953,44	903,56	0,864	36,55	35,64	26,86	25,45
26	1480,91	1497,67	1083,89	985,64	0,936	41,72	42,19	30,53	27,76
28	1590,69	1580,91	1151,73	1098,27	1,008	44,81	44,53	32,44	30,94
30	1627,61	1631,84	1201,88	1156,89	1,080	45,85	45,97	33,86	32,59
32	1794,46	1790,69	1288,02	1228,33	1,152	50,55	50,44	36,28	34,60
34	1941,66	1927,91	1396,17	1347,12	1,224	54,69	54,31	39,33	37,95
36	2084,98	2094,46	1414,32	1387,02	1,296	58,73	59,00	39,84	39,07
38	2257,64	2241,56	1512,46	1492,55	1,368	63,60	63,14	42,60	42,04
40	2384,32	2397,51	1600,61	1571,66	1,440	67,16	67,54	45,09	44,27
42	2587,79	2634,32	1698,75	1664,35	1,512	72,90	74,21	47,85	46,88
44	2604,48	2711,05	1759,9	1725,07	1,584	73,37	76,37	49,57	48,59
46	2741,14	2857,93	1835,05	1803,12	1,656	77,22	80,51	51,69	50,79
48	2920,33	2954,33	1943,19	1905,49	1,728	82,26	83,22	54,74	53,68
50	2934,57	3066,04	1981,34	1952,97	1,800	82,66	86,37	55,81	55,01

Tiempo Horas	Concentración Cl (mg/l)				T (10 ⁵ s)	Concentración Cl (mol/m ³)			
	CN		CM			CN		CM	
52	3097,31	3182,21	2069,48	2044,23	1,872	87,25	89,64	58,30	57,58
54	3282,67	3322,87	2135,63	2100,77	1,944	92,47	93,60	60,16	59,18
56	3301,21	3414,33	2221,78	2197,09	2,016	92,99	96,18	62,59	61,89
58	3460,14	3528,57	2303,92	2281,2	2,088	97,47	99,40	64,90	64,26
60	3584,74	3601,26	2374,07	2375,44	2,160	100,98	101,44	66,88	66,91
62	3651,37	3698,01	2490,21	2462,74	2,232	102,86	104,17	70,15	69,37
64	3775,92	3812,67	2548,36	2501,86	2,304	106,36	107,40	71,78	70,47
66	3845,11	3905,09	2656,51	2596,01	2,376	108,31	110,00	74,83	73,13
68	3985,82	4016,74	2701,65	2653,64	2,448	112,28	113,15	76,10	74,75
70	4163,16	4186,08	2772,83	2715,53	2,520	117,27	117,92	78,11	76,49
72	4286,02	4360,77	2850,94	2796,08	2,592	120,73	122,84	80,31	78,76

Valores de Flujo Iónico y Coeficiente de Difusión

MUESTRA	FLUJO IÓNICO J (mol/cm ² *s))	COEFICIENTE DIFUSIÓN Deff (10 ⁻¹²) (m ² / s)
CN	2,13E-09	0,853
	2,16E-09	0,868
CM	1,39E-09	0,559
	1,37E-09	0,548

ANEXO H

TOMA DE DATOS ENSAYO DE SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS

Resultados Ensayo de Solidez Bajo la Acción de Sulfatos

ENSAYO DE SOLIDEZ BAJO LA ACCIÓN DE SULFATOS			
TIPO DE MUESTRA Concreto Normal (CN)			
Peso Inicial (gr)	Peso 7 ciclos (gr)	Desgaste 7 ciclos (% peso)	Promedio Desgaste 7 ciclos
1875,9	1734,8	7,52	7,57
1879,8	1741,6	7,35	
1876,6	1729,8	7,82	
TIPO DE MUESTRA Concreto Modificado (CM)			
Peso Inicial (gr)	Peso 7 ciclos (gr)	Desgaste 7 ciclos (% peso)	Promedio Desgaste 7 ciclos
1862,1	1824,3	2,03	2,28
1877,1	1831,2	2,45	
1851,2	1807,7	2,35	