

**USO DE LA ESCORIA DE PROCESOS METALURGICOS COMO AGREGADO
DEL CONCRETO PARA LA FABRICACION DE ELEMENTOS DE
CONSTRUCCION NO ESTRUCTURALES**

LUDWING PEREZ BUSTOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**USO DE LA ESCORIA DE PROCESOS METALURGICOS COMO AGREGADO
DEL CONCRETO PARA LA FABRICACION DE ELEMENTOS DE
CONSTRUCCION NO ESTRUCTURALES**

ING. LUDWING PEREZ BUSTOS

Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Director

RICARDO ALFREDO CRUZ HERNANDEZ
Ingeniero Civil, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, por el cuidado cada día y por brindarme la posibilidad de hacer lo que me gusta.

A mi esposa, amiga y confidente, Ingrith Nayerly, por ser mi ayuda idónea.

A mis familiares, por ser apoyo y compañía.

A mis compañeros, por sus aportes.

A mi director y profesor, Ricardo A. cruz, por sus contribuciones realizadas al proyecto de investigación, durante el desarrollo del proyecto.

A mis calificadoras, por sus recomendaciones.

Al personal de laboratorio de la universidad industrial de Santander.

A la escuela de Ingeniería Civil, y a la coordinación de la Maestría en Ingeniería Civil de la UIS por la ayuda prestada y las facilidades dadas al autor de esta investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. ANTECEDENTES.....	19
1.1. DEFINICION Y COMPOSICION DE LA ESCORIA.	21
1.1.1. Definición.....	21
1.1.2. Composición de la escoria.	22
1.2. CLASES DE HORNOS DE FUNDICIÓN.....	23
1.2.1. Horno de cubilote.....	24
1.2.2. Horno de reverberos.	25
1.2.3. Horno de convertidor.	25
1.2.4. Horno eléctrico.....	26
1.2.5. Alto horno.	27
1.3. CLASIFICACIÓN DE LA ESCORIA	28
1.4. APLICACIONES DEL USO DE LA ESCORIA.....	29
1.4.1. Aplicaciones de las escorias de horno eléctrico.....	30
1.4.2. Aplicaciones de las escorias de alto horno.	30
1.4.3. Hormigones con arena de fundición.....	32
1.4.4. Hormigones con sustitución de áridos por escoria.	33
1.5. CONCEPTO DE DURABILIDAD.....	39
1.5.1. Carbonatación	40
1.5.2. Reacción álcali-agregado.....	42
1.5.3. Ataque por sulfatos	43
1.6. ENSAYOS ACELERADOS PARA EVALUAR LA DURABILIDAD.	44
1.6.1. Ensayo acelerado álcali agregado.	44
1.6.2. Sulfatación acelerada.	45
1.6.3. Carbonatación acelerada.....	45

2. MARCO EXPERIMENTAL	48
2.1. CARACTERIZACION DE LA ESCORIA.....	49
2.2. DISEÑO DE LA MEZCLA PARA EL MATERIAL COMPUESTO	54
2.3. PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO	62
2.4. EVALUACIÓN DEL EFECTO GENERADO POR ATAQUE QUÍMICO SOBRE EL MATERIAL COMPUESTO	71
2.5. ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN NO ESTRUCTURALES.....	77
3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACION DE LA ESCORIA Y DISEÑO DE LA MEZCLA.....	81
3.1. GRANULOMETRÍA.....	81
3.2. DENSIDAD	82
3.3. HUMEDAD NATURAL	82
3.4. ABSORCIÓN DE AGUA	83
3.5. DISEÑO DE LA MEZCLA PARA EL MATERIAL COMPUESTO	83
4. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO	93
4.1. MÓDULO DE ROTURA	93
4.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	94
4.3. ABSORCIÓN	96
4.4. VELOCIDAD INICIAL DE ABSORCIÓN.....	97
4.5. CARGA DE ROTURA	99
4.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD	99
4.7. DENSIDAD DEL MATERIAL EN ESTADO ENDURECIDO	100
4.8. PESO POR UNIDAD DE ÁREA.....	101
5. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL EFECTO GENERADO POR ATAQUE QUÍMICO SOBRE EL MATERIAL COMPUESTO	103
5.1. REACCIÓN ÁLCALI ÁRIDO	103

5.2. ATAQUE POR SULFATOS.....	106
5.3. CARBONATACIÓN.....	109
6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCION, NO ESTRUCTURALES.	115
6.1. ENSAYO A FLEXION (PLANO DEBIL).....	115
6.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN	117
6.3. ENSAYO EN EL PLANO INCLINADO	119
CONCLUSIONES.....	121
RECOMENDACIONES.....	125
BIBLIOGRAFIA.....	127
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción de la fundición en España, en el año 2006	20
Figura 2. Producción de la fundición en España, para el año 2010	21
Figura 3. Elementos abundantes en las escorias de convertidor de procesos industriales	23
Figura 4. Clasificación de la escoria según su procedencia	29
Figura 5. Concentración anual de dióxido de carbono desde 1959 hasta 2011 ...	41
Figura 6. Fases de la Reacción Álcali-Agregado	43
Figura 7. Marco experimental	48
Figura 8. Granulometría de la escoria de horno de cubilote y granulometrías ideales	51
Figura 9. Elementos de laboratorio para determinar la masa unitaria del agregado grueso y fino	57
Figura 10. Secuencia para el diseño de mezclas de concreto	62
Figura 11. . Falla por carga a flexión.....	63
Figura 12. Ensayo de probetas a compresión.....	65
Figura 13. Ensayo reacción álcali árido	72
Figura 14. Ensayo a flexión en el plano débil.....	78
Figura 15. Ensayo a compresión longitudinalmente.....	79
Figura 16. Ensayo a compresión diagonal	80
Figura 17. Ensayo de colorimetría para el agregado fino	85
Figura 18. Valores del módulo de rotura de acuerdo al porcentaje de sustitución.....	94
Figura 19. Resistencia a compresión a diferentes edades de curado	96
Figura 20. Profundidad de penetración, ensayo de permeabilidad.....	97
Figura 21. Densidad en estado endurecido para diferentes porcentajes de sustitución.....	101

Figura 22. Variación de la masa húmeda, ensayo acelerado reacción álcali árido	104
Figura 23. Porcentaje de variación de la masa referente al porcentaje de sustitución.....	104
Figura 24. Eflorescencias presentes en las probetas, ensayo de reacción álcali árido	105
Figura 25. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión, en probetas inmersas en soda caustica	106
Figura 26. Variación de la masa húmeda, probetas sometidas a sulfatación	107
Figura 27. Aspecto de las probetas durante el ensayo de sulfatación acelerada	108
Figura 28. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión en probetas sulfatadas	109
Figura 29. Profundidades de carbonatación para el 0, 10, 15 y 20% de sustitución.....	110
Figura 30. Tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC.....	111
Figura 31. Resistencia máxima a la tracción indirecta de probetas carbonatadas.....	113
Figura 32. Ensayo en el plano débil, carga puntual central	116
Figura 33. Ensayo resistencia a compresión.....	118
Figura 34. Ensayo diagonal	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de distribución granulométrica, NTC 174	50
Tabla 2. Tamaño de las muestras para el agregado fino, NTC 77	55
Tabla 3. Escala Colorimétrica de Gardner	56
Tabla 4. Masa mínima de la muestra para determinar densidad y absorción del agregado grueso	58
Tabla 5. Condiciones de la cámara para la carbonatación del concreto	75
Tabla 6. Flujos de CO ₂ y aire para garantizar una concentración del 70%.....	75
Tabla 7. Distribución granulométrica de la escoria.....	81
Tabla 8. Cálculo de la densidad del cemento hidráulico	83
Tabla 9. Distribución granulométrica del agregado fino	84
Tabla 10. Valores de masa unitaria del agregado grueso	85
Tabla 11. Valores de masa unitaria del agregado fino (arena).....	86
Tabla 12. Valores de masa unitaria del agregado fino (escoria)	86
Tabla 13. Valores de densidad del agregado grueso.	87
Tabla 14. Valores de densidad del agregado fino (Arena).	87
Tabla 15. Valores de densidad del agregado fino (Escoria).	87
Tabla 16. Resistencia a la compresión a diferentes edades y porcentajes de sustitución.....	95
Tabla 17. Absorción con diferentes porcentajes de sustitución.....	96
Tabla 18. Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración.....	98
Tabla 19. Tiempo de absorción de agua.....	98
Tabla 20. Carga de rotura del Material Compuesto.....	99
Tabla 21. Comparación del Módulo de Elasticidad Experimental con los valores al aplicar las ecuaciones propuestas por NSR-10	100
Tabla 22. Resultados del ensayo para calcular la masa unitaria.....	101

Tabla 23. Pérdida de masa (%), con sustitución de escoria por arena del 20%	108
Tabla 24. Resultados de medición de la profundidad de carbonatación.	110
Tabla 25. Profundidad de penetración	111
Tabla 26. Resistencia a la tracción indirecta	112
Tabla 27. Tiempo de vida útil	112
Tabla 28. Carga máxima aplicada y módulo de rotura, ensayo en el plano débil, en losas (25 x 25 cm)	116
Tabla 29. Carga máxima aplicada y módulo de rotura, ensayo en el plano débil, en plaquetas (50 x 50 cm)	117
Tabla 30. Carga máxima aplicada en losas, ensayo a compresión.....	118
Tabla 31. Carga máxima aplicada en paneles, ensayo a compresión.....	118
Tabla 32. Carga máxima aplicada en losas, plano fuerte.....	120

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Gradaciones ideales para agregados en porcentaje que pasa	136
Anexo B - Caracterización de la materia prima	137
Anexo C - Diseño de mezcla, metodo ACI comité 211	140
Anexo D - Diseño de mezcla usando escoria por arena, método ACI comité 211.	145
Anexo E - Cálculo de la porosidad del concreto, para determinar el coeficiente de permeabilidad por penetración de agua.	150
Anexo F – Tablas de análisis comparativos según normas.....	154
Anexo G – Tabla resumen en porcentaje de los ensayos realizados al material compuesto	156

RESUMEN

Título: Uso de la Escoria de Procesos Metalúrgicos como Agregado del Concreto Para la Fabricación de Elementos de Construcción no Estructurales

Autor: Ludwing Pérez Bustos**

Palabras clave: Agregado fino, concreto modificado, escoria, horno de cubilote, propiedades mecánicas.

En la actualidad existe una tendencia por la construcción sustentable, también llamada construcción verde, la cual implica la utilización de materiales producidos con bajo consumo de energía. Es común el uso de materia prima proveniente de residuos o subproductos de fábricas industriales mediante la adición o la sustitución de componentes del concreto en diferentes proporciones.

Este trabajo presenta las propiedades de un concreto fabricado con escoria de horno de cubilote (EHC) triturada. La arena se sustituyó por EHC en diferentes proporciones (0%, 10%, 15% y 20%). El residuo industrial se caracterizó físicamente respecto a su granulometría, densidad, absorción y humedad natural; con estos datos y los ensayos realizados al cemento, agua y los agregados pétreos seleccionados, se efectuó el diseño de la mezcla. Posteriormente se evaluó el comportamiento físico-mecánico del material compuesto, para una resistencia de diseño de 14 MPa. Se realizaron ensayos al concreto en estado fresco y en estado endurecido para determinar su resistencia a la compresión a diferentes edades para cada porcentaje de sustitución, el módulo de rotura, la velocidad inicial de absorción, la absorción, la carga de rotura, el módulo de elasticidad, la densidad del material endurecido y la masa unitaria. En cada prueba realizada en esta investigación, se tuvieron en cuenta las desviaciones estándar asociada a los resultados para la aceptación del ensayo. Se evidenció que el material compuesto presenta un comportamiento favorable en su resistencia a compresión al sustituir el 20% de arena por escoria. Se dedujo que a mayor porcentaje de sustitución de EHC menor es la resistencia a flexión. Los porcentajes de absorción del material compuesto resultaron mayores a los admisibles y respecto a la densidad, se concluyó que ésta guarda una relación proporcional con el porcentaje de sustitución.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ricardo Alfredo Cruz Hernández

ABSTRACT

Title: Using Process Metallurgical Slag as Concrete Added to manufacture Nonstructural Building Elements

Author: Ludwig Pérez Bustos**

Keywords: fine aggregate, modified concrete, slag, cupola furnace, mechanical properties.

Nowadays there is a sustentable construction trend also known as green construction, which involves the use of materials with low energy consumption. It's very common the use of materials which origin its from industrial plants using the addition or substitution of specific components in different proportions.

The steel industry's debris its one of the best materials used as(value-added) and as cement material in the concrete. This study shows the concrete's properties with cupola furnace slag (EHC) crushed. The sand was replaced by EHC in different proportions (0%, 10%,15%, and 20%). The industrial residue was physically, characterized according with particle size, density and natural moisture absorption; using these data and the tests on cement, water and stone aggregates the mixture was design. Subsequently the physical-mechanical composite material's behavior for a design strength of 14 Mpa. Specific tests were made in the fresh and hard states to determine its compressive strength at different times for each percentage of substitution, the rupture modulus, the initial rate of absorption, absorption, tensile strength, elasticity modulus, density of hardened material and unit weight. In each test made in this investigation always had present the standard deviations according with the acceptance for the test results. It showed that the composite has a favorable performance in compressive strength to replace 20% of slang sand. It appeared that a greater percentage of substitution of EHC lower flexural strength. The absorption percentages of the composite material were greater than those admisible for density and conclude that it stores proportional relation with substitution percentage.

* Degree work

** Faculty of Engineering physicomechanical. School of Civil Engineering. Director Ricardo Alfredo Hernández Cruz

INTRODUCCIÓN

Los residuos industriales en nuestro planeta son un problema de enormes dimensiones. La producción en masa, a finales del siglo XX e inicios del siglo XXI, ha hecho que el consumismo desenfrenado produzca enormes cantidades de desechos, que van desde los que se descomponen de forma natural o que se pueden reciclar, hasta los tóxicos y potencialmente peligrosos para el ser humano. Son tan altos los volúmenes producidos, que la naturaleza ya es incapaz de asimilarlas, ni nuestra propia sociedad y sus avances tecnológicos.

La industria del sector metalúrgico, por demanda de sus productos para el avance del desarrollo tecnológico, no escapa a esta problemática. Se producen anualmente grandes cantidades de elementos de composición metálica y desechos sólidos, entre los cuales se encuentra la limalla, el carboncillo y la escoria. El almacenamiento y posterior eliminación ocasiona reducción de espacio a la empresa que lo produce y un problema ambiental por degradación a largo plazo respectivamente.

En la actualidad se realizan adiciones o sustituciones al concreto en diferentes proporciones; estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural. Para ser usados, estos pueden ser procesados o sin procesar, algunos materiales reaccionan para formar componentes cementantes, otros para mejorar las propiedades del hormigón puesto en servicio.

La ingeniería civil se encarga en gran medida de mejorar las condiciones de vida de la población civil. La vivienda, necesidad sentida de la población, representa el espacio físico donde se establece la familia, núcleo básico de la organización social. En la actualidad más y más familias carecen literalmente de un hogar o

viven en condiciones deplorables cada día. En nuestro país se constituye en un reto a enfrentar, no solo por el estado sino por todos los que contribuimos como profesionales en el área de la construcción, en buscar soluciones que permitan disminuir los costos de la vivienda tradicional haciéndola accesible a toda la población civil, ofreciendo sistemas y materiales alternativos con bajo impacto de producción energético.

Este trabajo de investigación presenta el estudio, que tiene como objetivo general proponer el uso de la escoria de procesos metalúrgicos como agregado del concreto para la fabricación de elementos de construcción no estructurales.

Para lograr este objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Usar la escoria de procesos metalúrgicos como agregado del concreto para la fabricación de elementos de construcción no estructurales
- Evaluar las características físicas de la escoria, en comparación con agregados convencionales.
- Evaluar las características físicas y mecánicas del material compuesto con sustitución del agregado fino por escoria al 0, 10, 15 y 20%.
- Evaluar el efecto generado por ataque químico sobre el material compuesto, con y sin sustitución del agregado fino, como aporte al estudio de la durabilidad del mismo.

La investigación se encuentra seccionada en cinco partes: la primera parte describe la caracterización física de la escoria con la cual se trabajó (1). La segunda parte describe el estudio de los materiales para el diseño de la mezcla

del material compuesto (MC) (combinación de agregado fino, agregado grueso, cemento, agua y escoria), ya realizados los ensayos anteriormente mencionados, se procedió a realizar el diseño de la mezcla usando el método de la ACI comité 211 (2). La tercera parte describe las características físicas y mecánicas del nuevo material con sustitución, para una resistencia máxima a compresión de 14 MPa, con 4 porcentajes de sustitución; 0%, 10%, 15% y 20%, siendo 0%, la ausencia de escoria, denominado concreto convencional, aquí llamado concreto de control (CC). La cuarta parte describe la evaluación del efecto generado por el ataque químico, con el fin de determinar el posible uso del MC en contacto con un suelo que contenga sulfatos o álcali, además del efecto generado por la carbonatación presente en el aire, los cuales pueden afectar la vida útil en servicio del material compuesto. Por último se evaluó el comportamiento mecánico de los elementos no estructurales elaborados con el MC, se analizó los paneles y las plaquetas ante la aplicación de fuerzas externas como son: ensayos a flexión, resistencia a la compresión lateral y ensayo en el plano inclinado.

1. ANTECEDENTES

A mitad del siglo XIX, en los inicios de la revolución industrial, los metalúrgicos no valoraban en su completa dimensión las escorias ni otros desechos industriales, existían limitados conocimientos y experiencias sobre las masas fundidas y, por consiguiente, sobre la posibilidad de obtener materiales y artículos valiosos como resultado de su tratamiento (3). No existían tecnologías ni instalaciones destinadas a este fin, la organización del tratamiento de las escorias y residuos industriales se desarrollaba en empresas aisladas.

La industria de procesos metalúrgicos produce gran cantidad de residuos de diferentes clases; dependiendo del tipo de horno, adiciones, material de fundición y del procedimiento usado. Investigaciones en diferentes partes del mundo han demostrado el uso potencial de estos desechos como material de construcción de diversas maneras (4). A nivel nacional y mundial se viene tratando este inconveniente de los residuos industriales ya que se trata de un problema común de la industria metalúrgica. En ese contexto, se plantea el proyecto de investigación en ejecución. El desarrollo de los procesos de tratamiento de escorias y residuos metalúrgicos ha transcurrido de forma similar en los principales países productores de acero, ferro-aleaciones y metalurgia no férrea. Localmente, empresas como Acerías Paz del Rio, Acerías de Colombia, Acerías de los Andes, entre otras, están produciendo considerable cantidad de escoria. Este problema no solo se presenta a nivel nacional (5). En el año 2004 la producción de acero en España, para hornos que utilizan como agente de combustión el oxígeno, ascendió a 16,5 millones de toneladas, distribuidas de la siguiente manera; 12 millones de toneladas producidas en hornos de arco eléctrico y 4,5 millones de toneladas producidas en altos hornos, dejando 2,5 millones de toneladas en escoria residual (4).

Durante el año 2006, la producción industrial de elementos metálicos en España, la cual tiene dos focos, la Asociación de fundidores del País Vasco y Navarra y la Asociación de Fundidores de Cataluña, originó un millón ciento setenta y siete mil cuatrocientos veintisiete toneladas (1'177.427 ton), de los cuales el 81% (948.174 ton) corresponden a fundición de hierro, el 8% (85.144 ton) corresponden a fundición de acero y el 12% restante (144.109 ton) corresponden a fundición no férrea, como se muestra en la Figura 1. En el año 2010, las cantidades originadas fueron las siguientes: un millón once mil trescientos ochenta y tres toneladas (1'011.383 ton), de los cuales el 83% (839.448 ton) corresponden a fundición de hierro, el 7% (70.797 ton) corresponden a fundición de acero y el 10% restante (101.138 ton) corresponden a fundición no férrea (4), como se muestra en la Figura 2.

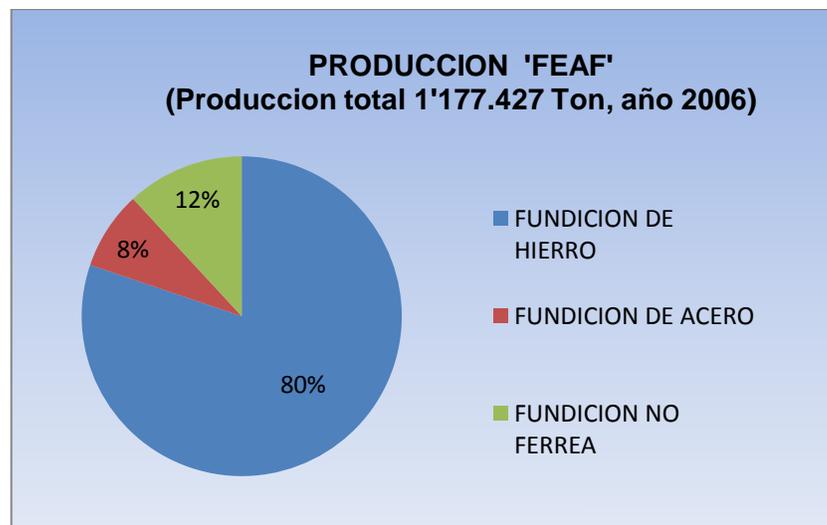


Figura 1. Producción de la fundición en España, en el año 2006 (4)

Aquí solo se han tomado datos de producción y registrado empresas primarias, de tener en cuenta la cantidad de empresas productoras secundarias y terciarias, el número de toneladas anuales se elevaría de forma considerable.

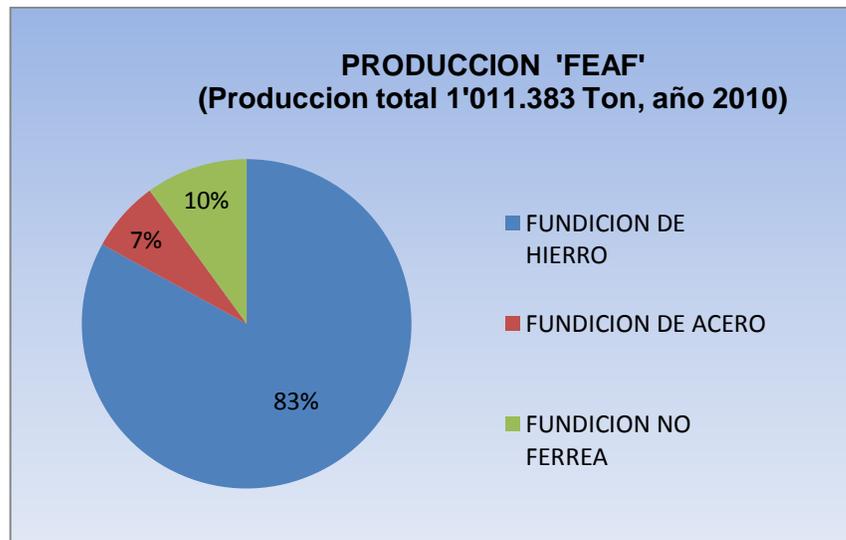


Figura 2. Producción de la fundición en España, para el año 2010 (4)

En la actualidad a nivel nacional no se le está dando la importancia que amerita dicho material producido, La escoria generada por altos hornos y hornos de cubilote entre otros, puede ser usada como material en la construcción directa o indirectamente, ayudando a eliminar el problema ambiental por residuos de materiales producto de la industria de producción metálica ferroso y no ferroso.

1.1. DEFINICION Y COMPOSICION DE LA ESCORIA.

1.1.1. Definición. El término “escoria” se utiliza para describir el material de desecho que debe ser eliminado y procesado por separado o descartar en un lugar seguro. También puede ser peligroso, venenoso o impuro, dependiendo del contexto del uso. Esta palabra originalmente se usaba para referirse a procesos de fabricación en general. En el sentido original, “escoria” se refiere a las impurezas que surgen durante el proceso de fundición, formado por las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del material, formando una capa de espuma con las

impurezas que flotan en la superficie. Como el metal se calienta, puede ser desnatado en esta escoria de metal para que el producto refinado sea más puro, garantizando un rendimiento fiable cuando se convierte. Con algunos metales, la cantidad de escoria generada puede ser muy alta, tanto como el 50% de metal (6).

Además de que contienen los productos de la oxidación, la escoria puede contener una variedad de impurezas no deseadas que se han introducido en el metal. En algunos casos, estas impurezas pueden ser peligrosas además de no deseadas, este tipo de escoria debe ser manejado y procesados con especial cuidado para que no presente riesgo para la salud humana. La escoria blanca es más representativa que la escoria negra por el alto contenido de aluminio, manganeso y fósforo, el contenido de magnesio es más alto en la escoria negra por ser proveniente del refractario durante la reducción, la diferencia de color entre las blancas y las negras se debe a la mayor presencia de hierro y manganeso (7).

1.1.2. Composición de la escoria. La estabilidad de la escoria es un requisito para su posible uso como árido o por incorporación una vez se ha molido. La presencia de CaO libre, MgO o sulfuros pueden crear problemas si su presencia es significativa en porcentaje de adición. Las pruebas realizadas muestran que no contienen componentes potencialmente expansivos, los elementos más abundantes en la escoria son: Fe, Ca, Si, Mn, Al, y Mg; los compuestos mineralógicos más abundantes en la composición son: calcio anhídrido, silicatos, magnetita y ferrita, La existencia de silicatos de calcio anhídrido, pueden indicar una posible debilidad de la actividad hidráulica (8).

Los elementos abundantes en las escorias de procesos industriales de manera general, se pueden observar en la Figura 3.

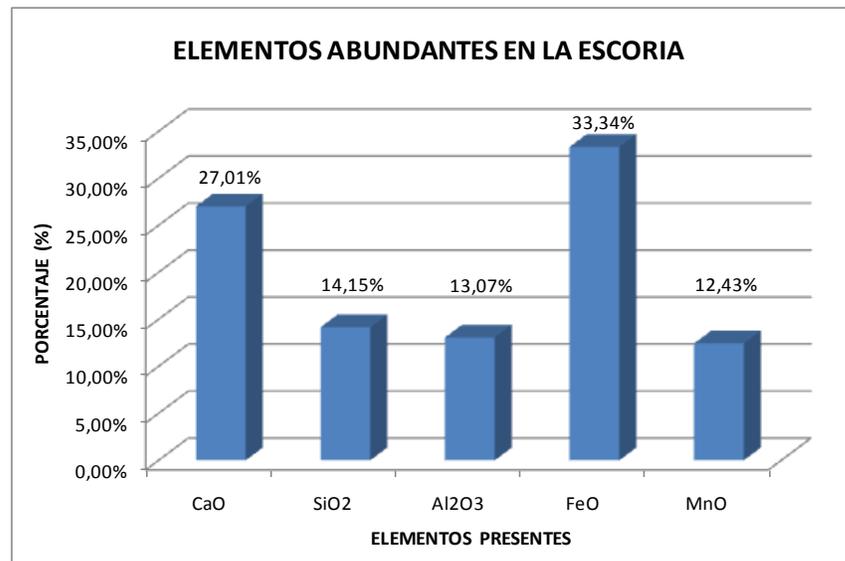


Figura 3. Elementos abundantes en las escorias de convertidor de procesos industriales (8)

El conocimiento de los componentes químicos de los residuos, es necesario para identificar los posibles componentes peligrosos para el medio ambiente y la salud humana. También se usa este conocimiento, para explicar el comportamiento del residuo en su posible aplicación. En caracterizaciones de escoria se han encontrado elementos abundantes como: Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Na, P, Si, S, Ti y metales pesados como As, Ba, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Mo, V, Zn. Estos influyen negativamente en el medio ambiente, para su posible utilización en la producción de materiales de construcción (9).

1.2. CLASES DE HORNOS DE FUNDICIÓN

Los hornos empleados para la fundición de metales, son dispositivos en los cuales se alcanzan altas temperaturas, dependiendo del metal que se necesita fundir. A continuación se presenta una breve descripción de los hornos de cubilote, de reverbero, del horno de convertidor, del horno eléctrico y por último del alto horno.

1.2.1. HORNO DE CUBILOTE. Un cubilote es un horno vertical para refundir los lingotes de hierro que se obtienen en los altos hornos, chatarra de re-uso, alimentadores y bebederos de piezas fundidas anteriormente, principalmente se usa para fundir fundición gris y con la ayuda de metales añadidos al momento del sangrado denominados inoculantes se puede obtener fundición nodular, eventualmente se usa también para aleaciones de cobre pero el uso no es muy difundido. Del material líquido vaciado en moldes apropiados se podrá fabricar directamente piezas de maquinaria y objetos de hierro fundido. El cubilote es básicamente un tubo vertical que sirve de soporte al refractario que lo recubre interiormente. Se han dado casos de cubilotes hechos hasta de cilindros vacíos de aceite apilados uno encima del otro y recubiertos de arcilla que sea refractaria, lógicamente los lotes de producción serán para uso eventual o en zonas aisladas. Comercialmente los cubilotes oscilan entre los 450 mm (18") de diámetro interior con producciones de algunos cientos de kilos hora de fundición gris hasta unidades de más de 2 m de diámetro interno (80") con producción de varias toneladas por hora. (10)

El cubilote es el único horno de fusión secundaria, no siderúrgico, que tiene al metal y al combustible en contacto directo por lo que logra altos grados de eficiencia térmica. El combustible más usado es el coque de carbón, el carbón mineral y el carbón vegetal obteniéndose con este último fierro fundido de muy bajo contenido de azufre, la implicancia de tipo ecológico hace que esto solo sea posible actualmente con carbón obtenido de bosques cultivados. El cubilote aún en la actualidad sigue siendo el horno de fundición para metal ferroso de uso más extendido en el mundo teniendo solo como limitante el que no llega a fundir aceros por la ganancia de carbono que se produce dentro del cubilote aun cargando solo chatarra de acero. Se usa también como elemento primario de fusión para trabajar en forma "duplex" con hornos eléctricos de inducción o arco en donde se hace la reducción del carbono y ajuste metalúrgico. (10)

1.2.2. HORNO DE REVERBEROS. El horno de reverbero es un tipo de horno generalmente rectangular, cubierto por una bóveda de ladrillo refractario y con chimenea, que refleja (o reverbera) el calor producido. Es utilizado para realizar la fusión de metales de bajo punto de fusión como el aluminio. Tales hornos se usan en la producción de cobre, estaño y níquel, y en el reciclado del aluminio. Los hornos de reverbero se utilizan para la fundición tanto de metales férreos como de metales no férreos, como cobre latón, bronce y aluminio (11).

Hay bastante conocimiento con respecto a la influencia del reciclaje de la escoria de conversión en las pérdidas que se presentan en el horno reverbero. Es claro que durante el reciclaje de esta escoria ocurre una reducción de los óxidos de hierro mediante los sulfuros contenidos en el horno del reverbero. Existe una tendencia, en algunas partes, de tratar a las escorias de conversión separadamente, lo que ha significado una reducción importante de las pérdidas y mayores tonelajes de producción. En este reactor, las pérdidas mecánicas en las escorias van desde un 65 a un 80% del total, el resto corresponde al material oxidado y sulfurizado soluble (12).

1.2.3. HORNO DE CONVERTIDOR. El horno de convertidor, es un horno que contiene el baño fundido. Sus formas y dimensiones son variables, pero entre los arreglos más comunes se puede mencionar los convertidores horizontales y los verticales. En ambos casos el equipo tiene forma cilíndrica o similar, con una abertura en su parte superior (boca), y es capaz de realizar un movimiento basculante (inclinación o rotación para cada caso), esencial tanto para recibir los diferentes materiales alimentados, como para descargar el metal ya procesado. La conversión puede realizarse por oxidación selectiva de uno o varios componentes del baño fundido, al introducir gas (con frecuencia aire o una mezcla enriquecida del mismo) ya sea a través de una serie de aberturas en su coraza llamadas toberas o por medio de un tubo que se introduce desde su boca hasta el baño fundido, llamado lanza (13). De esta forma, los elementos indeseables e impurezas son eliminados ya sea por

su incorporación en la escoria o por volatilización y/o arrastre en los gases de salida.

Tal como en el caso de la fusión, las escorias de conversión tienen material disuelto como sulfuros y óxidos (mayormente óxidos), atrapados mecánicamente. En algunas fundiciones se practica, hoy en día, el tratamiento de escorias por flotación y se comienza en otras a practicar la limpieza en horno eléctrico (12).

En la operación de convertidores, para asegurar una buena escoria, es importante considerar una adición apropiada de fundentes relativas al flujo de aire utilizado. Esta operación cambia de una planta a otra, en algunas se estila agregar el fundente unos minutos después de comenzado el soplado, en otras se agrega inmediatamente comenzado. También la forma de controlar el proceso está aún muy ligada a un operador, mediante el catálogo visual de la escoria y las llamas del reactor (12).

1.2.4. HORNO ELÉCTRICO. El horno de arco eléctrico para acería consiste, en un recipiente refractario alargado, refrigerado por agua para tamaños grandes, cubierto con una bóveda también refractaria, a través de la cual uno o más electrodos de grafito están alojados dentro del horno. El horno está compuesto principalmente de tres partes: el armazón, que consiste en las paredes refractarias y la cimentación, el hogar, que consiste en el lecho refractario que bordea la cimentación y la bóveda o cubierta, de aspecto esférico o de frustrum (de sección cónica), cubre el horno con material refractario. Puede estar refrigerada con agua. La bóveda está construida con materiales de alta resistencia pirosfópica (generalmente hormigón refractario) para soportar grandes choques térmicos y en el cual entran los electrodos de grafito que producen el arco eléctrico (14).

La fabricación de acero al carbono y de baja aleación en la Unión Europea ha sufrido una modificación progresiva en los últimos veinticinco años. En primera

instancia se produjo una sustitución del horno Martin-Siemens por el horno de arco eléctrico (electric arc furnace, EAF), sustitución que llegó a ser completa hacia 1980. A partir de entonces, la cantidad de acero fabricado en horno eléctrico ha aumentado progresivamente, y en especial en Europa, donde supera ampliamente a la vía tradicional horno alto-convertidor al oxígeno.

En general la obtención de acero por el proceso de horno de arco eléctrico utiliza de un 90 a 100% de chatarra más los fundentes como materia prima y genera dos tipos diferentes de escoria, denominadas oxidantes y reductoras, o negras, y blancas, respectivamente. Esto es debido a las dos etapas de que consta dicho proceso: fusión (marcha oxidante) y afino (marcha reductora).

Propiedades de las escorias de horno eléctrico: Las escorias negras, están compuestas principalmente por hierro, calcio, silicio y aluminio.

1.2.5. ALTO HORNO. El alto horno es la instalación industrial donde se transforma o trabaja el mineral de hierro. Un alto horno típico está formado por una cápsula cilíndrica de acero de 30 m de alto forrada con un material no metálico y resistente al calor, como asbesto o ladrillos refractarios. El diámetro de la cápsula disminuye hacia arriba y hacia abajo, y es máximo en un punto situado aproximadamente a una cuarta parte de su altura total (14).

Estas escorias se utilizan en la industria de conglomerantes desde hace tiempo atrás, demostrándose que, dichas escorias básicas, molidas y mezcladas con cal hidráulica daban lugar a un material que, sin alcanzar la calidad del cemento portland superaba los sistemas que sólo utilizaban cal como ligante (14)..

Propiedades de las escorias de alto horno: La composición química de la escoria de alto horno, expresada en óxidos, tiene como principales constituyentes los

óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio, que comprenden aproximadamente el 95% del total.

1.3. CLASIFICACIÓN DE LA ESCORIA

La escoria ha sido normalmente considerada como el desecho resultante de las operaciones de fusión y conversión; sin embargo, ya los primeros metalurgistas pudieron darse cuenta que algunas de sus propiedades químicas y/o físicas podían modificarse mediante la adición de fundentes adecuados, específicos al proceso que se lleva a cabo. Las escorias se han subdividido de diversas maneras, unas de esas clasificaciones son las siguientes:

De acuerdo a su origen, pueden darse definición a tres importantes residuos en escoria como son: 1. Escoria negra de acería, capa sobrenadante que se combina con las impurezas del metal fundido en el proceso de fusión de la chatarra y que se separa de la carga líquida por diferencia de densidades. 2. Escoria de ferroaleaciones de ferro silico manganeso, material de origen industrial de naturaleza inorgánica que se genera en la fabricación de ferroaleaciones de ferro silico manganeso de las que se separa por diferencia de densidad. 3. Escoria blanca de acería, capa sobrenadante que se produce durante la operación de afino del acero fundido y que se separa de la carga líquida por diferencia de densidades (15).

Según su procedencia, como se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.**, las escorias de horno alto suelen ser clasificadas también por la manera en que son enfriadas. Se utilizan tres tipos de enfriamiento: al aire, expandidas y granuladas. Las escorias de acería en general, son enfriadas al aire (12).

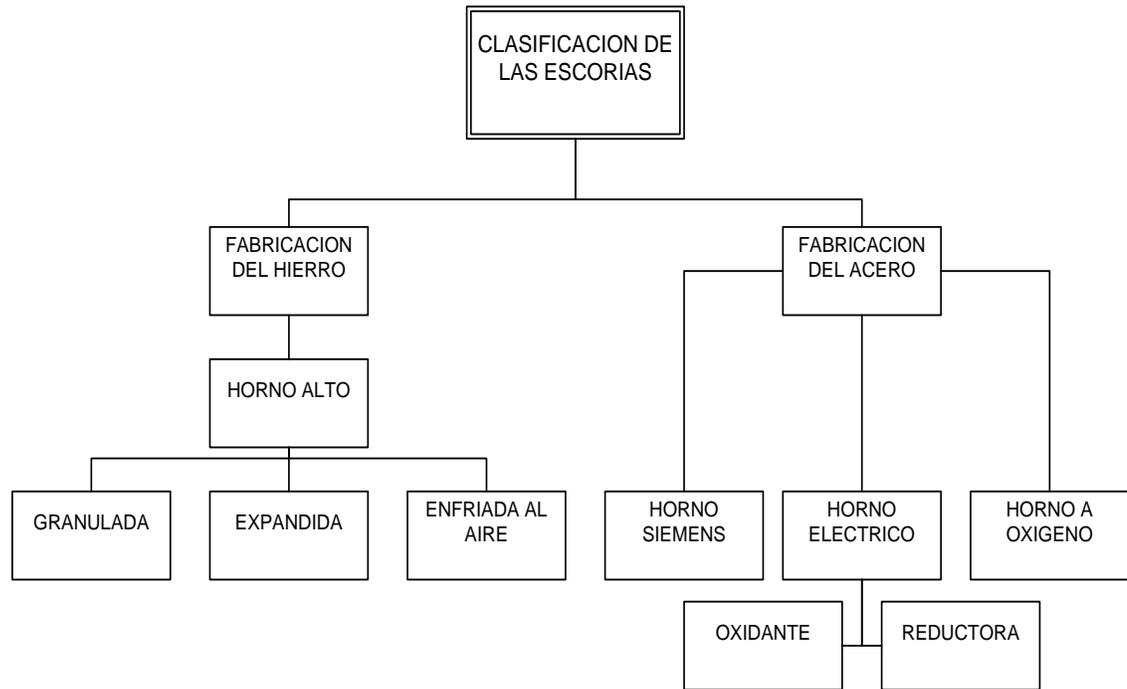


Figura 4. Clasificación de la escoria según su procedencia (12)

En términos generales se encuentran escoria de alto horno (BFS), escoria de horno de oxígeno básico (BOF), hornos de arco eléctrico (EAF - HAE), escorias de horno de recipiente tratado con ácido (LF) llamada también de refinación de escorias y escoria granulada de alto horno (GGBS).

1.4. APLICACIONES DEL USO DE LA ESCORIA

Las investigaciones relacionadas con el uso de la escoria alrededor del mundo son variadas. A continuación se presentan posibles aplicaciones de las escorias de horno eléctrico, de las escorias de alto horno, además de hormigones con arena de fundición y hormigones con sustitución de áridos por escoria.

1.4.1. Aplicaciones de las escorias de horno eléctrico. Más concretamente en lo que a sustitución de las escorias en hormigones representa, se ha observado que; uno de los usos posibles para las escorias EAF podría ser la fabricación de concretos de baja resistencia. Con este uso, se podría conseguir la mayor reutilización de las escorias producidas. Pero para ello sería necesario proceder a la trituración, homogeneización, regado y envejecimiento de las escorias EAF antes de su uso como áridos para hormigón. A pesar de todo el pre tratamiento, cuando se utilicen escorias EAF como árido para hormigones es imprescindible agregar áridos finos que “cierren” el esqueleto mineral de los hormigones. Éstos áridos finos serán preferentemente de origen calizo de trituración y se agregará en las proporciones necesarias en cada caso.

En sus investigaciones da Lima y Vázquez (7), investigaron el comportamiento de escorias de horno eléctrico y su sustitución en la fabricación de hormigones. Se estudiaron las características físicas del hormigón endurecido resultante, así como la durabilidad de las escorias y el comportamiento ambiental de los hormigones, concluyendo que; los hormigones fabricados con escoria poseen resistencias a compresión superiores a los hormigones de referencia, con la mismas relación agua cemento y el mismo asentamiento. Las propiedades físicas más relevantes son que los hormigones con escoria son más densos que el hormigón convencional, aunque sin llegar a ser clasificados como pesados, y más impermeables también. En cuanto a la durabilidad no presentan ningún comportamiento nocivo. Por lo que los campos de aplicación más propicios podrían ser en estructuras y aplicaciones donde el peso propio actúe de manera beneficiosa.

1.4.2. Aplicaciones de las escorias de alto horno. Las escorias de alto horno se utilizan en la fabricación de cemento siderúrgico, para reemplazar el cemento Portland y como árido ligero, árido grueso y árido fino en hormigones. El tipo de

aplicación depende de la manera en que ha sido enfriada. Se distinguen tres grandes grupos: granulada, expandida y enfriada al aire.

Para el primer grupo, el de la escoria granulada, el uso más común para la misma es; como árido fino en bases y sub-bases en vías, y hormigones o como cementante hidráulico. Pero podemos destacar que su uso está más extendido como ligante hidráulico.

Los cementos con escoria, cuando se comparan con el cemento Portland, presentan menor resistencia a edades tempranas, pero pueden alcanzar resistencias equivalentes a edades avanzadas. La baja resistencia es más marcada en tiempos de baja temperatura y menos marcada en tiempos calurosos. Al no existir aluminatos ni silicatos tricálcicos en las escorias, el calor de hidratación es menor que en el cemento Portland y por eso el desarrollo de la resistencia se ve menos afectado por las altas temperaturas.

Como ligante hidráulico la escoria granulada de alto horno puede también ser aplicada en bases y sub-bases de carretera utilizando el método "gravelaitier" que ha sido desarrollado en Francia, en los años 1960 por M. Prandi (7). Por otro lado, las escorias expandidas se caracterizan por ser poco densas, y ello les hace óptimos para el uso como árido en bloques de hormigón ligero y en estructuras de hormigón del mismo tipo. El aislamiento térmico es excepcionalmente bueno en este tipo de bloques.

Por último se tienen las escorias enfriadas al aire. En este grupo los áridos de escoria son obtenidos por trituración, tienen densidades entre 2,0 y 2,5 g/cm³, resistencia al desgaste caracterizada por el ensayo Los Ángeles entre 20-35% y presentan angulosidad elevada. Su angulosidad es adecuada para dar una buena estabilidad en capas de carreteras, aunque consume más ligante. Son muy utilizadas en este tipo de usos en países como: Japón, EUA y Europa.

Para su uso en construcción civil, se observa que la aplicación más utilizada es como árido para el hormigón. Algunos países tienen cubierto este tipo de utilización por normas como por ejemplo, la norma alemana DIN 4226.

Cabe destacar que el destino o uso principal de estas escorias no está en la fabricación de hormigones, la escoria sólida se clasifica y se emplea en carreteras, mientras que la arena gruesa se usa fundamentalmente en la industria cementera (7).

1.4.3. Hormigones con arena de fundición. Las arenas de moldeo químico inorgánico utilizan como aditivos una resina y un catalizador que endurecen la mezcla por medio de una reacción química. A su vez utilizan como aglomerante base el silicato sódico. Las mezclas contienen, generalmente, entre un 2.5 y un 4.0% en peso de silicato sódico, respecto a la arena, y un 10 y un 15% de resina, en peso respecto al silicato sódico.

Las arenas de moldeo químico orgánico presentan una gran variedad de sistemas, en función del tipo de aglomerante empleado. La elección de un tipo particular de aglomerante depende del tipo de metal fundido, el tiempo de curado deseado, la complejidad y el espesor de las piezas.

Otra de las utilidades que se le está dando a las arenas de fundición, es como componente de hormigones de limpieza (para asentar las cimentaciones), soleras e incluso cimentaciones de maquinaria. El principal problema que plantea es que el material es fino, por lo que sería un material de sustitución parcial. Se podrá llegar hasta un 45% (7), de sustitución en el caso de que la arena esté limpia de bentonita, ya que ésta puede provocar fuertes dilataciones.

Se ha establecido que una sustitución de la arena natural por la arena de fundición del 25 al 35% en peso podía producir tanto una disminución en la trabajabilidad en el hormigón fresco, como una reducción en la resistencia a compresión del hormigón endurecido del 20-30%, debido al producto químico adherido a las arenas de fundición. Sin embargo las resistencias obtenidas resultaban suficientemente altas como para que estos hormigones fueran utilizados en hormigones estructurales. No hubo variación en la resistencia a tracción como en el módulo elástico de un hormigón fabricado con sustitución parcial de arenas de fundición con respecto a un hormigón convencional (7).

1.4.4. Hormigones con sustitución de áridos por escoria. Investigaciones con sustitución de arena verde, de acuerdo a la fase experimental las conclusiones obtenidas fueron: El hormigón fabricado con arena de fundición química obtiene una mayor manejabilidad, y el uso de un alto porcentaje (mayor al 50%) de las escorias como árido grueso reduce considerablemente las posibilidades del hormigón, Los concretos hechos con arena de fundición verde o química obtiene propiedades mecánicas más adecuadas que el hormigón convencional, cuando el hormigón se fabrica con una alta relación agua-cemento, Hormigones producidos con escoria de horno eléctrico de arco y escoria de alto horno como reemplazo de materia prima como agregados gruesos obtiene una resistencia a la compresión mayor que el hormigón convencional cuando el hormigón se hace con una relación media de agua-cemento. Hormigones fabricados con subproductos industriales metalúrgicos sufrieron cambio de longitud similar a la del hormigón convencional, Se comprueba que los hormigones elaborados con subproductos metalúrgicos transmiten menor cantidad de agua por capilaridad y obtener mayor resistencia a la compresión residual después de la exposición a altas temperaturas a las del hormigón convencional (16).

En Ucrania, en el centro para la construcción con concreto, los estudios técnicos han demostrado que las escorias de ferro-silicato de los hornos de fundición de

zinc (ISF), puede ser utilizado como un sustituto de la arena en los compuestos de cemento. La escoria ISF contiene porciones de zinc y plomo, que son conocidos por causar retraso del fraguado del concreto. Pruebas experimentales al concreto demostraron que este retardo no parece ser perjudicial para la hidratación de hormigón final (17).

Estudios de lixiviación demostraron que la ceniza de combustible pulverizado y escoria granulada de alto horno tienen el potencial para reducir la lixiviación de iones de plomo y zinc, incluso en soluciones altamente alcalinas. Los resultados demuestran que la inclusión de la escoria de la ISF en mezclas de concreto, en efecto retrasa el fraguado del concreto. La longitud del retraso del concreto no está directamente relacionada con las cantidades de iones de zinc o plomo lixiviado de la escoria, Como era de esperar, la lixiviación de iones de plomo y zinc es sustancialmente mayor en soluciones con alto pH. Sin embargo, la combinación de la escoria reduce la lixiviación, incluso en soluciones altamente alcalinas (17).

En Algeria en el instituto de Génie Rural, en la universidad de Blida se determinaron algunos aspectos de durabilidad del hormigón que contiene 50% y 65% de escoria de reemplazo, expuestos a diferentes entornos de curado. La mezcla de dosificación de los hormigones de escoria se llevó a cabo de tal manera que los resultados obtenidos dieron resistencias a compresión similares a los de hormigón sin escoria de 3 días de curado hacia adelante, Los resultados muestran que el agua de curado inicial unos 7 días antes de la exposición a un ambiente de secado, es esencial para minimizar el daño micro estructuralmente que influyen en la durabilidad de los hormigones de escorias. Los datos también muestran que incluso cuando son expuestos a un ambiente agresivo, escorias con hormigones tienen una estructura de poro refinado en comparación con el hormigón normal, y una mayor resistencia al deterioro (18).

El Departamento de ingeniería civil de las universidades de Zonguldak Karaelmas, Osmangazi (19), y el programa de programas técnicos en Turquía, investigaron el uso de las cenizas de fondo y la escoria granulada de alto horno, individual y colectivamente como áridos finos en el hormigón sustituyéndola en porcentajes para su estudio del 10%, 20%, 30%, 40% y 50%, Las propiedades de durabilidad de los hormigones se compararon con el fin de estudiar las posibles ventajas de las tasas diferentes de sustitución Según los resultados, se afecta a algunas propiedades de durabilidad del hormigón de manera positiva en el caso de que se utilice como agregado fino. Los concretos hechos con arena de fundición verde o química obtienen propiedades mecánicas más adecuadas que el hormigón convencional, cuando el hormigón se fabrica con una alta relación agua-cemento. - Hormigones producir con escoria de horno eléctrico de arco y escoria de alto horno como reemplazo de materia prima como agregados gruesos obtiene una resistencia a la compresión mayor que el hormigón convencional cuando el hormigón se hace con una relación agua-cemento media. La fuerza de tracción indirecta y módulo de elasticidad son similares a los de hormigón convencional.

Se ha dicho que los cementos de escorias tienen menor resistencia temprana, lo que es atribuible al lento crecimiento del gel. En el caso muy concreto de alta resistencia, sin embargo, esto se compensa con la densidad del cuerpo sólido.

La hidratación inicial. En un hormigón con escoria de cal bajo, puede ser inferior, La hidratación de la escoria es básicamente, la disolución de la estructura de la cadena de silicato y aluminato (en la escoria) por el ataque de hidroxilo. Para la escoria para continuar hidratante, Ca^{2+} y OH^- de las escorias no son suficientes, por lo que una fuente de alimentación externa se hace necesaria.

Estos contenidos de material se encontraban mezclados en masas o conglomerados y para separar los compuestos de hierro no deseado se usó separación por magnetos y trituración, en seis diferentes mezclas mostró

propiedades mecánicas relativamente buenas, concretos que usaron mezclas con 10% de hierro como escoria de alto horno, presentaron resistencia a la compresión de 140,3, 193,8, 333,3 kg/cm² fueron obtenidos después de 3, 7 y 28 días, respectivamente. La resistencia mínima a la compresión del concreto usando cemento Portland tipo I según la norma ASTM C150-86 para 3, 7 y 28 días son 12, 19 y 28 MPa, respectivamente de 120, 190 y 280 kg/cm². La producción exitosa de cemento Portland de la escoria de hierro, escorias de acero, piedra caliza confirma el buen desempeño de estos materiales como materia prima para elaborar otros compuestos (20).

Otros sondeos en la universidad de North western en Estados Unidos, orientaron la investigación al uso del polvo de horno para la producción de cemento, como activador para la escoria granulada de alto horno (GGBFS), un subproducto para la producción de concretos convencionales al sustituir los agregados tradicionales. El desarrollo de resistencia a la compresión a los 56 días de curado. Los resultados típicos se obtuvieron para las dos mezclas de referencia. En comparación con el hormigón de cemento Portland, a edades tempranas resulta en una menor resistencia a la compresión, pero igual o superior a edades más tardías. A la edad de 7 días, la resistencia a la compresión de la mezcla de cemento escoria fue menor que la del hormigón OPC. Sin embargo, para el día 28 y 56 de fraguado, la resistencia a la compresión fue la más alto de todas las mezclas, lo que indica un alto grado de reacción puzolánica.

En todas las edades del proceso. El estudio ha demostrado también que desarrollan una mayor porosidad si la comparamos con el concreto de control, que puede llevar a una menor resistencia.

Se concluyó: que las propiedades de los materiales llamados escoria, proporcionan evidencias de que los materiales secundarios, puede ser utilizado con éxito para activar escoria de alto horno y el polvo de horno de escoria de

hormigón, con buenos resultados generales en relación con el tiempo de fraguado, aumento de la temperatura, y las propiedades mecánicas, se pueden producir con una amplia gama de composición química y finura, y, esencialmente, puede ser considerado como un material alternativo futuro para concretos con escoria. Con la dosificación adecuada y diseño de la mezcla, se puede determinar el máximo rendimiento.

La combinación de las características químicas y físicas de la escoria, es fundamental en el control de los mecanismos de activación de GGBFS, las propiedades de los productos de hidratación, y la tasa de desarrollo de la fuerza. Adecuada concentración inicial alcalina y la presencia de sulfatos tienen una influencia decisiva en la activación de la escoria y la hidratación inicial, en la hidratación adicional y la formación de productos de hidratación, dando lugar a una mayor tasa de desarrollo de la fuerza, están determinadas por la disponibilidad de calcio, proporcionado por el contenido de cal libre.

La resistencia a la compresión y de tracción, módulo de elasticidad y las características de durabilidad (envejecimiento acelerado, la congelación y descongelación, mojado y secado), de hormigón con escoria de horno eléctrico, El principal resultado fue que las escorias EAF son básicamente adecuadas para reemplazar los áridos tradicionales en lugar de los naturales en los conglomerados, incluso en altos porcentajes y de tamaños intermedios si la producción lo permite (de 2-4 mm de tamaño) (21).

No obstante, debe considerarse que las escorias como tienen que ser almacenados al aire libre expuesta a la humedad natural o en algunos casos a humedad excesiva, permitiendo expansiones viables por contaminación en el sitio de almacenamiento, los hormigones elaborados con Escoria de alto horno como agregado mostraron buenas características de resistencia en condiciones ambientales normales ya que las propiedades mecánicas son totalmente

comparables (o incluso mejor) que los observados para el hormigón tradicional, por otro lado, la hidratación y óxidos libres parecen representar un límite para la durabilidad del hormigón resultante (22).

De hecho, aunque se demostró que la duración y respuesta puede ser significativamente mejor, incluso en los procesos de congelación y descongelación, las condiciones ambientales en una pequeña cantidad de agentes incorporadores de aire bajo estas condiciones son bastantes vulnerables en repeticiones cíclicas de humedecimiento y secado (23).

Otra característica que se encontró de sustituir la escoria por arena es la disminución en la penetración de cloruros, los hormigones con 50% de reemplazo de escoria tienen una menor penetración de cloruros. Dependiendo de la aplicación a la cual se vaya a someter los porcentajes de sustitución de escoria por áridos en porcentaje debe variar para lograr una mayor resistencia.

Comparando la producción de cemento de escoria en Europa, representa casi el 20% de la producción total de cemento, la aceptación de los cementos producidos de escorias de altos hornos en los Estados Unidos ha sido considerablemente lento, con solamente cerca de 1% de la producción total (24), (25).

No hay factores adversos para el uso de escorias en la construcción como adición o material, los resultados apuntan a la estabilidad volumétrica, los elementos metálicos no induce insalubridad. Los residuos se catalogan como residuos no especiales ni valorizables, además no presentan ningún metal pesado por encima de los niveles considerados como aceptables (26).

1.5. CONCEPTO DE DURABILIDAD

Las estructuras de concreto se han diseñado, a través de la historia, con base en su resistencia a la compresión. La premisa indicaba que si el concreto era suficientemente resistente como para soportar las cargas diseñadas, también poseía un comportamiento favorable en todos los demás aspectos. Cuando se identificaban determinados mecanismos de destrucción, por ejemplos: el ataque hielo-deshielo, ataque por sulfatos, reacción álcali-agregado, corrosión por cloruros, etc., se asumían sus limitaciones y se reseñaba a la composición química del cemento o en la relación agua/cemento (27).

El término durabilidad, se refiere a la habilidad del concreto para resistir la acción del medio ambiente, los ataques químicos, la abrasión y otras condiciones de servicio de tal manera que sus características y propiedades se mantengan a lo largo de su vida útil (28; 29).

El concreto tiene tendencia a ser durable por sí mismo, sin embargo, muchas estructuras modernas de concreto, no duran tanto, como lo pone en evidencia la continua necesidad de reparar y rehabilitar infraestructuras de concreto. Desde luego, esto tiene que ver con las exigencias, aún mayores, que se asignan a los concretos modernos, los entornos especiales en los que se espera que el material cumpla sus funciones y la complejidad creciente de los sistemas cementantes en sí mismos (27). Por otra parte, el deterioro en el concreto se debe a una selección inapropiada de materiales, a prácticas constructivas pobres, a falta de comprensión por parte de los ingenieros que construyen en ambientes potencialmente destructivos y una creciente tendencia a invertir poco y esperar demasiado de los materiales en un periodo de tiempo prolongado.

1.5.1. Carbonatación

➤ Concentración de CO_2 en la atmósfera

El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono (IV), gas carbónico y anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Se encarga de permitir que la Tierra tenga una temperatura tolerable para la biomasa, sin él, el planeta sería demasiado frío para albergar vida. Sin embargo, forma parte de los denominados gases de efecto invernadero, a los cuales se atribuye en gran parte, el calentamiento global y los desórdenes climáticos a nivel mundial.

La situación actual del calentamiento del planeta, tomando en cuenta la contaminación es cada vez más delicada, Por más que se adelantan campañas ambientales en contra de la emisión de gases tóxicos por parte de las diferentes industrias, ésta, en lugar de descender, asciende de manera acelerada con tendencia exponencial a través del tiempo como se ilustra en la Figura 5.

El valor registrado para la emisión mundial de dióxido de carbono a diciembre de 2011 muestra una concentración de 391.80 ppm, cuando la llamada 'zona segura' es de 350 ppm (30), una cifra alarmante, si se tienen en cuenta las caóticas consecuencias que el efecto invernadero podría causar en un futuro cercano (31), si se continúa con esta tendencia.

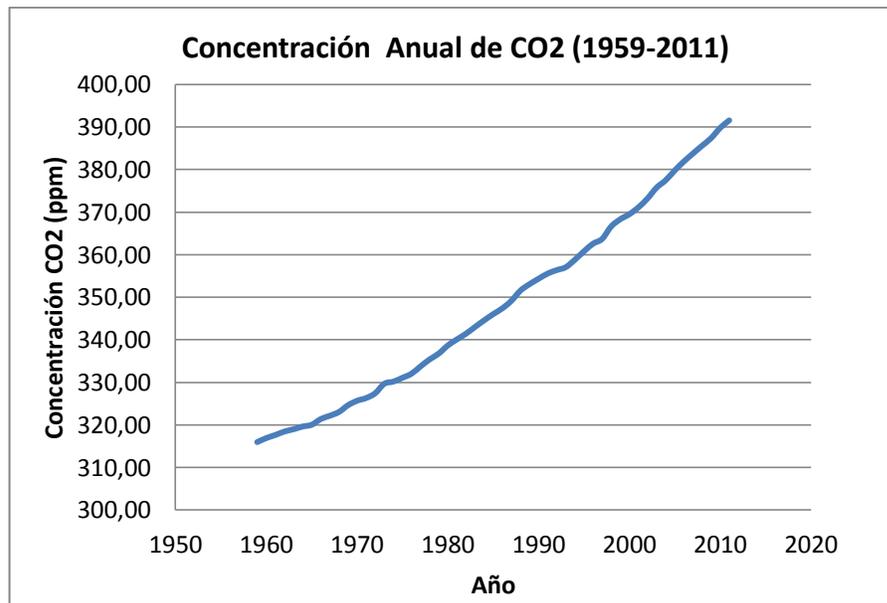


Figura 5. Concentración anual de dióxido de carbono desde 1959 hasta 2011 (30)

➤ Carbonatación del concreto

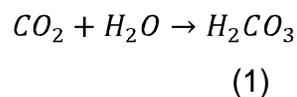
No sólo los seres vivos se ven afectados por altos niveles altos de CO₂ presentes en la atmosfera, las estructuras de concreto también sufren efectos negativos en presencia del gas con el paso del tiempo. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el CO₂ atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo. La corrosión uniforme, inducida por carbonatación, acelera la formación de grietas, si las condiciones adecuadas de temperatura y humedad están presentes (32).

La profundidad de carbonatación se da, por el ingreso del CO₂ en el sistema de poros del hormigón, por la difusión debido al gradiente de concentración que actúa como la fuerza impulsora; El tipo de cemento, su cantidad en el hormigón y la relación A/C son factores que pueden afectar el índice de difusión del CO₂ (33).

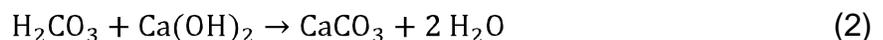
Los niveles elevados de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera despreciable. Si la humedad relativa es mayor de 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO₂.

Las reacciones que se presentan en la carbonatación son las siguientes (34):

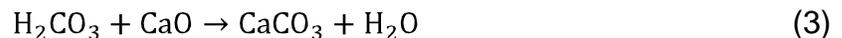
Formación de ácido carbónico



Neutralización del hidróxido de calcio



Liberación del óxido de calcio



1.5.2. Reacción álcali-agregado. La reacción álcali-agregado se produce, cuando interaccionan agregados que contienen minerales con silicatos potencialmente reactivos, con los álcalis del cemento, esta reactividad lleva consigo la formación de gel, que en presencia de humedad se expande, manifestándose en agrietamientos y/o movimientos diferenciales, y con ello, la disminución drástica de la resistencia a la compresión y de su vida útil de servicio (35).

La expansión provocada por esta reacción se localiza especialmente en las zonas húmedas del hormigón, siendo las estructuras más deterioradas aquellas que están en contacto con el agua como puentes, carreteras, presas y muelles entre otros (7). El proceso viene determinado en gran medida con la humedad relativa del ambiente y la tensión mecánica a la cual está sometido cada elemento estructural.

Fases de la reacción:

Neutralización de los radicales Si-OH a través de una reacción tipo ácido-base: Aquí las cargas terminales son equilibradas por iones Na^+ , teniendo en cuenta que el acceso de los OH^- y el Na^+ está limitado por la dimensión de estas zonas y por lo separadas que se encuentren de la superficie de la partícula como ilustra en la Figura 6.

Ataque de los puentes siloxano (Si-O-Si) por parte de los iones OH^- : Reacción que lleva implícita una progresiva desintegración de la estructura química del concreto.

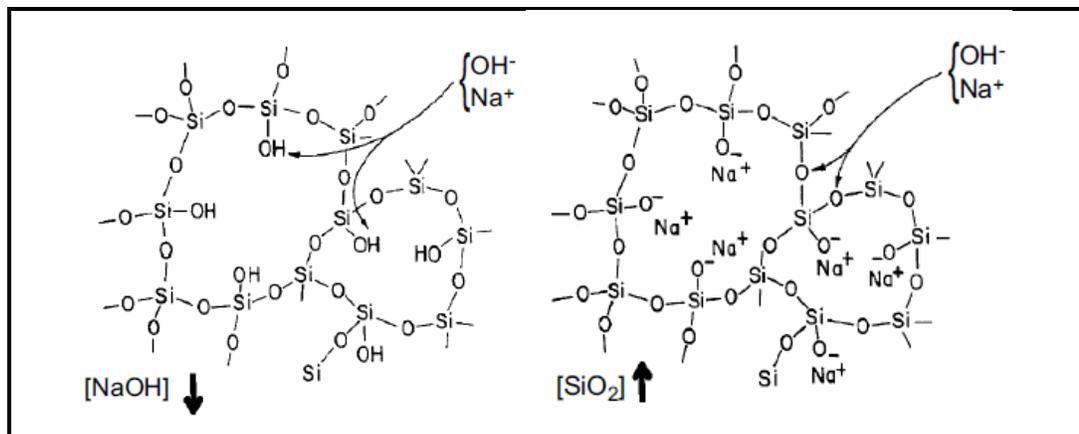


Figura 6. Fases de la Reacción Álcali-Agregado (36)

1.5.3. Ataque por sulfatos. En el ambiente, a menudo se encuentran diversidad de sulfatos (de sodio, potasio, calcio o magnesio), se presentan de manera natural en el suelo o disueltos en el agua que corre por el suelo, el sulfato puede estar presente en los efluentes y desechos industriales, como los de las industrias asociadas con la fabricación de químicos, baterías, aluminio y en la minería. El agua empleada en las torres de enfriamiento también puede contener sulfatos debido a la acumulación gradual de sulfatos provenientes de la evaporación (36).

El ataque por sulfatos se da generalmente a través de medios acuosos. Si el sulfato no se encuentra disuelto en agua, es probable que no haya alguna penetración considerable en los poros de concreto (37), así mismo, existe una gran influencia en la relación agua/cemento.

Generalmente, se menciona que el ataque por sulfatación es un ataque físico, referido a la cristalización de sales, sin embargo, esta afirmación no se considerará correcta, pues este proceso, similar a la formación de compuestos expansivos como la etringita se basa en una reacción química, aunque sí puede conllevar a daños físicos de la estructura del concreto.

1.6. ENSAYOS ACELERADOS PARA EVALUAR LA DURABILIDAD.

Existen múltiples ensayos para la evaluar la durabilidad de los concretos modificados; en el presente trabajo se realizarán ensayos para estudiar el ataque producido por los álcalis, a la sulfatación y a la carbonatación de manera acelerada, los cuales se describen a continuación.

1.6.1. Ensayo acelerado álcali agregado. El método sudafricano de reactividad potencial (ASTM C1260) es ampliamente utilizado para medir la reactividad de los agregados por causa de los álcalis presentes en la mezcla. Sin embargo, por tratarse de barras de mortero no considera las alteraciones que puede presentar el comportamiento del concreto a partir de las características del agregado grueso (38). Autores como Gress y Kozikowski (39), proponen modificaciones al ensayo en concretos, empleo de temperatura más elevada y diferentes condiciones de humedad con las probetas sellados en vacuo, en un plástico con agua. Otros como Scott (40), recomiendan la utilización del ensayo ASTM C 1260 con alteraciones que consistieron en la sustitución de la barra de mortero por prismas de hormigón utilizados en el ensayo ASTM C 1293, pero utilizando las condiciones

del ensayo ASTM C 1260, puesto que las condiciones de la ASTM C 1293, son no aceleradas y se limita a una relación a/c entre 0.42 y 0.45.

1.6.2. Sulfatación acelerada. Los ataques acelerados de sulfatos se dan a través de ciclos de humedecimiento y secado, es decir, en zonas donde hay presencia de agua con sulfatos de manera intermitente, el ataque es en mayor grado. Además, existe una relación considerable entre la cantidad de hidróxido de calcio presente en la hidratación del concreto, y la susceptibilidad a la acción de los sulfatos. En el agua de mar, además de sulfatos, existe la presencia de otros iones como el cloruro, por lo que el ataque se acelera aún más.

Los métodos ASTM C-1012 y ASTM C-452 (corresponde a INV 329 Y NTC 397), basados en la inmersión de mortero en solución de sulfato de sodio anhidro, evalúan el cambio de longitud del mortero expuesto. Se pretende optimizar la evaluación de los daños que puede sufrir una estructura en estado de servicio. Por esta razón, se decidió tomar como referencia estos métodos para adaptarlos a concretos que se encuentren en condiciones extremas del ataque por sulfatos. En consecuencia, el ensayo modificado plantea la inmersión de probetas de concreto en solución acuosa de sulfato de sodio anhidro intermitentemente, tal como lo propone el ensayo Duggan (7), (41).

1.6.3. Carbonatación acelerada. La cámara de carbonatación es un sistema capaz de simular, mantener condiciones estables y constantes de temperatura, humedad relativa y concentración del gas (34).

La velocidad de carbonatación puede ser modelada mediante una simplificación de la ley de la raíz cuadrada de tiempo, con base en la Ley de Fick (42):

$$X = K \sqrt{t} \quad (4)$$

Dónde X es el espesor de la capa carbonatada, t es el tiempo de exposición (o la edad de la estructura) y K es el coeficiente de carbonatación (42), también conocido como velocidad de carbonatación, que se define como:

$$K = \frac{2DC_s}{M}^{1/2} \quad (5)$$

Donde D es el coeficiente de difusión efectiva del CO₂, C_s es la concentración de CO₂ sobre la superficie externa del concreto (en moles por unidad de volumen de aire), y M es el número de moles de CO₂ necesarios para carbonatar un volumen unitario de concreto.

Cuando un elemento es sometido primero a un ambiente de una concentración C_{s1}, y luego esta concentración cambia a C_{s2}, se genera la ecuación (6):

$$X_{c_2}^2 - X_{c_1}^2 = K^2 t_2 - t_1 \quad (6)$$

El ensayo acelerado de carbonatación mediante cámara saturada de CO₂, es generalmente utilizado para determinar el coeficiente de carbonatación en concretos (32), (43)- (44). Consiste en someter probetas a ambientes con altas concentraciones de dióxido de carbono y condiciones de humedad relativa donde se presente el efecto de carbonatación (50% - 75%) (45), con el fin de determinar el coeficiente de carbonatación, por medio de la profundidad de penetración, teniendo en cuenta el tiempo de exposición.

La profundidad de carbonatación será medida de acuerdo al criterio de la RILEM – 88 (46), utilizando un indicador de basicidad como la fenolftaleína al 1% en solución etílica. Se mide la distancia que ha penetrado el CO₂ en el concreto desde la parte externa de la probeta, hacia el centro de la misma. Si no se presenta cambio de color, quiere decir que el dióxido de carbono penetró, puesto que el CO₂ es un compuesto ácido que no reacciona a la fenolftaleína. Si por el

contrario se presenta un color fucsia, quiere decir que en esa zona no penetró el CO₂ y que el concreto permanece con su pH básico.

El modelo matemático del proceso de carbonatación, con base en las ecuaciones (4) y (5) deriva en una correlación, esta correspondencia se da entre dos concentraciones diferentes de CO₂ y sus respectivos tiempos de exposición, que se puede observar en la ecuación (7):

$$T_1 = T_2 \frac{C_{s2}}{C_{s1}} \quad (7)$$

En la expresión (7), el valor de T₁ es el tiempo de exposición al que se ha sometido el concreto con una concentración C_{s1} y T₂ es el tiempo de exposición al que se ha sometido el concreto con una concentración C_{s2}.

2. MARCO EXPERIMENTAL

En la figura 7 se presenta la metodología seguida para el desarrollo de la presente investigación, la cual consta de 5 partes a saber: la caracterización de la escoria, el diseño de la mezcla para el M.C, la evaluación de los efectos generados por ataque químico y los elementos de construcción no estructurales.

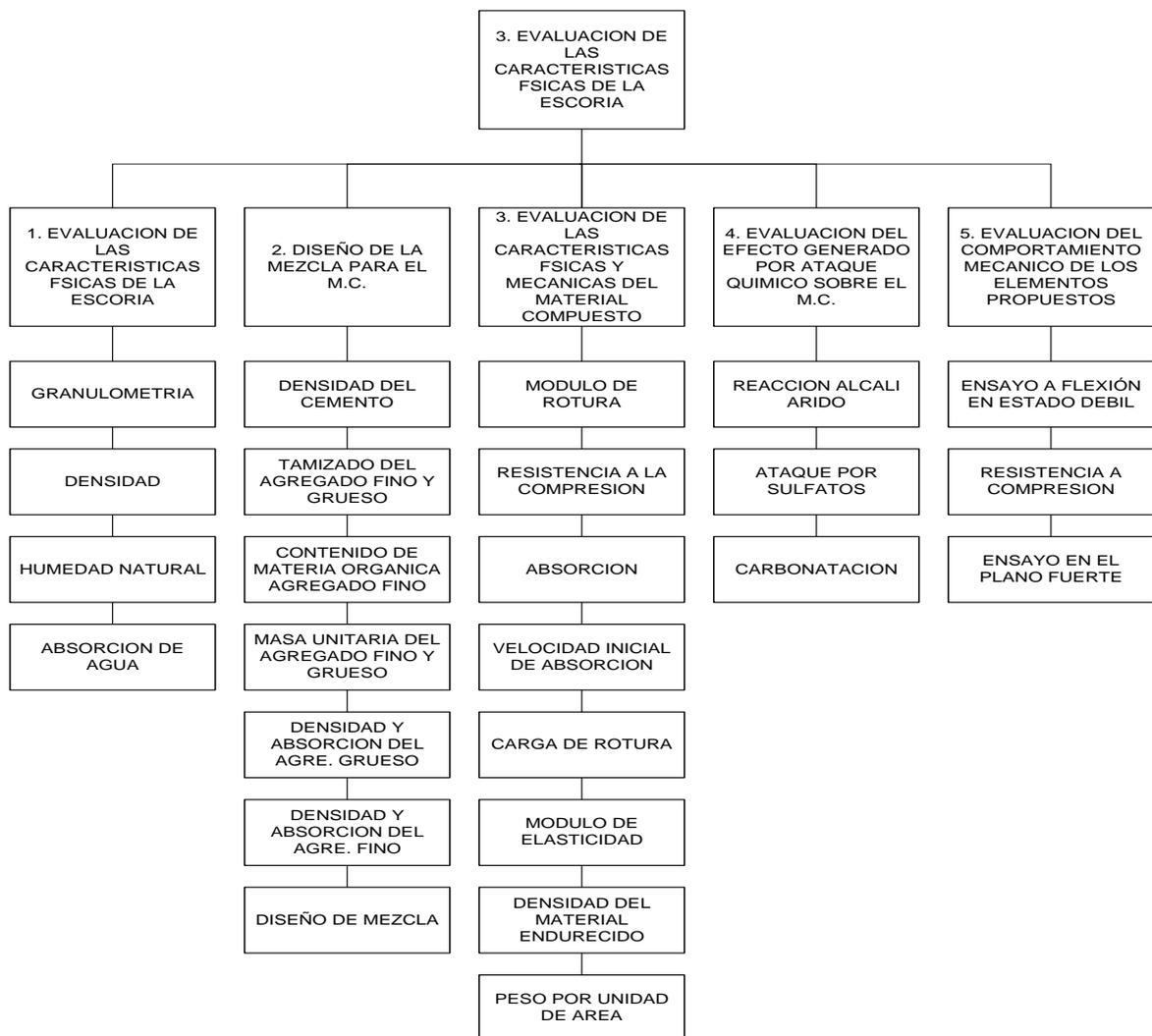


Figura 7. Marco experimental

Fuente: autor

2.1. CARACTERIZACION DE LA ESCORIA

Con esta caracterización se busca determinar las propiedades de la escoria, lo cual permite emitir un juicio acertado a cerca de su uso. Para llevarla a cabo se realizaron los ensayos de granulometría, densidad, humedad natural, absorción de agua y el diseño de la mezcla.

➤ GRANULOMETRÍA

Una vez se extrae la escoria fundida del horno de cubilote, se deposita en las pilas que contienen agua a temperatura ambiente, el cambio espontáneo de temperatura ocasiona que la escoria tenga alta porosidad y baja densidad, posteriormente se almacena en la parte exterior del recinto, donde se encuentra el horno quedando a la intemperie. Una vez extraída de las piletas, la escoria fue separada y almacenada en sacos de fibra sintética para evitar el contacto con el suelo y su contaminación.

La trituración de la escoria se llevó a cabo empleando la máquina de los Ángeles, que normalmente es usada para el ensayo de resistencia al desgaste de los agregados gruesos de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") (NTC 98), se introdujeron 12 esferas de acero (diámetro promedio de 46,8 mm y masa comprendida entre 390 gr y 445 gr) junto con la escoria, el fraccionamiento de los gránulos de escoria tuvo una duración de 30 minutos en total, dividida en dos secciones de 15 minutos cada una.

La selección del material se realizó usando el procedimiento por cuarteo, este procedimiento se describe en la Norma Técnica Colombiana 1522 (47).

El método de ensayo para el análisis por tamizado de la escoria se efectuó siguiendo la NTC 77 (48); la muestra se secó en un horno a 110 °C hasta alcanzar

una masa constante, después se seleccionaron los tamices: No.4 (4.75mm), No.8 (2.36mm), No.16 (1.18mm), No.30 (600 μ m), No.50 (300 μ m), No.100 (150 μ m) y No.200 (74 μ m), se introdujo en ellos la escoria y se trasladan a la tamizadora mecánica por un periodo de tiempo de 15 minutos. Enseguida se separaron los tamices que estaban en conjunto y se pesaron las cantidades de escoria retenida en cada sección, utilizando balanzas con precisión 0.1 grs.

Las curvas granulométricas ideales y la experimental se graficaron grupalmente con el fin de mostrar la no dispersión de datos y la aceptación de la granulometría de la escoria como se pueden ver en la Figura 8. Se realizaron dos ensayos de granulometría y se clasificó de acuerdo al sistema unificado para la Clasificación de suelos (USCS) (49).

Tabla 1. Rangos de distribución granulométrica, NTC 174

Tamiz NTC 32	% que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600	25 a 60
300	10 a 30
150	2 a 10

En la determinación del módulo de finura (MFe), se aplicó la NTC 77 (48), mediante el ensayo se obtuvo el MFe para la escoria de horno de cubilote. Hay que resaltar que; cuando se tienen gránulos gruesos este módulo es mayor y será menor si lo componen gránulos finos. De acuerdo a la curva granulométrica de la escoria, se puede concluir que el contenido es de gránulos gruesos según la NTC 2240 (50). En la Tabla 1, se puede apreciar los rangos de valores que deben pasar por cada tamiz usado para el ensayo.

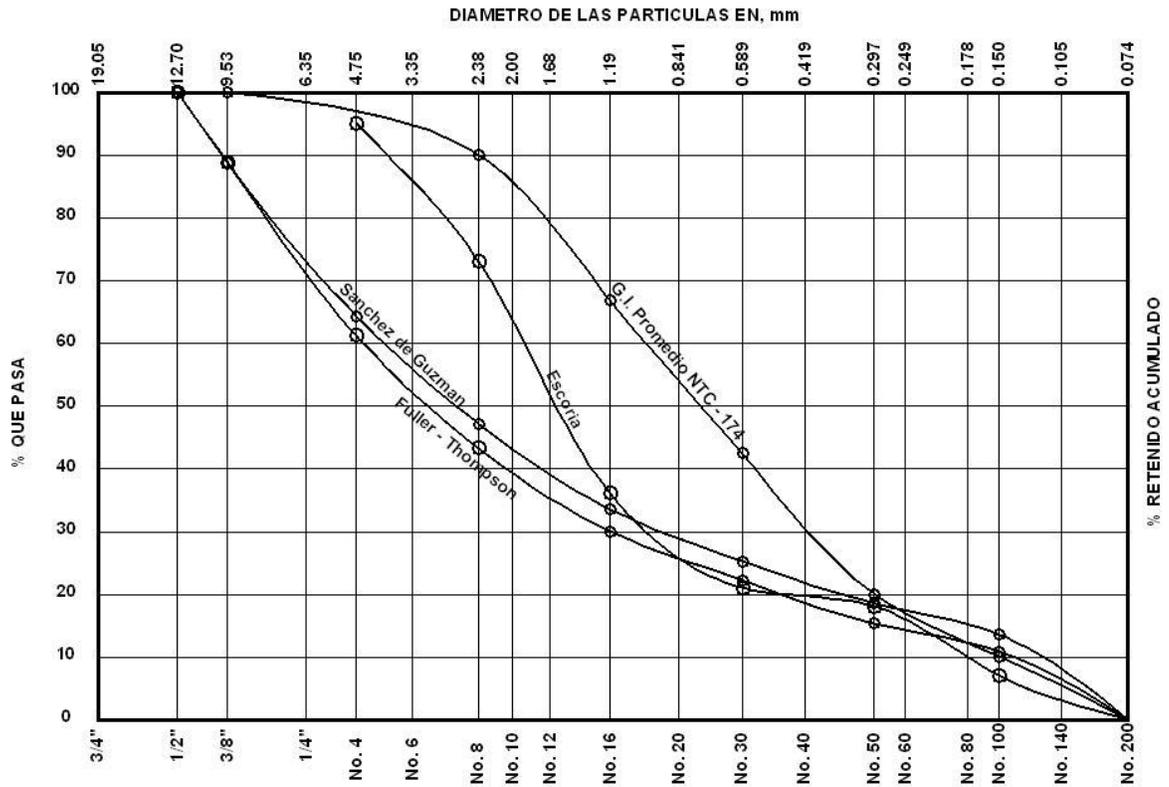


Figura 8. Granulometría de la escoria de horno de cubilote y granulometrías ideales

Fuente: autor

➤ DENSIDAD

Para determinar la densidad de la escoria, se usó el procedimiento descrito en la NTC 237 (51), 'densidad del agregado fino'. El ensayo cubre la determinación de la densidad aparente y la densidad nominal de la materia en estudio. Con respecto a los materiales destinados para el ensayo, se empleó el frasco de Le Chatelier, de forma que se adicione agua hasta un punto sobre el vástago entre 0 y 1 ml y se registró la lectura inicial (R1), a continuación se agregaron 55 gramos de agregado fino, en la condición saturada superficialmente seca desalojando todo el aire atrapado, después se tomó la lectura final en el frasco, se removió el agregado fino del picnómetro y se secó en el horno eléctrico hasta obtener masa constante a una temperatura de 110 °C.

El cálculo de la densidad aparente y nominal se realizó mediante las ecuaciones (8) y (9), según la NTC 237, que se muestran a continuación:

$$Da = \frac{S1*(A_s)}{R2-R1} \quad (8)$$

$$Dn = 0,9975 * \frac{A}{(B+A-C)} \quad (9)$$

De la ecuación (8) anteriormente expuesta, a saber; Da es la densidad aparente en g/cm^3 , S1 es la muestra saturada y superficialmente seca usada en el frasco de Le Chatelier en gramos, R1 es la lectura inicial del nivel del agua en el frasco y R2 es la lectura final del frasco.

De la ecuación (9) anteriormente expuesta, a saber; Dn es la densidad nominal en g/cm^3 . A, es la masa en el aire de la muestra seca al horno, en gramos, B, es la masa del picnómetro llenó con agua, en gr, y C, es la masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración en gramos.

➤ HUMEDAD NATURAL

En relación a la pérdida de agua de las muestras por evaporación, se preservaron en recipientes tapados y almacenados lejos de la luz solar como se menciona en la NTC 1495 (52). Ahora bien, la determinación de la humedad natural se realizó tan pronto como el material estuvo disponible en los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander. La cantidad de material seleccionado fue de 1000 gramos de material, el cual fue representativo de la muestra total, por tanto, se mezcló la escoria hasta su homogenización, se cuarteo y se pesó la cantidad descrita anteriormente.

A continuación se determinó y registró la masa del contenedor usado en el ensayo limpio y secó, posteriormente se puso la muestra en el recipiente y se estableció la masa del contenedor más el material húmedo con la ayuda de la balanza digital (53). La muestra se secó en el horno a 110 °C durante 24 horas, una vez el material cumplió con las horas programadas se comprobó que tuviese masa constante, se retiró del horno y se registró el peso seco de la muestra más el contenedor. El porcentaje de agua se calculó usando la ecuación (10) la cual se encuentra en la NTC 1495:

$$w = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} * 100 * \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (10)$$

En la ecuación (10) descrita anteriormente se encuentra que; w es el contenido de agua en porcentaje, Mcws es la masa del contenedor y de la muestra húmeda en gramos, Mcs es la masa del contenedor y de la muestra seca en gramos, Mc es la masa del contenedor en gramos, Mw es la masa de agua y Ms es la masa de las partículas sólidas en gramos.

➤ ABSORCIÓN DE AGUA

Para determinar la absorción de agua de la escoria se usó el procedimiento del agregado fino descrito en la NTC 237 (51). Se dispuso del frasco de Le Chatelier y se usó el mismo procedimiento descrito para determinar la densidad nominal y aparente, el cálculo de la absorción de agua se realizó mediante la ecuación (11), que se muestra a continuación, según la NTC 237:

$$Absorcion \% = \frac{S-A}{A} * 100 \quad (11)$$

De la ecuación para determinar la absorción; la variable A es la masa en el aire de la muestra seca al horno en gramos, y S es la masa de la muestra saturada superficialmente seca en gramos.

2.2. DISEÑO DE LA MEZCLA PARA EL MATERIAL COMPUESTO

El diseño de mezcla es un proceso que busca determinar las proporciones de los diferentes componentes del concreto, con el fin de obtener mejores resultados que van desde el estado fresco hasta el estado endurecido. A continuación se describen los procedimientos empleados en los ensayos de densidad del cemento hidráulico, tamizado para el agregado fino y grueso, contenido de materia orgánica para el agregado fino, masa unitaria para el agregado fino y grueso y el cálculo de la densidad y de la absorción para el agregado fino y grueso.

➤ DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO

En la determinación de la densidad del cemento hidráulico, por lo cual se usó el procedimiento descrito en la NTC 221 (54), el procedimiento da inicio con el llenado del frasco de Le Chatelier con Kerosene hasta la marca graduada entre 0 y 1 ml, a continuación se introdujo el frasco en agua por periodos de 3 minutos hasta que se estabilizó el descenso del nivel de Kerosene y se tomó la lectura inicial. Con la ayuda de un embudo de vidrio se adicionaron 64 gr de cemento hidráulico tipo I y se procedió de igual manera que la descrita anteriormente en periodos de 3 minutos y se registró la segunda lectura o lectura final.

El cálculo de la densidad se realizó mediante la ecuación (12) según la NTC 221, que se muestra a continuación:

$$\text{Densidad } \rho \text{ en gr cm}^3 = \frac{\text{Masa del cemento (gr)}}{\text{Volumen desplazado (ml)}} \quad (12)$$

➤ TAMIZADO DEL AGREGADO FINO Y GRUESO

La Norma Técnica Colombiana NTC 77 (48), describe el procedimiento para el tamizado del agregado fino y grueso, donde se seleccionaron tres (3) porciones aproximadamente igual siguiendo las indicaciones de la Tabla 2 de la NTC 129, sección 4.4, las cuales se combinaron para formar la muestra tipo.

Tabla 2. Tamaño de las muestras para el agregado fino, NTC 77

Agregado fino	
Tamaño Máximo nominal del agregado (mm)	Masa mínima aproximada en kg
2,36 (No.8)	10
4,75 (No.4)	10

La cantidad de material seleccionado para el ensayo fueron 300 gr, por consiguiente, después del secado en el horno y tener masa constante a 110 °C se puso la muestra en los tamices en orden descendente (Tamices No. 4, 8, 16, 30, 50 y 100), a continuación se tamizó mecánicamente durante 15 minutos.

El agregado grueso usado para elaborar el concreto, posee un tamaño de ½” constante, por tal razón no se hace necesario el ensayo granulométrico.

➤ CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA PARA EL AGREGADO FINO

La presencia considerable de materia orgánica en los agregados ya sea en el fino o en el grueso afecta el comportamiento del material perjudicando el fraguado y la resistencia mecánica de la mezcla. El contenido de materia orgánica en el

agregado fino se determinó usando la NTC 127 (55). En primer lugar, se llenó una botella de vidrio transparente con 130 ml de agregado fino y se añadió hidróxido de sodio (NaOH) hasta que el volumen de agregado fino y de solución sea de 200 ml aproximadamente, seguidamente se tapó y agito vigorosamente la botella dejándola en reposo durante 24 horas. Por lo cual, se usaron 5 vidrios de colores estándar, como se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Escala Colorimétrica de Gardner (55)

Agregado fino	
Color Gardner estándar	Placa orgánica
5	1
8	2
11	3 (estándar)
14	4
16	5

➤ **MASA UNITARIA PARA EL AGREGADO FINO Y GRUESO**

En la determinación de la masa unitaria, el procedimiento empleado fue 'por apisonamiento' el cual se describe en la NTC 92 (56), Numeral 10, pág. 6, donde se empleó un recipiente metálico con manija impermeable y uniforme en sus bordes superior e inferior como se puede apreciar en la Figura 9, el volumen del molde es de 0.00172 m³.

Antes de nada, se pesó el molde donde se va a depositar el material y se puso en el recipiente una tercera parte del agregado, después se apisono con 25 golpes sin que la varilla golpee el fondo del molde distribuyéndolos uniformemente sobre la superficie, de igual manera se realizó con las 2/3 partes restantes sin que el apisonado supere la capa anteriormente compactada, por último, se niveló la superficie del material (agregado) con una placa de vidrio.



Figura 9. Elementos de laboratorio para determinar la masa unitaria del agregado grueso y fino (56)

El cálculo de la masa se llevó a cabo mediante la ecuación (13), extraída de la NTC 92, la cual se describe a continuación:

$$\text{Masa } M \text{ en Kg } m^3 = \frac{G-T}{V} \quad (13)$$

De la ecuación (13) para determinar la absorción; la variable M es la masa unitaria del agregado en Kg/m³, G es la masa del agregado más el molde en Kg, T es la masa del molde en Kg, V es el volumen del molde en m³.

➤ DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

La masa mínima necesaria para realizar el ensayo se tomó de la NTC 176 (57), la cual se muestra en la Tabla 4, el agregado grueso que se dispuso para el ensayo se secó a 110 °C hasta obtener masa constante y se dejó enfriar por un periodo de tiempo de 4 horas a temperatura ambiente, seguidamente se sumergió el agregado en agua a temperatura ambiente durante un periodo de 24 horas, a continuación se extrajo la muestra del agua y se envolvió en un paño seco, después se removió hasta retirarle la capa superficial de agua y se determinó la

masa de la muestra de ensayo en la condición saturada superficialmente seca (s.s.s).

Posteriormente a la determinación de la masa superficialmente seca se determinó el peso de la masa sumergida en agua, una vez registrada la masa sumergida se tomó la muestra y se introdujo en el horno a 110°C durante 24 horas, se dejó enfriar durante 4 horas y se pesó para conocer su masa seca.

Tabla 4. Masa mínima de la muestra para determinar densidad y absorción del agregado grueso (57)

Tamaño Nominal (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo, (Kg)
12,5 o menos	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125

Las unidades de la densidad se expresan en gramos sobre centímetro cúbico. Se calculó; la densidad aparente (DBulk), la densidad nominal (Dn) y la densidad aparente saturada superficialmente seca (Da.SSS), además de la absorción en porcentaje, mediante las ecuaciones 14, 15, 16 y 17, que se muestran a continuación, extraídas de la NTC 176:

$$\text{Densidad aparente } DBulk = 0.9975 * \frac{A}{B-C} \quad (14)$$

$$\text{Densidad aparente S.S.S } Da.SSS = 0.9975 * \frac{B}{B-C} \quad (15)$$

$$\text{Densidad nominal } Dn = 0.9975 * \frac{A}{A-C} \quad (16)$$

$$\text{Absorción } \% = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (17)$$

En las ecuaciones (14), (15), (16) y (17) el valor de A es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, B es la masa en el aire de la muestra de ensayo saturada y superficialmente seca, C es la masa en el agua de la muestra.

➤ DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

Con respecto al procedimiento para determinar la densidad y la absorción del agregado fino, se usó el descrito en la NTC 237 (51), en cuanto a la toma de muestras se realizó siguiendo los parámetros de la NTC 3674 (58), método B – Cuarteo, antes de nada, Se llenó el picnómetro con agua y se introdujeron 500 gramos de arena en condición saturada superficialmente seca, a continuación, se adiciono agua hasta completar el 90% y con giros sucesivos se removió el aire atrapado, el picnómetro se introdujo en agua hasta alcanzar 23 °C y se determinó la masa total del picnómetro con la muestra y el agua, a continuación se secó la muestra en horno a 110 °C, seguidamente se dejó enfriar durante 1 hora y se determinó su masa.

Las unidades de la densidad se da en gramos sobre centímetro cúbico. Se calculó la densidad aparente (DBulk), la densidad nominal (Dn) y la densidad aparente saturada superficialmente seca (Da.SSS), además de la absorción en porcentaje,

mediante las ecuaciones 18, 19, 20 y 21, según la NTC 237, que se muestran a continuación:

$$\text{Densidad aparente } DBulk = 0.9975 * \frac{A}{B+S-C} \quad (18)$$

$$\text{Densidad aparente S.S.S } Da.SSS = 0.9975 * \frac{S}{B+S-C} \quad (19)$$

$$\text{Densidad nominal } Dn = 0.9975 * \frac{A}{B+A-C} \quad (20)$$

$$\text{Absorcion } \% = \frac{S-A}{A} * 100 \quad (21)$$

En las ecuaciones (18), (19), (20) y (21) el valor de D, es la densidad aparente en gramos sobre centímetro cúbico, A es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gramos, B es la masa del picnómetro llenó con agua, en gramos, S es la masa de la muestra saturada y superficialmente seca, C masa del picnómetro con la muestra y el agua hasta la marca de calibración, en gramos.

➤ DISEÑO DE MEZCLA

El diseño de mezcla, tiene como propósito conocer las propiedades de los componentes del concreto para determinar las cantidades necesarias de cada elemento y así lograr la determinación de la combinación más práctica y económica de materiales disponibles para producir un concreto que satisfaga los requerimientos bajo condiciones particulares de uso.

La dosificación para el diseño de mezcla se realizó empleando el método estandarizado por el Instituto Americano del Concreto (ACI 211) (59), el cual se basa en la selección del asentamiento de acuerdo al tipo de construcción, la

resistencia promedio de diseño, el tamaño máximo del agregado, la relación agua/cemento y el módulo de finura de la arena. Se seleccionó la dosificación por peso.

Antes de dosificar la mezcla de concreto, fue necesario conocer ciertos datos como el tipo de elemento, las condiciones a la que estará expuesta en su vida útil, tamaño máximo nominal, resistencia a la compresión y la densidad del material entre otros.

Con respecto a la necesidad del concreto se necesitaron datos previos como son: la resistencia de diseño a los 28 días y la densidad del cemento.

Con relación a la los materiales se necesitó conocer: del agregado grueso; el tamaño máximo, el tamaño máximo nominal, la masa unitaria compacta (MUC), la masa unitaria suelta (MUS), la densidad aparente, la absorción, la humedad natural y la textura del agregado. Del agregado fino; el módulo de finura, el ensayo para determinar el contenido de materia orgánica, la masa unitaria compacta (MUC), la masa unitaria suelta (MUS), la densidad aparente, la absorción y la humedad natural.

Los pasos que se siguieron para el diseño de la mezcla se esquematizan en la Figura 10.

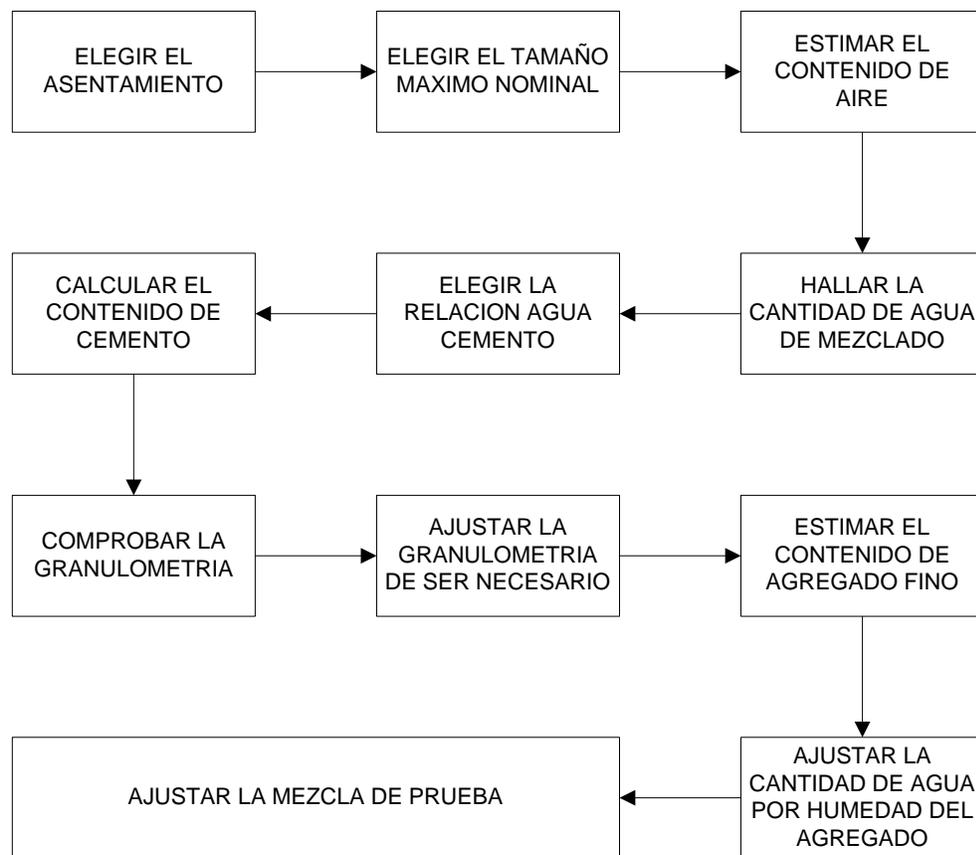


Figura 10. Secuencia para el diseño de mezclas de concreto

Fuente: autor

2.3. PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO

El estudio de los materiales se ocupa de las propiedades, clasificación y usos de la materia ya sea modificada, combinada o en estado natural. De forma usual se separan para su estudio en dos grandes grupos: las propiedades físicas y las propiedades mecánicas. En el presente estudio se realizaron los ensayos de módulo de rotura, resistencia a la compresión, absorción, velocidad inicial de absorción, carga de rotura, módulo de elasticidad, densidad del material en estado endurecido y peso por unidad de área.

➤ MÓDULO DE ROTURA

El ensayo de módulo de rotura tiene por objeto establecer la determinación de la resistencia a la flexión de un espécimen de concreto por medio del uso de una viga simple cargada en el punto central sobre concretos convencionales, la falla de los especímenes se puede apreciar en la Figura 11. Los especímenes se curaron por un periodo de 28 días sumergidos en agua. La precarga inicial vario del 3% al 6% de la carga ultima, se comprobó la no existencia de luces adicionales entre el soporte de ensayo y el espécimen ya que esto podría alterar el buen funcionamiento del ensayo y la obtención de resultados fiables.



Figura 11. . Falla por carga a flexión

Fuente: Autor

Se controló el moldeo y desmoldeo al igual que el transporte y el curado de las mismas. Para ensayar los especímenes se usó la máquina MTS 647 hydraulic wedge grip, con una carga uniforme de 0.007 kN/s, para un total de 1015 datos al finalizar el ensayo, el Módulo de Rotura (MR) tiene un valor que oscila entre el 11 y el 23% de la resistencia a compresión, esto depende de las dimensiones y del tipo de agregado. La ecuación usada para el cálculo del módulo de rotura fue la siguiente, según el I.N.V E-415 (60):

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (22)$$

En la determinación del MR, Las variables mostradas son; P es la carga aplicada en N, L es la longitud de la luz dada en mm, b es el ancho promedio del espécimen en el punto de fractura en mm y d es la altura promedio del espécimen en el punto de fractura en mm. Los valores obtenidos para el módulo de rotura, según la norma, tiene unidades lb/pulg² (psi), los resultados se expresan en Kg/cm².

➤ RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia de diseño proyectada fue de 140 Kg/cm² (2000 psi) a los 28 días de edad, las probetas se elaboraron y curaron siguiendo la NTC 1377 (61), a saber, la relación agua cemento se conservó fija para cada sustitución de 0,68 y un asentamiento de 4 cm clasificada como consistencia semi - seca, el contenido de aire 2,5%. El ensayo a compresión se realizó siguiendo los lineamientos de la NTC 673 (62), con el equipo de laboratorio MTS 647 hydraulic wedge grip, como se muestra en la Figura 12.

Se fabricaron probetas para diferentes edades de curado (7, 14, 28 y 60 días) para los diferentes porcentajes de sustitución (0, 10, 15 y 20%) de arena por escoria. Antes de realizar el ensayo a compresión se refrentaron con azufre para evitar irregularidades en la superficie donde se aplicó la carga, las probetas elaboradas fueron de forma cilíndrica con diámetro 10 cm y una altura de 20 cm.



Figura 12. Ensayo de probetas a compresión

Fuente: Autor

➤ ABSORCIÓN

Para obtener la absorción del MC se empleó la NTC 4992 (63), donde el procedimiento incluye como primer paso, el proceso de secado en horno ventilado entre 110°C a 115°C , así pues, se separaron las muestras entre sí 2,5 cm hasta que se obtuvo una masa seca constante (M_s) por un periodo de 24 horas, posteriormente se pesaron cada dos horas de manera consecutiva hasta que la variación de masa fuera inferior al 0,2%. Como segundo paso, la saturación en agua durante 24 horas entre 15 y 27°C , por un lado, se conservó la altura del agua por encima del espécimen a 2,5 cm, se debió compensar la pérdida de agua por evaporación a un nivel demarcado previamente, por otro, una vez pasado el tiempo de saturación se pesaron suspendidas de un alambre sumergidos en agua (M_a).

Las probetas se extrajeron y se dejaron escurrir por un minuto sobre una malla metálica con aberturas 5 mm, además se secaron superficialmente para ser pesadas inmediatamente, así se obtuvo su masa húmeda (Mh).

La absorción de agua (Aa), se calculó mediante la ecuación 23 y 24, extraídas de la NTC 4992, con una aproximación de 0,1%.

$$\text{Absorción } Aa, \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = \frac{Mh - Ms}{Mh - Ma} * 1000 \quad (23)$$

$$\text{Absorción } Aa, \% = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (24)$$

➤ VELOCIDAD INICIAL DE ABSORCIÓN

Antes de realizar el ensayo de permeabilidad, se realizaron pruebas preliminares de absorción de agua a presión atmosférica con una lámina de agua por encima de las probetas de 2,5 cm para calcular la penetración del líquido, el recipiente que se usó fue un vaso graduado al milímetro con tapa ajustable para evitar la evaporación y una probeta de concreto de control cuyas medidas fueron de 2 pulgadas de diámetro por 4 pulgadas de alto, la probeta se sumergió en agua a temperatura ambiente por un periodo de tiempo el cual finalizaba cuando el flujo de penetración fuera constante.

El método de ensayo usado para calcular el coeficiente de permeabilidad (K) se describe en la NTC 4483, sección 6.2, 'Determinación de la profundidad de penetración', el cual implica ejercer sobre la cara del espécimen una presión equivalente a 0,5 MPa (50 mca) de forma constante durante un periodo de tiempo de 4 días. Esta presión no fue suministrada en su totalidad, para este proyecto de investigación se usaron 0,12 MPa (12 mca) durante 8 días.

Se elaboraron 16 especímenes de ensayo, 4 por cada sustitución de escoria por arena, curadas 28 días por inmersión en agua siguiendo la recomendación de la NTC 4483 (64), Nota 2 (Pág. 4), 'la aplicación de presiones muy grandes a especímenes de concreto muy jóvenes, que no han desarrollado suficiente resistencia mecánica, puede dar lugar a micro fisuras que conducirían a valores erróneos de permeabilidad', ahora bien, se dejaron secar a temperatura ambiente por un periodo de tiempo de 8 días y se introdujeron en el horno a 100 °C durante 48 horas con el fin de garantizar la no presencia de agua en el núcleo de la probeta, una vez cumplidos 8 días de inmersión a la presión establecida se secciono el espécimen perpendicularmente a la cara sobre la cual se aplicó la presión de agua y se midió la profundidad promedio de penetración, para seccionar las probetas se usó el ensayo de tensión indirecta NTC 722. La ecuación empleada para calcular el coeficiente de permeabilidad, se define mediante la ecuación (25), según la NTC 4483.

$$\text{Coeficiente de permeabilidad } K, \frac{m}{s} = \frac{D^2V}{2Th} \quad (25)$$

En la ecuación 25 el valor de D corresponde a la profundidad de penetración en metros, de modo semejante, V es la porosidad del concreto en porcentaje, T es el tiempo que tomó para penetrar la profundidad D en segundos y h es la cabeza de presión en metros. La porosidad se calculó usando el equipo 'Core Pet'. Su formulación se realizó por medio de la ley de Boyle, de los gases ideales, su funcionamiento es a base de helio. Los cálculos y descripción del proceso para determinar la porosidad se puede ver en el anexo E.

➤ CARGA DE ROTURA

Por su naturaleza, el concreto es una masa endurecida y heterogénea cuya resistencia depende de la relación agua cemento (a/c), del contenido y del tipo de

cemento, de las características de los agregado (granulometría, resistencia, tamaño máximo), fraguado, curado, y de la edad del concreto (7). El curado se realizó de manera estándar y similar para cada sustitución, el procedimiento es igual que el planteado en el ensayo de resistencia a la compresión.

➤ MÓDULO DE ELASTICIDAD

Los valores del módulo de elasticidad calculados son usualmente menores para el módulo obtenido bajo una aplicación rápida de carga y usualmente mayores para aquellos valores obtenidos bajo una aplicación de carga sostenida a largo plazo (otras condiciones para el ensayo).

En el presente trabajo de investigación se comparará experimentalmente el módulo de elasticidad para concretos con sustitución de arena por escoria con el concreto convencional (CC), se hará referencia al valor medio para la información experimental a nivel nacional sin distinguir el tipo de agregado (NSR – 2010, mediante la expresión, $E_c = 3900 * \overline{f'_c}$ en Mpa) (65).

Los ensayos se realizaron sobre cilindros de concreto de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud de acuerdo con los requisitos para ensayos de especímenes a compresión establecidos en la NTC 1377 (61), los especímenes se ensayaron con 28 días de curado inmersos en agua, con el deformímetro instalado para la medición de la deformación en una máquina de ensayo de rata constante de carga para la obtención del módulo de elasticidad.

Para el cálculo del módulo de elasticidad se usó la expresión (26), obtenida de la NTC 4025:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (26)$$

En la ecuación 26, el valor de E_c es el módulo de elasticidad constante (MPa o PSI), asimismo S_2 es el esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última, de modo semejante, S_1 es el esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal, ϵ_1 , de las 50 millonésimas (MPa) y para finalizar, ϵ_2 es la deformación longitudinal producida por el esfuerzo S_2 (66).

La toma de datos de carga se registró en intervalos de 2000 Kgf, la deformación en 1×10^{-4} pulgadas y el módulo de elasticidad se calculó en MPa.

➤ DENSIDAD DEL MATERIAL EN ESTADO ENDURECIDO

El procedimiento para hallar la densidad del material endurecido, da inicio con la finalización del curado de forma estándar a los 28 días de curado, las muestras se secaron en un horno con extractor de humedad manteniendo una temperatura constante de 100°C durante 24 horas, separadas entre sí 25 mm para evitar cualquier retención de humedad, obteniéndose la masa seca (M_s) constante, en dos pesajes sucesivos a intervalo de 2 horas con una variación de masa menor a 0,2%. Una vez obtenida la masa seca, las probetas se dejaron secar a temperatura ambiente, posteriormente los especímenes se dejaron sumergidos en agua durante un periodo de 24 horas con una temperatura constante de 20°C , cabe anotar que, la altura de agua por encima de las probetas se conservó constante a 50 mm compensando la evaporación, así también, se dejó una separación entre las probetas sumergidas con el fin de evitar porciones de probetas sin saturar.

El pesaje de los especímenes saturados se realizó en una cesta de malla, de separación 5 mm previamente pesada y suspendida por una varilla para obtener la masa inmersa en agua (M_a), por consiguiente, se dejaron escurrir durante un minuto, a continuación, las probetas se secaron superficialmente y se pesaron

inmediatamente, de esta forma se obtuvo la masa saturada superficialmente (Mh) (63), según la NTC 4992.

$$\text{Densidad } D, \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = \frac{M_s}{M_h - M_a} * 1000 \quad (27)$$

Para el cálculo de la densidad D, usando la expresión 27 las masas Ms, Mh y Ma deben introducirse en gramos.

➤ PESO POR UNIDAD DE ÁREA

La masa unitaria del concreto endurecido es igual a la masa del concreto recién mezclado menos el agua que se pierde por medio de la evaporación en estado fresco, la cantidad de agua evaporable en condiciones de humedad relativa del 50% es del orden de 2,5% de la masa del concreto y depende de; la relación agua cemento, de la absorción de los agregados y del tamaño de la estructura. Para obtener el peso por unidad de área se referenció el ensayo mediante la NTC 1926, sección 6.2.

Antes de nada, para el cálculo del peso por unidad de área, se situaron tres (3) capas de concreto preparado en el molde apisonado con 25 entradas de la varilla lisa, a continuación, se vibró internamente cada capa, fijándose de no llegar al fondo en el vibrado o en el apisonado de la primera capa, ni pasar de una capa a otra en las vibraciones intermedias.

Posteriormente, se retiraron los excesos de material en la capa superior empleando una lámina, la cual se pasó de un lado a otro del molde, el cálculo de la masa unitaria del concreto en estado fresco se obtuvo mediante la expresión (28), extraída de la NTC 1926:

$$D \text{ (Kg)} = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (28)$$

En la determinación de la ecuación 28, el valor que corresponde a D es la masa unitaria del concreto en mm, asimismo, M_c es la masa del recipiente llenó con concreto en mm, de modo semejante, M_m es la masa del recipiente en mm y V_m es el volumen del recipiente en mm^3 .

2.4. EVALUACIÓN DEL EFECTO GENERADO POR ATAQUE QUÍMICO SOBRE EL MATERIAL COMPUESTO

Ciertos componentes del suelo y del medio ambiente llegan a ser causantes del deterioro del concreto ya sea de forma directa, como es el contacto físico con ciertas sustancias (álcalis y los sulfatos) o de manera indirecta como las partículas de dióxido de carbono del medio ambiente. En el presente trabajo se estudió el ataque producido por los álcalis a los agregados, la sulfatación y a la carbonatación de manera acelerada, los cuales se describen a continuación.

➤ REACCIÓN ÁLCALI ÁRIDO (RAA)

En primer lugar, para dar inicio al ensayo de RAA, se sumergieron las probetas en agua a 80°C durante 12 horas, con el fin de que no hubiera diferencia de temperatura al momento de sumergirlas en la solución. Por otro lado cabe anotar que se usó el ensayo modificado de la norma ASTM 1260, cabe anotar que se siguieron las recomendaciones expuestas por la ASTM 1293, el cual consiste en sumergir las probetas durante 16 días en una solución acuosa de soda cáustica (NaOH, 1N) a una temperatura elevada (80°C) para garantizar la aceleración de la reacción como se puede ver en la Figura 13. Ahora bien, se evaluó periódicamente la variación de la masa y al finalizar 16 días de inmersión se realizó el ensayo complementario de resistencia a la compresión. Además se

tuvieron en cuenta los cambios observados en las probetas mediante inspección visual.

El ensayo continuo con el pesaje de las probetas en estado secó, seguidamente se registró la lectura del peso de las probetas pasados 28 días del curado y 120 días de secado por medio de una balanza digital.



Figura 13. Ensayo reacción álcali árido

Fuente: Autor

Con el fin de acelerar el ataque por RAA, se preparó una solución acuosa de soda cáustica (NaOH), denominada hidróxido de sodio, con una concentración 1N (1 normal), equivalente a 40 g por cada 900 ml de agua. Previamente se calentó el agua (11.25 Litros de agua por cada recipiente) a 80°C, lentamente se introdujo el NaOH (500 g por cada recipiente). A medida que se iba introduciendo el NaOH, se iba agitando la solución. Por consiguiente, se utilizó un recipiente con diferencias de nivel en su base, que garantizó la difusión de la soda cáustica en la parte inferior de las probetas.

Las probetas únicamente se extrajeron de la solución donde se encontraban inmersas mientras se realizaba el control de variación de la masa y se volvían a sumergir.

Se evaluó la variación de la masa de las probetas realizando el pesaje de las mismas por medio de una balanza digital cada dos días en estado saturado superficialmente secó (S.S.S.). Sino también, se realizó la inspección visual para evaluar los posibles cambios de aspecto exterior de las probetas.

Al finalizar los 16 días del ensayo, se evaluó la resistencia a la compresión de las probetas utilizando el equipo MTS 637 Hydraulic Wedge Grip.

➤ ATAQUE POR SULFATOS

En primer lugar, se preparó una solución acuosa de sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) con una concentración de 80 gramos/Litro equivalente al 7.77% de concentración, teniendo en cuenta que la densidad del Na_2SO_4 es de 2.68 g/cm^3 . Por lo cual, la solución acuosa de sulfato anhidro se preparó 48 horas antes de la inmersión de las probetas.

La concentración de sulfato de sodio utilizada, se justifica para acelerar el ataque de sulfatación del concreto con condiciones críticas superiores a las de servicio (Ataque muy fuerte). Si bien, se sabe que un ataque fuerte por sulfatos solubles en aguas se presenta cuando se superan 10 g/L (67). Tomando como referencia investigaciones que realizaron el ensayo como lo establece la ASTM C 1012, usando soluciones de 50 g de Na_2SO_4 disueltas en 900 ml de agua, observaron que algunas mediciones se pueden extender hasta 12 meses, por esta razón se incrementó la concentración de la solución en 2.4%. Se utilizaron dos recipientes cada uno con 1000 g de Na_2SO_4 disueltos en 12.5 litros de agua.

La lectura inicial del peso de las probetas, se realizó pasados 28 días del curado y 30 días de secado al aire, por medio de una balanza digital. La duración total del ensayo de ataque por sulfatos fue de 14 días, se efectuaron 7 ciclos de 48 horas, cada ciclo está compuesto por las etapas; de inmersión, secado y enfriamiento, un nuevo periodo comienza con una nueva inmersión, el ciclo del ensayo comprendió: Inmersión de las probetas en la solución Durante 24 horas (cada ciclo), se utilizó un recipiente con diferencias de nivel en su base que garantizó la difusión del sulfato en la parte inferior de las probetas, secado al horno durante 8 horas a 105 °C, enfriamiento a temperatura ambiente por un periodo de tiempo de 16 horas.

En el lapso de tiempo que duro ensayo, se midió la variación de la masa de las probetas tanto seca (al horno) como húmeda (S.S.S.), asimismo se realizó la inspección visual con el fin de observar los posibles cambios de aspecto (exterior) de las probetas. Al finalizar 14 días se evaluó la resistencia a la compresión de las probetas utilizando el equipo MTS 637 Hydraulic Wedge Grip.

➤ CARBONATACIÓN

El ensayo consistió en someter probetas de concreto secas al ambiente durante 240 días, con diferentes porcentajes de sustitución de escoria por arena, con una alta concentración de dióxido de carbono en la cámara de carbonatación.

Ante todo, se puso en marcha la alimentación de CO₂, del aire seco y del aire húmedo, la fuente del dióxido de carbono procedió de un tanque de 25 Kg de capacidad, a continuación se abrió la válvula del tanque y se observó en el tubo del flujo una presión de 500 psi sin descenso lo que indicó flujo constante. El aire que ingresa a la cámara tiene como fuente el aire encuentra en la atmósfera, el cual es capturado por un compresor para aumentar la presión y dirigir el flujo. Por

tanto, se establecieron las siguientes condiciones de humedad, temperatura y concentración, según la teoría consultada (45).

Tabla 5. Condiciones de la cámara para la carbonatación del concreto

Humedad Relativa (%)	50 - 70
Temperatura	25
Concentración (%)	70
Tiempo del ensayo (h)	15

Fuente: autor

Establecidas las condiciones se procedió a secar totalmente la cámara, posteriormente, se llenó de agua el recipiente que alimenta la caja de acero inoxidable para la medición de humedad, así mismo, se ingresaron probetas y se tapó, después se fijó el valor de la histéresis de humedad en 65% para que la humedad se encontrara en el rango establecido como se muestra en la Tabla 5. La temperatura se fijó en 30°C mientras se alcanzaba el valor de la histéresis, posteriormente se estableció en 25°C. El controlador de tiempo se fijó en 15 horas. La razón por la cual se elige este valor, se debió a la alta concentración utilizada. (67), (68). A continuación, se energizó la cámara, y se abrió la válvula del tanque de CO₂ a una presión de 250 psi, garantizando flujo constante.

Para alcanzar una concentración del 70% se fijaron los flujos de CO₂, aire seco y aire húmedo, con los valores que se muestran en la Tabla 6

Tabla 6. Flujos de CO₂ y aire para garantizar una concentración del 70%.

Flujo de CO ₂ (lpm)	7.5
Flujo de aire seca (lpm)	10
Flujo de aire húmedo (lpm)	0

Fuente: autor

Se permitió la entrada de CO_2 sin entrada de aire a la cámara mientras se alcanza el valor de histéresis, y luego si abrir el flujo de aire secó para su estabilización. Al finalizar las 15 horas de carbonatación se cerró el flujo de CO_2 y se dejó la cámara en operación durante una hora más, sólo con flujo de aire secó para poder extraer las probetas de forma segura.

El ensayo de tracción indirecta se realizó a las probetas que fueron sometidas a carbonatación acelerada de acuerdo a las exigencias de la NTC 722 (69). El equipo utilizado fue 'AMSLER'. El procedimiento consistió en la colocación de los listones de apoyo; la ubicación de la muestra y la aplicación de carga en dirección perpendicular a la longitud de la probeta, se registró el máximo valor de carga aplicada indicado por el medidor de carga de la máquina en el momento de la falla. Este ensayo se utilizó como complemento del ensayo de carbonatación, pues el sentido longitudinal de la falla, permitió evaluar la profundidad de carbonatación alrededor del centro de concreto.

Aprovechando la forma de la falla que proporcionó el ensayo de tracción indirecta, se aplicó fenolftaleína al 1% en solución etílica para determinar las zonas con pH básico y ácido, según el color que se presentó.

En las zonas donde el concreto reaccionó a la fenolftaleína, presentó un color fucsia que indica la no presencia de carbonatación, mientras que en las zonas que mantuvieron el color original del concreto sí hubo difusión de CO_2 , la fenolftaleína es un indicador de sustancias básicas, puesto que el CO_2 es un compuesto ácido no reacciona a la fenolftaleína.

Se realizaron varias mediciones de penetración de CO_2 , se registraron los máximos y mínimos valores de profundidad de carbonatación, con el cual se determinó el coeficiente de carbonatación K de cada probeta.

2.5. ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN NO ESTRUCTURALES.

Los elementos no estructurales son aquellos cuya función es de servir de cerramiento y no soportan cargas estructurales salvo la de su propio peso. Los elementos aquí propuestos se evaluaron ante tres tipos de solicitaciones: ensayo a flexión en el plano débil, resistencia a la compresión y el ensayo en el plano inclinado. La resistencia a la flexión en el plano débil del elemento sigue la norma NTC 1085, sin embargo la resistencia a la compresión y a la tensión diagonal no siguen ninguna norma específica, ya que no existe. El método aquí propuesto se plantea como posible procedimiento, y se considera aporte del autor.

➤ ENSAYO A FLEXIÓN (PLANO DÉBIL)

La baldosa se define como una placa de pequeño espesor en relación con las demás dimensiones, de forma cuadrada o rectangular de diferentes tamaños destinada principalmente al recubrimiento de pisos. El panel se encuentra constituido por una sola capa y puede poseer un lado mayor que el otro. En la evaluación de la resistencia a la flexión se cumplen los requisitos descritos en la NTC 1085 (70) y UNE-EN (1339:2004). Los elementos a ensayar son: el panel (50 x 50 cm) y la plaqueta (Baldosa 25 x 25 cm), con 28 días de curado sumergidos en agua.

La NTC 1085 (70) establece que no se deben hacer ensayos a elementos de dimensión menor a 20 x 20 centímetros para baldosas, por esta razón, las dimensiones utilizadas fueron de 25 x 25 centímetros.

Las baldosas se ubicaron sobre dos apoyos de madera separados 170 mm, la carga se aplicó en el punto central mediante una esfera de hierro de peso 410 gramos, el incremento de carga fue constante hasta que se produjo la rotura como se puede apreciar en la Figura 14, el resultado se expresa en kgf, y el módulo de

rotura en MPa. La ecuación (29) que se muestra a continuación se usó para calcular el módulo de rotura de los elementos, según el I.N.V E-415 (60).



Figura 14. Ensayo a flexión en el plano débil

Fuente: autor

$$MR = \frac{3PL}{2bt^2} \quad (29)$$

En la ecuación 29, MR es el módulo de rotura en MPa, P es la carga de rotura en N, L es la longitud entre apoyos en mm, b es el ancho de la losa en mm y t es el espesor de la losa en mm.

➤ RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a compresión se realizó sobre probetas prismáticas en el plano longitudinal, con un área total de aplicación de carga de 62.5 cm². La carga aplicada tuvo un incremento de 10 kgf de manera invariable hasta que se produjo la falla en el elemento de concreto como se puede ver en la Figura 15.



Figura 15. Ensayo a compresión longitudinalmente

Fuente: autor

➤ ENSAYO EN EL PLANO INCLINADO

El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión, que produce esfuerzos de compresión en la diagonal vertical y al mismo tiempo produce esfuerzos de tracción en la diagonal perpendicular. Aunque se trate de un ensayo a compresión diagonal, puede manifestarse una falla de tipo escalonada igual que la falla presentada en muretes de ladrillos cuando la disposición interna de los componentes así lo impongan.

Con el fin de apoyar las losas de concreto en la máquina de ensayo, se cortaron las aristas y se apoyó la parte superior en un molde que posee base neopreno, la postura del molde se puede observar en la Figura 16, restringiendo el desplazamiento y la no aplicación correcta de la carga, la carga se aplicó a una rata constante de 10 kilogramos fuerza.



Figura 16. Ensayo a compresión diagonal

Fuente: autor

3. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACION DE LA ESCORIA Y DISEÑO DE LA MEZCLA.

Cuando se dispone de las características de un material, es posible conocer las potencialidades y limitaciones que este pueda presentar. Es necesario conocer las características físicas de la escoria en estudio, esta información será obtenida de los siguientes ensayos; granulometría, densidad, humedad natural, absorción de agua para la escoria. Los resultados se muestran a continuación.

3.1. GRANULOMETRÍA

La escoria presentó las siguientes características granulométricas: $D_{60} = 1.8$, $D_{30} = 0.84$, $D_{10} = 0.172$, $C_u = D_{60}/D_{10} = 10.46$; ($C_u > 4$), $C_c = ((D_{30})^2) / (D_{10} * D_{60}) = 2.279$; ($3 > C_u > 1$) (71). Se clasificó como arena con simbología "SW", son arenas bien gradados y pocos finos, la presencia de finos que puedan contener no debe producir cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa, ni interferir con su capacidad de drenaje.

Tabla 7. Distribución granulométrica de la escoria

Tamiz (Pulg)	Tamiz (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
4	4.75	49,80	4,98	4,98	95,02
8	2.38	221,60	22,17	27,15	72,85
16	1.19	369,80	37,00	64,15	35,85
30	0.589	152,50	15,26	79,41	20,59
50	0.297	27,30	2,73	82,14	17,86
100	0.150	107,10	10,72	92,86	7,14
Fondo		67,50	6,75	99,61	0,39

Fuente: Autor

Los resultados de la clasificación granulométrica, se presentan en la Tabla 7. Los tamices que cumplen con la retención optima del material fueron el tamiz No. 4, 50, 100 y 200 y los que no cumplen con el porcentaje serían los tamices 8, 16 y 30, Ya que el agregado no deberá contener más del 50% del material retenido en dos tamices consecutivos (72). El módulo de finura de la escoria fue de $M_{Fe}=3,507$. Lo cual indica que se clasificará como arena gruesa, si lo comparamos con el rango normal de aceptación ($2.1 < M_{Fe} < 3.6$) (73). En el anexo A. Se muestran las gradaciones ideales para los agregados.

3.2. DENSIDAD

Experimentalmente se obtuvo un valor para la densidad aparente de $2,35 \text{ gr/cm}^3$, los agregados pétreos de masa normal oscilan entre $2,3$ y $2,8 \text{ gr/cm}^3$, según la roca de origen. La densidad nominal se refiere al material solido formado por las partículas constituyentes sin incluir el espacio de los poros saturables, se obtuvo un valor de 2.40 gr/cm^3 . Como se sustituirá la arena por escoria, se considera que la escoria posee densidad dentro del rango de aceptación de los agregados finos.

3.3. HUMEDAD NATURAL

La humedad natural de la escoria es de 0.33% , indicando niveles inferiores, no afectando el diseño de la mezcla por saturación de los poros.

3.4. ABSORCIÓN DE AGUA

La escoria posee un porcentaje de absorción de 0.85% el cual es muy bajo, y no incidirá negativamente en el diseño de la mezcla, al extraerle el agua a los demás componentes del concreto.

3.5. DISEÑO DE LA MEZCLA PARA EL MATERIAL COMPUESTO

Para el diseño de la mezcla del material compuesto, se realizaron los ensayos de densidad del cemento hidráulico, tamizado para el agregado fino y grueso, contenido de materia orgánica para el agregado fino, masa unitaria para el agregado fino y grueso y el cálculo de la densidad y de la absorción tanto para el agregado fino como para el grueso. Los resultados de los ensayos se presentan a continuación. Los resultados del diseño de la mezcla, se pueden ver en el anexo B.

➤ DENSIDAD DEL CEMENTO HIDRÁULICO

Para determinar la densidad del cemento hidráulico tipo I, se realizaron 3 ensayos y se promedió los resultados obtenidos, se encontró que la densidad del cemento es de 3.018 (gr/ml) \pm 3.0, los resultados se ilustran en la Tabla 8.

Tabla 8. Cálculo de la densidad del cemento hidráulico

Densidad del cemento hidráulico				
Descripción	P-1	P-2	P-3	Un
Peso de la muestra de cemento	65	65	65	gr
Volumen inicial (Vo)	0,7	0,3	0,4	ml
Volumen final (Vf)	23	21,7	21,35	ml
Volumen (V = Vf - Vo)	22,3	21,4	20,95	ml
Densidad (Pe = W / V)	2,915	3,037	3,103	g/ml

Fuente: Autor

➤ TAMIZADO DEL AGREGADO FINO Y GRUESO

Tabla 9. Distribución granulométrica del agregado fino

Arena				
Tamiz	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
4	26,30	2,63	2,63	97,37
8	53,00	5,30	7,93	92,07
16	109,30	10,94	18,87	81,13
30	220,50	22,06	40,93	59,07
50	33,80	3,38	44,31	55,69
100	482,70	48,29	92,61	7,39
Fondo	73,90	7,39	100,00	0,00

Módulo de finura	2,073
------------------	-------

Fuente: Autor

La arena presentó las siguientes características granulométricas: $D_{60} = 0,44$, $D_{30} = 0,12$, $D_{10} = 0,08$, $C_u = D_{60}/D_{10} = 5,17$; ($C_u > 4$), $C_c = ((D_{30})^2) / (D_{10} * D_{60}) = 0,38$, (71), (74). Se clasificó como arena con simbología "SP", son arenas mal gradadas con grava, con pocos finos o sin ellos, la distribución granulométrica se puede ver en la Tabla 9.

➤ CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA PARA EL AGREGADO FINO

El color de la solución combinado con el agregado fino es menor al color de la placa orgánica No.3, la foto de la tabla colorimétrica se muestra en la Figura 17. Se descartó el exceso de materia orgánica en el agregado y se consideró apto para usarse en el diseño de la mezcla.



Figura 17. Ensayo de colorimetría para el agregado fino

Fuente: Autor

➤ **MASA UNITARIA PARA EL AGREGADO FINO Y GRUESO**

Los valores de masa unitaria obtenidos experimentalmente, se muestran en la Tabla 10, Tabla 11 y la Tabla 12, por lo cual se puede expresar que, los valores obtenidos para la arena, la escoria y el triturado, se encuentran en el rango de 1300 a 2000 Kg/m³, de manera que, se clasificaron como material de masa normal (75), ver Anexo F - sección F.1.

Tabla 10. Valores de masa unitaria del agregado grueso

P _m =	Peso del medidor Vacío	2531	Gramos
P _c =	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	6722	Gramos
P _s =	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6347	Gramos
Masa unitaria del agregado S.S.S. compactado	$(P_c - P_m) / V$	1477,79	Ka/m ³
Masa unitaria del agregado S.S.S. suelto	$(P_s - P_m) / V$	1345,56	Ka/m ³

Fuente: autor

Tabla 11. Valores de masa unitaria del agregado fino (arena)

Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7217	Gramos
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6481,5	Gramos
Masa unitaria del agregado S.S.S. compactado		$(Pc-Pm)/V$	1652,33 Ka/m ³
Masa unitaria del agregado S.S.S. suelto		$(Ps-Pm)/V$	1392,98 Ka/m ³

Fuente: autor

Tabla 12. Valores de masa unitaria del agregado fino (escoria)

Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7430	Gramos
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6609	Gramos
Masa unitaria del agregado S.S.S. compactado		$(Pc-Pm)/V$	1727,43 Ka/m ³
Masa unitaria del agregado S.S.S. suelto		$(Ps-Pm)/V$	1437,94 Ka/m ³

Fuente: autor

➤ DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Experimentalmente se obtuvo un valor para la densidad aparente de 2,61 gr/cm³, los agregados pétreos de masa normal oscilan entre 2,40 y 2,85 gr/cm³, ver anexo F – sección F.2, por consiguiente, se puede decir que el valor obtenido experimentalmente, posee densidad alta, dicho valor se encuentra en el rango de aceptación para el agregado grueso (76).

La absorción del agregado grueso se encuentra entre 0.2% al 4%, se consideró normal y no influirá negativamente en el diseño de la mezcla, ya que a mayor absorción posee menos resistencia mecánica (77).

Tabla 13. Valores de densidad del agregado grueso.

DENSIDAD		
Densidad real=	$C/(C-B)$	2,72
Densidad aparente=	$C/(A-B)$	2,61
Densidad aparente S.S.S=	$A/(A-B)$	2,65

ABSORCION		
% de Absorcion	$((A-C)X100)/C$	1,56

Fuente: autor

➤ **DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO**

Experimentalmente se obtuvo un valor para la densidad aparente de la arena de $2,58 \text{ gr/cm}^3$, y para la escoria de $2,35 \text{ gr/cm}^3$, como se puede apreciar en la Tabla 14 y en la Tabla 15 respectivamente. Los agregados pétreos de masa normal fluctúan entre $2,40$ y $2,85 \text{ gr/cm}^3$. De ahí, se concluye que, posee densidad normal y puede ser usado como agregado fino para la mezcla de concreto. La absorción del agregado fino (Arena) y la escoria, se encuentra entre 0.2% al 2%, se consideró normal y no influirá negativamente en el diseño de la mezcla (76), (77), ya que a mayor absorción posee menos resistencia mecánica.

Tabla 14. Valores de densidad del agregado fino (Arena).

DENSIDAD		
Densidad real=	$D/(A-C+D)$	2,71
Densidad aparente=	$D/(A+B-C)$	2,58
Densidad aparente S.S.S=	$B/(A+B-C)$	2,63

ABSORCION		
% de Absorcion	$((B-D)X100)/D$	1,87

Tabla 15. Valores de densidad del agregado fino (Escoria).

DENSIDAD

Densidad real=	$D/(A-C+D)$	2,40
Densidad aparente=	$D/(A+B-C)$	2,35
Densidad aparente S.S.S=	$B/(A+B-C)$	2,37

ABSORCION

% de Absorción	$((B-D) \times 100) / D$	0,85
----------------	--------------------------	-------------

Fuente: autor

➤ **DISEÑO DE MEZCLA**

El conocimiento de las propiedades del concreto en estado fresco como en estado endurecido tiene como finalidad determinar el diseño de la mezcla, para la dosificación se han propuesto métodos analíticos, experimentales, semi analíticos y empíricos. El método usado en esta investigación tiene como base los procedimientos del Instituto Americano del Concreto, elaborado por el comité 211.

Datos iniciales requeridos, para el diseño de mezcla

Resistencia a los 28 días: 2000 PSI

Densidad del cemento hidráulico: 3 gr/cm³

Asentamiento: 4 cm

Agregado grueso

Tamaño máximo: 12,50 mm

Tamaño máximo nominal: 12,50 mm

Masa unitaria compacta (MUC): 1479,23 kg/m³

Masa unitaria suelta (MUS): 1347,18 kg/m³

Densidad: 2610 kg/m³

Absorción: 1,56%

Humedad natural: 0,49%

Textura: rugosa y forma angular

Agregado fino (Arena)

Módulo de finura: 2,07 mm

Ensayo colorimétrico: 2 (Normal)

Masa unitaria compacta (MUC): 1650,00 kg/m³

Masa unitaria suelta (MUS): 1391,02 kg/m³

Densidad: 2580 kg/m³

Absorción: 1,87%

Humedad natural: 0,83%

Porcentaje de arcilla: 0%

El valor del asentamiento seleccionado fue de 4 cm, se tomó de la tabla 'valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción', con una consistencia semi seca y un grado de trabajabilidad pequeño, el tipo de estructura determinada fueron losas medianamente reforzadas.

El contenido de aire seleccionado fue de 2.5, se tomó de la tabla 'contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición', los datos de ingreso, para la determinación fueron el tamaño del agregado grueso y el grado de exposición al que se verá sometida la mezcla.

La cantidad de agua de mezclado fue de 200 litros, se tomó de la tabla 'agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaño máximo nominal del agregado', los datos de ingreso, para la determinación fueron el asentamiento (en centímetros), la inclusión de aire y el tamaño máximo nominal del agregado.

La relación agua cemento fue de 0,68, se tomó de la gráfica 'curvas de resistencia a la compresión versus relaciones agua - cemento', los datos de ingreso, para la determinación fueron la resistencia de diseño y el aire incluido.

El contenido de cemento se calculó por metro cúbico, mediante la expresión (30):

$$C = \frac{a}{a_c} \quad (30)$$

En la ecuación 30, el valor que corresponde a C, es el contenido de cemento en kg/m³, asimismo, a es el contenido de agua en litros a/c es la relación agua-cemento. Para nuestro diseño el valor del contenido de cemento es 292,7 Kg/m³

El volumen de cemento se calculó por metro cúbico, mediante la expresión (31):

$$V_c = \frac{C}{\text{Densidad del cemento } (D)} \quad (31)$$

En la expresión anterior, el valor de V_c es el contenido de cemento en m³/m³, de modo semejante, C es el contenido de cemento y el valor de D corresponde a la densidad del cemento. Para nuestro diseño el valor del volumen de cemento es 0,098 m³/m³, al multiplicar la densidad por el volumen, se obtuvo el peso del cemento, 0,098 * 3000 = 292,70 kg/m³.

El contenido de grava (b/bo) seleccionado fue de 0,630, se tomó de la tabla 'volumen de grava por unidad de volumen de concreto', los datos de ingreso, para la determinación fueron el módulo de finura y el tamaño máximo nominal, el volumen de las partículas de concreto por metro cúbico se obtuvo al multiplicar el contenido de grava (b/bo) por el volumen de partículas de agregado grueso por metro cúbico de agregado grueso (bo'), que a su vez se obtuvo de dividir la MUC en la densidad de la grava:

$$bo' = \frac{MUC}{\text{Densidad de la grava}} \quad (32)$$

$$bo' = \frac{1479,23}{2610} = 0,567$$

El volumen de grava por metro cúbico (B), se obtuvo mediante la expresión:

$$B = b_{bo} * bo' \quad (33)$$

$$B = 0,630 * 0,567 = 0,357 \text{ (m}^3 \text{ m}^3)$$

Al multiplicar la densidad por el volumen, se obtuvo el peso de la grava, $0,357 * 2610 = 931,91 \text{ kg/m}^3$.

El contenido de arena se hace mediante la diferencia de los contenidos de aire, agua, cemento y grava para completar 1 m^3 de concreto, para nuestro diseño se obtuvo un valor de $826,58 \text{ kg/m}^3$.

La relación (C : G : A), obtenida para el diseño de la mezcla, fue de: 1 : 3,2 : 2,8.

Posteriormente se realizó el ajuste a la mezcla de prueba, tomando los pesos húmedos de los agregados, el peso unitario del concreto en estado fresco, el rendimiento de la mezcla de prueba, el contenido de agua de mezclado de la mezcla de prueba, el ajuste a la cantidad de cemento, el ajuste a la cantidad de grava y el ajuste a la cantidad de arena (29).

El proceso de diseño de la mezcla se puede ver en el anexo C, y el proceso de diseño de la mezcla con escoria, se puede ver en el anexo D.

Los resultados obtenidos de la caracterización física de la escoria mostraron que; la escoria en estudio al ser clasificada como arena, se catalogara como arena gruesa bien gradada. La densidad del material se relaciona como masa normal y la humedad y la absorción obtuvieron valores similares, por lo cual la relación entre ellos se considera en equilibrio para el diseño de la mezcla, en cuanto a corrección por humedad de los agregados finos se refiere. Por todo lo anterior se concluye que la arena puede ser reemplazada por escoria.

4. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DEL MATERIAL COMPUESTO

Finalizado el estudio de la caracterización física de la escoria, se aceptaron los residuos de los procesos metalúrgicos para reemplazar la arena del M.C. Es necesario determinar las propiedades físicas y mecánicas del material con sustitución para determinar su posible uso como elemento de construcción no estructural, por lo cual se realizaron los ensayos de: módulo de rotura, resistencia a la compresión, absorción, velocidad inicial de absorción, carga de rotura, módulo de elasticidad, densidad del material en estado endurecido y peso por unidad de área. Los resultados de los ensayos se presentan a continuación.

4.1. MÓDULO DE ROTURA

El valor máximo del ensayo a los 28 días con una sustitución del 0% fue de 41,40 Kg/cm², los ensayos presentaron una desviación estándar de 1,38 kg/cm² y porcentaje de confianza del 95%. Analizando la tendencia de acuerdo al porcentaje de reemplazo se encontró que, a mayor porcentaje de sustitución menor es la resistencia a flexión, de igual modo, el menor valor (12,39 Kg/cm²) corresponde a un porcentaje de sustitución del 20% de escoria por arena, así mismo, posee un valor en porcentaje de 11,20 de la resistencia máxima a compresión, valor que se encuentra en el rango de aceptación (78). Los resultados se exhiben en la Figura 18.

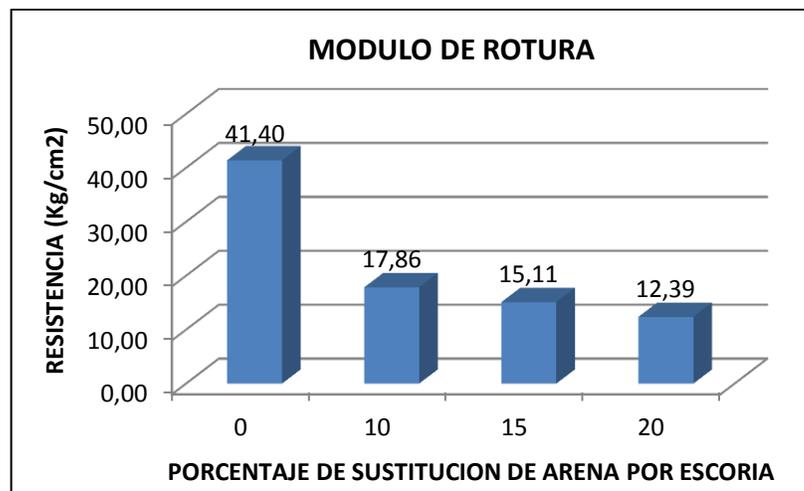


Figura 18. Valores del módulo de rotura de acuerdo al porcentaje de sustitución

Fuente: autor

4.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión se presentan en la Tabla 16 y de modo semejante se ilustran en la figura 19 con el fin de poder analizar el incremento de la resistencia a medida que transcurrió el tiempo de fraguado del MC. Los resultados presentaron un coeficiente de variación de 3.2% y un rango de aceptación de resistencia de cilindros (100 mm x 200 mm) para 12 muestras de 9,0%, según la NTC 673 (62).

La Tabla 16 muestra el desarrollo de la resistencia a la compresión del material compuesto a lo largo de 60 días de curado, se observa que, entre los 7 y los 14 días de curado el MC con sustitución del 10% y 15% presentan una disminución en su resistencia o poca tendencia a incrementarla respectivamente, este comportamiento se pudo presentar debido a que la escoria; físicamente actúa como dispersante, modifica la retención de agua y disminuye el calor de hidratación. Químicamente atenúa las reacciones deletéreas y altera el índice de actividad puzzolánica entre otros factores de reacción química interna, entre las interacciones de los materiales (79). Muy diferente al material compuesto con 0%

y 20% de reemplazo de arena por escoria, que muestran un aumento sostenido de su resistencia en el tiempo.

A los 28 días de curado, comparando todos los tipos de MC, se observa que el MC con 20% de sustitución alcanzó el valor mayor de resistencia a la compresión de 10.84 MPa. A esta edad todos los MC presentaron mayor resistencia que la del concreto con 0% de sustitución, denominado concreto de control (CC). Se pudo apreciar que ni el CC ni los MC alcanzaron la resistencia de diseño de 14 MPa, probablemente debido a las características físicas y químicas antes mencionadas.

A los 60 días de curado, los MC mantienen similar tendencia, mostrando el 20%, el máximo valor de 13.69 MPa, superior en 16.98% respecto al del CC. Este valor de resistencia a la compresión a los 60 días del MC al 20% de sustitución corresponde al 99.3% de la resistencia de diseño.

Tabla 16. Resistencia a la compresión a diferentes edades y porcentajes de sustitución

Tiempo días	% Sustitución	Esfuerzo Kg/cm ²	Esfuerzo psi
7	0	59,37	844,42
7	10	76,06	1081,77
7	15	76,34	1085,87
7	20	67,30	957,19
14	0	71,90	1022,61
14	10	74,75	1063,21
14	15	80,00	1137,85
14	20	91,96	1307,94
28	0	99,62	1416,97
28	10	102,40	1456,47
28	15	108,34	1540,99
28	20	110,58	1572,85
60	0	115,91	1648,70
60	10	125,05	1778,64
60	15	130,64	1858,20
60	20	139,63	1986,02

Fuente: autor

La carga axial longitudinal, que produce la rotura de los especímenes de concreto con las sustituciones estudiadas, se expone en la Figura 19, para 4 diferentes edades del ensayo, a saber, 7, 14, 28 y 60 días. A los 60 días, el MC al 20% presentó la mayor carga de rotura que corresponde a 107.55 kN.

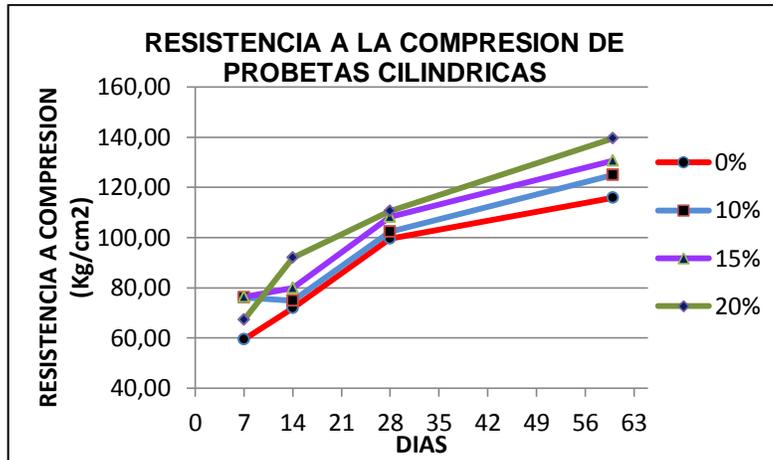


Figura 19. Resistencia a compresión a diferentes edades de curado

Fuente: autor

4.3. ABSORCIÓN

La Tabla 17 presenta el resumen de los resultados derivados del ensayo para la obtención de la absorción del MC, con variación de masa inferior al 0,2% como porcentaje de aceptación del ensayo según la NTC (63). Los datos se presentan de dos formas a saber, la primera en gr/cm^3 y la segunda en porcentaje.

Tabla 17. Absorción con diferentes porcentajes de sustitución

Sustitución	Absorción	Absorción
	(gr/cm^3)	(%)
0%	0,218	10,6
10%	0,211	10,2
15%	0,214	10,4
20%	0,212	10,3

Fuente: autor

Si bien, el porcentaje de absorción admisible es del 7%, el valor mínimo obtenido en los ensayos de laboratorio fue del 10,2% para una sustitución del 10% de arena por escoria, valor que supera los parámetros aceptables.

4.4. VELOCIDAD INICIAL DE ABSORCIÓN

Los resultados del ensayo de porosidad y permeabilidad permitió apreciar que, la relación de vacíos presentes es directamente proporcional con la relación agua cemento, es decir, si la relación agua cemento es alta, el número de poros es alto, la resistencia a la compresión ($f'c$) es menor cuando la porosidad presente en el concreto es alta (80). La probeta con agua de absorción que se introdujo por presión durante el ensayo se ilustra en la Figura 20.



Figura 20. Profundidad de penetración, ensayo de permeabilidad

Fuente: autor

Tabla 18. Relación de la permeabilidad del concreto con el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K)			
K	Coef. De permeabilidad	1,13E-11	m/s
t	tiempo en seg. (8 dias)	691200	s
H	Cabeza de presion	12	m
V	Porosidad	0,21	Porcen
D	Penetracion del agua	0,03	m

Fuente: autor

Los resultados preliminares del ensayo de absorción a temperatura ambiente y presión atmosférica se pueden apreciar en la Tabla 19, pasadas 24 horas del ensayo a presión atmosférica, la absorción de agua no presentó variaciones de absorción significativas, y la penetración del agua calculada fue de 0,97 mm.

Tabla 19. Tiempo de absorción de agua

Tiempo	Absorción (ml)
00h 00m 00s	550
00h 03m 00s	540
00h 09m 00s	530
00h 30m 00s	523
01h 00m 00s	520
03h 00m 00s	520
05h 00m 00s	520
08h 00m 00s	519
12h 00m 00s	519
24h 00m 00s	518

Fuente: autor

Se tomó un valor promedio de porosidad de las muestras con diferente sustitución igual a 20.79%, con una desviación estándar de 0,70 y un porcentaje de confianza del 90%. La penetración promedio de las probetas fue de ± 3 cm, y el coeficiente

de permeabilidad calculado experimentalmente fue de $1,13 \times 10^{-11}$ m/s, los valores producto del ensayo, se pueden ver en la Tabla 18 Por consiguiente, El coeficiente de permeabilidad del material compuesto, se clasificó como medio – alto (64), Ver anexo F – sección F.3.

4.5. CARGA DE ROTURA

La interpretación de los resultados pasados 7 días de curado, reveló que las probetas con el 15% de sustitución presentaron mayor resistencia ante la acción de fuerza axial en sentido longitudinal, alcanzando una fuerza de rotura de 58,80 kN, que aquellas con sustituciones del 0%, 10% y 20%. Pasados 14 días de curado las demás probetas conservaron un incremento progresivo a medida que aumentaba el tiempo de curado, esta variación de carga se puede ver en la Tabla 20.

Tabla 20. Carga de rotura del Material Compuesto

Carga de rotura para al MC (kN)				
Días	0%	10%	15%	20%
7	45,73	58,58	58,80	51,83
14	55,38	57,57	61,62	70,83
28	76,73	78,87	83,45	85,17
60	89,28	96,32	100,62	107,55

Fuente: autor

4.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD

La Tabla 21 muestra los valores experimentales obtenidos con una precisión del $\pm 4.25\%$, los valores no sufrieron desviación más del 5%, parámetros establecidos según la NTC 4025, y se comparan con los calculados por la expresión para E_c consignada en la NSR-10 (65). Los resultados Permiten analizar, que, los valores

obtenidos, usando la ecuación de la NSR-10 tienen un promedio del 48.03% más que el obtenido experimentalmente.

Tabla 21. Comparación del Módulo de Elasticidad Experimental con los valores al aplicar las ecuaciones propuestas por NSR-10

Tiempo días	% Sustitución	Experimental Mpa	Ec NSR-10 Mpa
28	0	6289.62	12190.03
28	10%	5462,04	12358,77
28	15%	6372,38	12712,28
28	20%	5934,06	12843,02

Fuente: autor

4.7. DENSIDAD DEL MATERIAL EN ESTADO ENDURECIDO

El ensayo para determinar la densidad de las probetas, aplicado al material compuesto permitió analizar qué; la densidad del material se incrementa con el mayor grado de sustitución de escoria por arena, los valores obtenidos se ilustran en la Figura 21, con una desviación estándar promedio de $43,98 \text{ kg/m}^3$ y un porcentaje de confianza del 96%. Se evidencio que existe una diferencia de $4,49 \text{ Kg/m}^3$ entre el 0% y el 20% de sustitución.

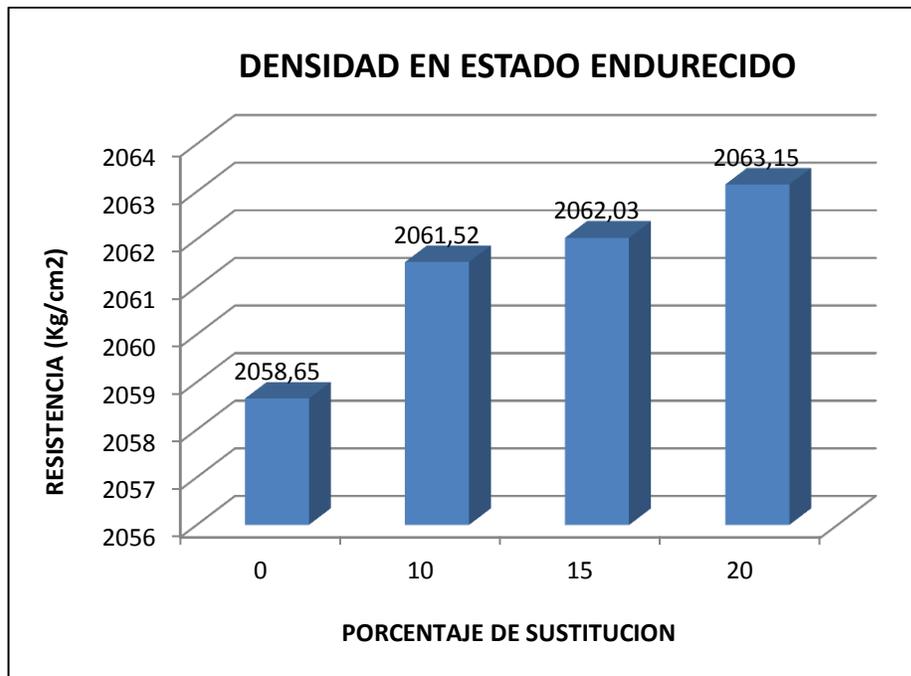


Figura 21. Densidad en estado endurecido para diferentes porcentajes de sustitución

Fuente: autor

4.8. PESO POR UNIDAD DE ÁREA

Conforme a la clasificación del concreto según su masa unitaria (81), el concreto se clasifica como un concreto normal en cualquiera de los porcentajes de sustitución de acuerdo a los datos presentados en la Tabla 22, ver anexo F – sección F.4.

Tabla 22. Resultados del ensayo para calcular la masa unitaria

Porcentaje de sustitución	Masa unitaria	Unidad
0%	2307,46	Kg/m ³
10%	2303,59	Kg/m ³
15%	2308,93	Kg/m ³
20%	2304,95	Kg/m ³

Los resultados obtenidos de la caracterización físico mecánica del M.C, expusieron que; el valor del módulo de rotura fue menor con el mayor porcentaje de sustitución de arena por escoria (20%), el cual posee un valor que se considera aceptable. El valor de resistencia de diseño a la compresión proyectado (14 MPa) no se logró a los 28 días de curado, más a los 60 días de curado se alcanzó el 99.3%, esto pudo ocasionarse por la interacción entre la escoria y el material cementante específicamente las puzolanas que contiene, otra posible causa pudo ser que, la escoria modifica la retención de agua y el proceso de fraguado se hace más lento. (79). La absorción del M.C fue en promedio de 10,2% porcentaje que excede los aceptables (7%). El coeficiente de permeabilidad se clasifico como medio alto y la porosidad fue del 21%, porcentaje muy alto para concretos expuestos a humedad, por lo cual se recomienda no expone el M.C a contacto con elementos o suelos que contengan exceso de agua. El valor del módulo de elasticidad determinado experimentalmente fue más bajo (48.03%) del que se halla con las ecuaciones de la NSR-10. El material compuesto es más denso con el mayor porcentaje de sustitución, con una diferencia de 4,49 kg entre el 0% y el 20% de reemplazo de agregado fino por escoria. El peso por unidad de área se clasifica como concreto normal (2000 – 2500 kg/m³) por tener un valor promedio de 2306,23 kg/m³.

5. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL EFECTO GENERADO POR ATAQUE QUÍMICO SOBRE EL MATERIAL COMPUESTO

Para evaluar el efecto generado por el ataque químico sobre el material compuesto, se realizaron los siguientes ensayos acelerados; ataque producido por los álcalis a los agregados, ataque producido por sulfatación y ataque producido por la carbonatación, los resultados obtenidos se describen a continuación.

5.1. REACCIÓN ÁLCALI ÁRIDO

En el ensayo realizado para determinar la reacción álcali árido con respecto a la variación de la masa, se puede especificar que, la variación de la masa fue en aumento de acuerdo a la penetración de la solución pero no se presentó variación considerable de la masa. Se pudo determinar que las probetas con el 20% de sustitución de escoria por arena obtuvo el mayor porcentaje de aumento de masa con un +0.31%, como se muestra en las Figura 22. Variación de la masa húmeda, ensayo acelerado reacción álcali árido, los resultados presentaron un promedio de variación de incremento en masa, en su punto máximo de 3908,75 gr, una desviación estándar promedio de 74,06 gr, con un porcentaje de confianza del 94%.

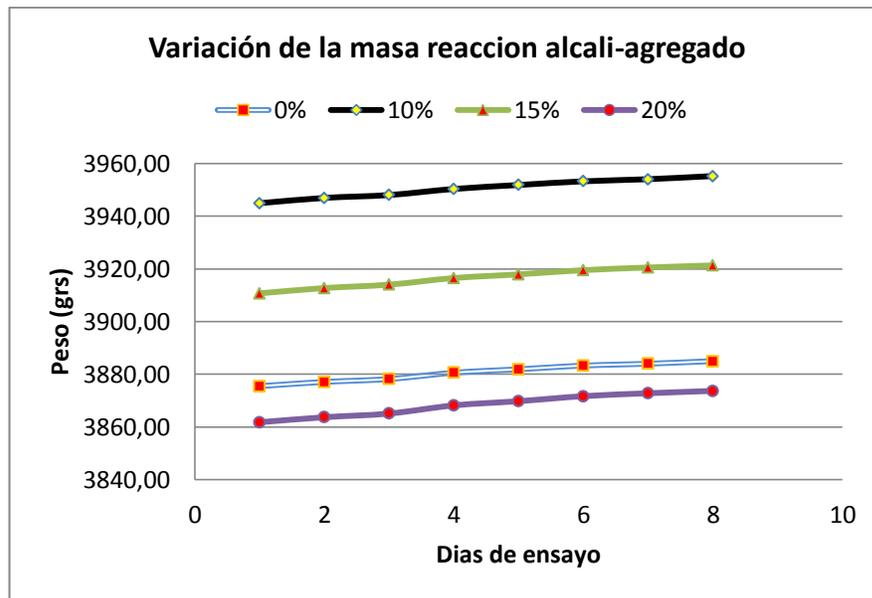


Figura 22. Variación de la masa húmeda, ensayo acelerado reacción álcali árido

Fuente: autor

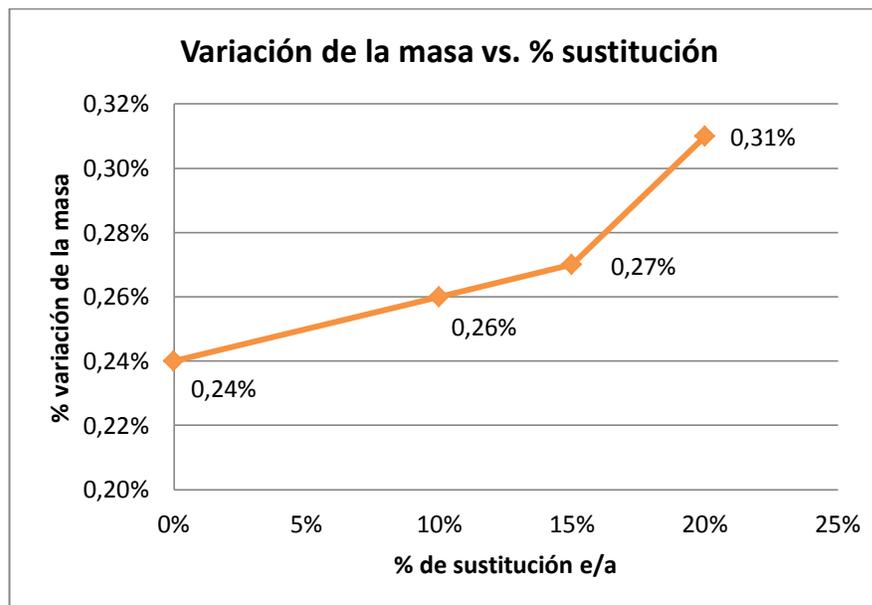


Figura 23. Porcentaje de variación de la masa referente al porcentaje de sustitución

Fuente: autor

El comportamiento del incremento de acuerdo al porcentaje de sustitución, indica que hay mayor difusión de la solución de soda cáustica en el concreto con mayor

reemplazo de escoria por arena, este fenómeno se debe a la reacción entre los álcalis del cemento y los agregados, sobre todo el agregado fino de la escoria de horno de cubilote por su alto contenido de sílice, ya que la reacción induce a una expansión de la estructura del concreto, con posibles agrietamientos internos.

Todas las probetas mostraron cambios en la textura externa, la cual se caracterizó por poseer una capa superficial, al tacto resbaladiza. Así mismo, en las probetas que tenían 20% de sustitución de escoria por arena los cambios fueron más notorios, pues en ellas se presentaron capas de soda cáustica densificada de color blanco las cuales se pueden ver en la Figura 24. Según la inspección visual, no se puede determinar si la escoria favorece o no a la disminución de los efectos de la reacción álcali agregado.



Figura 24. Eflorescencias presentes en las probetas, ensayo de reacción álcali árido

Fuente: autor

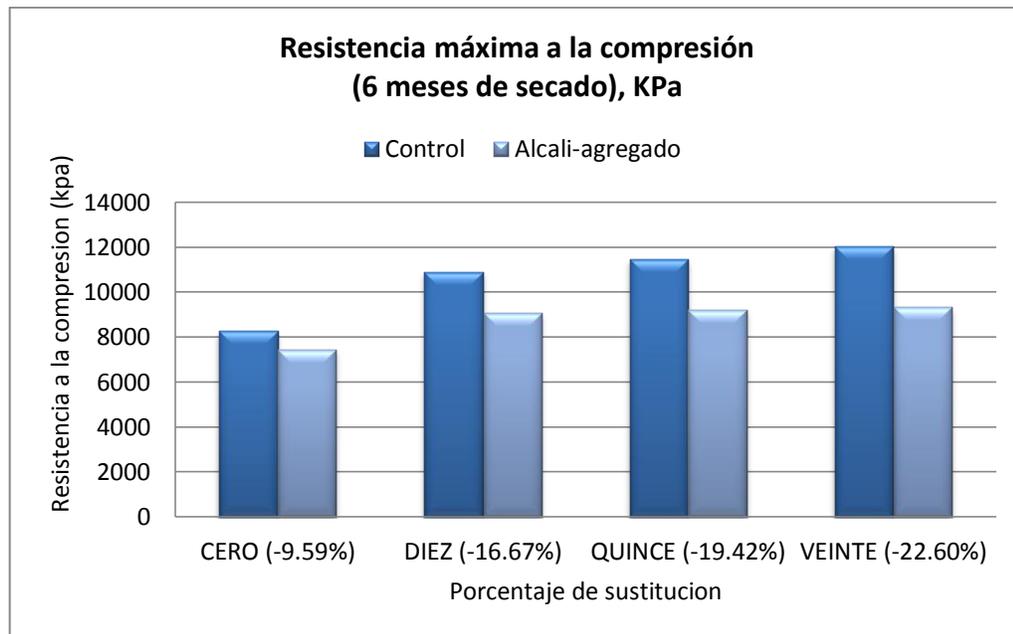


Figura 25. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión, en probetas inmersas en soda caustica

Fuente: autor

Los resultados del ensayo complementario de resistencia a la compresión proveen mayor claridad acerca del comportamiento de las probetas ante la aceleración de la reacción álcali árido. Se observa en la Figura 25 que el porcentaje de sustitución que presentó mayor disminución de la resistencia fue el 20%, se adjudica esta disminución a la reacción álcali-árido.

5.2. ATAQUE POR SULFATOS

En los ciclos terminales de humedecimiento y secado para la determinación del ataque por sulfatos se presentaron cambios repentinos en la apariencia de las probetas, pues no sólo se exteriorizó desprendimiento de material en su capa externa, sino que, también surgió una capa de sulfato solidificado alrededor de las mismas, la razón por la cual se presentó esta capa, fue el ascenso del sulfato hacia la superficie por acciones capilares y en consecuencia la cristalización de

sales por evaporación, esta acción fue la principal generadora del daño como se puede ver en la Figura 26, los resultados presentaron un promedio de variación de incremento en masa en su punto de descenso de 3885 gr, una desviación estándar promedio de 79,55 gr, con un porcentaje de confianza del 95%.

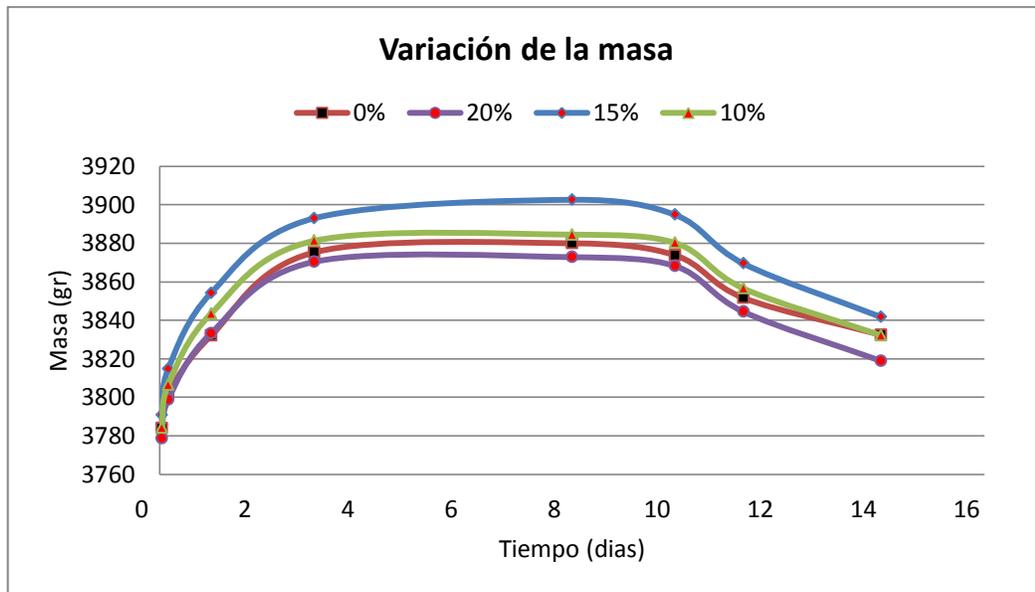


Figura 26. Variación de la masa húmeda, probetas sometidas a sulfatación

Fuente: autor

La evaluación del comportamiento del concreto al estudiar sus masas con sus diferentes sustituciones sometido al ataque por sulfatos, evidencia el deterioro descrito por la inspección visual, en el cual, las probetas del 20% de sustitución de escoria por arena, sufrieron un mayor daño que las demás, con desprendimiento de material en la capa externa, el daño de las probetas se exhibe en la Figura 27, esta pérdida de masa se puede ver en la Tabla 23. La menor pérdida se presentó en la de sustitución del 0%, lo cual indica que se vio afectada en menor medida por la cristalización de sales.

Tabla 23. Pérdida de masa (%), con sustitución de escoria por arena del 20%.

día	Masa promedio (Kg)	Pérdida de masa (%)
4	3870,40	0,03
8	3872,80	0,06
10	3868,20	-0,12
12	3844,40	-0,62
14	3818,90	-0,66

Fuente: autor

Al finalizar el ensayo de ataque acelerado por sulfatos se realizó el ensayo de resistencia a la compresión con el propósito de establecer si existe disminución de esta propiedad del concreto. El ensayo se realizó no sólo entre porcentajes de sustitución de arena por escoria, sino también con las probetas de control que no fueron sumergidas a la solución, se obtuvieron los siguientes resultados.



Figura 27. Aspecto de las probetas durante el ensayo de sulfatación acelerada

Fuente: autor

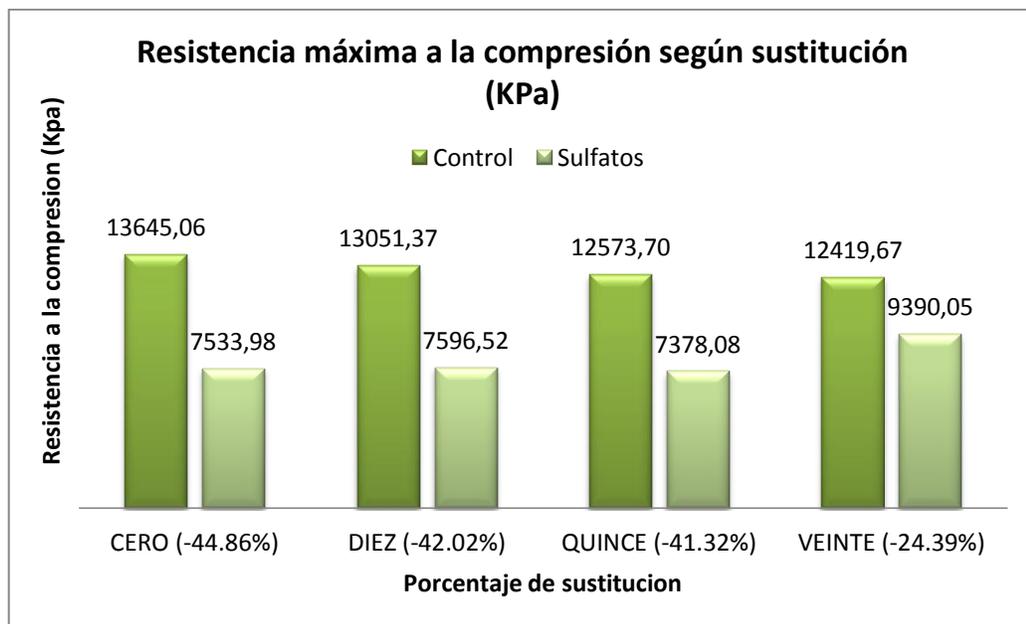


Figura 28. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión en probetas sulfatadas

Fuente: autor

La Figura 28 permite observar la disminución del valor de resistencia máxima para las probetas sumergidas (verde claro), respecto a las probetas de control que no fueron sumergidas (verde oscuro). Se observa que a mayor sustitución de escoria por arena, mayor resistencia a la compresión, este comportamiento podría atribuirse a la acción activadora de la solución sobre la escoria de horno de cubilote para que desarrolle un comportamiento aglomerante.

5.3. CARBONATACIÓN

En el ensayo de carbonatación realizado al MC con diferentes relaciones de sustitución se encontró que, las probetas con 0% de sustitución de escoria por arena, presentaron penetración completa de la carbonatación, estos resultados se pueden apreciar en la Tabla 24 y en la Figura 29, a partir de que no se presentó cambio de color ante la presencia de la fenolftaleína, es decir, el CO₂ se difundió en todo el interior de las probetas. De igual manera, sucedió en las probetas con

10% sustitución, presentó un color atenuado uniformemente distribuido, indicando que el CO₂ se difundió en toda la probeta, pero no con la misma concentración que en las probetas sin sustitución. De igual manera, las probetas con el 15 y 20% de sustitución se determinó, que el núcleo permaneció con el pH básico, alrededor de él núcleo se produjo carbonatación en proporciones distintas para ambas sustituciones.



Figura 29. Profundidades de carbonatación para el 0, 10, 15 y 20% de sustitución

Fuente: autor

Tabla 24. Resultados de medición de la profundidad de carbonatación.

% de sustitución	Profundidad de carbonatación	Observaciones
0%	Completa	Sin color
10%	Completa	Color muy atenuado
15%	De 21 a 39 mm	3 puntos de control por probeta
20%	De 19 a 32 mm	3 puntos de control por probeta

Por tanto, se determinaron el coeficiente de carbonatación y el tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto con EHC, con resistencia de 2000 psi

para los diferentes porcentajes de sustitución, estos resultados se ilustran en la Figura 30.

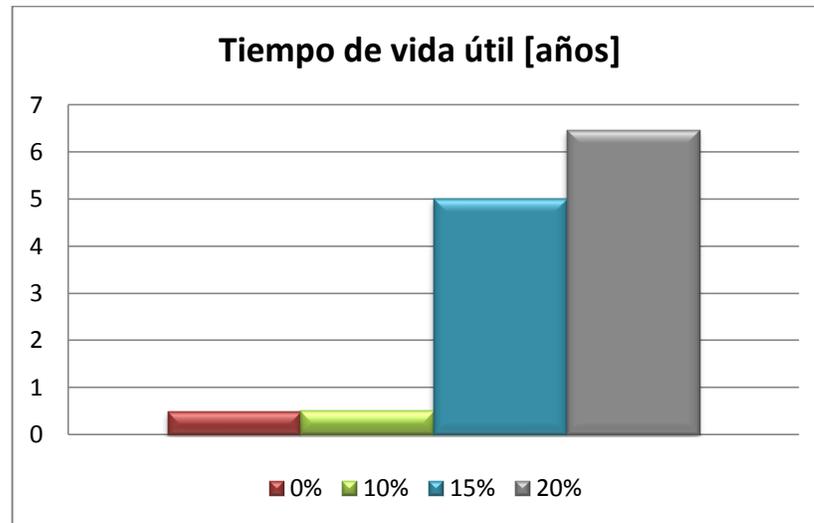


Figura 30. Tiempo de vida útil estimado para una estructura de concreto de EHC

Fuente: autor

Después, se tomó el tiempo de vida útil, el compendio de los cálculos realizados se puede ver en la Tabla 27 , como el tiempo que tarda el CO₂ del ambiente en difundirse hasta llegar al acero de refuerzo, se asumió una profundidad, para este cálculo de acuerdo a un recubrimiento del refuerzo de 40 mm.

Tabla 25. Profundidad de penetración

Muestra	Penetración (cm)			
0% - 1	Completa (Sin color fucsia)			
0% - 2	Completa (Sin color fucsia)			
10% - 1	Completa (Levemente pigmentada)			
10% - 2	Completa (Levemente pigmentada)			
15% - 1	Min	2,1	Máx	3,2
15% - 2	Min	3,3	Máx	3,9
20% - 1	Min	1,9	Máx	3,1
20% - 2	Min	2,8	Máx	3,2

$$T = \frac{2*P}{\pi*L*d} \quad (34)$$

Tabla 26. Resistencia a la tracción indirecta

Sustitución	Resistencia a la tracción indirecta (KPa)
0%	848,271
10%	835,977
15%	1026,531
20%	1131,028

$$K = \frac{x}{t} \quad (35)$$

$$T1 = T2 * \frac{Cs2}{Cs1} \quad (36)$$

Cs2 = 70% Ensayo, Cs1 = 0.03918% Servicio, se asumió un recubrimiento de 4 cm.

Tabla 27. Tiempo de vida útil

Sust	Penetración Promedio [mm]	t exposición [hr]	K (mm/hr ^{0.5})	K (mm/año ^{0.5})	T vida útil (años) Cs=70%	T vida útil (años) Cs=0.03918%
0%	100	15	25,8198	2416,61	0,000273	0,489361
10%	99	15	25,5616	2392,44	0,000279	0,499297
15%	31,25	15	8,0687	755,19	0,002805	5,011063
20%	27,5	15	7,1004	664,57	0,003622	6,470897

Observando la Tabla 25 y la Tabla 27, se puede analizar el beneficio que la escoria de horno de cubilote como agregado fino provee a la durabilidad de las

estructuras por carbonatación, pues las probetas de mayor porcentaje de sustitución tuvieron menor difusión de CO₂ en su interior.

El ensayo de tracción indirecta sobre las probetas expuestas a la carbonatación, permitió seccionarlas longitudinalmente, este procedimiento reveló los resultados que se ilustran en la Figura 31, los datos se tomaron de la Tabla 26.

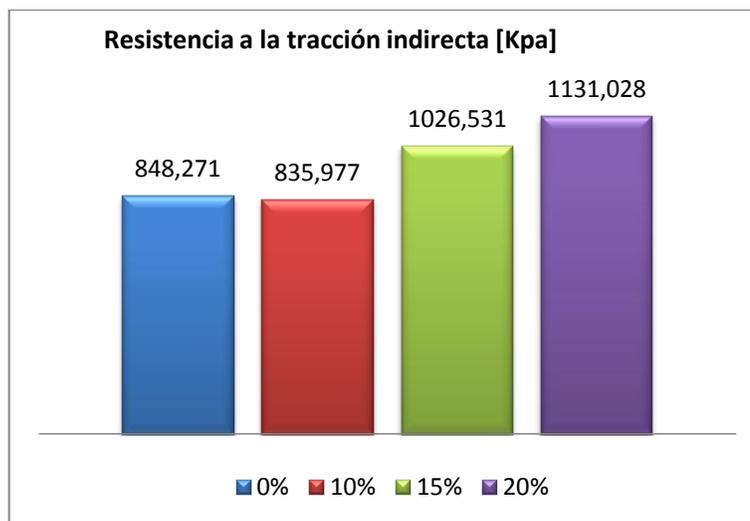


Figura 31. Resistencia máxima a la tracción indirecta de probetas carbonatadas

Fuente: autor

Aunque es un ensayo complementario, se usó para comparar el comportamiento de las probetas con diferente sustitución de escoria por arena.

El incremento de masa en el ensayo de reacción del álcali con los áridos no fue considerable, pero el concreto presentó eflorescencias de color blanco, asimismo, la probeta que presentó mayor disminución en el ensayo de resistencia a la compresión fue la que tuvo reemplazo del 20%, de lo cual se puede concluir que a mayor sustitución mayor es la probabilidad de daño. De los ensayos para estudiar el ataque por sulfatos, se puede concluir que las probetas presentaron desprendimiento de la capa externa y que la mayor sustitución de escoria por arena (20%) disminuyó este efecto, presentando el mayor valor de resistencia a la

compresión una vez se finalizó el ensayo de sulfatación. De los ensayos para estudiar la carbonatación en concretos modificados, se puede concluir que a mayor porcentaje de sustitución menor es la difusión de CO₂ en el concreto.

6. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCION, NO ESTRUCTURALES.

Una vez determinadas las propiedades físico mecánicas del material compuesto evaluadas se proponen dos elementos de construcción no estructurales como son: el panel (50 x 50 cm) y la plaqueta (Baldosa 25 x 25 cm). Los ensayos propuestos para determinar el comportamiento de los elementos son: el ensayo a flexión (plano débil), resistencia a la compresión lateral y el ensayo en el plano inclinado, con el fin de analizar las cargas de servicio a las cuales se pueda ver sometido el elemento.

6.1. ENSAYO A FLEXION (PLANO DEBIL)

El ensayo a flexión de los elementos propuestos mostró que la carga máxima soportada por las losas fue de 3,44 kN, la cual corresponde a un módulo de rotura de 5,61 MPa y un promedio de carga de 3,14 kN para los 5 ensayos que se realizaron, los resultados presentaron una desviación estándar promedio de 0,19 kN, con un porcentaje de confianza del 95%, como se puede ver en la Tabla 28. De acuerdo a la norma UNE-EN para baldosas de hormigón, el valor mínimo de módulo es 2,4 MPa, valor que es superado por los resultados mínimos obtenidos para el material compuesto (+30.83%). El uso recomendado para este elemento por la norma es 'de uso normal como enchape para interiores y exteriores'.

La carga máxima soportada por las plaquetas fue de 1,594 kN, que corresponde a un módulo de rotura de 3,06 MPa y un promedio de 1,39 kN para los 5 ensayos realizados, los resultados presentaron una desviación estándar promedio de 0,18 kN, con un porcentaje de confianza del 95%, como se evidencia en la Tabla 29. La

disposición de las losas y las plaquetas para la realización del ensayo se ilustra en la Figura 32. Aunque Los paneles de hormigón (50 x 50 cm) no poseen normatividad, Si tomamos el valor mínimo de módulo de acuerdo a la norma UNE-EN para losas, se supera el valor mínimo establecido (+26.32%).

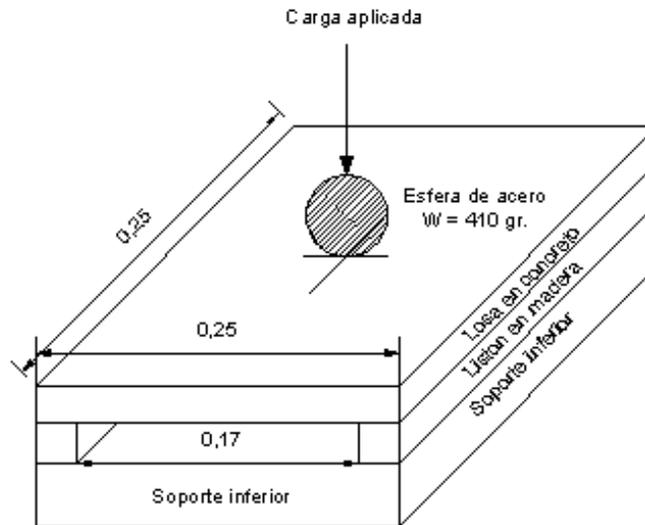


Figura 32. Ensayo en el plano débil, carga puntual central

Tabla 28. Carga máxima aplicada y módulo de rotura, ensayo en el plano débil, en losas (25 x 25 cm)

Ensayo	Carga (kN)	Módulo de rotura (MPa)
1	2,95	4,81
2	2,95	4,81
3	3,44	5,61
4	3,24	5,29
5	3,10	5,06
Promedio	3,14	5,12

Fuente: autor

Tabla 29. Carga máxima aplicada y módulo de rotura, ensayo en el plano débil, en plaquetas (50 x 50 cm)

Ensayo	Carga (kN)	Módulo de rotura (MPa)
1	1,163	2,23
2	1,563	3,00
3	1,443	2,77
4	1,594	3,06
5	1,185	2,28
Promedio	1,39	2,67

Fuente: autor

6.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El ensayo propuesto de resistencia a la compresión en planos laterales no se encuentra establecido por norma, por lo tanto este ensayo se considera aporte del autor para el estudio de losas y plaquetas. Los ensayos se realizaron de la manera como se describen en el numeral 2.5 del presente trabajo de investigación, para el ensayo de resistencia a la compresión. El esfuerzo máximo soportado por las losas fue de 12,87 MPa (Tabla 30), los resultados presentaron un promedio de resistencia a la compresión lateral de 8100 kg, una desviación estándar promedio de 70,71 kg, con un porcentaje de confianza del 95%. Los paneles soportaron 9,59 MPa (Tabla 31), con un promedio de resistencia a la compresión lateral de 5833,40 kg, una desviación estándar promedio de 230,30 kg, con un porcentaje de confianza del 90%. La disposición para la aplicación de la carga se puede apreciar en la Figura 33.

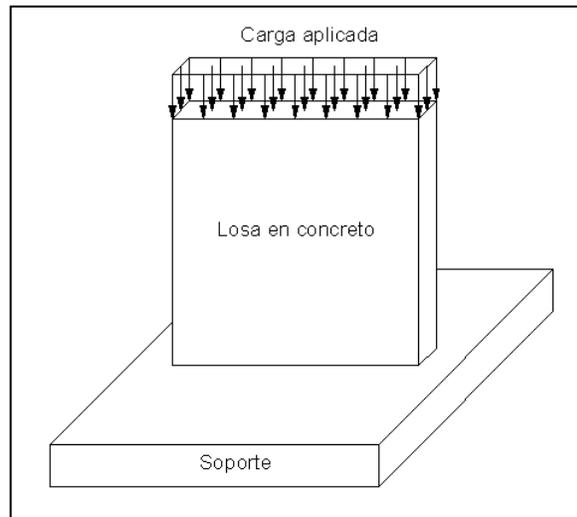


Figura 33. Ensayo resistencia a compresión

Fuente: autor

Tabla 30. Carga máxima aplicada en losas, ensayo a compresión.

Ensayo	Carga máxima (kg)	Esfuerzo (MPa)
1	8100	12,71
2	8000	12,55
3	8050	12,63
4	8150	12,79
5	8200	12,87
Promedio		12,71

Fuente: autor

Tabla 31. Carga máxima aplicada en paneles, ensayo a compresión.

Ensayo	Carga máxima (kg)	Esfuerzo (MPa)
1	5832,00	9,15
2	5600,00	8,79
3	5554,50	8,72
4	6112,50	9,59
5	6068,00	9,52
Promedio		9,15

Fuente: autor

6.3. ENSAYO EN EL PLANO INCLINADO

El ensayo propuesto de resistencia a compresión en el plano diagonal para placas y plaquetas, no se encuentra referenciado por las normas. Consecuentemente este ensayo se considera contribución del autor para el estudio de losas y plaquetas. Los ensayos se realizaron de la forma como se describen en el numeral 2.5 del presente trabajo de investigación, para el ensayo de resistencia a la compresión en el plano diagonal para placas y plaquetas. La carga máxima soportada por las losas fue de 17,45 kN, los resultados se pueden observar en la Tabla 32, los cuales presentaron un promedio de resistencia de 1740 kg, una desviación estándar promedio de 30,33 kg, con un porcentaje de confianza del 96%. La disposición del elemento para el ensayo se puede observar en la Figura 34.

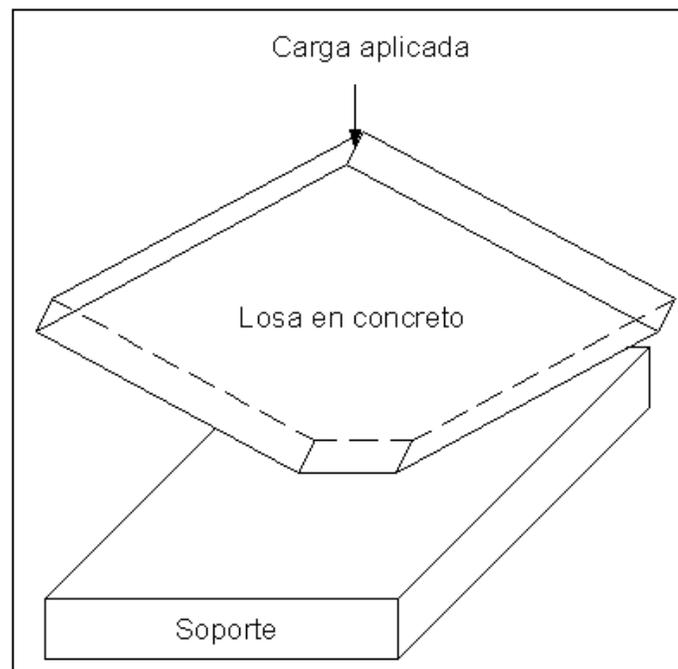


Figura 34. Ensayo diagonal

Fuente: autor

Tabla 32. Carga máxima aplicada en losas, plano fuerte.

Ensayo	Carga (kg)	Carga (kN)
1	1750	17.16
2	1700	16.67
3	1780	17.45
4	1760	17.26
5	1710	16.77
Promedio	1740	17.06

Fuente: autor

CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos específicos propuestos en esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

A. Respecto a la evaluación de las características físicas de la escoria comparándola con los agregados convencionales

Los resultados obtenidos de la clasificación granulométrica, permitieron la clasificación de la escoria como arena gruesa bien gradada con pocos finos. El valor de la densidad de la escoria se encuentra en el rango de aceptación para agregados finos y la humedad natural y la absorción de agua muestran valores bajos, los cuales no afectan el diseño de la mezcla realizado con la EHC. Al realizar la dosificación de una mezcla con solo arena y otra con solo escoria, dan diseños de mezcla similares, debido a que los dos agregados muestran igualmente similitud en la humedad natural y la absorción de agua.

B. Respecto a la evaluación de las características físicas y mecánicas del material compuesto, con sustitución del agregado fino por escoria al 0, 10, 15 y 20%.

Del ensayo de módulo de rotura al MC, se puede concluir que la resistencia disminuye al aumentar el porcentaje de sustitución, aun así, incluso el menor valor, que corresponde a la sustitución del 20% de escoria por arena, se encuentra en el rango de aceptación para este ensayo. Del ensayo de resistencia a la compresión realizado al MC se puede decir que a mayor porcentaje de sustitución de arena por escoria mayor es la resistencia a la compresión, no obstante, no se logró la resistencia de diseño de 14 MPa, a los 28 días de curado. Esto pudo ser

ocasionado, entre otros, por la actividad puzzolánica entre la escoria y el cemento o por el grado de vitrificación, quizás porque la escoria actuó físicamente como dispersante al modificar la retención de agua o al disminuir el calor de hidratación (79). Es importante añadir que un valor próximo a la resistencia de diseño se consiguió pasados 60 días de curado. Del ensayo de absorción aplicado al MC se puede concluir que estos valores son similares para los concretos con las diferentes sustituciones e incluso con el del concreto patrón. El valor obtenido de absorción de agua fue elevado, superior al considerado aceptable del 7% para concretos que vayan a estar en contacto con el suelo o en condiciones de contacto permanente con agua, Por tal razón es preferible utilizar estos concreto en ambientes no agresivos y protegidos de la intemperie. Del ensayo de velocidad inicial de absorción al MC, el coeficiente de permeabilidad K se clasifica como medio alto. Desde luego, la clasificación del coeficiente de permeabilidad obedece a valores de porosidad igualmente elevados. Del ensayo del módulo de elasticidad al MC, se encuentra que los valores hallados experimentalmente son inferiores a los calculados mediante las ecuaciones del Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente (NSR-10). Del ensayo de densidad del material en estado endurecido al MC, se puede evidenciar que a mayor porcentaje de sustitución de escoria por arena, el material es más denso. Del ensayo para determinar el peso por unidad de área realizado al MC, se encontró que el concreto se clasifica como un concreto de peso por unidad de área 'normal' en cualquiera de los porcentajes de sustitución.

C. Respecto a la evaluación del efecto generado por ataque químico sobre el material compuesto con y sin sustitución del agregado fino.

Los resultados obtenidos al estudiar la reacción álcali árido mostraron que la variación de la masa fue en aumento en el tiempo; sin embargo, dicho valor no fue considerable. Las probetas que lograron un incremento mayor de masa fueron las del 20% de sustitución de escoria por arena. Todas las probetas mostraron

cambios en la textura externa caracterizándose por presentar una capa resbalosa al tacto y eflorescencias de color blanco. El ensayo complementario de resistencia a la compresión del MC afectado evidenció que aquel con el 20% de sustitución presenta la mayor disminución en esta resistencia. Los resultados obtenidos al estudiar el ataque por sulfatos expusieron que las probetas presentaron desprendimiento repentinos de su capa externa; lo cual ocasionó dos efectos: el primero fue la disminución de la masa y el segundo la disminución de la resistencia a la compresión por rebaja del área de aplicación de carga. Los resultados obtenidos al estudiar el efecto de la carbonatación expusieron que las probetas con mayor porcentaje de sustitución de escoria por arena, como son 15% y 20%, impidieron la difusión interna del CO₂ en toda la probeta de concreto, quedando el núcleo sin carbonatar. Por otro lado al calcular el tiempo de vida útil en años, la sustitución del 20% provee mayor durabilidad de las estructuras ante el efecto de carbonatación.

D. Respecto a la evaluación del comportamiento mecánico de elementos de construcción no estructurales.

Los resultados obtenidos del ensayo a flexión de las losas permitieron analizar qué los valores hallados experimentalmente superaron los registrados en las normas para dicho ensayo (2,4 MPa), superándolos en un 38.83%. A pesar de no existir una norma para ensayo de los paneles de hormigón (50 x 50 cm) se aplicó el ensayo a flexión de acuerdo a la norma UNE-EN para losas superando, igualmente en este caso, el valor mínimo establecido en un 26.32%. Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión son considerados como aporte del autor para el estudio de losas y plaquetas por no encontrarse norma alguna que regule los ensayos y sus tolerancias respectivas, El esfuerzo máximo soportado por las losas fue de 12,87 MPa y los paneles soportaron 9,59 MPa. Los resultados obtenidos del ensayo en el plano inclinado son considerados

como aporte del autor para el estudio de losas. La carga máxima soportada por las losas fue de 17,45 MPa.

E. Conclusión General

Los elementos de construcción no estructurales propuestos sustituyendo la arena por escoria fueron los paneles y las plaquetas, los cuales presentan un buen comportamiento del módulo de rotura, a la compresión y por consiguiente una buena resistencia frente a cargas de rotura. La densidad obtenida para el M.C. es de concretos normales y ante la acción de ataques químicos presentó un buen comportamiento ante la carbonatación y el ataque por sulfatos. Ante los ensayos de flexión en el plano débil realizados a los elementos se superaron los valores para las losas que vienen establecidas por las normas.

Por lo anterior se recomienda el uso de los paneles y las plaquetas con sustitución del 20% de escoria por arena, como enchapes en interiores, no expuesto a condiciones de humedad excesiva, ni en contacto con suelos que posean altos contenidos de álcalis o sulfatos.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios con mayores porcentajes de sustitución de escoria por arena. Se propone realizar estudios con 30%, 40% y 50% de sustitución, para una mayor resistencia a la compresión con el fin de evaluar el comportamiento físico-mecánico.
- Efectuar ensayos de caracterización química más detallada a la escoria de horno de cubilote a través de métodos avanzados como la difracción de rayos x, índice de actividad puzzolánica, EDX y grado de vitrificación.
- Tomar mayores tiempos de curado, que involucren una mayor cantidad de muestras para caracterizar el material desde el punto de vista físico-mecánico de manera completa. Se recomienda comprobar resistencia a la compresión sin ataques químicos a 7, 14, 28, 60, 120, 180, 240 y 360 días.
- Proponer ensayos que consideren la totalidad de los ataques que podría sufrir una estructura en servicio, complementándose con modelos matemáticos que realmente simulen los procesos de deterioro.
- Realizar estudios posteriores sobre la posible acción activadora de la solución sobre la escoria para que desarrolle un comportamiento aglomerante, en razón al comportamiento favorable que presentó el concreto de escoria de horno de cubilote respecto a la resistencia a compresión después del ataque por sulfatos.
- Evaluar las características de un concreto que utilice escoria pulverizada como componente o sustituto del cemento.

- Estudiar usos alternativos del M.C, para otros tipos de elementos de construcción.

BIBLIOGRAFIA

- **Aguirre, Iokin Berridi.** *Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón.* Barcelona : Universidad Politecnica de Cataluña, 2008. pág. 88. 2099.1/5634.(82)
- **Alvarado, N. J.** Influencia de la morfología de pétreos volcánicos, triturados y cantos rodados; correlacionando matemáticamente los módulos de elasticidad, estático y dinámico, en cilindros de mortero de 10 x 20 cm. San Nicolas de Hidalgo : Universidad Michoaca, 2010, pág. Pag. 26. Tesis de Pregrado.(74)
- **M. Carvajal, C. Silva, A. Vanegas.** *Efectos de la Carbonatación Acelerada en Distintos Tipos de Cemento y Hormigones.* Santiago de Chile : Redalyc, 2007. págs. 88-97. Vol. 6.(43)
- *Análisis de sensibilidad para estimar el modulo de elasticidad del concreto.* **M.F. Serrano, D.D. Pérez.** Nº. 1, Bucaramanga : s.n., Julio de 2010, Revista Educación en ingeniería, Concreto y cemento: Investigación y desarrollo, , Vol. Vol. 2. Pag.17 - 30.(84)
- **Argos, Acerias paz del rio - Cementos.**
<http://www.imcportal.com/newsfiles/20080831054644.pdf>. [En línea] 27 de Agosto de 2008.
<http://www.imcportal.com>.(5)
- **ASTM, American Society for Testing and Materials -.** Manual of testing procedures physical test method tex-403-a-74a saturade dry aggregates, Standard test method Specific gravity and absortion of coarse. [aut. libro] ASTM. *ASTM-C-127-88 (R93)*. s.l. : ASTM, 1974. Section 400-a series rev..(77)
- Books.Google.com. [En línea] <http://books.google.com.co/books/historia+de+la+escoria>.(3)
- **Cantabria, Consejo de gobierno de.** Disposiciones generales. *BOC - Numero 206.* 2006, Vol. 206, 8639.(15)

- **Arquimedes, D. Ortiz.** *Metodología para evaluar la susceptibilidad del concreto expuesto a soluciones de sulfatos.* Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 202. pág. 178.(41)
- *Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material.* **J. Setien, D. Hernández, J.J. González.** 23, España : Construction and Building Materials, 2008, Vol. XXIII. 1788-1794.(4)
- *Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace.* **Luxan M.P., Sotolongo R., Dorrego F., Herrero E.** 30, Madrid : Instituto C.C.E. Torroja Madrid España, Noviembre de 1999, Cement and Concret Research, Vol. XXX, pág. 3. 517-519.(8)
- *Characterization of the tunisian blast-furnace slag and its application in the formulation of a cement.* **B. Samet, M. Chaabouni.** 34, Tunisia : Pergamon, December de 2003, Cement and Concret Research, Vol. XXXIV, pág. 3. 1153-1159.(9)
- *Chloride binding capacity of blended mortars.* **R. de Gutiérrez, R. Del Vasto, R. Talerol.** 4, Madrid : s.n., 2000, Revista de Metalurgia CENIM, Vol. 36.(33)
- **Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del.** Conceptos Básicos del Concreto: Cemento y concreto resistentes a sulfatos. [En línea] October de 2006. [Citado el: 21 de Febrero de 2012.] <http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/problemas.pdf>.(36)
- *CPC-18 - Measurement of hardened concrete carbonation depth. Recommendations, RILEM.* ", Materials and structures, (Francia) 21:1988, núm. 126, pp. 453-455., France : Material and structures, 1988, Vol. 21. 453 - 455.(46)
- **Ramón Saraguro, R. Gallegos.** *Rediseño y calibración de un instrumento de laboratorio para medir porosidad usando helio.* Guayaquil : Escuela superior politécnica del litoral (ESPOL), 2010. pág. 8.(80)
- *Designing concrete for durability.* **Boyd, A.J, Mindess, S. Y Skalny, J.** 51, 12 de May de 2001, Materials of construction, Vol. LI, pág. 8. 263 - 264.(27)

- *Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag.* **A. Bouikni a, R.N. Swamy b, A. Bali.** [ed.] University of Blid. 23, El Harrach - Algeria : Institut du Génie Rural., 29 de March de 2009, Construction and building Materials, Vol. XXIII, pág. 10. 2836 - 2845.(18)
- *Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate.* **I'sa Yu' ksela, Turhan Bilirb, O'mer O'zkanc.** 42, Turkey : Zonguldak Karaelmas University, Turke., 03 de Julio de 2006, Science direct - Building and environment, Vol. XLII, pág. 09. 2651 - 2659.(19)
- **Balseca, K. Coronel.** *Ataque de los sulfatos a los hormigones de alto desempeño.* [ed.] Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Guayaquil, Ecuador. : Escuela Superior Politécnica del Litoral., 2009. pág. 7.(37)
- *Effect Of Pore Size Distribution On Drying Shrinking Of Alkali-Activated Slag Concrete.* **Frank Collins, J. G. Sanjayan.** 9, Clayton - Australia : Department of Civil Engineering, September de 2000, Cement and Concrete Research, Vol. XXX, pág. 8. 1401-1406.(22)
- *Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración.* **E. Moreno, L. Dominguez, C. Sanabria, F. Duarte.** 2, Yucatan : s.n., mayo de 2004, Redalyc, Vol. 8, págs. 117-130.(32)
- Ensayo para determinar el contenido de humedad del agregado fino - NTC 1495. *NTC.* Bogota : s.n.(52)
- Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto – NTC 673. *NTC.* Bogota : s.n., 2010.(62)
- **Juárez, A. Rico.** *Mecánica de suelos Tomo I.* [aut. libro] Juarez y Rico. *Mecánica de suelos Tomo I.* s.l. : Limusa, 2005. Tercera edición - Cap. VII - Pag. 163..(49)
- *Evaluation of steel furnace slags as cement additives.* **M. Tufekci, A. demirbas, H. Genc.** 11, Trabzon - Turkey : s.n., 25 de August de 1997, Cement and concrete research, Vol. 27, págs. August 25 – 1997. 1713 - 1717.(20)

- *Desempeño de las pinturas vinil-acríticas contra la carbonatación del concreto.* **E. I. Moreno, R. G. Solis, C. A. Arias.** No.1, Yucatan, Mexico : Ingeniería Revista Académica, 2008, Redalyc, Vol. Vol.12, págs. 31 - 39.(68)
- Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados - NTC 92. *NTC.* Bogota : s.n., 1994.(56)
- Fundación Wikimedia, Inc. [En línea] 26 de Julio de 2012. [Citado el: 26 de julio de 2012.] http://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_reverbero.(11)
- 59. **Guzman, Diego Sanchez de.** Colección básica del concreto. *Tecnología y propiedades.* 2da. Bogota : Instituto del concreto, 2001, Cap. XI. Pag. 187.(59)
- 78. **Guzman, Diego Sanchez de.** Colección básica del concreto. *Tecnología y propiedades.* Bogotá : Instituto del concreto, 1999, Cap. VIII. Pag. 141..(78)
- 75. **Guzman, Diego Sanchez de.** Colección básica del concreto. *Tecnología y propiedades.* 2da. Bogota : Instituto del concreto, 2002. Pag. 187.(75)
- 81. **Guzman, Diego Sanchez de.** Colección básica del concreto. *Tecnología y propiedades.* Ed. 2da. Bogota : Instituto del concreto, 1998, Cap. VIII. Pag. 142..(81)
- 72. **Guzman, Diego Sanchez de.** Tecnología y propiedades - Colección básica del concreto. *Tecnología y propiedades - Colección básica del concreto.* Bogotá : Instituto del concreto, 2001, Cap. V. Pag. 80.(72)
- **Guzman, Diego Sanchez de.** Tecnología y propiedades - Colección básica del concreto. [aut. libro] Diego Sanchez de guzman. *Tecnología y propiedades - Colección básica del concreto.* Bogota : Instituto del concreto, 2000, XI, pág. 196.(2)
- *Hot stage processing of metallurgical slags .* **Dirk Durinck, Fredrik Engström, Sander Arnout, Jeroen Heulens, Peter Tom Jones, Bo Björkman, Bart Blanpain, Patrick Wollants.**

- 10, Issue : s.n., 20 de August de 2008, Conservation and recycling, Vol. LII, pág. 8. 1121 - 1131.(26)
- *Hydration And Properties of Novel Blended Cements Based on Cement Kiln Dust And Blast Furnace Slag.* **Maria S. Konsta-Gdoutos, Surendra P. Shah.** 33, Evanston : s.n., 06 de February de 2003, Cement and Concrete Research, Vol. XXXIII, pág. 08. 1269-1276.(21)
 - **ICC.UCV.**
http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf.
[En línea] [Citado el: 2011.] (1)
 - *79. Influencia de la incorporacion de escorias en las características de los cementos resultantes.* **O.R.Batic, J.D. Sota y D.D. Falcone.** La Plata, Argentina : Universidad Tecnologica Nacional, 2006. ISBN 950-42-0056-7.(79)
 - **Institute, American Concrete.** Cement and concrete institute ACI 201. *ACI Committee.* 2000, pág. 116.(28)
 - **Institute, American Concret.** Diseño de mezclas de concreto - ACI 211. [aut. libro] ACI. *ACI Committe.* 1994.(29)
 - *Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions.* **S. Solomon, G. Kasper, R. Knutti, P. friedlingstein.** 6, 10 de February de 2009, Proceedings of the Natiional Academy of sciences of the United States of America, Vol. 106, pág. 6. 1709.(31)
 - **J. Gadea, J. Soriano, A. Martin, P. L. Campos, A. Rodriguez, C. Junco.** *Reactividad arido - alcali en aridos para hormigon.* s.l. : Materiales de Construccioin, 2010. Vol. 60. 69 - 78.(35)
 - **J. Osma, V. Villamizar.** *Evaluacion del efecto de la carbonatacion sobre la velocidad del ppulso ultrasonico en concreto.* Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2011. pág. 103.(34)
 - **Lima, Luciana Amaral de.** *Hormigones con escoria de horno electrico como aridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental.* Barcelona : Universidad Politecnica de Cataluña, Escuela superior de ingeniería de caminos, canales y puertos, 1999. pág. 265.(7)

- Losetas de concreto para pavimentos - NTC 4992. *NTC*. Bogota : s.n., 2004.(63)
- **Malanca, R.** *Diseño de un ensayo acelerado para la determinación del ataque por sulfatos a estructuras de hormigón y alternativa propuesta para el diseño de un contenedor*. Cuyo : Balseiro, 2010.(67)
- 23. *Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as Aggregate*. **C. Pellegrino, V. Gaddo**. 31, Padova - Italy : s.n., 27 de May de 2009, Cement & Concrete Composites, Vol. XXXI, pág. 9. 663 - 671.(23)
- Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos - NTC 77. *NTC*. Bogota : s.n., 2007.(48)
- Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino - NTC 237. *NTC*. Bogota : s.n., 1995.(51)
- Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso - NTC 176. *NTC*. Bogota : s.n., 1996.(57)
- Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto - NTC 127. *NTC*. Bogota : s.n., 1997.(55)
- Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua - NTC 4483. *NTC*. Bogota : s.n., 1998.(64)
- *Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados*. **M. Barreto, J. de Brito, A. Santos Silva**. 2, Lisboa, Portugal : Revista ingenieria de construccion, Agosto de 2009, SciELO, Vol. 24, págs. 141 - 152. 0718 - 5073.(38)
- 39. *Accelerated ASR testing of concrete prisms incorporating recycled concrete aggregate*. **D. L. Gress, R. L. Kozikowsk**. Quebec, Canada : Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Quebec City, QC, Canada, June, pp. 113, 2000. 1139 - 1148.(39)

- *Mitigating alkali silicate reaction in recycled concrete.* **Xinghe, L.** s.l. : ProQuest, 1998, Vol. 17. 3198011.(40)
- **Moreno, E. I.** *Carbonation of Blended Cement Concretes.* Tampa - Florida : Department of Civil and Environmental Engineering, 1999.(44)
- **(NMX), Norma Mexicana.** Agregados masa específica y absorción de agua del agregado fino- Método de prueba - C 165. s.l. : NMX, 1984.(76)
- **P. Tans, R. Keeling.** Annual mean concentrations at the Mauna Loa observatory, La Jolla CA. [En línea] [Citado el: 15 de Febrero de 2012.] <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.(30)
- 58. —. Practica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados, tomadas en campo para la realización de ensayos - NTC 3674. *NTC.* Bogota : s.n., 1998.(58)
- *Properties of concrete using metallurgical industrial by products as aggregates.* **Etxeberria M, Pacheco C, Meneses J.M, I. Berridi.** 1594–1600, España : Construction and Building Materials, 2010, Vol. 24.(83)
- *Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone.* **Ahmad Monshi, Masoud Kasiri Asgarani.** 29, Najaf Abad Branch : s.n., 01 de January de 1999, Cement and concrete research, Vol. XXIX, pág. 5. 1373 - 1377.(24)
- *Properties of concrete pavements prepared with ferrochromium slag as concrete aggregate.* **J.Zelie.** 35, Croatia : Cement and Concret Research, 2005. 2340 - 2349.(16)
- **Solar, Marcelo Cabello del.** <http://es.wikipedia.org/wiki/Cubilote>. *wikipedia.org*. [En línea] [wikipedia.org](http://es.wikipedia.org/wiki/Cubilote), 2012. [Citado el: 18 de Enero de 2013.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Cubilote>.(10)
- **Técnicas, Instituto Colombiano de Normas.** Agregados usados en morteros de mampostería - NTC 2240. *NTC.* Bogota : s.n., 2003.(50)

- **Técnicas, Instituto Colombiano de Normas.** Ensayo para determinar la granulometría por tamizado - NTC 1522. *NTC.* Bogota : s.n., 1979.(47)
- **Técnicas, Instituto de normas.** Baldosas de cemento - NTC 1085. *NTC.* Bogota : s.n., 1980.(70)
- **Técnicas, Instituto Colombiano de Normas.** Método para determinar la densidad del cemento hidráulico - NTC 221. *NTC.* Bogota : s.n., 1995.(54)
- **Técnicas, Instituto Colombiano de Normas.** Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio - NTC 1377. *NTC.* Bogota : s.n., 1998.(61)
- **Técnicas, Instituto Colombiano de Normas.** Especificaciones de los agregados para concreto - NTC 174. *NTC.* Bogota : s.n., 2010. Pág. 6, Parágrafo 6.3 - ASTM C-33..(73)
- **Técnicas, Instituto Colombiano de Normas.** Método de ensayo para determinar el modulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión – NTC 4025. *NTC.* Bogota : s.n., 2005.(66)
- **Técnicas, Instituto de Normas.** Metodo de ensayo para determinar la resistencia a la tension indirecta de especimenes cilindricos de concreto - NTC 722. *NTC.* Bogota : s.n., 1999.(69)
- *The use of Ferro - silicate slag from isf zinc production as a sand replacement in concrete, Centre for Concrete Construction. M. Caroline. H. Rebeca, L. Kevin.* Ucrania : s.n., 08 de Julio de 2003, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pág. 5. 2085 - 2089.(17)
- **Tutti, K.** Transportation research board. [En línea] 1982. [Citado el: 12 de Noviembre de 2011.] Cement and concrete research institute. <http://worldcat.org/issn/03466906>. 00376006.(42)
- *Utilization of basic oxygen furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder. A. Srinivasa Reddy, R.K. Pradhan, Sanjay Chandra.* 79, India : s.n., 02 de May de 2006, International Journal of Mineral Processing, Vol. LXXIX, pág. 5.(25)

- *Valoracion de las escorias metalurgicas como recursos industriales.* **D. Lovera, V. Arias, R. Coronado.** [ed.] instituto de investigacion FIGMMC. 13, San Marcos : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2004, Vol. 7, pág. 5. 1561-0888.(12)
- **Vias, Instituto nacional de.** Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo - INV E-122. Bogota : s.n., 1995.(53)
- **Vias, Instituto Nacional de.** Resistencia a la flexion del concreto, metodo de la viga central cargada en el punto central. [aut. libro] Instituto Nacional de Vias I.N.V E-415.(60)
- **Villalaz, C.** Mecanica de suelos y cimentaciones. [aut. libro] Crespo Villalaz. *Mecanica de suelos y cimentaciones.* Mexico : Limusa, 2004, Cap. VI. Pag. 90.(71)
- **Wikipedia, Fundacion.** Wikipedia. [En línea] 24 de Junio de 2012. [Citado el: 24 de Junio de 2012.] http://es.wikipedia.org/wiki/Horno_de_arco_el%C3%A9ctrico.(13)
- **Wikipedia, Foundation.** Wikipedia. [En línea] 15 de Agosto de 2012. [Citado el: 15 de Agosto de 2012.] http://es.wikipedia.org/wiki/Alto_horno.(14)
- **Wikipedia.** wikipedia.org. [En línea] [Citado el: 15 de Agosto de 2012.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Escoria>.(6)
- **201, American Concrete Institute commitee.** *Guide to durable concrete.* Farmington : ACI, 2001. pág. 53. ACI 201.2R-08.(45)
- **2010, Norma Sismo Resistente.** Norma Sismo Resistente 2010 - Titulo C. *NSR - 10.* Bogota : NSR-2010, 2010, C-113, C-113.(65)

ANEXOS

Anexo A - Gradaciones ideales para agregados en porcentaje que pasa

Gradaciones ideales para agregados en porcentaje que pasa				
Tamiz		Tamaño Máximo (1/2") - mm		
mm	Pulgadas	Fuller - Thompson	Sánchez de G.	NTC 174 - Promedio
12,7	1/2	100	100	
9,51	3/8	87,20	87,90	100
4,76	No.4	61,20	64,30	97,50
2,38	No.8	43,30	47,10	90,00
1,19	No.16	30,60	34,50	67,50
0,600	No.30	21,60	25,20	42,50
0,300	No.50	15,30	18,50	20,00
0,150	No.100	10,80	13,50	6,00

Anexo B - Caracterización de la materia prima

B.1 AGREGADO GRUESO

AGREGADO GRUESO			
GRAVEDADES ESPECIFICAS			
A=	Peso de la muestra en condicion S.S.S, en el aire	5000	Gramos
Pa=	Peso de la canasta, sumergida en agua	1785	Gramos
Pb=	Peso de la canasta + muestra S.S.S, sumergida en agua	4900	Gramos
B=	Peso de la muestra en agua (Pb-Pa)	3115	Gramos
C=	Peso de la muestra secada en el horno	4923	Gramos
CALCULOS			
Gravedad especifica real=	$C/(C-B)$	2,72	Adim
Gravedad especifica aparente=	$C/(A-B)$	2,61	Adim
Gravedad especifica aparente S.S.S=	$A/(A-B)$	2,65	Adim
PESO UNITARIO			
CALIBRACION DEL MEDIDOR			
P1=	Peso del medidor + Vidrio	3007	Gramos
P2=	Peso del medidor + Vidrio + Agua	5843	Gramos
V=	Volumen del medidor	$(P2-P1)/1000$	2,836 dcm ³
DATOS			
Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	6722	Gramos
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6347	Gramos
Masa unitaria del agregado S.S.S. compactado	$(Pc-Pm)/V$	1477,79	Ka/m ³
Masa unitariadel agregado S.S.S. suelto	$(Ps-Pm)/V$	1345,56	Ka/m ³
% de Absorcion	$((A-C)X100)/C$	1,56	%
% de Vacios	$(D*1000-E)/(D*10)$	44,29	%

B.2 AGREGADO FINO - ARENA

AGREGADO FINO - ARENA			
GRAVEDADES ESPECIFICAS			
A=	Peso del frasco + Agua hasta la marca, en el aire	654	Gramos
B=	Peso de la muestra en condicion S.S.S, en el aire	500	Gramos
C=	Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca, en el ai	964	Gramos
D=	Peso de la muestra seca al horno	490,8	Gramos
CALCULOS			
Gravedad especifica real=	$D/(A-C+D)$	2,71	Adim
Gravedad especifica aparente=	$D/(A+B-C)$	2,58	Adim
Gravedad especifica aparente S.S.S=	$B/(A+B-C)$	2,63	Adim
PESO UNITARIO			
CALIBRACION DEL MEDIDOR			
P1=	Peso del medidor + Vidrio	3007	Gramos
P2=	Peso del medidor + Vidrio + Agua	5843	Gramos
V=	Volumen del medidor	$(P2-P1)/1000$	2,836 dcm ³
DATOS			
Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7217	Gramos
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6481,5	Gramos
Masa unitaria del agregado S.S.S. compactado	$(Pc-Pm)/V$	1652,33	Ka/m ³
Masa unitaria del agregado S.S.S. suelto	$(Ps-Pm)/V$	1392,98	Ka/m ³
% de Absorcion	$((B-D)X100)/D$	1,87	%
% de Vacios	$(E*1000-F)/(E*10)$	37,21	%

B.3 AGREGADO FINO - ESCORIA

AGREGADO FINO - ESCORIA			
GRAVEDADES ESPECIFICAS			
A=	Peso del frasco + Agua hasta la marca, en el aire	654	Gramos
B=	Peso de la muestra en condicion S.S.S, en el aire	500	Gramos
C=	Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca, en el ai	943	Gramos
D=	Peso de la muestra seca al horno	495,8	Gramos
CALCULOS			
Gravedad especifica real=	$D/(A-C+D)$	2,40	Adim
Gravedad especifica aparente=	$D/(A+B-C)$	2,35	Adim
Gravedad especifica aparente S.S.S=	$B/(A+B-C)$	2,37	Adim
PESO UNITARIO			
CALIBRACION DEL MEDIDOR			
P1=	Peso del medidor + Vidrio	3007	Gramos
P2=	Peso del medidor + Vidrio + Agua	5843	Gramos
V=	Volumen del medidor	$(P2-P1)/1000$	2,836 dcm ³
DATOS			
Pm=	Peso del medidor Vacio	2531	Gramos
Pc=	Peso del medidor + material S.S.S. compactado	7430	Gramos
Ps=	Peso del medidor + material S.S.S. suelto	6609	Gramos
Masa unitaria del agregado S.S.S. compactado	$(Pc-Pm)/V$	1727,43	Ka/m ³
Masa unitaria del agregado S.S.S. suelto	$(Ps-Pm)/V$	1437,94	Ka/m ³
% de Absorcion	$((B-D)X100)/D$	0,85	%
% de Vacios	$(E*1000-F)/(E*10)$	27,10	%

Anexo C - Diseño de mezcla, metodo ACI comité 211

DATOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS METODO ACI COMITÉ 211				
		UNID		UNID
RESISTENCIA A LOS 28 DIAS	2000,00	PSI	14	Mpa
DENSIDAD CEMENTO	3000,00	Kg/m3	3,00	g/m3

AGREGADO GRUESO	TAMAÑO MAXIMO	12,50	mm	0,492126	Pulg
	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	12,50	mm	0,492126	Pulg
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1479,23	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1347,18	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2610,00	Kg/m3		
	ABSORCION	1,56	%	0,0156	
	HUMEDAD NATURAL	0,49	%	0,0049	
	TEXTURA	Rugosa y forma redondeada			

AGREGADO FINO	MÓDULO DE FINURA (MF)	2,07			
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1650,00	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1391,02	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2580,00	Kg/m3		
	ABSORCION	1,87	%	0,0187	
	PORCENTAJE DE ARCILLA	0,00	%	0	
	ENSAYO COLORIMETRICO	2,00	-		
	HUMEDAD NATURAL	0,83	%	0,0083	

ASENTAMIENTO	4	cm	
CONTENIDO DE AIRE	2,5	%	0,025
CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO	200	Lts	0,2

REALACION (a/c)	0,6833	Adim		
CONTENIDO DE CEMENTO (C)	292,697	Kg/m3	293,00	Lts
VOLUMEN DE CEMENTO POR m3 DE CONCRETO (Vc)	0,098	m3/m3		
CONTENIDO DE GRAVA (b/bo), CONOCIENDO EL MF Y TMN.	0,630	Adim		
bo' (DATOS DEL AGREGADO GRUESO)	0,567	Adim		
VOLUMEN DE GRAVA POR m3 (B)	0,357	m3/m3		
CONTENIDO DE ARENA (Va)	0,320	m3/m3		
PESO DE LOS MATERIALES				
DESCRIPCION	DENSIDAD	PESO	VOLUMEN	RELA
CEMENTO	3000,00	292,70	0,098	1
AIRE	0,00	0,00	0,025	
AGUA	1000,00	200,00	0,200	
GRAVA	2610,00	931,91	0,357	3,2
ARENA	2580,00	826,58	0,320	2,8
		TOTAL	1,000	

PESOS HUMEDOS DE LOS AGREGADOS					
DE LA GRAVA $M_{hg} = M*(1 + Hg)$			936,48	Kg/m3	
Si la humedad es mayor que la absorción, la grava posee agua en exceso se usa $Ag = M (H \pm Abs)$					
Hg	0,0049	Abs	0,015		
r	0	o	6	19,10	
Agua en exceso a la condición S.S.S				19,10	Kg

DE LA ARENA $M_{hA} = M*(1 + Ha)$			833,44	Kg/m3	
Si la humedad es mayor que la absorción, la grava					

posee agua en exceso se usa $Aa = M (H \pm Abs)$					
HgAg	0,0083	Abs	0,018		
r	0	o	7	22,32	
Agua en exceso a la condición S.S.S				22,32	Kg

Agua total en exceso o Defecto, $At = Ag + Aa$	41,42	Kg
Cantidad de agua de mezclado	241,42	Kg/m ³

AJUSTE A LA MEZCLA DE PRUEBA		
Asentamiento cono de Abrams	3,00	cm
Diferencia de asentamientos	1,00	cm

AJUSTE DEL AGUA DE MEZCLADO			
CANTIDADES PARA LA MEZCLA DE PRUEBA			
DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	%
CAN. AGUA USADA PARA LA PRUEBA	1,24	Lts	0,00124
Agua	0,30	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
Cemento	0,36	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
Grava (Húmeda)	1,16	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
Arena (Húmeda)	1,03	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
TOTAL	2,86	Kg	

PESO UNITARIO DEL CONCRETO EN ESTADO

FRESCO		
Peso Unitario fresco (W)	2308,00	Kg/m3

Sale del recipiente usado para hacer el ensayo

RENDIMIENTO DE LA MEZCLA DE PRUEBA		
$Y = W1 / W$ (m3)	0,0012	m3

CONTENIDO NETO DE AGUA DE MEZCLADO, DE LA MEZCLA DE PRUEBA (CNAM)		
Agua	0,30	Kg
Ag * Y , (Por agua libre en la grava)	0,02	Kg
At * Y , (Por agua libre en la arena)	0,05	Kg
TOTAL	0,37	Kg

Cantidad de agua neta de mezclado (CANM) que se requiere para un metro cúbico de concreto con el mismo asentamiento de la mezcla de prueba, debe ser:		
Cantidad de agua de mezclado por m3	302,33	Kg/m3
CANM = CNAM / Y	304,33	Kg/m3
CANM Total por centímetro de defecto	304,46	Kg/m3

AJUSTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO		
CANM Total / (a/c)	445,38	Kg

AJUSTE DE LA CANTIDAD DE GRAVA		
(Cantidad de grava de la		

mezcla de prueba) / Y	937,97	Kg/m3
Cantidad en peso secó	933,39	Kg/m3
Cantidad en peso S.S.S	947,96	Kg/m3

AJUSTE DE LA CANTIDAD DE ARENA		
Se hace por diferencia de pesos, al conocerse el peso volumétrico del concreto y los pesos del cemento, agua y de la grava		
Peso volumétrico del concreto	2308,00	Kg/m3
Peso del cemento	445,38	Kg/m3
Peso del agua	304,46	Kg/m3
Peso de la grava S.S.S	947,96	Kg/m3
CANTIDAD DE ARENA	610,20	Kg/m3
CANTIDAD DE ARENA EN PESO SECÓ	605,18	Kg/m4

PESO DE LOS MATERIALES POR M3		
DESCRIPCION	PESO	UNIDAD
CEMENTO	445,38	kg/m3
AIRE	0,00	kg/m3
AGUA	304,46	kg/m3
GRAVA (SECA)	1418,05	kg/m3
ARENA (SECA)	1257,77	kg/m3

Anexo D - Diseño de mezcla usando escoria por arena, método ACI comité 211.

DATOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS METODO ACI COMITÉ 211				
		UNID		UNID
RESISTENCIA A LOS 28 DIAS	2000,00	PSI	14	Mpa
DENSIDAD CEMENTO	3000,00	Kg/m3	3,00	g/m3

AGREGADO GRUESO	TAMAÑO MAXIMO	12,50	mm	0,492126	Pulg
	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	12,50	mm	0,492126	Pulg
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1479,23	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1347,18	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2610,00	Kg/m3		
	ABSORCION	1,56	%	0,0156	
	HUMEDAD NATURAL	0,49	%	0,0049	
	TEXTURA				

AGREGADO FINO	MÓDULO DE FINURA (MF)	3,46			
	MASA UNITARIA COMPACTA (MUC)	1727,00	Kg/m3		
	MASA UNITARIA SUELTA (MUS)	1438,00	Kg/m3		
	DENSIDAD APARENTE	2350,00	Kg/m3		
	ABSORCION	0,85	%	0,0085	
	PORCENTAJE DE ARCILLA	0,00	%	0	
	ENSAYO COLORIMETRICO	2,00	-		
	HUMEDAD NATURAL	0,33	%	0,0033	

ASENTAMIENTO	4	cm		
CONTENIDO DE AIRE	2,5	%	0,025	
CANTIDAD DE AGUA DE MEZCLADO	200	Lts	0,2	
REALACION (a/c)	0,6833	Adim		
CONTENIDO DE CEMENTO (C)	292,697	Kg/m3	293,00	Lts
VOLUMEN DE CEMENTO POR m3 DE CONCRETO (Vc)	0,098	m3/m3		
CONTENIDO DE GRAVA (b/bo), CONOCIENDO EL MF Y TMN.	0,630	Adim		
bo' (DATOS DEL AGREGADO GRUESO)	0,567	Adim		
VOLUMEN DE GRAVA POR m3 (B)	0,357	m3/m3		
CONTENIDO DE ARENA (Va)	0,320	m3/m3		
PESO DE LOS MATERIALES				
DESCRIPCION	DENSIDAD	PESO	VOLUMEN	RELA
CEMENTO	3000,00	292,70	0,098	1
AIRE	0,00	0,00	0,025	
AGUA	1000,00	200,00	0,200	
GRAVA	2610,00	931,91	0,357	3,2
ARENA	2350,00	752,89	0,320	2,6
		TOTAL	1,000	

PESOS HUMEDOS DE LOS AGREGADOS				
DE LA GRAVA $M_{hg} = M \cdot (1 + Hg)$				
	936,48			Kg/m3
Si la humedad es mayor que la absorción, la grava posee agua en exceso se usa $A_g = M (H \pm Abs)$				
Hg	Abs	0,015		
r	0,00490	o	6	19,10
Agua en exceso a la condición S.S.S				19,10
				Kg

DE LA ARENA $M_hA = M \cdot (1 +$ Ha)		755,37	Kg/m ³
Si la humedad es mayor que la absorción, la grava posee agua en exceso se usa $A_a = M (H \pm Abs)$			
HgAg	Abs	0,008	
r	0,00330	o	5
		8,88	
Agua en exceso a la condición S.S.S		8,88	Kg

Agua total en exceso o Defecto, $A_t = A_g + A_a$	27,99	Kg
Cantidad de agua de mezclado	227,99	Kg/m ³

AJUSTE A LA MEZCLA DE PRUEBA		
Asentamiento cono de Abrams	0,00	cm
Diferencia de asentamientos	4,00	cm

AJUSTE DEL AGUA DE MEZCLADO			
CANTIDADES PARA LA MEZCLA DE PRUEBA			
DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	%
CAN. AGUA USADA PARA LA PRUEBA	1,24	Lts	0,00124
Agua	0,28	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
Cemento	0,36	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
Grava (Húmeda)	1,16	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
Arena (Húmeda)	0,94	Kg	Sale de la cantidad que prepare para hacer la muestra
TOTAL	2,74	Kg	

PESO UNITARIO DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO		
Peso Unitario fresco (W)	2308,00	Kg/m3

Sale del recipiente usado para hacer el ensayo

RENDIMIENTO DE LA MEZCLA DE PRUEBA		
$Y = W1 / W$ (m3)	0,0012	m3

CONTENIDO NETO DE AGUA DE MEZCLADO, DE LA MEZCLA DE PRUEBA (CNAM)		
Agua	0,28	Kg
Ag * Y , (Por agua libre en la grava)	0,02	Kg
At * Y , (Por agua libre en la arena)	0,03	Kg
TOTAL	0,34	Kg

Cantidad de agua neta de mezclado (CANM) que se requiere para un metro cúbico de concreto con el mismo asentamiento de la mezcla de prueba, debe ser:		
Cantidad de agua de mezclado por m3	284,88	Kg/m3
CANM = CNAM / Y	292,88	Kg/m3
CANM Total por centímetro de defecto	293,36	Kg/m3

sale

AJUSTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO		
CANM Total / (a/c)	428,63	Kg

AJUSTE DE LA CANTIDAD DE GRAVA		
(Cantidad de grava de la mezcla de prueba) / Y	976,75	Kg/m3
Cantidad en peso secó	971,99	Kg/m3
Cantidad en peso S.S.S	987,15	Kg/m3

AJUSTE DE LA CANTIDAD DE ARENA		
Se hace por diferencia de pesos, al conocerse el peso volumétrico del concreto y los pesos del cemento, agua y de la grava		
Peso volumétrico del concreto	2308,00	Kg/m3
Peso del cemento	428,63	Kg/m3
Peso del agua	293,36	Kg/m3
Peso de la grava S.S.S	987,15	Kg/m3
CANTIDAD DE ARENA	598,86	Kg/m3
CANTIDAD DE ARENA EN PESO SECÓ	596,89	Kg/m4

PESO DE LOS MATERIALES POR M3		
DESCRIPCION	PESO	UNIDAD
CEMENTO	428,63	kg/m3
AIRE	0,00	kg/m3
AGUA	293,36	kg/m3
GRAVA (SECA)	971,99	kg/m3
ARENA (SECA)	596,89	kg/m3

Anexo E - Cálculo de la porosidad del concreto, para determinar el coeficiente de permeabilidad por penetración de agua.

$$X = \frac{P_i - P_f * V_1 + V_3 + V_2 * -P_v - P_F}{P_f - P_v}$$

$$V_g = V_{dnu} - X$$

$$\phi = 1 - \frac{V_g}{V_T} * 100$$

Dónde: X, es el espacio vacío de la cámara, P_i, presión inicial de la carga del sistema, P_f, presión final en el sistema durante la expansión, V₁, volumen de poro de la muestra, V₃, Volumen neto del núcleo muestra, V_g, volumen de granos del núcleo de la muestra, V_{dnu}, Volumen de los discos no usados, V_T, Volumen total, φ, Porosidad efectiva de la muestra en porcentaje.

Unas segundas ecuaciones para calcular la porosidad similar a las primeras se presentan a continuación, con las 3 expansiones permitidas dentro del equipo, las 2 primeras expansiones se usan para calibrar el volumen de referencia:

- Primera expansión

$$V_{ref} * P_o = V_{ref} + V_m * P_f$$

Dónde: V_{ref}, Volumen de referencia que necesita ser calibrado (cm³), P_o, Presión inicial de carga cuando el Helio ingresa al sistema (P_{sig}), V_m, Volumen muerto existente en la cámara entre los discos de calibración dentro de la válvula de expansión (cm³), P_f, presión final del sistema (volumen de referencia + volumen muerto) durante la expansión hasta alcanzar el equilibrio (P_{sig}).

- Segunda expansión

$$V_{ref} * P_{oc} = V_{ref} + V_m + V_{cal} * P_{fc}$$

Dónde: P_{oc} , Presión inicial de la carga del sistema (P_{sig}), P_{fc} , Presión final durante la expansión hasta alcanzar el equilibrio (P_{sig}), V_{cal} , volumen del disco de calibración (cm^3).

- Tercera expansión

$$V_{ref} * P_{os} = V_{ref} + V - V_g + V_m * P_{fs}$$

Dónde: V , Volumen de todos los discos de calibración removidos cuando la probeta es ingresado, con los discos de calibración, P_{os} , Presión inicial de carga en el sistema (P_{sig}), V_m , volumen muerto en el porosímetro (cm^3), V_{ref} , volumen de referencia (cm^3), P_{fs} , presión final en el sistema durante la expansión hasta alcanzar el equilibrio (P_{sig}), V_g , volumen de granos del núcleo de muestra (cm^3).

Ecuaciones para el cálculo de la porosidad

$$V_g = V + V_{ref} * \frac{P_o}{P_f} - \frac{P_{os}}{P_{fs}}$$

$$V_p = V_b - V_g$$

$$\phi_{efec} = \frac{V_b - V_g}{V_b} * \frac{V_p}{V_b}$$

$$\rho_g = \frac{W_{mdry}}{V_g}$$

Dónde: P_{os} , es la presión inicial de la carga del sistema, P_o , presión inicial cuando el helio ingresa al sistema, P_{fs} , presión final en el sistema durante la expansión, P_f , presión final, V_p , volumen de poro de la muestra, V_b , Volumen neto del núcleo muestra, V_g , volumen de granos del núcleo de la muestra, W_{mdry} , Peso de la muestra seca, V_T , Volumen total, V_{ref} , Volumen de referencia, ϕ_{efec} , Porosidad efectiva de la muestra en porcentaje y ρ_g , densidad de los granos.



Probetas de concreto, ensayo de porosidad



Porosímetro a base de Helio - Core Pet

VOLUMENES DE ESPACIOS VACIOS (cc)	V1	40,60
	V2	7,70
	V3	5,64
VOL. DISCOS NO USADOS	cc	25,651
PESOS POR PROBETA (grs)	0%	42,96
	10%	44,10
	15%	44,02
	20%	42,95

	DIAMETRO	LONGITUD	PRES. INCI	PRES. FINAL	PRES. VACI	VT	X	Vg	ϕ (%)
0%	2,362	4,939	PSI	PSI	PSI		8,601	17,050	21,018
	2,363	4,930	82,572	60,885	-11,450	21,587			
	2,354	4,940							
PROMEDIO	2,360	4,936							
10%	2,355	4,996	PSI	PSI	PSI		8,338	17,313	20,271
	2,354	4,995	82,704	61,289	-11,449	21,715			
	2,356	4,965							
PROMEDIO	2,355	4,985							
15%	2,367	4,934	PSI	PSI	PSI		8,455	17,196	19,955
	2,346	4,917	82,706	61,154	-11,449	21,483			
	2,348	4,962							
PROMEDIO	2,354	4,938							
20%	2,362	4,939	PSI	PSI	PSI		8,685	16,966	21,912
	2,365	4,984	82,706	60,885	-11,584	21,727			
	2,361	4,944							
PROMEDIO	2,363	4,956							

Anexo F – Tablas de análisis comparativos según normas

F.1 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS SEGÚN SU DENSIDAD (INSTITUTO DEL CONCRETO)

Clasificación del agregado	Masa unitaria aproximada (Kg/m ³) Del agregado	Variedades más comunes de agregados
Liviano	480 – 1300	Pizarras expandidas, Esquistos, Escoria, Arcilla
Normal	1300 – 2000	Arena, Grava, Piedra triturada, Clinker, Escoria de fundición
Pesado	2000 – 5600	Barrita, Limonita, Magnetita, Limadura de acero, Hemátita

F.2 VALORES Y RANGOS DE DENSIDAD DE AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Material	Densidad (Kg/m ³)
Arena limpia y seca	1224 a 1840
Arena Húmeda	2300 a 2800
Grava natural	2400 a 2850
Grava seca	1660

F.3 RELACIÓN DE LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO CON EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD Y LA PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN

Determinación	Unidad	Permeabilidad		
		Baja	Media	Alta
Coeficiente de permeabilidad al agua	m/s	$< 10^{-12}$	$10^{-12} a 10^{-10}$	$> 10^{-10}$
Profundidad de penetración	mm	< 30	30 a 60	> 60

F.4 CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO SEGÚN SU MASA UNITARIA

Masa unitaria (Kg/m ³)	Descripción
500 - 2000	Concreto ligero
2000 - 2500	Concreto normal
2600 - 5000	Concreto pesado

Anexo G – Tabla resumen en porcentaje de los ensayos realizados al material compuesto

ENSAYO	CONCRETO DE CONTROL	C.M. 10% DE SUSTITUCIÓN	C.M. 15% DE SUSTITUCIÓN	C.M. 20% DE SUSTITUCIÓN
MODULO DE ROTURA	100%	43,14%	36,50%	29,93%
ABSORCIÓN (MAYOR)	100%	96,79%	98,17%	97,25%
VELOCIDAD INICIAL DE ABSORCIÓN (POROSIDAD)	95,92%	92,51%	91,07%	100%
CARGA DE ROTURA	90,09%	92,60%	97,98%	100%
MODULO DE ELASTICIDAD	98,70%	85,71%	100%	93,12%
DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO (MAYOR)	99,78%	99,92%	99,95%	100%
MASA UNITARIA	99,94%	99,77%	100%	99,83%
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MAYOR)	90,09%	92,60%	97,97%	100%
REACCIÓN ÁLCALI - ÁRIDO (AUMENTO DE MASA)	77,42%	83,87%	87,10%	100%
REACCIÓN ÁLCALI - ÁRIDO (PERDIDA COMPRESIÓN)	42,43%	73,83%	85,93%	100%
SULFATACIÓN (PERDIDA COMPRESIÓN)	80,23%	80,90%	78,57%	100%
CARBONATACIÓN (MAYOR DIFUSIÓN)	100%	100%	60,00%	51,00%