

**OBTENCIÓN DE UN MATERIAL CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR
DE LAS ESCORIAS DEL PROCESO DE COQUIZACIÓN DEL CARBÓN**

**DIEGO ANDRES FLOREZ GEREZ
JULIAN ALEXIS RUIZ CUADROS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2009**

**OBTENCIÓN DE UN MATERIAL CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR
DE LAS ESCORIAS DEL PROCESO DE COQUIZACIÓN DEL CARBÓN**

**DIEGO ANDRES FLOREZ GEREZ
JULIAN ALEXIS RUIZ CUADROS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Director
Ph.D. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2009

*Doy gracias a **Dios**, primero que todo, por haberme dado la oportunidad de culminar con este proceso de formación profesional, por que fue su mano poderosa la que en los momentos más difíciles de mi carrera me saco victorioso de todos los impases que la vida nos pone.*

*A mis padres **HUMBERTO y CELINA**, que siempre tuvieron una palabra de aliento, una mano amiga en los momentos de dificultad, que su ejemplo y los valores inculcados fueron una guía constante durante toda mi vida. A ellos dedico de corazón este título obtenido y pido a Dios salud y vida para gozar en un futuro cercano los frutos de este esfuerzo.*

*A mi compañero de grado **JULIAN ALEXIS RUIZ CUADROS**, mi mejor amigo de universidad, el cual con su paciencia y virtud supo acompañarme en momentos de felicidad y de necesidad, haciéndome sentir que más que un hermano tenía a mi lado el hermano que nunca tuve.*

*Dedico de corazón este título a mi hija **INGRID JMENA FLOREZ PRADA**, por la cual me exigí siempre al máximo, ella se ha convertido en motor de mis anhelos, y pido a Dios que de ahora en adelante me de sabiduría, salud y vida para gozar mi existencia al lado de su tierna mierda e inolvidable sonrisa.*

A mi novia Diana Marcela Sanabria pues fue un gran apoyo en la culminación de mi carrera

*A todos mis amigos, en especial a los compadritos, **Alexander Gelvez, Julián Ruiz, Diego Sarmiento (Ocaña), Sergio Gualdrón (Pechi), Fabián Oviedo, Daniel Ardila, Edwin (Polito) y Pedro Aguilera** porque se convirtieron como en los dedos de mis manos, a los cuales se les quiere, se les necesita y nunca se quisiera que faltaran, pensar en dejar su amistad es como querer perder un dedo.*

No puedo dejar a un lado a todas aquellos trabajadores de la VIS, que me brindaron su apoyo y su amistad, y, que mes a mes me colaboraban comprándome los artículos de aseo personal que yo vendía y con los cuales sostenía a mi familia y pagaba mis estudios.

*Por último, doy gracias a **Dios** nuevamente por la **FAMILIA** que me dio, los cuales se han preocupado por mí durante toda mi vida, y por los cuales siento un profundo afecto.*

DIEGO ANDRES FLOREZ JEREZ

*Agradezco en primera estancia a **DIOS** por permitirme cumplir esta meta, por ser mi guía y bendecirme a cada instante, por protegerme y darme el valor para seguir siempre adelante, sin importar los obstáculos y dificultades que puedan presentarse.*

*A mi madre **PATRICIA CUADROS GUEVARA**, por ser la mejor madre del mundo. Gracias mami porque todo lo que soy es por ti, por enseñarme que los sueños se pueden hacer realidad con esfuerzo y dedicación, y por apoyarme en cada momento de frustración, animándome a no desfallecer. Y gracias porque a pesar de la distancia siempre estabas ahí para mí.*

*A mi padre **ALVARO RUIZ RUEDA (QEPD)**, por protegerme, bendecirme y ser mi guía, y darme el valor para seguir siempre adelante.*

*A mi compañero **DIEGO ANDRES FLOREZ JEREZ**, por su amistad incondicional durante toda la carrera, y por esforzarse para terminar exitosamente esta etapa de nuestras vidas.*

*A todos mis amigos, en especial a los compadritos, **Alexander Gelvez, Diego Flórez, Diego Sarmiento (Ocaña), Sergio Gualdrón (Pechi), Fabián Oviedo, Daniel Ardila, Edwin (Polito)** y a mi primo **Andrés Bautista** porque las grandes amistades se conocen en los momentos difíciles, no olviden que pueden contar conmigo en todas las circunstancias.*

*Finalmente a toda mi familia, en especial a mis nonitas **Margarita y Adelaida (QEPD)**, a mis primas **Alba, Carolina y Laura**, a mis tías **Cenaida, Isolina, Mercedes, Mery y Zoraida**, a mi tío **Armando**, a mi padrino **Víctor Arturo**, a mis primos **Andrés, Luis, Jefferson, Javier y José Ernesto** por sus oraciones y por ayudarme cada día a salir adelante... mi felicidad es su felicidad y mis triunfos son los suyos.*

JULIAN ALEXIS RUIZ CUADROS

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo de investigación expresan sus más sinceros agradecimientos a:

La profesora Elcy María Córdoba, directora de este proyecto, por su orientación, sus aportes cognitivos y confianza para la realización y culminación de este trabajo.

A los calificadores, Luz Amparo Quintero y Jhon Freddy Palacios, por su oportuna revisión y colaboración.

A la empresa Prefabricados la Economía, en especial al Señor Francisco Ríos, por su apoyo intelectual y económico, sin los cuales había sido muy difícil el desarrollo y culminación de este trabajo de grado.

Al laboratorio de Resistencia de Materiales de la escuela de Ingeniería Civil de la UIS, en especial al Ingeniero Ricardo Cruz y a los Técnicos Jairo y Jaime, por su tiempo y colaboración.

Al grupo de investigación en Biomateriales, en especial a el Ingeniero Carlos Oviedo por su colaboración.

Al laboratorio de Difracción de Rayos X de la UIS, en especial al Químico José Luis Pinto, por su colaboración en los análisis de DRX.

A los profesores y técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica: Ambrosio, Javier, Mario, Daniel, Fermín y Orlando, por su paciencia, disposición y ayuda a lo largo de nuestra carrera universitaria.

Finalmente, a todos nuestros amigos, con quienes hemos compartido alegrías y tristezas durante toda la carrera; gracias por brindarnos SU AMISTAD... no olviden que es el regalo más perdurable y valioso que conservaremos siempre en nuestros corazones.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	20
OBJETIVOS	23
OBJETIVO GENERAL	23
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	24
1.1 PROCESO DE COQUIZACIÓN ^[2]	24
1.1.1 Reacciones de Coquización	25
1.2 EL COQUE EN COLOMBIA ^[1]	26
1.3 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COQUE ^[1]	27
1.4 EL CONCRETO	28
1.4.1 Componentes del concreto	29
1.4.1.1 Cemento.	29
1.4.1.2 Agregados	31
1.4.1.3 Agua.	32
1.4.2 Propiedades del Concreto.	32
1.4.3 Tipos de concreto	33
1.4.4 Efecto de las puzolanas en el concreto.	34
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	36
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	37
2.1.1 Análisis mineralógico por la técnica de Difracción de Rayos X (DRX)	37
2.1.2 Análisis Químico elemental por fluorescencia de rayos X (FRX).	37

2.2 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA ESCORIA	38
2.3 DISEÑO DE MEZCLAS	39
2.3.1 Granulometría de los Agregados	41
2.3.2 Composición de la Mezcla	41
2.3.3 Relación Agua/Cemento	42
2.3.4 Tiempo de Curado.	42
2.4 CONFORMADO POR PRENSADO UNIAXIAL	42
2.5 CURADO	43
2.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS CERÁMICOS	43
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	45
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	45
3.1.1 Escoria (agregado grueso).	45
3.1.2 Arena (agregado fino).	48
3.1.3 Cemento	49
3.2 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA ESCORIA	50
3.3 DISEÑO DE MEZCLAS	53
3.3.1 Granulometría de los agregados	53
3.3.2 Composición de la mezcla	57
3.3.3 Relación agua/cemento.	61
3.3.4 Tiempo de curado	62
3.4 EFECTO DEL TIPO DE CONFORMACIÓN DEL CONCRETO DE ESCORIA	65
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO DE ESCORIA DESARROLLADO	67
3.5.1 Elasticidad del concreto.	67
3.5.2 Análisis Fractomecánico	68

3.5.3	Morfología de la interface.	70
3.5.4	Características del concreto de escoria desarrollado.	72
	CONCLUSIONES	75
	RECOMENDACIONES	77
	BIBLIOGRAFIA	78
	ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1: Diagrama Producción Mundial de Carbón Coque	28
Figura 2. Reacción puzolánica	34
Figura 3. Metodología empleada para el desarrollo del proyecto.	36
Figura 4. Prensa Hidráulica para el conformado de las probetas	43
Figura 5. Maquina Universal de Ensayos	44
Figura 6. Fotografía de la escoria utilizada	45
Figura 7. Difractograma de la escoria	46
Figura 8. Rangos granulométricos agregado grueso *	47
Figura 9. Distribución granulométrica de la escoria	47
Figura 10. Distribución granulométrica de la arena	48
Figura 11. Rangos granulométricos agregado fino	49
Figura 12. Gráfica de Solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en presencia de álcalis a 40°C	51
Figura 13. Difractogramas de los residuos de los ensayos de evaluación de la puzolanidad de la escoria	52
Figura 14. Efecto de la granulometría de la Arena y la Escoria sobre las propiedades físico- mecánicas del concreto: a) Resistencia a la compresión, b) Densidad	53
Figura 15. Carta de Pareto	57
Figura 16. Diagrama del efecto de la resistencia a compresión	57

Figura 17. Efecto de la composición de la mezcla sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto: a) Resistencia a la compresión, b) Densidad	58
Figura 18. Carta de Pareto	60
Figura 19. Diagrama del efecto de la resistencia a compresión	60
Figura 20. Efecto de la relación agua/cemento en las propiedades físico-mecánicas del concreto de escoria: a) Resistencia a compresión, b) Densidad	62
Figura 21. Efecto del tiempo de curado sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto de escoria: a) Resistencia a compresión, b) Densidad, c) Porosidad, d) Absorción de agua y e) Humedad	64
Figura 22. Efecto del tipo de conformación del concreto de escoria sobre sus propiedades físico-mecánicas: a) Resistencia a la compresión, b) Densidad	66
Figura 23. Fotografías del acabado superficial según el tipo de conformado de los concretos de escoria: a) Mortero prensado y b) Mortero fluido	67
Figura 24. Gráficas Esfuerzo vs Deformación para diferentes concretos: a) Escoria, b) Convencional	68
Figura 25. Fractura típica del concreto de escoria desarrollado	69
Figura 26. Orientación de la fractura	70
Figura 27. Reconstrucciones de la interface agregado grueso-mortero en los concretos de escoria (a) y convencional (b)	71

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Reacciones de Coquización ^[3] .	25
Tabla 2. Clasificación de concretos ligeros	34
Tabla 3. Relaciones Cemento-Escoria	38
Tabla 4. Diseño de experimentos para la obtención de concretos de escoria	40
Tabla 5. Composición química de la escoria	46
Tabla 6. Composición química de la arena	48
Tabla 7. Composición mineralógica del cemento	49
Tabla 8. Composición química del cemento	50
Tabla 9. Tamaños medios de partícula de las fracciones de los agregados evaluados en las mezclas	54
Tabla 10. Condiciones más adecuadas para la elaboración del concreto de escoria	72
Tabla 11. Comparación de propiedades físico-mecánicas de un concreto de escoria y uno convencional	73

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. MÉTODO EMPLEADO EN LA TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X	81
ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA NORMA NTC 1512	82
ANEXO C. MUESTREO Y ENSAYO DE PREFABRICADOS DE CONCRETO NO REFORZADO, VIBROCOMPACTADO NORMA NTC 4024	86
ANEXO D. POROSIDAD APARENTE POR EL MÉTODO DE ARQUIMEDES NORMA ICONTEC 674	93 93
ANEXO E. PATRONES DE AGRIETAMIENTO TÍPICOS PARA CILINDROS ENSAYADOS A COMPRESIÓN	96

RESUMEN

TÍTULO: OBTENCIÓN DE UN MATERIAL CERÁMICO DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE LAS ESCORIAS DEL PROCESO DE COQUIZACIÓN DEL CARBON.*

AUTORES: FLÓREZ JÉREZ, Diego Andrés, y, RUIZ CUADROS, Julián Alexis **

PALABRAS CLAVES: Escoria de coquización, Puzolana, Carbón, Concreto.

DESCRIPCIÓN:

El coque metalúrgico es conocido ampliamente por sus aplicaciones como agente reductor y combustible en diferentes procesos de obtención de metales, pero la obtención de este material trae consigo la generación de unos residuos sólidos,(escorias), que son altamente contaminantes y que tienen poco o ningún uso industrial.

El propósito de este proyecto es el de buscar una aplicación industrial a este tipo de residuos y de generar alternativas que mitiguen el impacto ambiental que estas generan.

En un comienzo se realizó un Análisis mineralógico por la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), donde se conocieron las especies cristalinas presentes en la escoria de coquización, luego un Análisis Químico elemental por fluorescencia de rayos X (FRX), donde se determinó elementos químicos existentes, se observó la presencia de elementos como SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , en proporciones suficientes como para pensar que se estaba enfrente de un material puzolánico, basados en la definición de la norma ASTM C618 como “: *aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alúmina, capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y formar por esta reacción compuestos con propiedades cementicias*” , fue por esto que se pensó en realizar morteros de arena-escoria-cemento y agua de uso en el área de la construcción.

Se obtuvieron excelentes resultados pues se alcanzaron resistencias a la compresión del orden de los 4100 psi (28.26 MPa) para un concreto de escoria de 1750 kg/m^3 de densidad y según la norma NSR-98: *título C* esta resistencia es apta para la construcción de muros estructurales, columnas y pisos de mediano tráfico, además la densidad de este mortero está un 25% en peso por debajo de un concreto normal que soporte este tipo de resistencia a la compresión.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica.
Director: Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta

ABSTRAC

TITLE: OBTENTION OF A CERAMIC MATERIAL OF CONSTRUCTION FROM THE COKIN SLAGS PROCESS OF THE CARBON.*

AUTHORS: FLÓREZ JÉREZ, Diego Andrés, and, RUIZ CUADROS, Julián Alexis **

KEY WORDS: Coking slags, Pozzolanic, Coal, Concrete.

DESCRIPTION:

Metallurgical coke is widely known for its applications as a reducing agent and fuel in different processes of metal extraction, but obtaining this material with itself about the generation of solid residues (slags), which are highly polluting and have little or no industrial use.

The intention of this project is of looking for an industrial application to this type of residues and of generating alternatives that mitigate the environmental impact that these generate.

In a beginning it was realized a mineralogical Analysis for the technology of Diffraction of X-rays (DRX), where there were known the crystalline present species in the dross of coquización, after a Chemical elementary Analysis for fluorescence of X-rays (FRX), where I determine chemical existing elements, I observe the presence of elements as SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3 in sufficient proportions as to think that one was opposite a pozzolanic's material's based on the definition of the standard ASTM C618 as "*those natural or artificial, rich materials in silica and alumina, capable of reacting with lime in water presence and of forming for this reaction composed with properties cementicius*", it was for this that was thought of realizing mortars of sand, slag, cement and water of use in the area of the building.

They were obtained excellent results were achieved for compressive strengths of about 4100 psi (28.26 MPa) for a slag concrete density of 1750 kg/m³ and according to the standard NSR-98: *degree C* this resistance is suitable for the construction structural walls, columns and floors of medium traffic, plus the density of this mortar is 25% by weight below a normal concrete to support this kind of resistance to compression.

*Degree Work.

**Physical-Chemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Materials Science School. Director: Ph.D. Elcy María Córdoba Tuta

INTRODUCCION

El consumo mundial de coque es de alrededor de 357 millones de Toneladas/año^[1], teniendo las mayores demandas en las industrias metalúrgicas para producción de acero. Es tal la importancia de este recurso energético que casi el 70% del acero producido proviene de hierro obtenido en altos hornos, en los cuales se utiliza como combustible coque.

Esta alta demanda de coque trae consigo la generación de gran cantidad de residuos sólidos o escorias, producidas durante la destilación del carbón para la fabricación del coque.

Dado que dichas escorias tienen poco o ningún uso industrial, ellas son almacenadas indefinidamente, ocasionando de esta forma problemas de disponibilidad de espacio físico en las plantas y, lo más grave, ocasionando contaminación de los suelos por la lixiviación o disolución con el agua lluvia de algunas especies, como metales y azufre.

Tales problemas son de especial interés para nuestro país, dado que Colombia es uno de los mayores productores de coque en América. Se calcula que la producción anual es de 1,1 millones de toneladas^[1]. Teniendo en cuenta que el estimativo que de la generación de escoria corresponde al 12% de la cantidad de coque producido en el país, se están generando cerca de 132.000 toneladas al año de tal residuo, lo cual es preocupante desde un punto de vista ambiental.

Una solución a este problema es encontrarle un uso industrial a tales escorias, con lo que además las plantas de coquización aumentarían sus ganancias al valorizar tales residuos sólidos. En este sentido y teniendo en cuenta la composición

química de este tipo de escoria, constituida principalmente por óxidos como SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , ésta podría servir como materia prima para la obtención de cerámicos de construcción, dado que tales óxidos le confieren un carácter puzolánico a dichos residuos. Es decir, que al hidratarse la escoria y entrar en contacto con el óxido de calcio del cemento se favorece la formación de compuestos hidratados estables, tales como tobermorita gel, portlandita y etringita hexagonal, pudiéndose obtener mezclas de concreto con alta resistencia mecánica y posiblemente con mayor resistencia al ataque químico que el concreto convencional.

Teniendo en cuenta lo anterior, con el presente trabajo se pretende evaluar la viabilidad técnica de obtención de concretos prensados utilizando la escoria como agregado grueso en ellos.

VIABILIDAD

Para la realización de este proyecto se contó con la orientación técnica y el suministro de materias primas de la Empresa Prefabricados La Economía (Floridablanca/Santander), la cual ha venido adelantando estudios para el aprovechamiento de este tipo de residuos sólidos, y del Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales de la Universidad Industrial de Santander. Dado que uno de los pilares misionales de esta última es la extensión, es decir brindar apoyo tecno-científico a la sociedad en pro de su desarrollo.

FINALIDAD

Este proyecto tuvo como fin aportar conocimiento que permita ayudar a la obtención de materiales cerámicos de construcción a partir de las escorias generadas en el proceso de coquización del carbón.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ❖ Obtener un material cerámico de construcción a partir de escorias del proceso de coquización del carbón.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Desarrollar morteros de construcción empleando diferentes mezclas con escorias de coquización.
- ❖ Determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales obtenidos y compararlas con las de un mortero tradicional.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 PROCESO DE COQUIZACIÓN ^[2]

Cuando el carbón es calentado a alta temperatura en ausencia de oxígeno, sufre varias transformaciones físicas y químicas.

Los cambios en la estructura química determinan una evolución de gases y vapores condensables, dejando un residuo sólido constituido casi exclusivamente de carbono. Desde el punto de vista físico, el carbón se ablanda, poniéndose más o menos plástico; en este estado, los granos tienden a aglomerarse para formar una masa que se hincha, resolidifica y por último se contrae. El producto sólido final de estas dos transformaciones que ocurren a través de la carbonización se conoce como "Coque".

La designación de carbones coquizables o carbones no coquizables depende de su comportamiento cuando se calienta en ausencia de oxígeno. Si el carbón se ablanda y eventualmente se solidifica como un sólido más o menos aglomerado, entonces se clasifica como coquizable; pero si se desborona durante el calentamiento en forma de una masa débil, entonces se clasifica como no coquizable.

La producción de un buen coque depende primariamente de dos factores: la clase del carbón, la cual conduce a la formación de la estructura celular y del grado del carbón, que define la proporción de azufre y cenizas tanto en el carbón como en el coque.

Los carbones coquizables son aquellos que están clasificados como carbones de alto rango, es decir cuyo poder calorífico es mayor a 6.390 Kcal/Kg, mayor edad,

mayor contenido de carbono y, de igual modo, más bajo será su contenido de hidrógeno y materias volátiles.

Otros factores importantes son la granulometría del carbón a cargar en el horno, la densidad de carga, diseño y dimensiones de los hornos, la temperatura de coquización y la rata de calentamiento.

1.1.1 Reacciones de Coquización

Tabla 1. Reacciones de Coquización [3].

TEMPERATURA (°C)	REACCIÓN	TRANSFORMACIONES
110°C		Pérdida de agua higroscópica. Liberación de gases.
350°C y 400°C	$O \xrightarrow{K_1 E_1} M + R$	Transformaciones plásticas. (1)
500°C y 800°C	$M \xrightarrow{K_2 E_2} S + G_1$	Transformación a semicoque. (2)
800°C y 1500°C	$S \xrightarrow{K_3} C + E + G_2$	Grafitización por eliminación de H ⁺ (3)
O=bitúmenes M=Metaplastos S=Semicoque C= Coque E=Escoria G ₁ y G ₂ = Gases de combustión		

Las reacciones y transformaciones del proceso de coquización se observan en la tabla 1.

La primera transformación ocurre a los 110°C, con pérdida de agua higroscópica; a esta temperatura se inicia también la liberación de gases como oxido de carbono y metano.

Alrededor de los 350°C y 400°C los carbones empiezan a ablandarse en una medida que depende fuertemente del rango y de las condiciones de calentamiento. En correspondencia con estas temperaturas, la evolución de gases aumenta notablemente con la aparición de hidrocarburos parafínicos, olefínicos y

nafténicos, derivados de la descomposición de las cadenas laterales de las macromoléculas del carbón. En esta etapa comienza también la condensación parcial de la estructura aromática. Para los carbones comunes de coquización la fase de plasticidad se extiende durante un intervalo de temperatura de 100 a 150°C.

En el intervalo entre 500⁰C y 800⁰C ocurre la transformación en coque, producto de una drástica condensación de la estructura aromática y de una fuerte consolidación de la estructura física del semi-coque.

Con un posterior aumento de temperatura cuando prácticamente el único componente eliminable es el hidrógeno, se produce una fuerte aromatización (grafitización) del residuo del coque. Las diferencias de comportamiento entre varios tipos de coque se nivelan a temperaturas entre 1300⁰C y 1500⁰C pues las condiciones térmicas son tan drásticas que se pierden las diferencias de aromatización, debidas a la diversidad de carbones de partida.

1.2 EL COQUE EN COLOMBIA ^[1]

La producción colombiana de coque, en promedio, durante el período 1992 – 2004 ha sido de 0,5 millones de toneladas, donde se destaca el crecimiento presentado en el año 2003, año durante el cual se incrementó la producción en 51% con respecto al año anterior. En el 2004 se mantuvo su producción creciente siendo de 1,1 millones de toneladas, generada especialmente por los precios internacionales y por el aumento en la construcción de hornos de coquización para cumplir con los requerimientos del mercado.

La mayor parte de producción de coque se destina a la exportación y se estima que cerca del 30% es para consumo nacional. Este coque se produce principalmente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Norte de

Santander; regiones que cuentan con importantes reservas de carbones coquizables.

El coque para exportación es aportado principalmente por la región Cundiboyacense, cuyo aporte equivale al 80% del total exportado y para lo cual utiliza como salida el Puerto de Buenaventura y en menor grado puertos en Santa Marta. También se registran exportaciones de coque desde Norte de Santander hacia Venezuela.

1.3 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE COQUE ^[1]

La producción mundial de coque ha sido, en promedio de 357 millones de toneladas (Mt) durante el período comprendido entre 1980 – 2004, con una tendencia creciente en promedio del 4,1% desde el año 2000 hasta el 2004, alcanzando una producción estimada en el 2004 de 404 millones de toneladas que representa un crecimiento del 5,4% con respecto a lo producido en 1980.

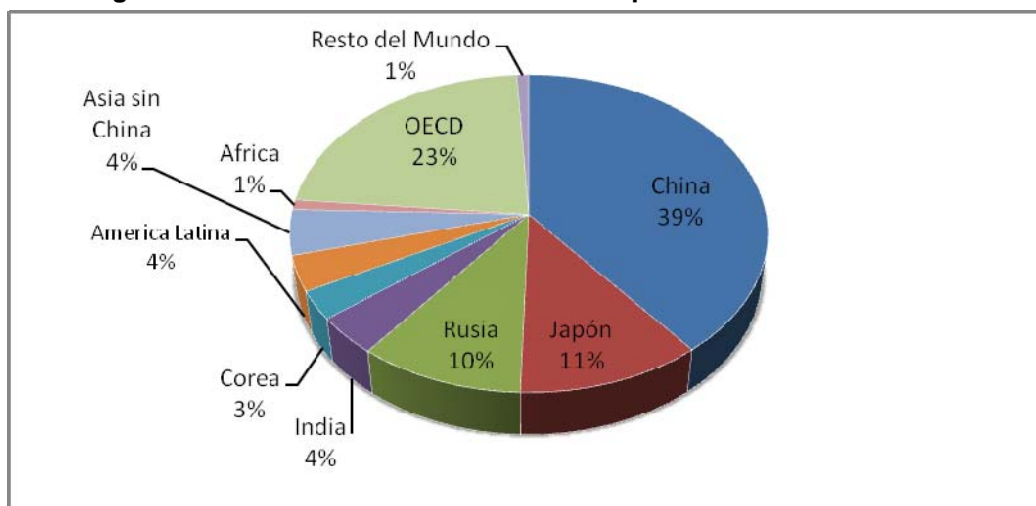
Esta producción es aportada principalmente por China, con una participación del 39,3% del total producido en el mundo, registrando aumentos considerables que equivalen a más de tres veces de lo que producía al inicio del período. Le siguen Japón y Rusia (11,2% y 10%), que continúan siendo importantes productores de coque en el mundo, por el volumen aportado; aunque registran ligeras disminuciones durante el período.

Otros países como India y Corea, presentan aumentos constantes en su producción, sin embargo, estos países aportan sólo el 3,9% y 2,9% de la producción mundial. El consolidado de la producción mundial de coque en 2004 se muestra en la figura 1.

Estados Unidos y Alemania son los países que presentan mayor disminución en volumen de producción registrada, con decrecimientos del orden del 62,8% y 77,9% para el período, reduciendo a la vez su participación mundial de manera notoria.

La producción de coque por parte de Brasil se resalta, aunque tiene una participación del 2,2% del total producido en el mundo, registra un aumento en volumen de más de 3,2 Mt, para un crecimiento del 72,1% durante el período.

Figura 1: Diagrama Producción Mundial de Carbón Coque



Fuente: U.S. International Energy Agency IEA (2004)

Mediante un análisis a los datos anteriores, la escoria del proceso de coquización se podría estimar en un 12% del total de coque producido, es decir 42.84 Mt al año. La alta generación de estos residuos sólidos impulsa la búsqueda de posibles aplicaciones, como la planteada en el presente proyecto; es decir su uso como agregado grueso en concretos para la industria de la construcción.

1.4 EL CONCRETO

El concreto se define como una mezcla homogénea de un material cementante, agregados inertes y agua, con o sin aditivos. ^[4]

Se prepara mezclando el agregado fino y grueso (arena y grava), los cuales constituyen entre el 70% y 75% por ciento del volumen, y una pasta cementante endurecida formada por cemento hidráulico y agua. Usualmente, se agregan aditivos para facilitar su trabajabilidad o mejorar su durabilidad.

1.4.1 Componentes del concreto

1.4.1.1 Cemento. ^[5]

El cemento puede definirse como un material pulverizado que se forma, por adición de una cantidad dada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire.

Se obtiene a partir de una mezcla de caliza y arcilla, debidamente dosificada y homogeneizada, la cual, posteriormente, se somete a un proceso de cocción hasta la fusión parcial (proceso de clinkerización), dando lugar al clinker, material granulado que finalmente se mezcla con yeso para obtener el cemento Portland. El clinker está formado principalmente por silicatos, aluminatos, y ferro-aluminatos de calcio, responsables primarios de las propiedades finales del cemento después de su hidratación

El cemento constituye entre el 7 y 15% del volumen total del concreto; es el componente activo de la mezcla y por tanto influye en todas sus características. El cemento Portland tipo I es el más comercializado en el país, se conoce como cemento gris y es usado principalmente en la industria de la construcción.

Hidratación del cemento ^[6]. La hidratación del cemento es función de las reacciones entre los minerales del cemento [C_3S (alita), C_2S (silicato tricálcico), C_3A (aluminato tricálcico), y C_4AF (ferritoluminato tetracálcico)] y el agua, además, de la presencia de yeso y otros aditivos. Los productos de las reacciones son principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos

de calcio hidratados. A continuación se presentan las reacciones más importantes que ocurren durante la hidratación del cemento.

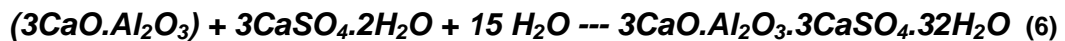
El C₃S (alita) es el silicato cálcico más inestable de los presentes en el cemento, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, así:



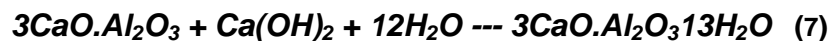
El silicato dicálcico (C₂S - Belita) al hidratarse también se convierte en tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, pero a diferencia de (4) se produce menos hidróxido de calcio:



El aluminato de calcio (C₃A - Celita) al combinarse con yeso y agua produce la etringita:



El aluminato de calcio (C₃A) con el hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado:



Las características de los minerales principales del cemento son:

Tobermorita gel (CSH) ^[7]: Es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y hormigones y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positiva.

Portlandita (hidróxido de calcio) ^[7]. Tiene efectos positivos en tanto que es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores altos (12-13), pues actúa como una “reserva alcalina”; de esta forma, protege a los hormigones armados de la corrosión electroquímica.

Etringita (trisulfoaluminato de calcio) ^[8]: Los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejado que le da al cemento mayor cohesión.

1.4.1.2 Agregados ^[9]

Son una masa de materiales casi siempre pétreos, que se consideraban originalmente inertes y que unidos por medio la pasta de cemento conforman la masa del concreto. Los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas influyen sobre el comportamiento del concreto.

Están constituidos por la parte fina (arena) y la parte gruesa (grava), para el presente proyecto se ha reemplazado el agregado grueso por la escoria del proceso de coquización.

Agregado fino. El agregado fino deberá cumplir con los siguientes requerimientos: consistir de arena natural o manufacturada, o una combinación de ambas. Sus partículas deben estar limpias y de perfil preferentemente angular, duro, compactas y resistentes. Debe estar libre de cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica, sales, u otras sustancias dañinas, el tamaño de partícula debe estar dentro de los límites indicados en la norma NTC 174 (Ver figura 10).

Agregado grueso. El agregado grueso generalmente es grava o roca triturada, escoria de alto horno, concreto triturado o una combinación de ellos.

1.4.1.3 Agua. Es el agua por medio del cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes ya que en presencia de ella experimenta reacciones químicas dándole las características de fraguar y endurecer.

El agua se usa en la elaboración del concreto para propósitos diferentes: como agua de mezclado, como agua de curado y como agua de lavado de los agregados. El agua de mezclado forma aproximadamente el 15% del volumen total del concreto de donde, un 5% sirve para hidratar el cemento y el 10% restante lubrica al concreto y luego se evapora durante el proceso de fraguado.

1.4.2 Propiedades del Concreto. Las propiedades que hacen del concreto el material más usado en los procesos de construcción civil son: resistencia a la compresión, la estabilidad dimensional y la durabilidad. Estas propiedades están directamente relacionadas con el proceso de hidratación de la pasta de cemento, la que a su vez depende de las propiedades de los agregados (tipo, tamaño, composición química, porosidad, densidad, etc.).

La resistencia a la compresión es la propiedad que más influye en el diseño y calidad de las estructuras de concreto. Existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad (fracción de espacios vacíos) y la resistencia a la compresión. La porosidad se puede presentar por dos razones, primero, el espacio en la interface de los agregados, y segundo, la porosidad propia de los componentes del concreto, siendo el espacio vacío de la interface el que más influye en la disminución de la resistencia a la compresión pues es una zona concentradora de esfuerzos.

Los productos de hidratación incrementan la compactación de los agregados, haciendo que la resistencia a la compresión aumente a medida que transcurre el tiempo de curado.

El estudio de la interacción de los componentes del concreto con respecto al aumento de la resistencia a la compresión, ha permitido que se manipule esta propiedad, dando lugar a la realización de dosificaciones controladas.

1.4.3 Tipos de concreto. A medida que pasaron los años el concreto fue perfeccionándose y clasificándose según sus aplicaciones ^[10]:

Concreto aireado o celular: Se obtiene agregándole a la mezcla una gran cantidad de aire, obteniendo así un hormigón de baja densidad, lo cual le otorga características de aislante térmico.

Concreto de tipo permeable: El cual emplea áridos de gran tamaño que permite, una vez colocado, que queden huecos entre las piedras y la pasta.

Concreto de alta densidad: Conocido también como concreto pesado, este tipo de concreto posee una densidad superior a la habitualmente conocida, es capaz de alcanzar densidades iguales o mayores a 6000 kg/m^3 y más. Su fabricación es a base de áridos de densidades superiores a los comunes, por lo general esta clase de concreto se emplea para blindar estructuras y proteger instalaciones frente a la radiación.

Concreto ligero ^[4]

Se denomina concreto ligero a todo aquel que tiene un peso volumétrico fresco menor de 1900 kg/m^3 . Estos valores son obtenidos por la formación de poros dentro del concreto, estos poros se pueden presentar en los agregados o en el mismo medio aglomerante. Por lo general estos concretos ofrecen un mejor aislamiento térmico que los concretos de pesos normales o pesados. Las

principales ventajas con el empleo de concretos ligeros inician desde el encofrado o armazón, debido a que reducen las presiones a las cuales son sometidos con un concreto de peso normal, así como en la disminución de las dimensiones y por lo tanto el costo de la cimentación.

Por su peso volumétrico y resistencia a compresión, los concretos ligeros se pueden clasificar en tres grupos (tabla 2).

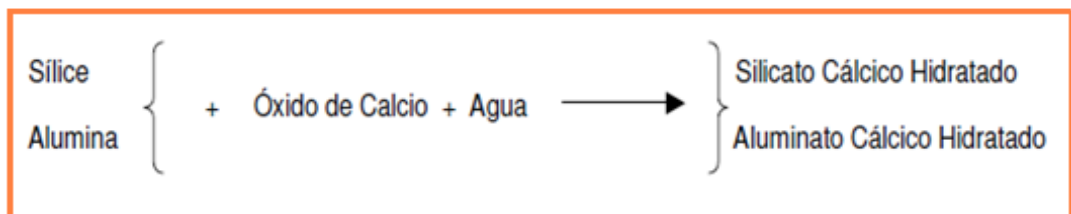
Tabla 2. Clasificación de concretos ligeros

CONCRETO LIGERO	Peso Volumétrico seco (Kg/m ³)	Resistencia a Compresión (Kg/m ²)
Estructural	1400-1800	≥ 175
Resistencia Moderada	800-1400	70 - 175
Aislante	300-800	< 70

1.4.4 Efecto de las puzolanas en el concreto. Las puzolanas son materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y alúmina, capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y formar por esta reacción compuestos con propiedades cementicias^[11].

La reacción entre una puzolana y el hidróxido de calcio es llamada *reacción puzolánica* (tal como se esquematiza en la figura 2).

Figura 2. Reacción puzolánica



Entre las ventajas técnicas de adicionar puzolanas en la mezcla del concreto se destacan las siguientes: La reacción es consumidora de CaO en lugar de ser productora, lo cual tiene un efecto importante sobre la durabilidad de la pasta hidratada en medios ácidos. Además, los productos de reacción son muy eficientes en el llenado de los espacios capilares, por lo que se mejora la resistencia e impermeabilidad del concreto.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A continuación se describen las actividades experimentales desarrolladas para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, la secuencia de actividades se presentan en la figura 3.

Figura 3. Metodología empleada para el desarrollo del proyecto.



2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

Las materias primas empleadas para la obtención del concreto prensado fueron: escoria, proveniente de las plantas de coquización del municipio de Los Patios (Norte de Santander), la cual se empleo como agregado grueso; la arena se usó como agregado fino y cemento Portland tipo 1 como agente aglomerante.

Inicialmente los agregados fino y grueso fueron sometidos a trituración manual y mecánica (molino de bolas), respectivamente, y cuarteos sucesivos, con el fin de obtener muestras representativas de cada una de ellos para su análisis.

2.1.1 Análisis mineralógico por la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). De acuerdo con lo establecido en la metodología del plan de proyecto, la muestra de escoria, fue analizada mediante un análisis mineralógico por la técnica de Difracción de Rayos X (DRX), donde se determinaron las especies cristalinas presentes en tal material.

Este análisis se realizó en el Laboratorio de Rayos X; adscrito a la escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander (El procedimiento empleado en la técnica de DRX se reporta en el anexo A).

2.1.2 Análisis Químico elemental por fluorescencia de rayos X (FRX). Se realizó con el fin de determinar los elementos químicos y sus porcentajes existentes en las materias primas.

Los análisis fueron realizados en el Centro de desarrollo Productivo de Joyería (C.D.P) en Bucaramanga, empleándose un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X Shimadzu EDX 800 HS de energía dispersa.

2.2 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA ESCORIA

Se realizó una adaptación del método de Frattini para la determinación de la actividad puzolánica de la escoria; tomando como base el ensayo químico para determinar la actividad puzolánica en cementos puzolánicos, de la norma NTC 1512^[12].

El procedimiento consistió en poner en contacto 20g de diferentes mezclas de cemento-escoria con 100mL de agua des-ionizada, las cuales se mantuvieron a 40°C durante 8 días. Entonces las concentraciones de Ca^{2+} y OH^- remanentes en la solución fueron determinadas por métodos volumétricos (titulación complejo métrica con EDTA y ácido-base, respectivamente).

En la tabla 3 se presentan las relaciones cemento-escoria tenidas en cuenta para este estudio.

Tabla 3. Relaciones Cemento-Escoria

% Cemento	% Escoria *
100	0
90	10
80	20
70	30

* Granulometría de la escoria: 100% -100 μm

Cada ensayo se realizó por triplicado y el valor promedio de los resultados de éstos fueron proyectados sobre la curva de solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Teniendo en cuenta que los materiales puzolánicos reaccionan con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ producido durante la hidratación del cemento, disminuyendo de esta forma la concentración de calcio en solución, al ubicar los resultados de los ensayos sobre la curva se puede demostrar el carácter puzolánico o no de la escoria. En este sentido cualquier punto ubicado por encima y sobre la curva indican soluciones

sobre saturadas y saturadas, respectivamente; mientras que los puntos bajo la curva corresponden a soluciones sub-saturadas.

Los detalles del procedimiento empleado para la determinación de la actividad puzolánica se reporta en el anexo B.

2.3 DISEÑO DE MEZCLAS

Los cerámicos (concretos prensados) fueron elaborados usando la escoria del proceso de coquización como agregado grueso, la arena como agregado fino, el cemento como agente aglomerante y el agua como agente activo. Se realizó un diseño de experimentos buscando determinar el efecto de las variables que más influyen en la resistencia mecánica de este tipo de concreto. Estas variables y sus niveles evaluados se muestran en detalle en la tabla 4.

Tabla 4. Diseño de experimentos para la obtención de concretos de escoria

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Estudio	N° Ensayo	Variables						Variable respuesta
		Granulometría escoria	Granulometría arena	Relación en peso escoria/arena	Relación en peso cemento/(escoria-arena)	Relación en peso agua/cemento	Tiempo de curado (días)	
I. Granulometría de los agregados	1	100%-15mm	100%-10mm	5/1	1/2	1/2	7	Resistencia a la compresión
	2	100%-10mm	100%-10mm	5/1	1/2	1/2	7	
	3	100%-5 mm	100%-10mm	5/1	1/2	1/2	7	
	4	100%-15mm	100%-5mm	5/1	1/2	1/2	7	
	5	100%-10mm	100%-5mm	5/1	1/2	1/2	7	
	6	100%-5 mm	100%-5mm	5/1	1/2	1/2	7	
	7	100%-15mm	100%-2mm	5/1	1/2	1/2	7	
	8	100%-10mm	100%-2mm	5/1	1/2	1/2	7	
	9	100%-5 mm	100%-2mm	5/1	1/2	1/2	7	
II. Composición de la mezcla	10	Mejores condiciones del estudio I		4/2	2/3	1/2	7	Resistencia a la compresión
	11	Mejores condiciones del estudio I		5/1	2/3	1/2	7	
	12	Mejores condiciones del estudio I		6/0	2/3	1/2	7	
	13	Mejores condiciones del estudio I		4/2	1/2	1/2	7	
	14	Mejores condiciones del estudio I		5/1	1/2	1/2	7	
	15	Mejores condiciones del estudio I		6/0	1/2	1/2	7	
	16	Mejores condiciones del estudio I		4/2	1/3	1/2	7	
	17	Mejores condiciones del estudio I		5/1	1/3	1/2	7	
	18	Mejores condiciones del estudio I		6/0	1/3	1/2	7	
III. Relación agua/cemento	19	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		1/3	7	Resistencia a la compresión
	20	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		1/2	7	
	21	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		2/3	7	
	22	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		7/10	7	
IV. Tiempo de curado	23	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		Mejores condiciones del estudio III		1
	24	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		Mejores condiciones del estudio III		4
	25	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		Mejores condiciones del estudio III		7
	26	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		Mejores condiciones del estudio III		14
	27	Mejores condiciones del estudio I		Mejores condiciones del estudio II		Mejores condiciones del estudio III		28

Tal como lo muestra la tabla 4, se llevaron a cabo cuatro estudios: granulometría de los agregados, composición de la mezcla, relación agua/cemento y tiempo de curado. En todos los casos la variable respuesta fue la resistencia a la compresión de los cerámicos.

A continuación se describe cada uno de los estudios.

2.3.1 Granulometría de los Agregados. Dado que la escoria original venía en un amplio rango de tamaños, desde polvo hasta trozos de 20 cm aproximadamente, se hizo necesario triturar y clasificar el material; cumpliendo con los rangos de distribución granulométricos para el agregado grueso del concreto, según la NORMA NTC 174^[9]. De igual forma se clasificó la arena o agregado fino cumpliendo con dicha norma.

Los rangos granulométricos evaluados para cada uno de los agregados fueron:

- Granulometría Escoria: 100%-15mm, 100%-10mm, 100%- 5mm.
- Granulometría Arena: 100%-10mm, 100%- 5mm, 100%- 2mm

La Granulometría de los Agregados hace parte del primer estudio del Diseño de Experimentos, para el cual las demás variables se dejaron en un nivel fijo, (ver tabla 4).

2.3.2 Composición de la Mezcla. Para este segundo estudio se utilizaron las mejores granulometrías de los agregados, encontradas del primer estudio. Con tales niveles fijos se evaluó la influencia de las variables relaciones en peso escoria-arena y cemento/(escoria-arena) sobre la resistencia mecánica de los cerámicos.

Los niveles de estas relaciones tenidos en cuenta fueron:

- ❖ Relación en peso escoria/arena: 4/2, 5/1, 6/0.
- ❖ Relación en peso cemento/ (escoria-arena): 1/3, 1/2 y 2/3.

Las relaciones en Peso Agua/Cemento y tiempo de curado se dejaron en un nivel fijo, (ver tabla 4).

2.3.3 Relación Agua/Cemento. Para el estudio 3, correspondiente a la Relación Agua/Cemento se trabajó con las mejores condiciones de granulometría de los agregados y composición de la mezcla, encontradas de los estudios 1 y 2.

Los niveles de la Relación en peso Agua/Cemento fueron:

- ✓ 1/3, 1/2, 2/3 y 7/10.

La variable “tiempo de curado” se fijó en 7 días.

2.3.4 Tiempo de Curado. Para el último estudio, sobre el efecto del tiempo de curado, se evaluaron los siguientes niveles:

- ✓ 1, 4, 7, 14 y 28 días

Los niveles de las otras variables fueron los mejores de los estudios anteriores.

2.4 CONFORMADO POR PRENSADO UNIAXIAL

El conformado de las probetas se hizo por prensado uniaxial, a 70 Psi, en una matriz metálica con forma cilíndrica ($\varnothing= 3$ pulgadas, $L=6$ pulgadas), de tal manera que cumplieran con los requisitos dimensionales para la determinación de la resistencia a la compresión (norma NTC 4024) ^[13].

El conformado de las probetas se realizó en la prensa hidráulica mostrada en la figura 4.

Para cada ensayo se fabricaron tres probetas, de las cuales se determinó un valor promedio de las propiedades físicas y mecánicas de las mismas.

Figura 4. Prensa Hidráulica para el conformado de las probetas



2.5 CURADO

El curado de las probetas se llevó a cabo al aire libre, durante un tiempo variable entre 1 y 28 días.

2.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS CERÁMICOS

Los cerámicos obtenidos con las diferentes mezclas de materias primas se caracterizaron físicamente (densidad, porosidad, humedad y absorción de agua) y mecánicamente (resistencia a la compresión), siguiendo los lineamientos de las Normas NTC 4024^[13] (anexo C) y NTC 674 (anexo D), respectivamente.

Los ensayos de resistencia a la compresión fueron realizados en una maquina universal de ensayos (figura 5), ubicada el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 5. Maquina Universal de Ensayos



Con ayuda de la maquina universal de ensayos MTS 810 se obtuvieron las curvas de esfuerzo-deformación en el concreto de escoria y el tradicional, de las cuales se determinaron los limites elásticos y los módulos de elasticidad de los concretos Finalmente, se realizó un análisis óptico de las probetas cerámicas luego de su ruptura bajo compresión, con el fin de determinar las zonas o interfaces críticas o concentradoras de esfuerzos y causantes de la falla del material.

También se estudiaron las diferencias morfológicas de las interfaces mortero-agregado grueso tanto en el concreto de escoria como en el convencional; esto se hizo mediante reconstrucciones de las superficies de los cerámicos.

Los estudios ópticos fueron llevados a cabo con ayuda del microscopio cofocal Hirox, del Laboratorio de Biomateriales de la Universidad Industrial de Santander.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

A continuación se presenta la caracterización química, mineralógica y granulométrica de las tres materias primas empleadas para el desarrollo del concreto prensado: escoria, arena y cemento.

3.1.1 Escoria (agregado grueso). En la figura 6 se muestran dos fotografías de la escoria de coquización usada en el presente proyecto, la cual es de color negruzco, con baja gravedad específica (1.5) y alta absorción de agua (23%), dada su gran porosidad.

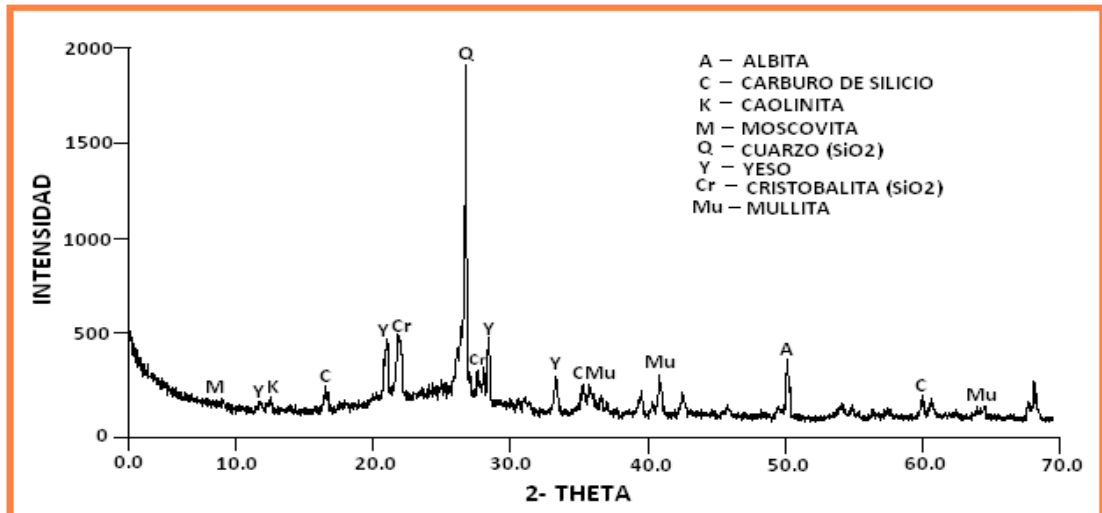
Figura 6. Fotografía de la escoria utilizada



Tal como se aprecia en la tabla 5, los principales elementos constituyentes de la escoria son silicio, aluminio y hierro. Sin embargo el difractograma de este material (Figura 7) demuestra que el compuesto cristalino más abundante es el SiO_2 que se encuentra como cuarzo y cristobalita. También se observa formación de mullita,

lo cual se explica por las altas temperaturas a las que fue expuesto el carbón durante la coquización.

Figura 7. Difractograma de la escoria



No obstante, vale la pena aclarar que este material está constituido principalmente de compuestos amorfos.

Tabla 5. Composición química de la escoria

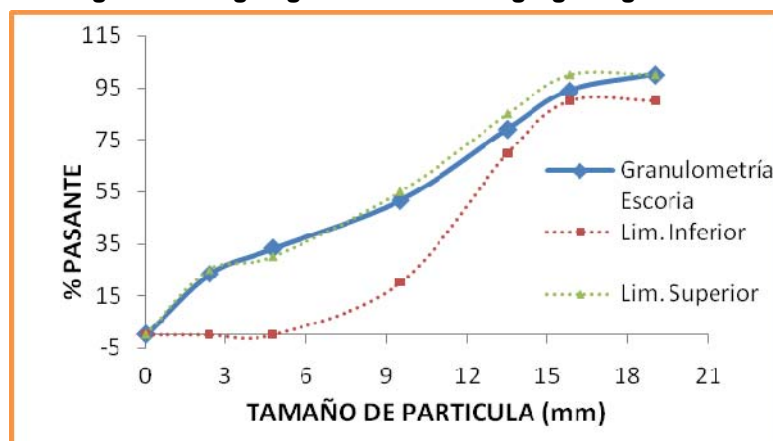
ANALITO	%	ANALITO	%
SiO ₂	53,055	SO ₃	3,462
Al ₂ O ₃	26,230	MgO	0,470
Fe ₂ O ₃	11,587	K ₂ O	1,436
CaO	1,676		

Teniendo en cuenta que la suma de óxidos de Si, Al y Fe en la escoria (Tabla 5) es de 90.87%, en principio esta materia prima cumple con el requisito composicional de un material puzolánico, que según la norma ASTM C 618-08a^[14] debe ser superior al 70%, dado que estos compuestos son los que reaccionan con el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento, formando silicatos

y aluminatos de calcio hidratados, los cuales a su vez son los responsables de conferirle rigidez y consistencia a los concretos.

Dado que la escoria original venía en un amplio rango de tamaños, desde polvos hasta trozos de 20cm aproximadamente, se hizo necesario triturar y clasificar el material, cumpliendo con los rangos de distribución granulométricos para el agregado grueso del concreto (Figura 8), según la norma NTC 174^[9].

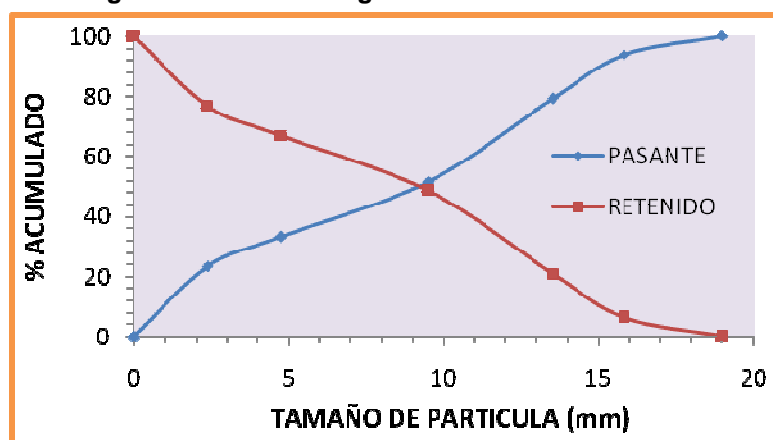
Figura 8. Rangos granulométricos agregado grueso *



* Las curvas punteadas corresponden a los rangos granulometricos optimos para el agregado grueso de los concretos (norma NTC 174)

En la figura 9 se observa la distribución granulométrica final de esta materia prima.

Figura 9. Distribución granulométrica de la escoria



De esta curva se infiere que el tamaño medio de partícula de escoria es de 9.5mm, aunque el tamaño máximo es de 18mm aproximadamente.

3.1.2 Arena (agregado fino). La arena utilizada como agregado fino fue arena de río, la cual está constituida principalmente de SiO₂, tal como lo demuestra el análisis elemental por FRX (Tabla 6).

Tabla 6. Composición química de la arena

ANALITO	%	ANALITO	%
SiO ₂	71,156	SO ₃	0,226
Al ₂ O ₃	15,043	MgO	1,018
Fe ₂ O ₃	3,699	K ₂ O	3,486
CaO	3,650		

En la figura 10 se puede apreciar la distribución granulométrica de esta materia prima, la cual señala un tamaño medio de partícula de 0.75mm aproximadamente. De acuerdo con la norma NTC 174^[9] este agregado también cumple con los requerimientos granulométricos (Figura 11)

Figura 10. Distribución granulométrica de la arena

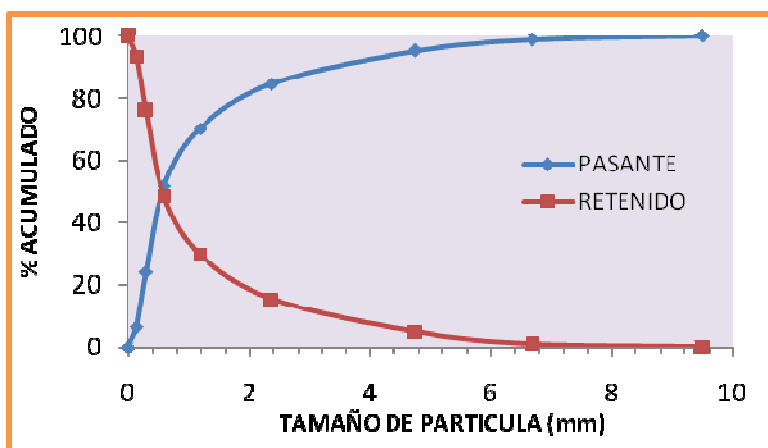
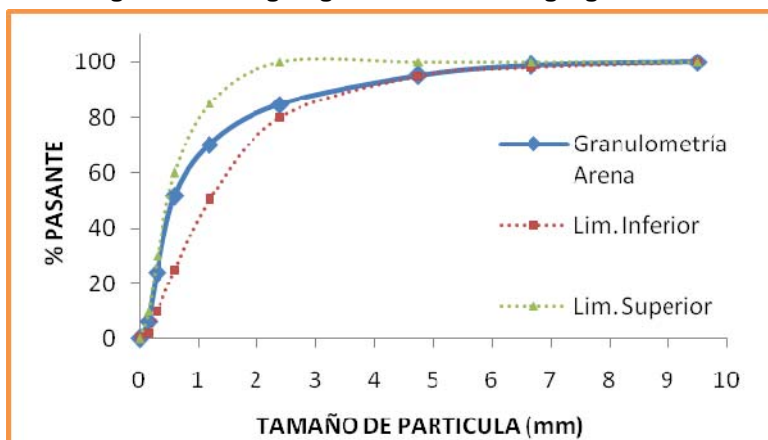


Figura 11. Rangos granulométricos agregado fino



3.1.3 Cemento. Como agente aglomerante de la mezcla de materias primas se usó cemento Portland tipo 1, marca Argos, cuya composición mineralógica (obtenida del proveedor) se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Composición mineralógica del cemento

COMPONENTE	%	COMPONENTE	%
Silicato tricálcico	49	Sulfato calcico	2.8
Silicato bicálcico	25	Oxido cálcico	0.8
Aluminato tricálcico	12	Oxido magnésico	2.4
Ferritolumínato Tetracálcico	8		

Esta composición concuerda con los resultados del análisis elemental obtenido por FRX (Tabla 8); según la cual el óxido de calcio corresponde aproximadamente el 74% del cemento, mientras que el SiO₂ el 14.4%, también se alcanza a detectar los óxidos de hierro y aluminio en cantidades inferiores al 5%.

Tabla 8. Composición química del cemento

ANALITO	%	ANALITO	%
SiO₂	14,428	SO₃	3,474
Al₂O₃	3,456	MgO	0,591
Fe₂O₃	2,899	K₂O	0,563
CaO	73,971		

La granulometría de esta materia es la típica de los cementos, específicamente residuos sobre tamiz 0,09mm en % masa (Norma DIN 4188) menor al 6%, es decir, la porción de los granos de tamaño medio comprendidos entre 3 y 30 μ m.

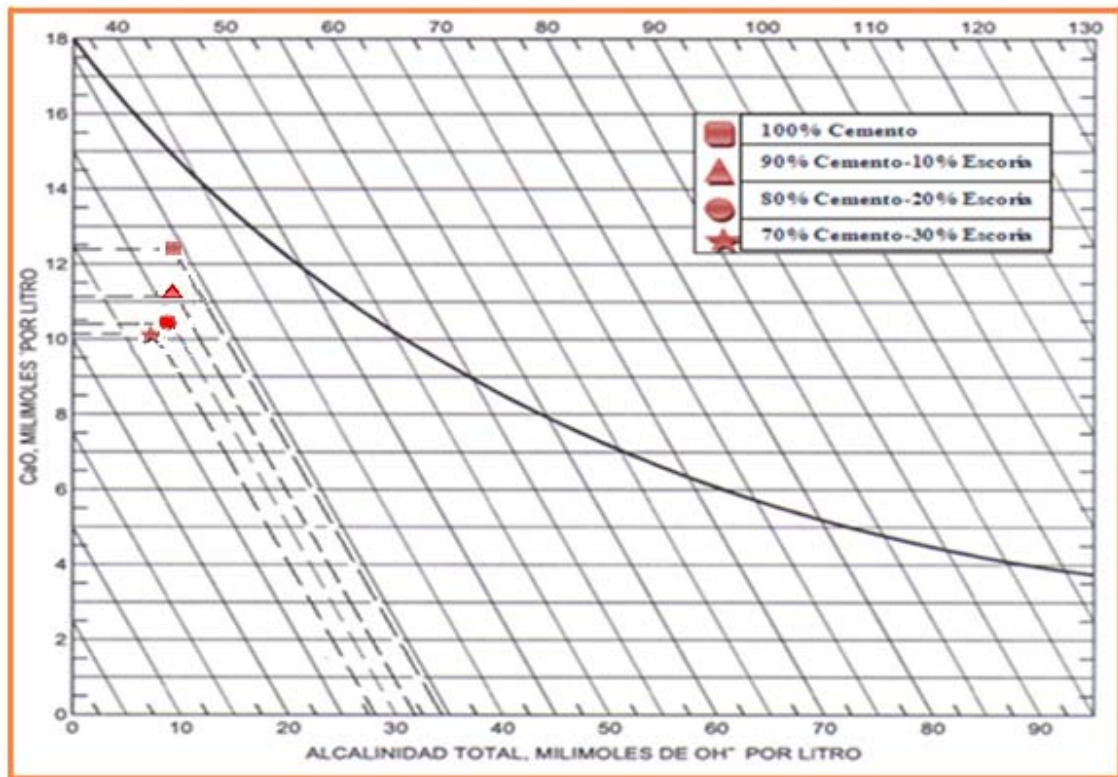
3.2 EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LA ESCORIA

Según el método de Frattini la realidad de la reacción puzolánica será probada si se demuestra que la adición de puzolana, finamente molida, a una solución saturada de cal provoca una caída en la concentración de cal de la solución ^[11].

La norma NTC 1512 se utiliza para determinar la puzolánidad de un cemento basada en el método de Frattini, los resultados de este ensayo tienen que ser reportados según la norma de la siguiente manera; *“En caso de que el punto representativo del contenido en óxido de calcio en función de la alcalinidad total, esté situado por debajo de la isoterma de solubilidad de la gráfica, el cemento ensayado se considera puzolánico”*.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 12.

Figura 12. Gráfica de Solubilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en presencia de álcalis a 40°C



Se observa en la figura 12 que a medida que se incrementa la cantidad de escoria la mezcla se torna más puzolánica, alejándose de la curva de solubilidad del $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

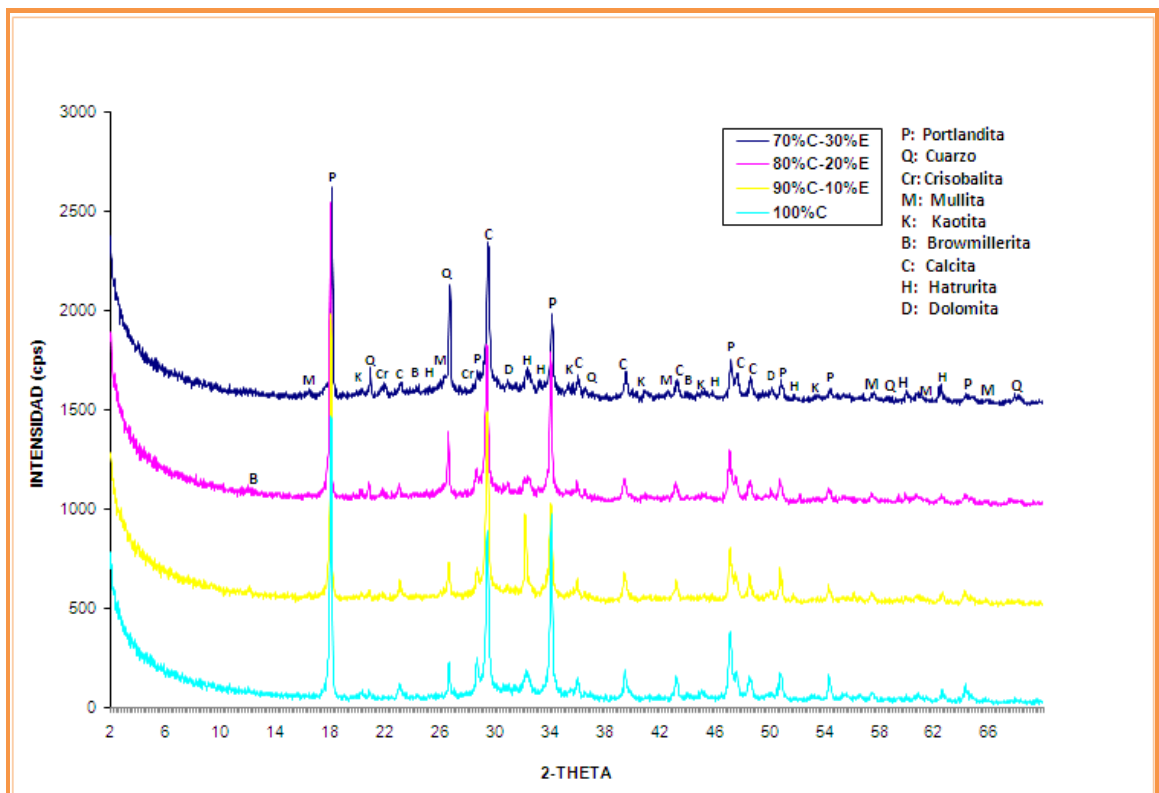
El comportamiento, también puzolánico, de la muestra de 100% cemento se explica por el hecho de que el cemento utilizado, así como la mayoría de cementos comercializados en Colombia, trae adiciones de puzolanas, pues los fabricantes ya conocen las bondades de estas adiciones^[15].

Los difractogramas de los residuos sólidos de los ensayos de evaluación de la actividad puzolánica de la escoria (Figura 13) evidencian que los productos de hidratación del cemento y de la mezcla escoria-cemento son los mismos: Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Hatrurita ($\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$), Katoita ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{H}_4\text{O}_4)_3$) y

Browmillerita ($\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$). Los tres últimos compuestos son aluminosilicatos de calcio, producto de las reacciones puzolánicas.

Dada la mayor altura relativa de los picos de estos compuestos con respecto a los de los demás compuestos en las mezclas escoria-cemento, se puede afirmar que la formación de los aluminosilicatos de calcio aumenta con la adición de escoria al cemento; lo cual es otra evidencia del carácter puzolánico de la primera.

Figura 13. Difractogramas de los residuos de los ensayos de evaluación de la puzolanidad de la escoria

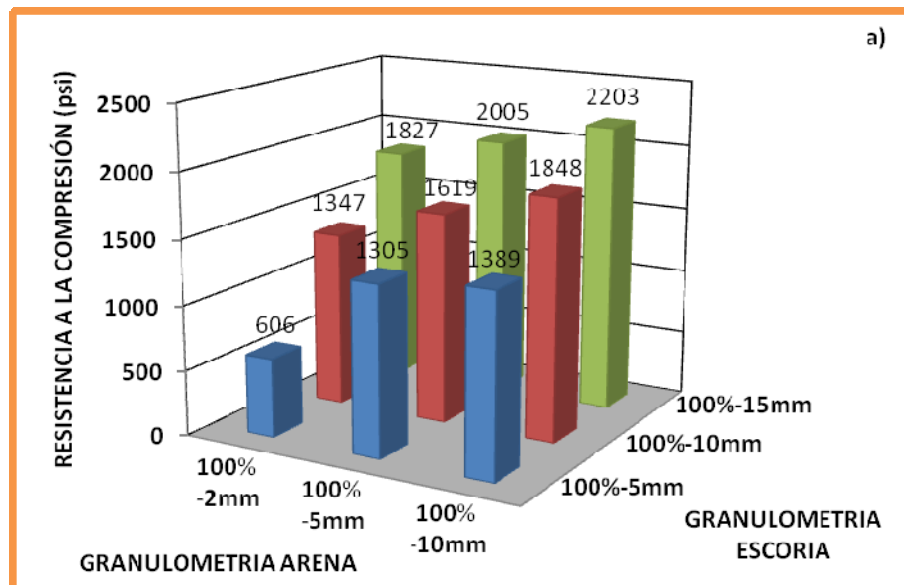


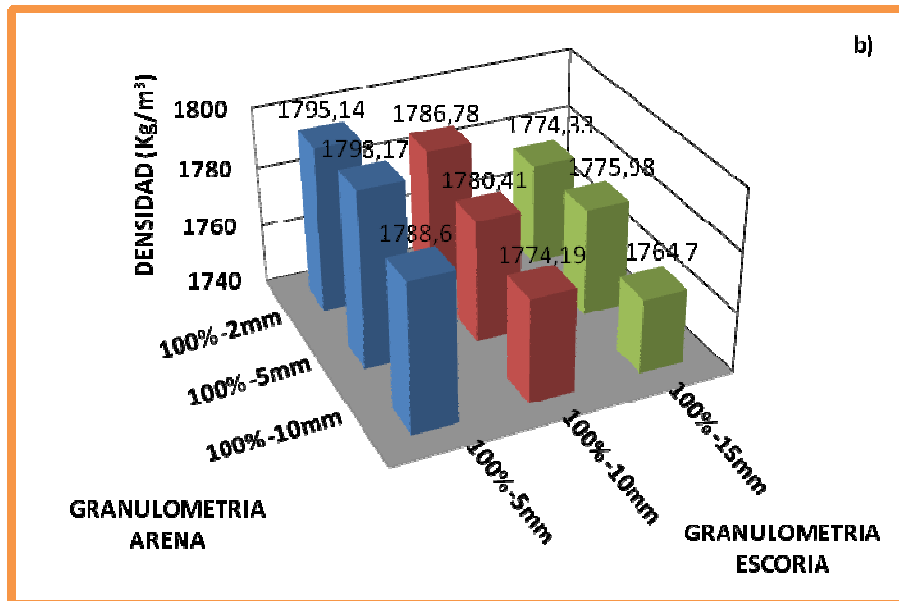
3.3 DISEÑO DE MEZCLAS

A continuación se presentan los resultados del efecto de las diferentes variables del diseño de mezclas sobre la resistencia a la compresión de las probetas de concreto.

3.3.1 Granulometría de los agregados. En la figura 14 se presentan los resultados del efecto de las granulometrías de los agregados grueso (escoria) y fino (arena) sobre la resistencia a la compresión y la densidad de las probetas de concreto prensado, obtenidos tal como se describió en el apartado metodológico. Se observa que el aumento de los tamaños máximos de los agregados fino y grueso aumenta la resistencia mecánica del concreto de escoria, lo que a su vez está acompañado de la disminución de su densidad.

Figura 14. Efecto de la granulometría de la Arena y la Escoria sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto: a) Resistencia a la compresión, b) Densidad





Al calcular nuevamente los tamaños medios de partícula de los agregados a partir de las figuras 9 y 10, para las tres fracciones granulométricas de partícula de cada agregado usados en las mezclas, se obtienen los valores presentados en la tabla 9.

Tabla 9. Tamaños medios de partícula de las fracciones de los agregados evaluados en las mezclas

ESCORIA		ARENA	
Rango granulométrico	Dp (mm)	Rango granulométrico	Dp (mm)
100% -5mm	1,65	100% -2mm	0,45
100% -10mm	3,0	100% -5mm	0,55
100% -15mm	8,0	100% -10mm	0,75

La anterior tabla señala que por la amplia distribución granulométrica de los agregados, al aumentar su tamaño máximo de partícula se incrementa notablemente el tamaño medio de las partículas; lo que implica una importante

disminución del área superficial de las partículas tanto de la escoria como de la arena.

Es bien conocido que la disminución del área superficial de las partículas de los agregados del concreto, implicada en su aumento de tamaño, tiene dos efectos contrarios, si se mantiene constante la adición de agua para hidratar el cemento y promover las reacciones puzolánicas: en primer lugar se disminuyen las necesidades de agua, con lo cual se mejora la hidratación del cemento y, por tanto, la cohesión entre los agregados, lo que se traduce en un aumento de la resistencia mecánica del concreto^[18]. El otro efecto que se podría encontrar está relacionado con el aumento de la porosidad y la formación de microgrietas en la zona de transición interfacial (situada entre la superficie del agregado y el mortero), debido a que en las etapas iniciales allí se concentraron películas de agua. Este segundo efecto conllevaría a la disminución de la densidad y de la resistencia mecánica del concreto.

Teniendo en cuenta que, a pesar de disminuirse la densidad del concreto al aumentarse el tamaño de las partículas de los agregados, la resistencia mecánica aumenta, se infiere que para este caso prevalece el primer efecto; es decir dado que el consumo de agua por parte de los agregados es menor se mejora la hidratación del cemento. Por otro lado, este resultado indica que la cantidad de agua adicionada está por debajo del valor óptimo para las mezclas de estudio.

La disminución de la densidad del concreto al aumentar el tamaño máximo de la escoria es debida, principalmente, a la alta porosidad de la escoria. Por tanto, entre mayor sea el tamaño de partícula menor es la densidad de la misma.

El efecto combinado de las variables granulometría de la escoria y granulometría de la arena, sobre la variable respuesta (resistencia a compresión), se determinó

con ayuda del software Statgraphics Centurion, teniendo en cuenta que el diseño experimental para este caso es de 2^3 (dos variables y tres niveles para cada una). Con ayuda de este software se hizo un análisis de regresión multifactor para obtener una ecuación que relaciona las variables y su efecto sobre la resistencia a la compresión.

Las respuestas de las regresiones lineales múltiples, describen la relación entre la resistencia a la compresión y las variables independientes, obteniendo la siguiente ecuación para describir el modelo, con un 95% de confianza.

$$\begin{aligned} \text{RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN} = & 1572,22 + 456,001 * \text{Granulometría} \\ & \text{escoria} + 276,733 * \text{Granulometría arena} - 101,817 * \text{Granulometría} \\ & \text{escoria} * \text{Granulometría arena} \end{aligned}$$

Posteriormente se hizo el análisis del diseño experimental bajo los parámetros del software Statgraphics Centurion, obteniendo las cartas de Pareto y el significado de los efectos estimados y las interacciones entre variables.

En la figura 15 se observa un efecto positivo más representativo de la granulometría de la escoria que de la arena, y un efecto negativo de la combinación de dichas variables.

En el diagrama del efecto sobre la resistencia a la compresión (Figura 16), se aprecia que al aumentar la granulometría de la escoria y la arena hay un notorio aumento de la resistencia a la compresión.

De aquí se concluye que las dos variables, la granulometría de la escoria es quien en mayor medida determina la resistencia mecánica del concreto.

Figura 15. Carta de Pareto

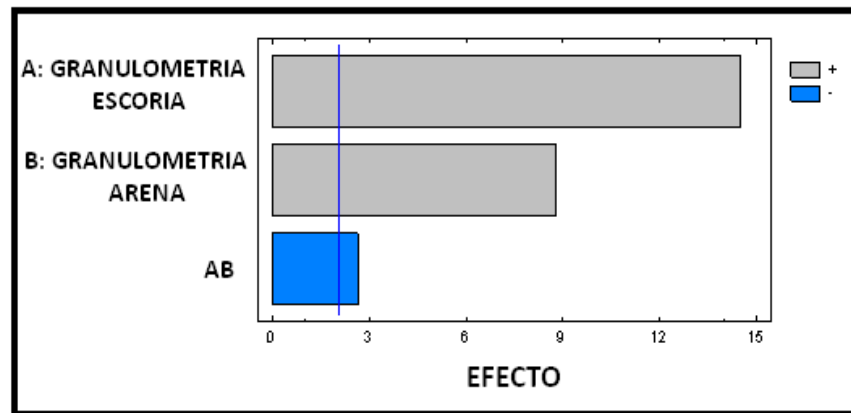
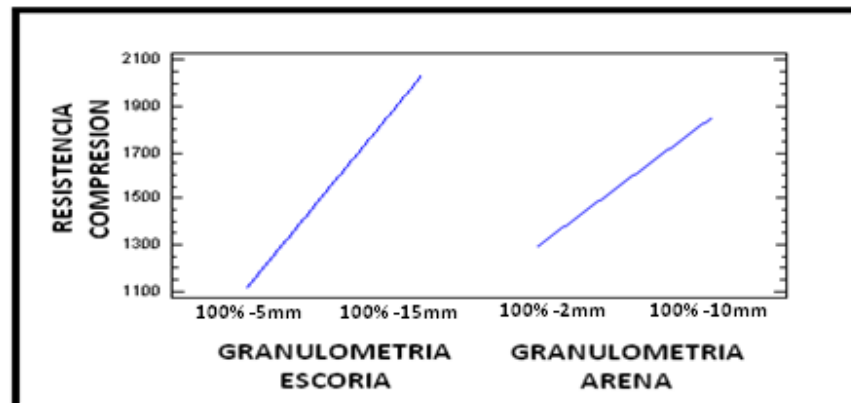


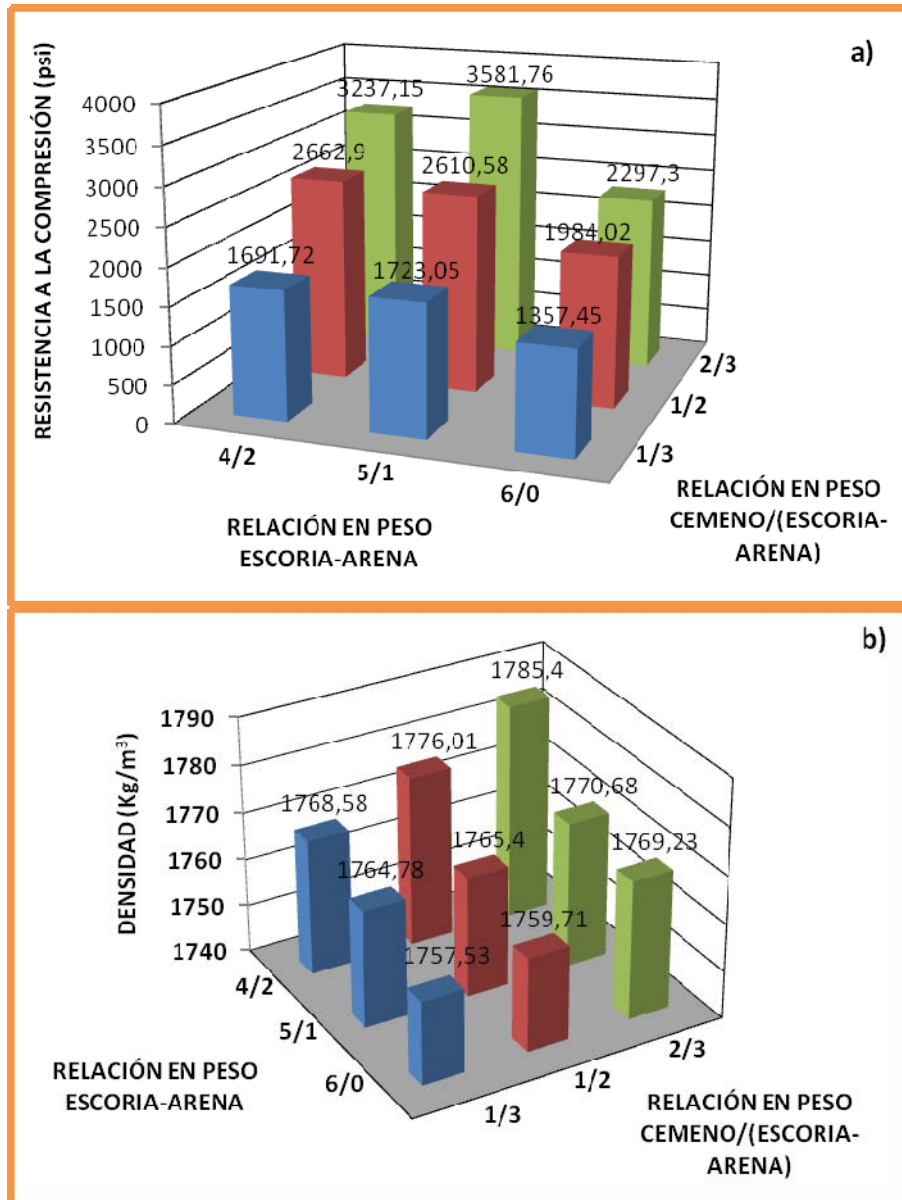
Figura 16. Diagrama del efecto de la resistencia a compresión



Teniendo en cuenta estos resultados se seleccionan como los mejores rangos granulométricos de los agregados: 100% -15mm para la escoria y 100% -10mm para la arena; con los cuales se alcanzó un valor de resistencia a la compresión de 2203 psi. Por tal motivo se utilizaron estos rangos granulométricos para el desarrollo de las probetas de concreto en los siguientes estudios.

3.3.2 Composición de la mezcla. En este apartado se estudia el efecto simultáneo de las variables relación escoria/cemento y cemento/agregados. En la figura 17 se presentan los resultados de este estudio.

Figura 17. Efecto de la composición de la mezcla sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto: a) Resistencia a la compresión, b) Densidad



Se observa que, para cualquier relación de agregados escoria/arena, el aumento de la relación cemento/(escoria+arena) de 1/3 a 2/3 conlleva un aumento de la resistencia a la compresión del concreto cercano al 100%. Este efecto es lógico,

dado que el cemento Portland al hidratarse aporta cohesión entre los diferentes compuestos del cemento.

En general, la resistencia aumenta al incrementar la relación escoria/arena de 4/2 a 5/1. Al seguir aumentando el contenido de escoria la resistencia cae notablemente. Es decir, que la máxima resistencia a la compresión se obtiene adicionando a la mezcla cinco veces la cantidad de arena.

El anterior resultado se explica por el hecho de que al aumentar el contenido de agregado fino (arena), es decir disminuir la relación escoria/arena (manteniendo constante la relación agua/cemento), se produce un déficit de agua para hidratar el cemento. Ya que a mayor cantidad de arena mayor absorción de agua, quedando poca para hidratar el cemento; por lo que finalmente se disminuye la resistencia a la compresión del concreto.

Por su parte, al aumentar en exceso la cantidad de agregado grueso (o minimizar el contenido de arena) se disminuye la retención inicial de agua en la pasta. Lo cual también perjudica notablemente la hidratación del cemento y la evolución de las reacciones puzolánicas (las cuales tienen una cinética lenta). Esto hace que bajo tales condiciones se obtenga un concreto con baja resistencia mecánica.

La densidad disminuye al aumentar la relación escoria-arena y al disminuir la relación cemento-(escoria-arena), esto se debe a que la densidad específica de la escoria (1.5) es menor que la de la arena (3.2) y que la del cemento (3.15) ^[9].

Del análisis del efecto combinado de las variables independientes (relación en peso escoria/arena y relación en peso cemento/(escoria+arena)), sobre la variable respuesta (resistencia a la compresión), se obtuvo la siguiente ecuación para describir el modelo con un 95% de confianza.

➤ RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN = 2349,62 + 325,466*relación escoria/arena + 724,032*relación cemento/(escoria-arena) + 151,42*relación escoria/arena*relación cemento/(escoria-arena)

En la carta de Pareto (figura 18) se observa un efecto positivo de la relación escoria/arena y la relación cemento/(escoria-arena), e igualmente un efecto positivo de dichas variables combinadas.

En el diagrama del efecto de la resistencia a la compresión (Figura 19), se aprecia que al aumentar la relación escoria/arena y la relación cemento/(escoria-arena) hay un incremento en la resistencia a compresión.

Figura 18. Carta de

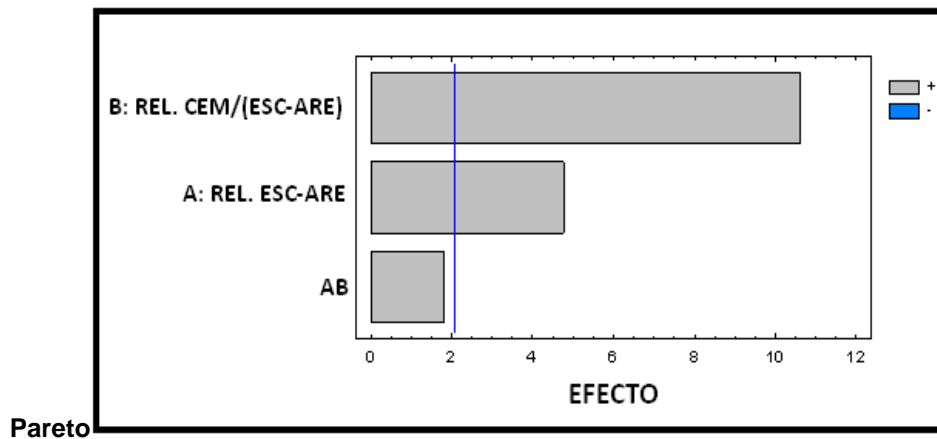
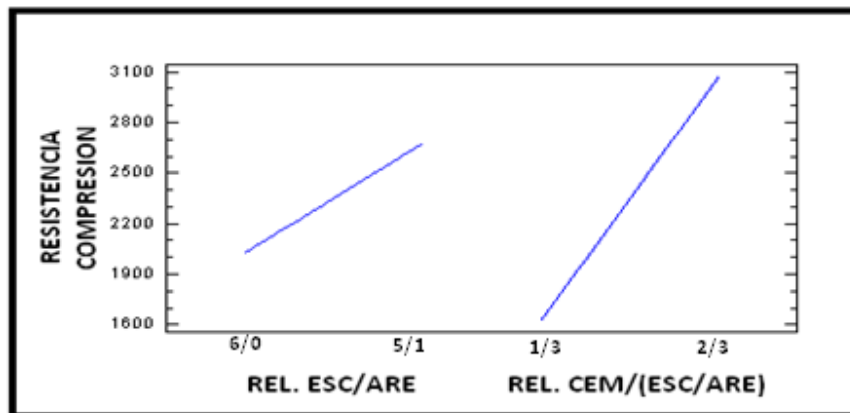


Figura 19. Diagrama del efecto de la resistencia a compresión



De este segundo estudio de variables, es evidente que quien afecta de forma más drástica la resistencia mecánica del concreto es la relación cemento/agregados, siendo dicho efecto más del doble del de la relación escoria/arena (ver figura 18).

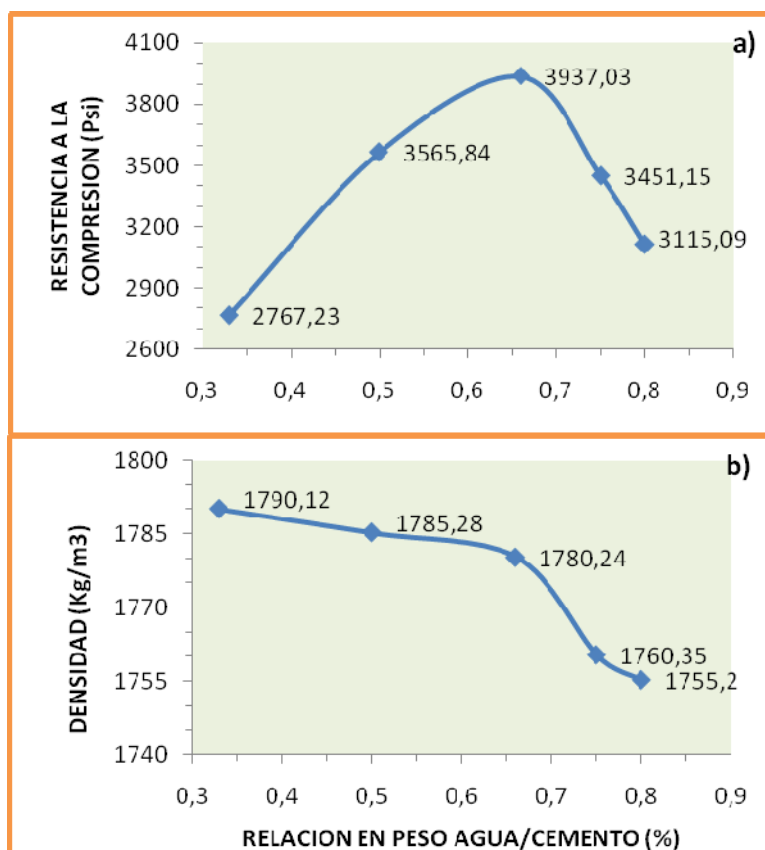
De este estudio de composición de la mezcla se seleccionan como condiciones óptimas: relación escoria/arena de 5/1 y relación cemento/agregados de 2/3; con las cuales se desarrollaron las probetas de concreto en los estudios siguientes.

3.3.3 Relación agua/cemento. En la figura 20 se presenta el efecto de la relación agua/cemento sobre la resistencia a la compresión y la densidad del concreto de escoria.

De la figura 20a es evidente que la resistencia mecánica del concreto de escoria aumenta con la adición de agua hasta un valor límite, a partir del cual la resistencia disminuye. Dicho límite se sitúa en una relación en peso agua/cemento de 2/3. Este límite se puede denominar como de “saturación”, dado que por debajo de él hay déficit de agua, por lo que no se alcanza la hidratación completa del cemento, lo que se traduce en una menor cohesión entre los agregados y, finalmente, en menor resistencia mecánica.

Al adicionar agua en exceso (por encima del límite de saturación del cemento) no se forman más fases estables de hidratación que mejoren la cohesión de los agregados. Por el contrario, el exceso de agua genera mayor porosidad en el concreto, lo que se traduce en una disminución de su densidad (ver figura 20b) y de su resistencia mecánica.

Figura 20. Efecto de la relación agua/cemento en las propiedades físico-mecánicas del concreto de escoria: a) Resistencia a compresión, b) Densidad



3.3.4 Tiempo de curado. Una vez determinadas las mejores condiciones de composición del concreto de escoria, se procedió a evaluar el efecto del tiempo de curado sobre sus propiedades físico-mecánicas.

Como se observa en la figura 21a, se producen dos cinéticas diferentes durante el curado del concreto. A tiempos cortos, hasta siete días, la resistencia a la compresión aumenta rápidamente, lo cual está relacionado con la alta cinética de las reacciones de hidratación del cemento. A tiempos mayores, aunque lentamente, la resistencia del concreto continua aumentando por el progreso de las reacciones de hidratación del cemento y de cristalización de la Etringita y el

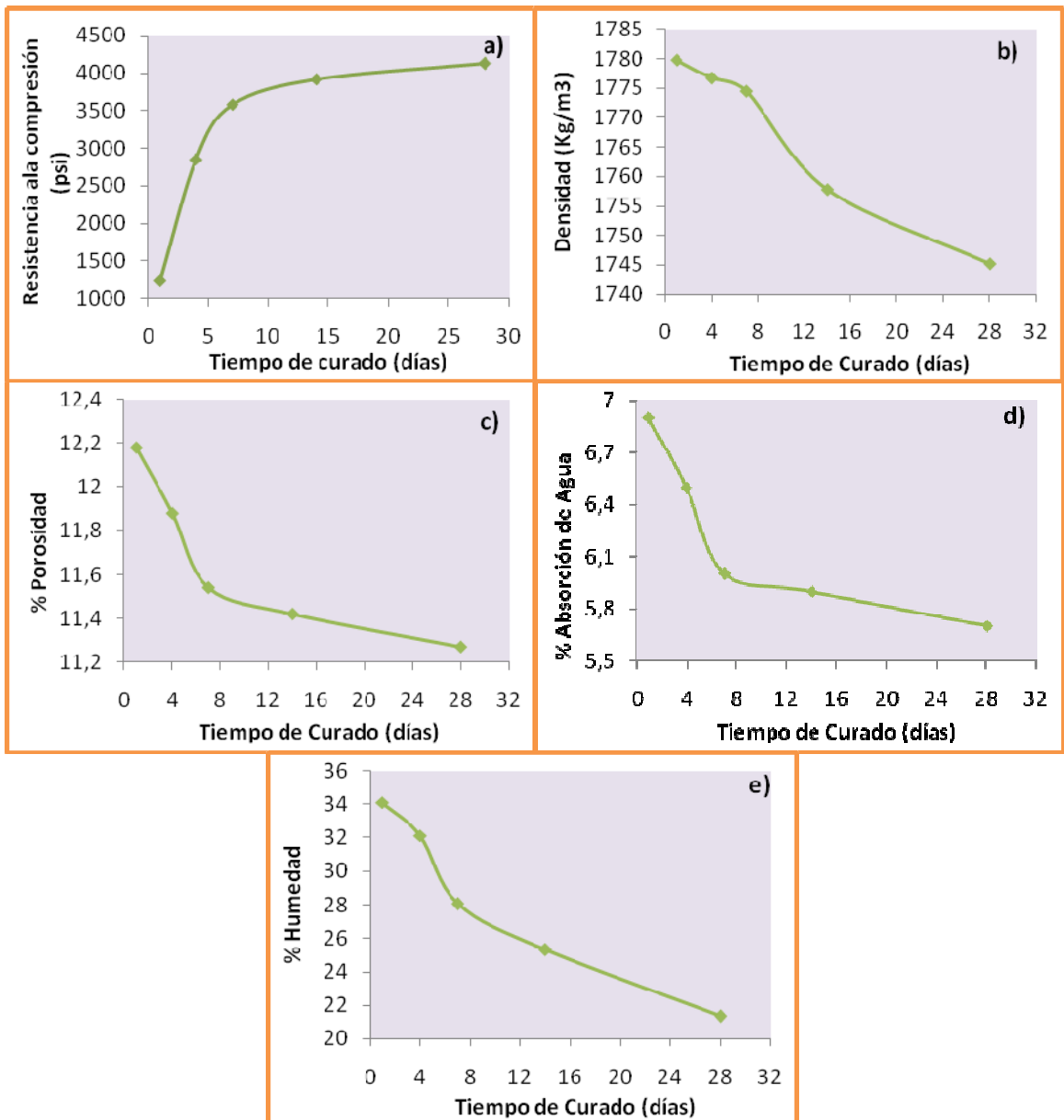
Hidróxido de Calcio, los cuales llenan los espacios vacíos que quedaron en la zona interfacial durante los primeros tiempos de curado.

El comportamiento cinético de la resistencia del concreto de escoria (Figura 21a), señala que al cabo de 7 días de curado éste alcanza el 87% de su valor máximo de resistencia a la compresión, es decir 3580 psi. Por su parte la máxima resistencia se alcanza a los 28 días aproximadamente (4125 psi). Mientras que en un concreto tradicional a los 7 días de curado solo se ha alcanzado el 70% de la resistencia a la compresión.

Este rápido curado del concreto de escoria es debido a la porosidad de la escoria, la cual atrapa agua que permite mantener una cinética de curado rápido hasta los 7 días.

De acuerdo con la figura 21b a medida que transcurre el tiempo de curado disminuye la densidad, a medida que progresa la hidratación, los diferentes productos formados llenan gradualmente los espacios entre los granos del concreto, provocando un aumento de la concentración de los sólidos hasta que el libre movimiento de las partículas se restringe, y la pasta fragua para convertirse en un sólido. A partir de ese momento, comienza la etapa de endurecimiento, que se caracteriza por pequeñas expansiones del concreto, ya que el volumen ocupado por los productos de hidratación es aproximadamente el doble del volumen del cemento anhidro ^[17]. Al tiempo que ocurre un cambio en el volumen del concreto se presenta una disminución en el peso de éste, pues el agua que estaba alojada en los poros de la estructura parte se utiliza en la hidratación del cemento y parte se evapora.

Figura 21. Efecto del tiempo de curado sobre las propiedades físico-mecánicas del concreto de escoria: a) Resistencia a compresión, b) Densidad, c) Porosidad, d) Absorción de agua y e) Humedad



En la figura 21 se muestra las variaciones de las propiedades físico-mecánicas del concreto de escoria: 21c) Porosidad, 21d) Absorción de agua y 21e) Humedad, con respecto al tiempo de curado.

La transferencia de humedad y los procesos de hidratación son fenómenos no sólo simultáneos sino acoplados. A medida que avanza la hidratación, se va consumiendo el agua libre, se reduce la porosidad y la conectividad de los poros, por la formación de productos de hidratación, lo que trae como consecuencia que la capacidad de transporte de agua disminuye de manera continua, es decir hay menor absorción de agua y de humedad.

3.4 EFECTO DEL TIPO DE CONFORMACIÓN DEL CONCRETO DE ESCORIA

Para comparar el efecto de esta variable, se desarrollaron probetas de concreto de escoria por prensado y colado, utilizando las mejores condiciones encontradas en el estudio de variables anterior. Luego del tiempo de curado (28 días) al aire libre se midió la resistencia a la compresión y densidad de dichas muestras.

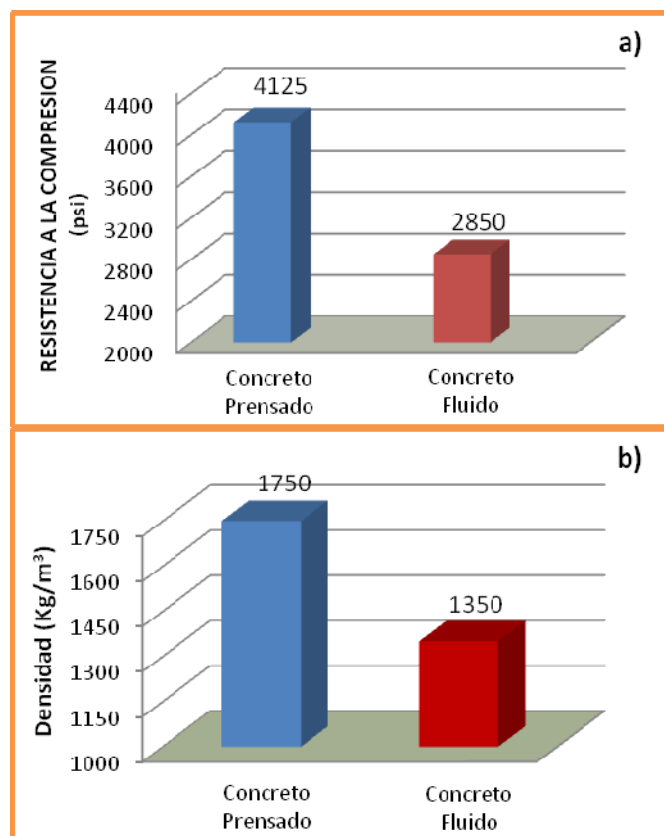
El efecto del tipo de conformación del concreto sobre sus propiedades físico-mecánicas se observan en la figura 22.

Es evidente que la conformación por prensado le aporta al concreto de escoria más resistencia mecánica que el colado (figura 22a); obteniéndose un valor promedio de resistencia a la compresión de 4125 psi para el concreto prensado y 2850 psi para el colado.

Esta diferencia se debe a que el prensado facilita la penetración del mortero dentro de los poros de la escoria, lo que se traduce en mayor adherencia entre las dos fases.

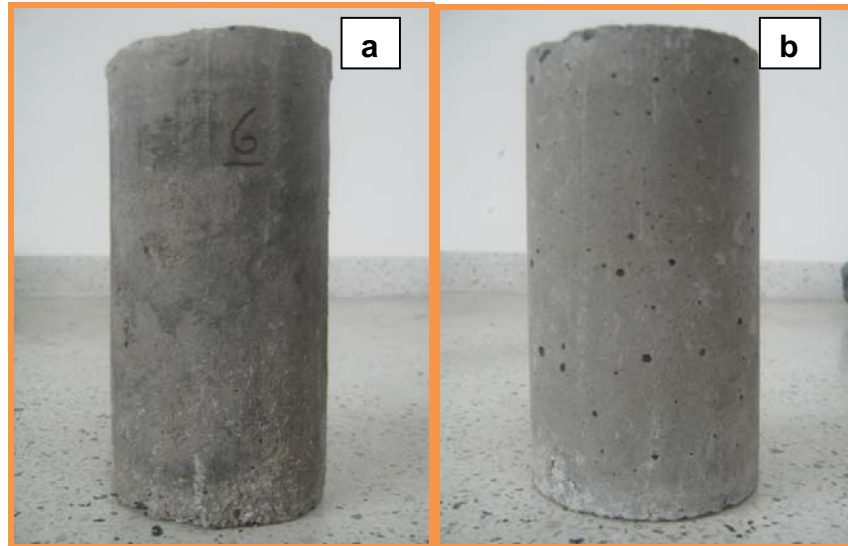
La mayor compactación de los agregados en el concreto prensado también se traduce en una mayor densidad (figura 22b), siendo 1750 Kg/m³ para el concreto prensado y 1350 Kg/m³ para el fluido.

Figura 22. Efecto del tipo de conformación del concreto de escoria sobre sus propiedades físico-mecánicas: a) Resistencia a la compresión, b) Densidad



En la figura 23 se compara el acabado superficial de los dos tipos de mortero. Claramente se observa que la porosidad del mortero fluido (figura 23b) es mucho mayor que el concreto prensado (figura 23a), y es algo lógico de esperar pues el prensado uniaxial disminuye la fracción de espacios vacíos.

Figura 23. Fotografías del acabado superficial según el tipo de conformado de los concretos de escoria: a) Mortero prensado y b) Mortero fluido



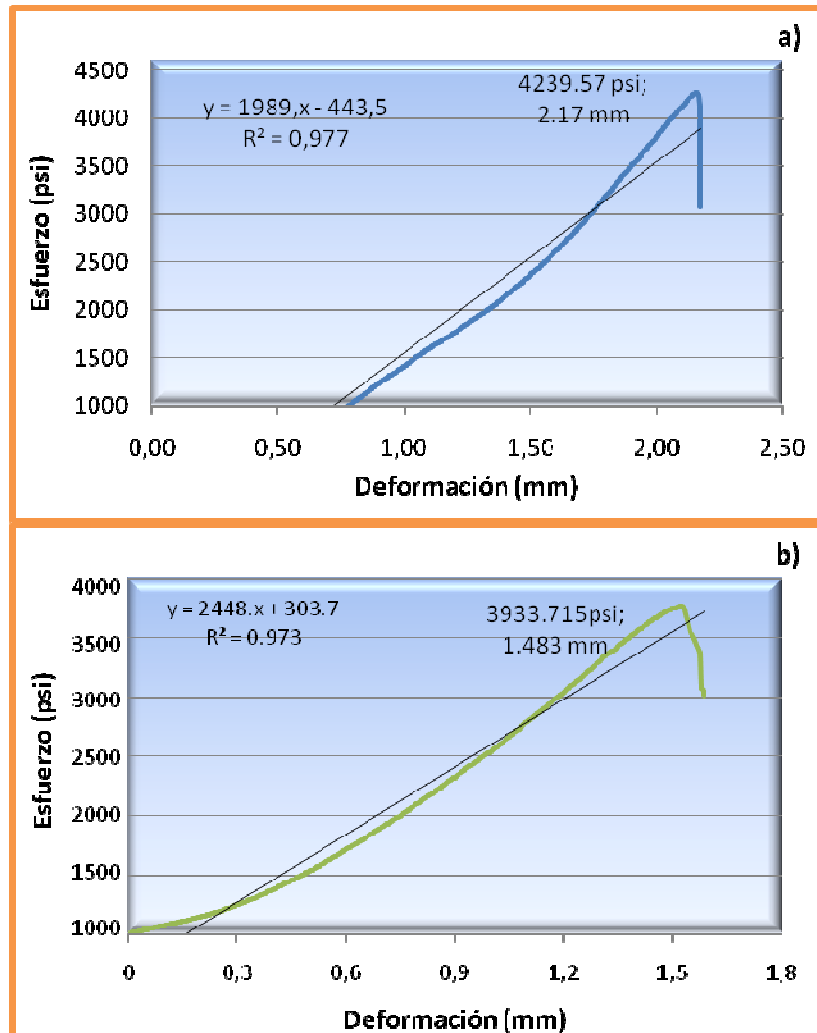
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO DE ESCORIA DESARROLLADO

3.5.1 Elasticidad del concreto. En las figuras 24a y 24b se muestran las curvas esfuerzo-deformación para los concretos de escoria y convencional, respectivamente, luego de 28 días de curado.

Los módulos de elasticidad, medidos como sus pendientes de las curvas, son 3.03×10^6 psi y 3.73×10^6 psi para el concreto de escoria y el convencional, respectivamente.

El tener menor módulo de elasticidad es una característica positiva para el concreto de escoria, específicamente para el diseño de estructuras sismo resistentes, pues al permitir mayor deformación se aumenta la capacidad de disipación de energía. Por su parte, el límite de elasticidad del concreto de escoria (4239.57 psi) es un poco mayor al del concreto convencional (3933.71 psi), lo que se traduce en un material estructuralmente más fuerte.

Figura 24. Gráficas Esfuerzo vs Deformación para diferentes concretos: a) Escoria, b) Convencional



3.5.2 Análisis Fractomecánico. La fractura típica por compresión del concreto de escoria prensado se presenta en la figura 25. La forma de dicha fractura es cónica dividida (ver anexo E).

Figura 25. Fractura típica del concreto de escoria desarrollado



Este es un buen patrón de fractura pues indica que la probeta tuvo un alto grado de compactación, aunque hay que aclarar que este patrón de fractura no es el 100% ideal, dado que está relacionado con defectos en los bordes de las probetas, especialmente a la falta de homogeneidad de la mezcla durante el proceso de conformado.

El patrón ideal para la fractura de un concreto es de forma cónica (ver anexo E), el cual implica una carga de compresión bien aplicada.

La figura 26 corresponde a una fotografía al interior de una probeta de concreto de escoria, luego de su ruptura por compresión. Se observa que la fractura ocurre a través del mortero (tal como se resalta con la línea punteada) y no a través de la partículas de escoria.

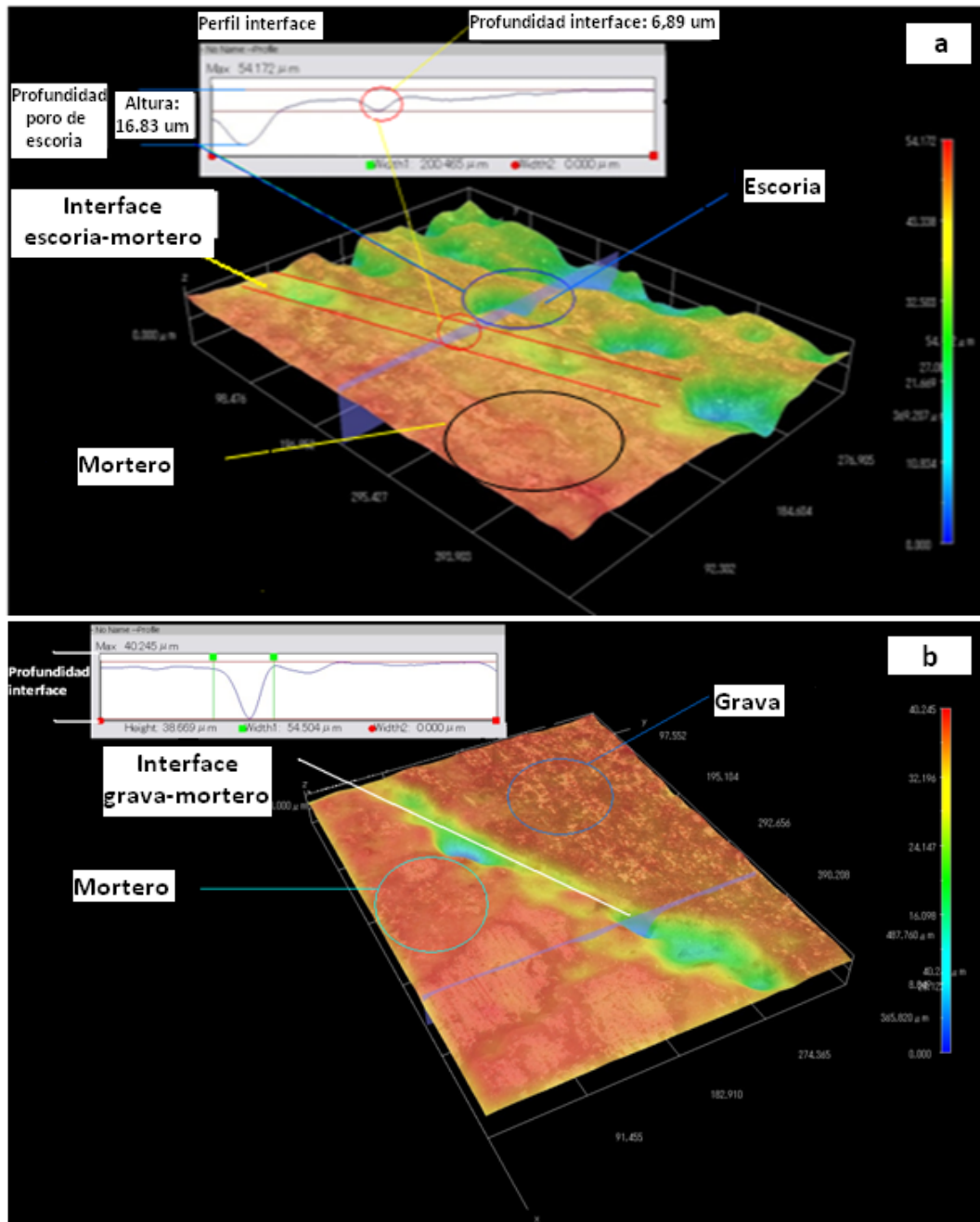
Tal comportamiento implica que las partículas de escoria no son zonas concentradoras de esfuerzos dentro del concreto.

Figura26. Orientación de la fractura



3.5.3 Morfología de la interface. Las reconstrucciones superficiales de los concretos de Escoria y Convencional se observan en la figura 27, cuyas imágenes fueron captadas en el microscopio cofocal Hirox.

Figura 27. Reconstrucciones de la interface agregado grueso-mortero en los concretos de escoria (a) y convencional (b)



En estas figuras las zonas más profundas tienen color verde-azul, mientras que las más altas o superficiales presentan colores rojizos. En el concreto de escoria (figura 27a) la zona interfacial no está claramente delimitada debido a la buena adherencia de la escoria con el mortero. Caso contrario ocurre en el concreto

convencional (figura 27b), para el cual se observa una franja verde-azulada entre el mortero y la grava, lo cual indica la presencia de vacíos de gran profundidad. La profundidad de los poros o vacíos en las interfaces son del orden de 40 μ m para el concreto convencional y de 7 μ m para el concreto de Escoria. Estos resultados explican el por qué de la mayor resistencia mecánica del concreto de escoria.

La menor presencia de vacíos en la interface escoria-mortero que en la de grava-mortero es debida a dos factores relacionados con la escoria: su porosidad y carácter puzolánico. Los poros de la escoria favorecen la adherencia del mortero sobre ella, dado que la pasta de mortero puede penetrar un poco dentro de ellos; minimizando de esta forma la formación de vacíos entre las dos fases. Por otro lado, los productos de las reacciones puzolánicas que ocurren sobre la escoria tienden a llenar los espacios vacíos de la interface.

3.5.4 Características del concreto de escoria desarrollado. El estudio de variables anteriormente presentado permitió concluir que las condiciones más adecuadas para la elaboración del concreto de escoria de coquización son las resumidas en la tabla 10.

Tabla 10. Condiciones más adecuadas para la elaboración del concreto de escoria

VARIABLE	NIVEL
Granulometría de la escoria	100% -15mm
Granulometría de la arena	100% -10mm
Relación en peso escoria/arena	5/1
Relación en peso cemento/(escoria-arena)	2/3
Relación en peso agua/cemento	2/3
Tiempo de curado (días)	28

En el presente estudio se obtuvieron concretos de escoria con resistencias a la compresión del orden de 4000 psi (28 MPa), suficientes para el uso ingenieril en el

diseño de estructuras de concreto simple según la norma NSR 98- Capitulo C (Concreto estructural), la cual exige una resistencia nominal superior a 17 MPa.

No obstante, concretos con menor contenido de cemento (relación cemento/agregados de 1/2), también alcanzan a cumplir con los requisitos mínimos de resistencia (18 MPa), los cuales se podrían utilizar para elaborar económicamente ladrillos para la construcción, dado que consumirían mayor cantidad de escoria y menos cemento

En la tabla 11, se comparan las propiedades del concreto de Escoria obtenido en la presente investigación con las de un concreto tradicional.

Tabla11. Comparación de propiedades físico-mecánicas de un concreto de escoria y uno convencional

PROPIEDADES	CONCRETO DE ESCORIA	CONCRETO CONVENCIONAL^[15]
Resistencia a la compresión (psi)	4000	4000
Densidad (Kg/m³)	1750	2200
% Porosidad	10.77	7.23
% Absorción de agua	5.7	3.03
% Humedad	21.33	15
Modulo de elasticidad (psi)	3.03x 10 ⁶	3.73 x 10 ⁶

Dado que el concreto de escoria obtenido en esta investigación tienen una densidad menor de 1800 Kg/m³ se clasifica como un concreto ligero^[9]; sin embargo, por su resistencia a la compresión (4000 psi) se clasificaría también dentro de los concretos de mediana resistencia.

Los porcentajes de porosidad, humedad y absorción de agua son superiores a los del concreto convencional debido al carácter poroso y amorfo de la escoria, esto

es beneficioso en la medida que esta porosidad ayuda a retener agua y humedad en la mezcla, agua necesaria para que los procesos de hidratación del cemento continúen en el proceso de curado y formen las fases cementicias de la mezcla. No obstante, podrían tener el problema de ser más susceptibles al ataque químico.

CONCLUSIONES

- ✚ El carácter puzolánico y poroso de la escoria confiere al concreto mayor resistencia a la compresión, teniendo en cuenta que los poros y los productos de la reacción puzolánica aumentan la adherencia entre la escoria y el mortero.
- ✚ La amplia distribución granulométrica de los agregados incrementa notablemente el tamaño medio de las partículas, lo cual implica una importante disminución del área superficial tanto de la escoria como de la arena, mejorando la hidratación del cemento y, por tanto, la cohesión entre los agregados.
- ✚ Los concretos de escoria al tener un mayor rango de deformación, aumentan su capacidad de disipar energía, siendo de gran interés para el diseño de estructuras sismo-resistentes.
- ✚ En los concretos tradicionales las relaciones agua-cemento superiores a 0.45 hacen que disminuya la resistencia a la compresión, para los concretos de escoria este rango aumenta hasta una relación máxima de 0.66.
- ✚ Las características del mejor material que se pudo obtener a partir de las escorias del proceso de coquización son: resistencia a la compresión de 4000 psi, modulo de elasticidad de 3.03×10^6 psi, densidad de 1750 Kg/m^3 , 10.77% de porosidad y 5.7% de absorción de agua.
- ✚ Se concluye que es técnicamente viable la obtención de materiales cerámicos para la construcción a partir de las escorias del proceso de coquización del carbón, los cuales pueden tener aplicación en la industria de la construcción como ladrillos, pisos vibro – compactados, adoquines, columnas, etc.
- ✚ La viabilidad de utilización de este desecho como una materia prima para materiales de construcción, le permiten a la industria del concreto utilizar miles

de toneladas de subproductos que de otra forma serian vertidos en los suelos como desechos, y que podrían llegar a contaminarlos por los procesos de lixiviación de sus constituyentes.

RECOMENDACIONES

- ✚ Realizar un estudio sobre la factibilidad económica de obtener materiales cerámicos para la construcción a partir de las escorias del proceso de coquización del carbón.
- ✚ Llevar a cabo un estudio de la variación en la conductividad térmica debido a que la escoria presenta una porosidad que le confiere propiedades de barrera térmica.
- ✚ Evaluar la resistencia al ataque químico del concreto de escoria desarrollado y a otros factores tales como el congelamiento y deshielo.

BIBLIOGRAFIA

- 1) FLOREZ Piedrahita Carlos Arturo. Unidad de Planeación Minero Energética APME, Cadena del Carbón Ministerio de Minas y Energía de La República de Colombia, 2005 Bogotá, Colombia.
- 2) MENÉNDEZ Díaz, José Ángel El carbón como recurso una visión general del carbón, 1994 Avilés, España.
- 3) CLASCHI Roberto, Parámetros de Calidad del Coque, Universidad Industrial de Santander, 1969, Colombia.
- 4) NORMA NSR 98 Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Título C Concreto Estructural.
- 5) GARZON Pedro, Ordoñez Ramón, UIS Tesis de Grado: Análisis del Comportamiento de los concretos ligeros utilizando el coque como agregado grueso, 1988 Bucaramanga-Colombia
- 6) GIRALDO Manuel Alejandro M, Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación, 2006 Medellín, Colombia.
- 7) CALLEJA, J. La Portlandita -hidróxido de calcio- y la Tobermorita -silicatos de calcio hidratados- de la pasta de cemento: tratamiento estequiométrico de sus comportamientos. Cemento y Hormigón, Vol 72. No 824, 526-542, 2001.
- 8) ABO-EL-ENEIN, SALAH A.; SALEM, TH. M.; HEKAL, EISA E. Thermal and Physicochemical studies on ettringite in the Cement—Roma,1988.—Vol 85, No 1 (En/Mz, 1988); P. 47-85: Vol 85, No.2 (Ab/Jn, 1988); P. 121-132.
- 9) NORMA NTC 174. Especificaciones de los agregados para el concreto, Norma Técnica Colombiana (ICONTEC), Bogotá, 2003.

- 10) NEVILLE A. (1999). Tecnología del Concreto, 1ª edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, D.F., pp. 185-200
- 11) QUINTANA Crespo Enrique, Universidad Nacional de Córdoba, Tesis de Grado: Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. 2005 Córdoba, Argentina.
- 12) NORMA NTC 1512. Ensayo Químico para Determinar la Actividad puzolánica. Norma Técnica Colombiana (ICONTEC), Bogotá, 2006.
- 13) NORMA NTC 4024 Muestreo y Ensayo de Prefabricados de Concreto no Reforzado, Vibrocompactado. Norma Técnica Colombiana (ICONTEC), Bogotá, 2006.
- 14) NORMA ASTM C-618-08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2006.
- 15) VACCA Castaño Patricia. LOS ECOMATERIALES: UNA ALTERNATIVA ECONÓMICA PARA LA CONSTRUCCIÓN. Agencia AUPEC, Universidad Del Valle. Cali 2003.
- 16) MEHTA Kumar P., Monteiro Paulo J.M., CONCRETO Microestructura, Propiedades y Materiales. McGraw-Hill, tercera edición EE.UU, 2006.
- 17) ROMEL SOLIS, CARCAÑO y MORENO, ERIC I. Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Rev. Fac. Ing. UCV*, sep. 2006, vol.21, no.3, p.57-68. ISSN 0798-4065.

ANEXOS

ANEXO A. MÉTODO EMPLEADO EN LA TÉCNICA DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

1. Preparación y Montaje de las muestras.

Las muestras fueron pulverizadas en un molino de bolas y llevadas a un tamaño de 150 μm . El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestras de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

2. Toma de datos de difracción.

Se realizó en un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB bajo las siguientes condiciones:

Voltaje	30 (kV)
Corriente	15 (mA)
Rendijas (Slits) DS	1.0°
RS	0.3 mm
SS	1.0°
Muestreo	0.02° 2theta
Rango de Medición	2-70° 2theta
Radiación	CuK α 1
Monocromador	Grafito
Identificación de fases	
Tipo de barrido	Continuo
Velocidad de Barrido	1.2°/minuto

3. Análisis por Difracción de Rayos-X

Identificación de fases

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del Internacional Centre for Diffraction data (ICDD).

ANEXO B. DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA NORMA NTC 1512

Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la actividad puzolánica, mediante el ensayo de Frattini.

Materiales

- Balanza sensible al 0,01 g.
- Termostato capaz de mantener la temperatura a $40^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Erlenmeyer de fondo plano de vidrio resistente a los álcalis de 300 de capacidad con tapón o corcho parafinado, que asegure un cierre hermético.
- Pipetas aforadas de 50 cm^3 y 100 cm^3 .
- Embudos.
- Vasos de bohemia de 400 cm^3 .

Reactivos

- Solución de ácido clorhídrico 0,1 N.
- Solución indicadora de anaranjado de metilo.
- Solución de hidróxido de amonio 1:1.
- Solución de oxalato de amonio al 5%.
- Solución de ácido sulfúrico.
- Solución de permanganato de potasio aproximadamente 0,05 N.
- Agua destilada.

PROCEDIMIENTO

Se preparan dos muestras en la forma que se indica a continuación para ser ensayada a los 7 días y eventualmente a los 28 días para el caso que ensayo a los 7 días de resultado negativo,

Se vierte en un Erlenmeyer 100 cm³ de agua destilada y se coloca en aparato provisto de un termostato a 40°C ±2°C durante aproximadamente una hora. Se retira el Erlenmeyer del aparato y se introducen en los 20 gr de la muestra de cemento medidos con aproximación de 0,01 g.

Se tapa inmediatamente, se agita enérgicamente durante 20 segundos para deshacer los grumos de cemento que se hayan formado y se coloca nuevamente el Erlenmeyer en el aparato, teniendo cuidado de que este colocado sobre un plano horizontal para que la capa de cemento sedimentada tenga un espesor uniforme.

Todas las operaciones fuera del aparato se deben realizar lo más rápido posible, en ningún caso en más de tres minutos, para evitar un descenso apreciable de temperatura del contenido del Erlenmeyer.

Trascurridos 7 días o 28 días, según corresponda, se filtra rápidamente por el embudo de placa filtrante, recogiendo el filtrado en un matraz Erlenmeyer. Utilizando una pipeta se transfieren 50 cm³ del filtrado a un vaso de bohemia de 400 cm³ de capacidad, se agregan 2 gotas de solución indicadora de anaranjado de metilo y se valora con solución aproximadamente 0.1 N de ácido clorhídrico.

Una vez alcanzado el punto final de la valoración, se determina la cal en el líquido. Para ello se alcaliniza ésta con unas gotas de amoníaco concentrado. Se calienta hasta ebullición y se precipita la cal añadiendo disolución de oxalato amónico al 5%.

Se deja el vaso sobre un baño maría durante 15 minutos y se separa el precipitado por filtración.

Se lava el filtro con el precipitado, utilizando para ello agua destilada fría,

Se separa del embudo el filtro con el precipitado y se adhiere desplegado, a la pared interior del vaso en el que se hizo la precipitación, de forma que pueda arrastrar el precipitado con facilidad, mediante el chorro de un frasco lavador que contenga agua destilada caliente. Sin separar el filtro de la pared del vaso se añade agua destilada en ebullición hasta completar un volumen de 200 ml.

Se agregan 10 cm³ de ácido sulfúrico diluido (1:1) y se calienta hasta que se inicie la ebullición. Se determina la cal en el líquido valorando éste con una disolución 0,05 N de permanganato de potasio, hasta observar un color rosado persistente. Una vez logrado, se deja caer el filtro en el líquido y se sigue añadiendo disolución de permanganato hasta observar de nuevo la coloración rosada, persistente durante 10 segundos.

CÁLCULOS

Alcalinidad total

la alcalinidad total se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_A = \frac{V' * N * 1000}{V}$$

Donde:

I_A: alcalinidad total.

V': volumen de la solución ensayada en cm³.

V: volumen de la solución de ácido clorhídrico utilizada en la valoración.

N: normalidad de la solución de ácido clorhídrico,

El contenido de óxido de calcio se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_p = \frac{20 * V'' * E}{0.056}$$

Donde:

IP: Contenido de óxido de calcio o índice puzolánico, en milimoles de CaO/L,

V'' : Volumen de la solución de permanganato de potasio utilizado en la valoración, en cm^3

E: Equivalente en cal (CaO) de 1cm^3 de la solución de permanganato empleada.

ANEXO C. MUESTREO Y ENSAYO DE PREFABRICADOS DE CONCRETO NO REFORZADO, VIBROCOMPACTADO NORMA NTC 4024

1. OBJETO

Esta norma establece los procedimientos para el muestreo y el ensayo de prefabricados de concreto, tales como: unidades de perforación vertical o macizas (bloques y ladrillos), de concreto para mampostería y chapas; gramoquines, losetas de revestimiento para cubiertas planas y otros prefabricados de concreto no reforzado, elaborados con mezclas "secas", y vibrocompactados, con el fin de evaluar su resistencia a la compresión, absorción, densidad, contenido de humedad y dimensiones. Están excluidos los prefabricados que tengan normas específicas, como los tubos y los adoquines.

2. RESISTENCIA A LA COMPRESION

2.1 EQUIPO

2.1.1 Máquina de ensayo

La máquina de ensayo debe cumplir con los requisitos de la NTC 3341. Debe estar equipada con dos bloques de acero, generalmente circulares, para soportar el espécimen de ensayo (véase la Nota 2). El bloque superior, que generalmente transmite la carga a la cara superior del espécimen, debe estar apoyado en una esfera; el otro, sobre el cual se coloca el espécimen, debe ser plano y rígido. Cuando el área de soporte de los bloques de acero no es suficiente para abarcar el área de soporte del espécimen, se deben colocar placas de acero suplementarias (que cumplan con los requisitos indicados en el numeral 2.1.2), entre los bloques de soporte y el espécimen refrentado, después de que se haya alineado el centroide de las superficies de soporte del espécimen, con el centro físico de los bloques de soporte (véase el numeral 2.4.1)

2.1.2 Bloques y placas de acero, para soporte

Las superficies de los bloques y placas de acero para soporte no se deben desviar del plano en más de 0,025 mm en ninguna línea de 150 mm. El centro de la esfera sobre la cual se asienta el bloque de soporte superior (de aplicación de carga), debe coincidir con el centro de su cara de soporte. Si se utiliza una placa de soporte inferior, el centro de la esfera del bloque superior debe estar alineado verticalmente, con el centroide de las caras de soporte del espécimen. El bloque con soporte esférico debe permanecer junto a su asiento, pero debe girar en cualquier dirección. El diámetro de la cara de los bloques de soporte debe ser de, mínimo 150 mm. Cuando se utilizan placas de acero entre los bloques de soporte de acero y el espécimen (véase el numeral 2.4.1), deben tener un espesor de, por lo menos, la mitad de la distancia desde el borde del bloque de soporte a la arista más distante del espécimen. El espesor de la placa no debe ser menor de 25 mm, en ningún caso.

Nota 2. Se recomienda que las caras de soporte de los bloques y placas usadas para el ensayo de compresión de especímenes de concreto, tengan una dureza Rockwell no inferior a 60 HRC (BHN620).

2.2 ESPECÍMENES DE ENSAYO

2.2.1 Se deben ensayar tres especímenes dentro de los siguientes tres días (72 h) a su despacho al laboratorio, para que permanezcan almacenados durante este tiempo a una temperatura de $24^{\circ}\text{C} \pm 8^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa inferior al 80%. Los especímenes deben ser unidades completas, excepto por las modificaciones hechas en los numerales 2.2.2 al 2.2.4.

2.2.2 Las proyecciones que tengan una longitud mayor que su espesor, se deben cortar con una sierra. En las unidades con tabiques rebajados, se corta, con una sierra, la pared que se proyecta hacia arriba de los tabiques, para obtener una superficie de soporte completa, sobre la sección transversal neta de la unidad. Si

la altura del espécimen se reduce en más de 1/3 de la altura original, se ensaya sólo un trozo de éste, de acuerdo con el numeral 2.2.4.

2.2.3 Cuando los especímenes completos para el ensayo de compresión son demasiado grandes para los bloques y las placas de soporte de la máquina de ensayo, o se encuentran fuera de la capacidad de carga de la máquina, se cortan las unidades con una sierra, hasta un tamaño apropiado para la capacidad de la máquina. El espécimen resultante no debe tener proyecciones, ni tabiques rebajados, y debe estar conformado por una o varias unidades cerradas de cuatro lados. La resistencia a la compresión del segmento se debe considerar como la resistencia a la compresión del espécimen completo.

2.2.4 Cuando los especímenes para el ensayo de compresión tienen tamaño y forma poco usuales, los especímenes se recortan para quitarles todo tipo de salientes y proyecciones. El espécimen resultante debe estar conformado por una o varias unidades cerradas de cuatro lados, con una superficie de soporte del 100%. Si esto no da como resultado una unidad *cerrada* de cuatro lados, el espécimen debe ser un trozo cortado de una pared de la unidad. El trozo debe tener una proporción de altura a espesor de 2 a 1, antes de practicar el refrentado, y una proporción de longitud a espesor de 4 a 1. La resistencia a la compresión del trozo se considera como la resistencia a la compresión del área neta de la unidad completa.

2.3 REFRENTADO DE LOS ESPECÍMENES DE ENSAYO

2.3.1 Las superficies de soporte se referían por uno de los métodos presentados en los numerales 2.3.2 y 2.3.3.

2.3.2 Azufre y materiales granulares. Se utiliza una mezcla comercial o se elabora en el laboratorio, una mezcla de 40% a 60% de azufre y el resto de arcilla cocida molida u otro material inerte adecuado, que pase por el tamiz 150 μm (No. 100), con o sin la adición de un plastificante. La mezcla se esparce uniformemente sobre una superficie no absorbente, impregnada ligeramente con aceite no contaminado (véase la Nota 3), o recubierta con una capa de teflón. Se calienta la

mezcla de azufre en un recipiente controlado termostáticamente, a una temperatura suficiente para mantener la fluidez de la mezcla durante un período razonable, después del contacto de ésta con la superficie por refrentar. Es necesario evitar el sobrecalentamiento de la mezcla y revolver el líquido en el recipiente antes de usarlo. La superficie para el refrentado debe ser plana, con una tolerancia de 0,08 mm en 400 mm debe ser lo suficientemente rígida y estar apoyada de tal manera que no se flexione, de forma medible, durante la operación de recubrimiento. Se colocan cuatro barras de acero, de sección cuadrada de 25 mm de lado, sobre la superficie para el refrentado, de manera que se forme un molde rectangular, aproximadamente 10 mm más grande que el espécimen, en cualquiera de sus dimensiones internas. Se llena el molde con la mezcla de azufre derretida, hasta una profundidad de 7 mm. La superficie del espécimen que se va a refrentar, se pone en contacto con el líquido rápidamente y se introduce en él, sosteniendo el espécimen de tal manera que su eje vertical quede en ángulo recto con la superficie del líquido de refrentado. Se deja el espécimen en reposo hasta que la solidificación sea completa. Los refrentados se dejan enfriar durante 2 h como mínimo, antes del ensayo de los especímenes. No se permite resanar los refrentados; los refrentados imperfectos se deben retirar y reemplazar por nuevos.

Nota 3. Se puede omitir el uso de aceite sobre las placas de refrentado, si la placa y el espécimen se pueden separar fácilmente sin dañar dichos refrentados.

2.3.3 Refrentado con yeso de estucar. Se esparce uniformemente una pasta pura de agua y yeso de estucar de alta resistencia (véase la Nota 4), sobre una superficie no absorbente, untada ligeramente con aceite o recubierta con una capa de teflón. Cuando se adiciona agua para alcanzar la consistencia necesaria para el refrentado el yeso de estucar a las 2 h, debe tener una resistencia a la compresión, de 24 MPa mínimo, al ensayarlo en cubos de 50 mm. La superficie de la placa para el vaciado del yeso deberá cumplir con los requisitos descritos en el numeral 5.3.2. La superficie del espécimen que se va a refrentar se pone en

contacto con la pasta; se presiona firmemente el espécimen con un solo movimiento, sosteniéndolo de manera que su eje vertical quede en ángulo recto con la superficie de refrentado. El espesor promedio del refrentado debe ser de de 3 mm máximo. No se permite resanar los refrentados; los refrentados imperfectos se deben retirar y reemplazar por nuevos. Los refrentados se dejan madurar 2 h, como mínimo, antes de ensayarlos especímenes.

Nota 4. Los siguientes yesos se consideran apropiados para este ensayo: "Hidrostone" e "Hidrocal White". No se deben utilizar otros yesos, a menos que, mediante ensayos, se compruebe que cumplen los requisitos de resistencia

2.4 PROCEDIMIENTO

2.4.1 Posición de los especímenes

Los especímenes se ensayan con los centroides de sus superficies de soporte alineados verticalmente con el centro de aplicación de carga del bloque con soporte esférico de la máquina de ensayo (véase la Nota 5). Excepto para unidades especiales que se vayan a utilizar con sus perforaciones en dirección horizontal, todas las unidades de concreto para mampostería se ensayan con sus celdas en posición vertical. Las unidades de mampostería que son 100 % sólidas y las unidades perforadas especiales para uso con sus celdas en dirección horizontal, se ensayan en la misma posición que se vayan a tener durante el servicio (posición normal).

Nota 5. Para materiales homogéneos se puede considerar, que el centroide de la superficie de soporte coincide verticalmente con el centro de gravedad del espécimen.

2.4.2 Velocidad del ensayo

La carga se aplica hasta la mitad de la carga máxima esperada a una tasa adecuada; posteriormente se ajustan los controles de la máquina para proporcionar una tasa uniforme de desplazamiento de la cabeza móvil de la máquina de ensayo, de manera que el resto de la carga se aplique durante mínimo 1 min y máximo 2 min.

2.4.3 Se registra la carga de compresión máxima en newton como $C_{\text{máx}}$ Carga máxima.

3. ABSORCION

3.1 Materiales

- Estufa eléctrica.
- Balanza, debe tener una sensibilidad del 0,5 % del peso del espécimen más pequeño del ensayo.

3.2. PROCEDIMIENTO

3.2.1 Saturación

Se sumergen los especímenes de ensayo en agua, a una temperatura entre 15⁰C y 27⁰C, durante 24 h. los especímenes se pesan sumergidos en agua, suspendidos mediante un alambre. Se retiran del agua y se dejan escurrir durante 1 min colocándolos sobre una malla metálica con aberturas de mínimo 9,5 mm; se seca el agua superficial con un paño seco y se pesan inmediatamente.

3.2.2 Secado

Después del proceso de saturación, se secan los especímenes en un horno ventilado, a una temperatura entre 100⁰C y 115⁰C durante mínimo 24 h, hasta que en dos pesajes sucesivos, a intervalos de 2 h, el espécimen no presente pérdidas en su peso mayor del 0,2 % con respecto al paso anterior.

3.3 CÁLCULOS

3.3.1 Absorción de agua

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Aa (\%) = [(Mh - Ms) / Ms] * 100$$

donde:

Mh = masa saturada del espécimen en g.

Ma = masa del espécimen inmerso en agua y suspendidas, en g.

Ms = masa seca del espécimen, en g.

3.3.2. Contenido de humedad

Se determina mediante la ecuación:

$$H (\%) = [(Mm-Ms)/(Mh-Ms)]*100$$

Donde:

Mm = masa del espécimen, tal como se tomó en el muestreo, en g.

Ms = masa seca del espécimen, en g.

Mh = masa saturada del espécimen en g.

3.3.3 Densidad

Se determina mediante la ecuación:

$$D (\text{Kg/m}^3) = [Ms/(Mh-Ma)]*1000$$

Donde:

Ms = masa seca del espécimen, en g.

Mh = masa saturada del espécimen en g.

Ma = masa del espécimen inmerso en agua y suspendidas, en g.

Nota 6. Todos los cálculos deben hacerse utilizando mm como unidad de longitud y g como unidad de masa. La calcular la absorción, la densidad y la masa de lastre, se presenta una fórmula alterna para presentarlas en kg/m³.

ANEXO D. POROSIDAD APARENTE POR EL MÉTODO DE ARQUIMEDES

NORMA ICONTEC 674

Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la porosidad aparente (poros permeables al agua en ebullición) y la densidad aparente de materiales refractarios premoldeados y no atacados o desmenuzados por agua en ebullición.

Materiales

- Estufa eléctrica.
- Balanza de capacidad apropiada y con sensibilidad de 0,1 g.

Procedimiento

A cada muestra de ensayo se le quitan, mediante la acción de un cepillo de acero, las partículas que no estén adheridas y se descartan las muestras visiblemente defectuosas (con fisuras, lafoliadas, con incrustaciones de cuerpos extraños).

Cada muestra se seca en estufa entre 105°C y 110°C hasta peso constante. Se dejan enfriar a temperatura del laboratorio y se registra el peso seco con precisión de 0,1 g.

Se colocan las muestras en un recipiente con agua potable y se hierven durante 2 h. Durante este periodo, las muestras deben estar completamente sumergidas y no tocar el fondo del recipiente que las contiene. Después se enfrían a temperatura ambiente, dejándolas sumergidas en el agua durante 3 h como mínimo. El proceso de enfriamiento se puede acelerar circulando agua potable y fría en el recipiente.

Para cada muestra de ensayo, del paso anterior se determina el peso suspendido en agua con precisión de 0,1 g, suspendiéndola mediante un alambre de cobre de uno de los brazos de la balanza. La balanza debe equilibrarse previamente con el alambre sumergido en el agua a la misma profundidad que cuando se coloca la muestra.

Se retiran las muestras del agua, si se han desprendido trozos o partículas de material. Se secan suavemente con un trapo de algodón o lino húmedo, a fin de quitar únicamente el agua libre de la superficie.

La operación de la eliminación del exceso de agua debe hacerse con cuidado para no quitar el agua contenida en los poros del material. Luego se registra, con precisión de 0,1 g, el peso de cada muestra saturada con agua y de superficie húmeda.

Nota. Si en el tratamiento de las muestras con agua de ebullición se desprenden partículas o pequeños trozos de material, las muestras se secan en estufa entre 105°C y 110°C hasta peso constante y nuevamente se registra, con precisión de 0,1 g. Este nuevo peso es el que se utiliza en los cálculos.

CÁLCULOS

Volumen Aparente

Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_a = G_a - G_s$$

Donde:

V_a = Volumen Aparente en cm^3

G_a = Peso de la muestra con agua, de superficie húmeda, en gramos.

G_s = Peso suspendido en agua de la muestra saturada con agua, expresado en gramos.

Volumen Aparente en Agua

Se determina mediante la ecuación:

$$V_{aa} = G - G_s$$

Donde:

V_{aa} = Volumen aparente en agua, en cm^3 .

G = Peso de muestra seca, expresado en gramos.

G_s = Peso suspendido en agua de la muestra saturada con agua, expresado en gramos.

Porosidad Aparente

Se determina mediante la ecuación:

$$P_a = \frac{G_a - G}{V_a} \times 100$$

Donde:

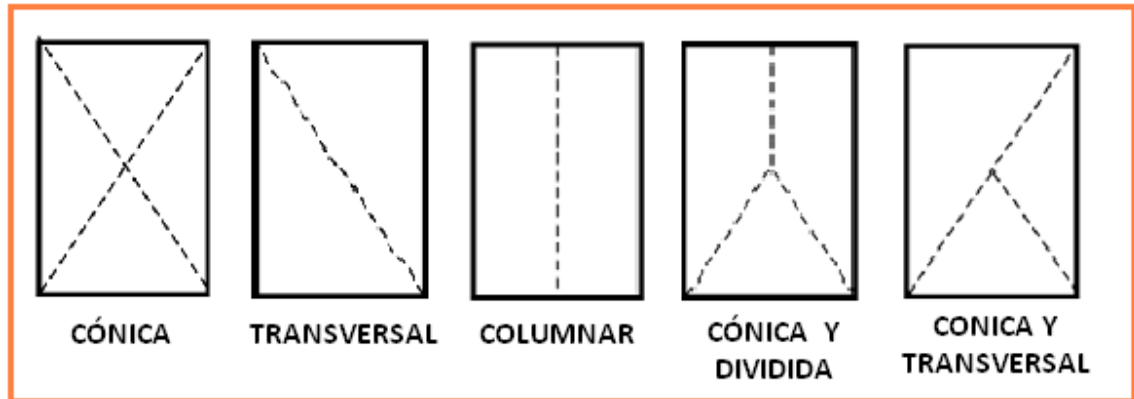
P_a = Porosidad aparente en porcentaje.

V_a = Volumen Aparente en cm^3

G_a = Peso de la muestra con agua, de superficie húmeda, en gramos.

G = Peso de muestra seca, expresado en gramos.

ANEXO E. PATRONES DE AGRIETAMIENTO TÍPICOS PARA CILINDROS ENSAYADOS A COMPRESIÓN



Cónica: Se presenta cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparado.

Transversal: Se presenta comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran en el límite de desviación (perpendicularidad) tolerada especificada de $0,5^\circ$.

Columnar: Se presenta en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y deficiencia del material de refrentado; también por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.

Cónica y dividida: Se presenta en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y deficiencias del material de refrentado o rugosidades del plato de refrentado.

Cónica y transversal: Se presenta cuando las caras de aplicación de carga del espécimen están ligeramente fuera de las tolerancias de paralelismo establecidas o por ligeras desviaciones en el centrado del espécimen con respecto al eje de carga de la máquina.