

**INCORPORACIÓN DE ESCORIA DE COQUE Y CENIZA DE CÁSCARA DE  
ARROZ COMO AGREGADOS EN MORTEROS**

**LEIDY PAOLA DURAN PLAZAS**

**JUAN CAMILO ORDOÑEZ SIERRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**INCORPORACIÓN DE ESCORIA DE COQUE Y CENIZA DE CÁSCARA DE  
ARROZ COMO AGREGADOS EN MORTEROS**

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de:  
Ingeniero Químico

**LEIDY PAOLA DURAN PLAZAS**

**JUAN CAMILO ORDOÑEZ SIERRA**

Directores:

**Ph.D. JOSÉ ANTONIO HENAO MARTÍNEZ**

**M.Sc. JAVIER ENRIQUE GÓMEZ RAMÍREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	13
1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	20
1.1 MATERIALES Y REACTIVOS.....	20
1.2 ADECUACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	20
1.2.1 Calcinación de la cáscara de arroz .....	20
1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....	21
1.3.1 Granulometría .....	21
1.3.2 Contenido de materia orgánica en la arena.....	21
1.3.3 Análisis químico elemental por Fluorescencia de Rayos X .....	22
1.3.4 Reactividad puzolánica .....	22
1.3.5 Absorción de agua .....	23
1.4 DISEÑO DE MEZCLA I .....	23
1.5 EVALUACIÓN MECÁNICA DE COMPRESIÓN I .....	23
1.6 DISEÑO DE MEZCLA II .....	25
1.7 EVALUACIÓN MECÁNICA DE COMPRESIÓN II .....	25
1.8 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA SULFATACIÓN .....	26
2. RESULTADOS Y ANALISIS.....	27
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....	27
2.1.1 Granulometría .....	27
2.1.2 Contenido de materia orgánica en la arena.....	27
2.1.3 Análisis químico elemental de la escoria de coque por FRX.....	28
2.1.4 Reactividad puzolánica .....	29
2.1.5 Absorción de agua .....	31

2.2	EVALUACIÓN MECÁNICA EN COMPRESIÓN .....	31
2.2.1	Diseño de mezcla I .....	31
2.2.2	Diseño de mezcla II .....	33
2.2.3	Resistencia a la compresión de los diseños de mezcla I y II .....	35
2.3	RELACIÓN ENTRE COMPORTAMIENTO MÁSSICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	35
2.4	EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA SULFATACIÓN .....	36
2.4.1	Análisis cualitativo .....	37
2.4.2	Análisis cuantitativo .....	38
2.4.3	Análisis por Difracción de Rayos X .....	39
3.	CONCLUSIONES.....	42
4.	RECOMENDACIONES .....	43
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
	BIBLIOGRAFÍA.....	48
	ANEXOS.....	49

## LISTADO DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología de la investigación.	16
Figura 2. Placa orgánica de colores Gardner.	18
Figura 3. Prensa hidráulica para el ensayo de compresión.	20
Figura 4. Prueba colorimétrica del agregado fino.	23
Figura 5. Reactividad puzolánica de la escoria de coque y la ceniza de cáscara de arroz.	24
Figura 6. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla I.	26
Figura 7. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla II.	28
Figura 8. Resistencia a la compresión del mortero tradicional y de los diseños de mezcla I y II a los 28 días.	29
Figura 9. Comportamiento másico del mortero tradicional y de los diseños de mezcla I y II a los 28 días.	30
Figura 10. Resultado del proceso de sulfatación finalizados los 6 ciclos de inmersión del mortero tradicional.	31
Figura 11. Resultado del proceso de sulfatación finalizados los 6 ciclos de inmersión del mortero con 5% de escoria y 5% de ceniza.	31

Figura 12. Variación porcentual másica del proceso de sulfatación durante los 6 ciclos de inmersión.	32
Figura 13. Proceso de calcinación de la cáscara de arroz.	45
Figura 14. Equipos empleados para el proceso de tamizado de los agregados.	46
Figura 15. Instrumentos empleados para la determinación de impurezas.	48
Figura 16. Proceso de determinación de absorción de agua de los agregados.	50
Figura 17. Determinación del contenido de cemento del mortero.	53
Figura 18. Determinación de la relación agua cemento del mortero.	54

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cantidad de reactivos empleados en el diseño de mezcla I.	19
Tabla 2. Cantidad de reactivos empleados en el diseño de mezcla II.	21
Tabla 3. Módulos de finura de los diseños de mezcla I y II.	22
Tabla 4: Resultados del análisis químico elemental FRX.	24
Tabla 5. Porcentaje de absorción de agua de los agregados.	25
Tabla 6. DRX para mortero tradicional antes de la sulfatación.	33
Tabla 7. DRX para mortero tradicional después de la sulfatación.	33
Tabla 8. DRX para mortero 5% escoria 5% ceniza antes de la sulfatación.	34
Tabla 9. DRX para mortero 5% escoria 5% ceniza después de la sulfatación.	34
Tabla 10. Mineralogía general del cemento Portland.	43
Tabla 11. Diámetro de abertura de acuerdo al número de tamiz.	47
Tabla 12. Granulometría arena de río.	60
Tabla 13. Granulometría 95% arena de río – 5% escoria de coque.	60

Tabla 14. Granulometría 85% arena de rio – 15% escoria de coque.	61
Tabla 15. Granulometría 75% arena de rio – 25% escoria de coque.	61
Tabla 16. Granulometría 90% arena – 5% escoria – 5% ceniza.	62
Tabla 17. Granulometría 80% arena – 5% escoria – 15% ceniza.	62
Tabla 18. Granulometría 70% arena – 5% escoria – 25% ceniza.	63
Tabla 19. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla I.	68
Tabla 20. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla II.	69
Tabla 21. Masa de las muestras.	70

## LISTADO DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Mineralogía y reacciones de hidratación del cemento portland.	43
Anexo B. Calcinación de la cáscara de arroz.	45
Anexo C. Caracterización física de los agregados arena y escoria de coque.	46
Anexo D. Determinación de las impurezas orgánicas en agregado fino.	48
Anexo E. Metodología de determinación de la absorción de agua.	50
Anexo F. Diseño de mezcla del mortero.	52
Anexo G. Protocolo experimental de sulfatación.	59
Anexo H. Tablas granulométricas.	60
Anexo I. Resultados de la prueba de reactividad puzolánica.	64
Anexo J. Determinación de la absorción de agua de los agregados.	66
Anexo K. Comportamiento mecánico a la compresión.	68
Anexo L. Comportamiento másico.	70

## RESUMEN

**TÍTULO:** INCORPORACIÓN DE ESCORIA DE COQUE Y CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ COMO AGREGADOS EN MORTEROS\*

**AUTORES:** LEIDY PAOLA DURAN PLAZAS, JUAN CAMILO ORDOÑEZ SIERRA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** MORTERO, ESCORIA DE COQUE, CÁSCARA DE ARROZ, RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, ATAQUE POR SULFATACIÓN.

**DESCRIPCIÓN:** El mortero tradicional es una pasta que está formada por la mezcla de cemento, agua y arena como agregado fino. El cemento portland presenta una mineralogía de la cual se busca aprovechar el silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y ferrita aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) que al hidratarse con agua permite la formación de silicatos y aluminatos hidratados. Estos productos son los responsables de que exista una excelente adherencia entre las diferentes partes del mortero.

En la actualidad se generan una gran cantidad de residuos minerales y agrícolas que generan contaminación a mediano y largo plazo. Algunos de estos residuos pueden funcionar como sustituto parcial de algún agregado del mortero. Entre estos residuos se encuentran la escoria de coque y la ceniza de cascara de arroz, por lo cual se propone usarlos como agregado fino en el mortero tradicional para mejorar sus propiedades fisicomecánicas a medida que se mitiga el impacto ambiental causado por estas sustancias.

En el presente estudio se busca evaluar el efecto que tiene la incorporación de la escoria de coque y la ceniza de cascara de arroz en el mortero tradicional. Dicho efecto se evalúa de acuerdo a los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión, parámetro de vital importancia en la aplicación industrial del mortero. Sobre la muestra de mayor resistencia se aplica un ataque por sulfatación para determinar su comportamiento ante un ataque químico.

Como resultado se obtiene que al incorporar 5% de escoria de coque y 5% de ceniza de cáscara de arroz la resistencia a la compresión aumenta considerablemente, además de presentar menor daño durante la prueba de sulfatación en comparación con el mortero tradicional.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

## SUMMARY

**TITLE:** ADDITION OF COKE SCUM AND ASH RICE HUSKS AS AGGREGATES IN MORTARS\*

**AUTHORS:** LEIDY PAOLA DURAN PLAZAS, JUAN CAMILO ORDOÑEZ SIERRA\*\*

**KEYWORDS:** MORTAR, SCUM OF COKE, RICE HUSKS, COMPRESSIVE STRENGTH, SULFATE ATTACK.

**DESCRIPTION:** The traditional mortar is a paste formed by mixing cement, water and sand as fine aggregate. Portland cement has a mineralogy that seeks to take advantage of tricalcium silicate (C3S), dicalcium silicate (C2S), tricalcium aluminate (C3A) and ferrite tetracalcium aluminate (C4AF) which upon hydration with water allows the formation of silicates and aluminates hydrated. These products are responsible for the excellent adhesion that exists between the different parts of the mortar.

Today a lot of mineral and agricultural waste are generated, polluting the environment in medium and long term. Some of these residues may function as a partial substitute for aggregate mortar. These residues are coke scum and ash rice husks, so it is proposed to use them as fine aggregate in the traditional mortar to improve their physical-mechanical properties as the environmental impact caused by these substances is mitigated.

In the present study is evaluated the effect of the incorporation of coke scum and ash rice husks in the traditional mortar. This effect is evaluated according to the results for compressive strength, the vital parameter in industrial application of the mortar. On the sample of greater resistance, sulfate attack is applied to determine the behavior under chemical attack.

As a result, the compressive strength increases considerably incorporating 5% of coke scum and 5% of ash rice husks, besides it presents less damage during sulfate test compared to traditional mortar.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School.

## INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras y agrícolas generan un crecimiento económico y social en las regiones donde se desarrollan. En Colombia, la producción de carbón y arroz representa el 66,60% del PIB minero y 55,00% del PIB agrícola, respectivamente.

Sin embargo, en la síntesis del coque y en la producción de arroz se generan residuos sólidos que, al no ser manipulados de forma adecuada, producen problemas de tipo ambiental y de salud pública. Por esta razón, para la escoria del proceso de coquización del carbón y la cáscara producida durante el trillado de arroz se requiere una gestión integral adecuada de estos residuos.

El manejo de la escoria de coque y de la cáscara de arroz ha sido estudiado por diferentes autores en la literatura. Algunos de ellos sugirieron el desarrollo de un mortero de construcción empleando diferentes mezclas con escoria de coquización, como sustituto parcial del agregado fino, concluyendo la importancia de la granulometría en función de la resistencia mecánica del mortero.

Por su parte, el uso de la cáscara de arroz como combustible para la generación de energía puede convertirse en una alternativa ecológica, mientras su ceniza ha sido empleada en diferentes investigaciones dependiendo de la procedencia y la calidad. Ejemplo de esto es la incorporación de la ceniza de la cáscara de arroz como relleno

en polímeros, principalmente en el polipropileno, para mejorar las propiedades reológicas y el módulo de almacenamiento.

Así mismo, la ceniza de cáscara de arroz ha sido utilizada como un material eficiente para la purificación de biodiesel, adsorbiendo las impurezas orgánicas e inorgánicas. Adicionalmente, existen estudios que afirman la posibilidad de usar la ceniza como reemplazo parcial del cemento Portland en los morteros.

Como se puede observar, los dos residuos industriales pueden ser utilizados como sustitutos parciales de los componentes de los morteros de construcción, con el objetivo de modificar sus propiedades mecánicas. Un mortero se define como una mezcla homogénea entre un material cementante (cemento Portland), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos.

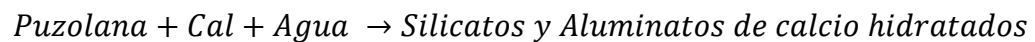
El cemento Portland tiene una composición mineralógica que permite aprovechar el silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y la ferrita aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). Estos compuestos reaccionan al contacto con agua para producir principalmente silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio y sulfoaluminatos de calcio hidratados. Dichas reacciones se presentan de manera detallada en el Anexo A.

Estos productos de reacción forman cristales alargados, prismáticos o en agujas, los cuales se entrelazan a medida que avanza el proceso de hidratación, dando lugar a una estructura que garantizará la resistencia y las propiedades químicas y físicomecánicas de la pasta.

Por otra parte, el agregado o relleno es un material inerte de forma granular, que representa entre el 50 y el 80% del volumen total de mortero. Este material es el responsable de las principales características físicas y químicas del mortero, tanto en estado plástico como en estado sólido. Uno de los agregados más comúnmente utilizados en la actualidad es la arena; sin embargo, existen materiales denominados agregados no convencionales, cuya actividad se encuentra en virtud de sus propiedades hidráulicas, ayudando a la resistencia mecánica.

Los agregados no convencionales son considerados materiales puzolánicos, es decir, materiales silíceos y aluminosos que no presentan características cementosas por sí mismas, pero que pueden adquirirlas cuando reaccionan con hidróxido de calcio a temperatura ordinaria y en presencia de agua.

Generalmente los materiales puzolánicos presentan un alto contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y/o alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en estado vítreo, caracterizados por su baja cristalinidad. Estos compuestos reaccionan con agua e hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), más conocido como cal, para generar silicatos y aluminatos de calcio hidratados como se observa en la ecuación:



Como se puede ver, los productos de esta reacción son muy similares a los productos de la reacción del cemento Portland, por lo cual existe la posibilidad de que la presencia de los agregados no convencionales favorezca a las propiedades químicas y físico-mecánicas del mortero.

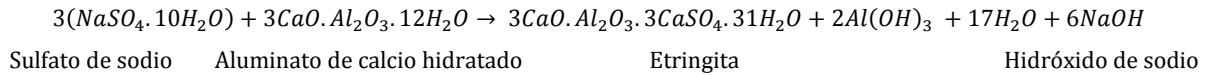
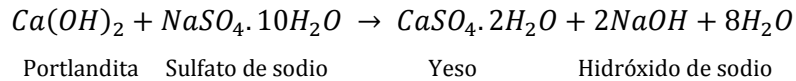
Uno de los agregados no convencionales que pueden ser empleados para modificar las propiedades del mortero es la ceniza de la cáscara de arroz, la cual es considerada una puzolana artificial cuando se lleva a cabo la combustión de este residuo bajo condiciones determinadas de temperatura, aportando su contenido de sílice amorfa de aproximadamente 90%

Una de las propiedades de mayor interés en los morteros es la resistencia a la compresión, la cual se define como la máxima resistencia a la carga axial que presenta dicho material a una edad de 28 días, expresado en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{Kg/cm}^2$ ), megapascales (MPa) o en libras por pulgadas cuadradas ( $\text{lb/pulg}^2$  o psi).

A partir de una magnitud establecida para la resistencia a la compresión se desarrolla el diseño de mezcla del mortero, el cual involucra factores como el contenido de cemento, el contenido de agua y el módulo de finura de los agregados. La medida de la resistencia a la compresión permite demostrar la efectividad del diseño de mezcla.

Adicionalmente a la medición de la resistencia a la compresión del mortero también se evalúa el deterioro por agentes químicos externos tales como los sulfatos. Cuando un mortero de cemento Portland se encuentra expuesto a las sales de sulfato, usualmente presentes en los efluentes y desechos industriales asociados a la fabricación de químicos, baterías y a la actividad minera, los iones de sulfato se mueven a través del sistema de poros de la estructura y reaccionan con los compuestos químicos de la pasta del cemento hidratado, formando productos expansivos que causan el deterioro del mortero.

Uno de los sulfatos que usualmente causa daños en el mortero es el sulfato de sodio, de acuerdo a las reacciones:



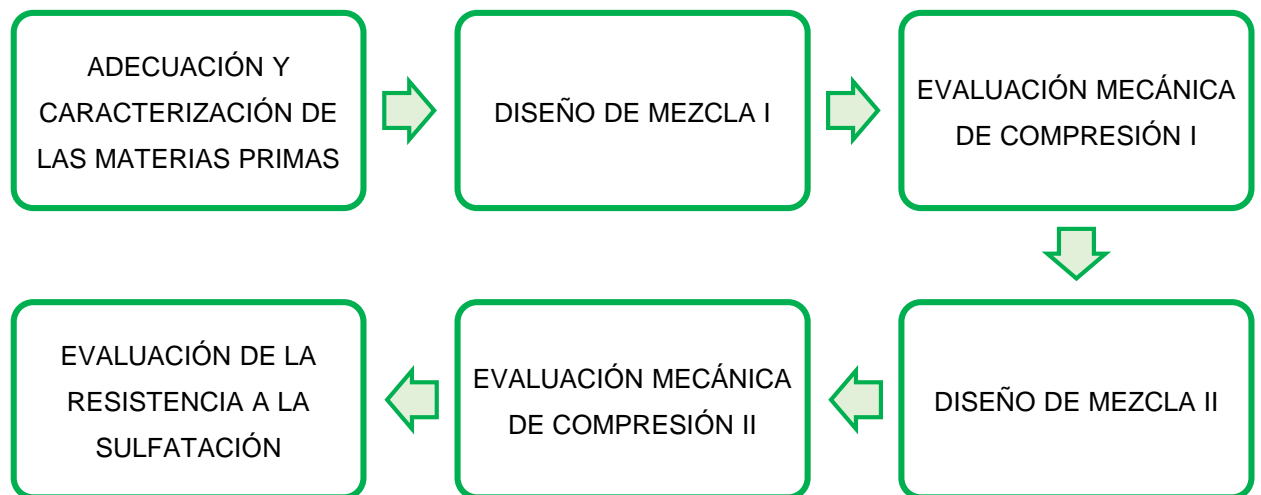
La primera reacción consiste en la formación de yeso a partir de la Portlandita (hidróxido de calcio) en presencia del sulfato de sodio, lo cual produce la expansión y pérdida de cohesión de la pasta de mortero. Por su parte, la segunda reacción consiste en la formación de etringita a partir de aluminato de calcio y sulfato de sodio, lo cual causa un aumento de volumen de la estructura y su posterior fisuración.

Así, en la presente investigación se propone realizar un aporte a la mitigación del impacto ambiental y de salud pública, aprovechando la escoria de coque y la cáscara de arroz para sustituir parcialmente el agregado fino en el mortero, determinando el porcentaje de incorporación más apropiado y evaluando la resistencia a la compresión y la respuesta a la sulfatación.

## 1. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La Figura 1 muestra las etapas desarrolladas durante la presente investigación.

Figura 1. Metodología de la investigación.



### 1.1 MATERIALES Y REACTIVOS

Los materiales empleados para la síntesis del mortero fueron: cemento portland tipo I sin aire; arena de río con módulo de finura de 3.4 como agregado fino, densidad de 2375 kg/m<sup>3</sup> y porcentaje de absorción de agua de 1,54%; escoria del proceso de coquización con porcentaje de absorción de 1,86%; cáscara de arroz y agua.

### 1.2 ADECUACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

**1.2.1** Calcinación de la cáscara de arroz: La calcinación controlada se realizó en una mufla localizada en el laboratorio de Operaciones Unitarias y Procesos de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander. El tiempo total de la calcinación fue de 4 horas y 20 minutos, en un intervalo de temperatura

desde 300 °C hasta 650 °C con un aumento de 100 °C cada hora. El proceso se lleva a cabo sin exceder los 700 °C, garantizando la formación de sílice amorfa dentro de la ceniza de cáscara de arroz. Los cálculos y la curva de temperatura del proceso se presentan en el Anexo B.

### **1.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS**

**1.3.1 Granulometría:** En el Anexo C se muestra el proceso empleado para establecer el módulo de finura de las diferentes mezclas de arena, escoria de coque y ceniza de cáscara de arroz a partir de la granulometría. El módulo de finura fue utilizado como parámetro previo para el diseño de mezcla, basado en las especificaciones estándar presentes en la norma NTC 174 para los agregados.

**1.3.2 Contenido de materia orgánica en la arena:** La arena empleada como agregado fino para morteros no debe contener materia orgánica, dado que ésta no permite el desarrollo eficaz de las reacciones del cemento con el agua en la síntesis del mortero. Por esta razón, en el Anexo D se presenta la metodología establecida en la norma NTC 127 para determinar cualitativamente la presencia de material orgánico en el agregado fino.

Esta metodología consistió en colocar el agregado fino en una solución de hidróxido de sodio por un periodo de 24 horas. Transcurrido este tiempo se realizó la evaluación colorimétrica, que se basó en comparar el color de la solución obtenida con la placa orgánica de colores Gardner que se muestra en la Figura 2. El tono estándar para una muestra adecuada es el N°3; así, un tono más oscuro significa que dicha muestra contiene impurezas orgánicas perjudiciales y no debe ser usada.

**1.3.3** Análisis químico elemental por Fluorescencia de Rayos X: La muestra de escoria de coque fue analizada empleando el equipo Bruker D8 Tiger del laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander. Este análisis permite conocer la composición y concentración química elemental de la escoria.

Figura 2. Placa orgánica de colores Gardner.



**1.3.4** Reactividad puzolánica: Para conocer la actividad puzolánica de la escoria de coque y de la ceniza de la cáscara de arroz, se adecuó el método denominado “consumo de cal” desarrollado en el Laboratorio de Análisis Industriales de la Universidad Industrial de Santander. El método consistió en la preparación de dos mezclas, cada una de ellas con 25 mL de una solución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a 40 °C y 2,5 g de escoria de coque o ceniza de cáscara de arroz, respectivamente.

Estas mezclas se mantuvieron en recipientes cerrados a 40°C, y de cada una de ellas fue tomada una muestra después de 1, 3, 4 y 8 días para ser analizadas mediante filtración y titulación, la cual se realizó con indicador naranja de metilo y HCl de concentración 0,0204 M.

**1.3.5 Absorción de agua:** El procedimiento que se muestra en el Anexo E se realizó de acuerdo a la norma NTC 237, y permitió determinar el porcentaje de absorción de agua de la escoria de coque y de la ceniza de cáscara de arroz.

#### **1.4 DISEÑO DE MEZCLA I**

Los cálculos realizados para determinar la cantidad de cemento Portland tipo I sin aire, arena de río, escoria de coque y agua para cada uno de los morteros se presentan en el Anexo F y se resumen en la Tabla 1. Los porcentajes mostrados corresponden al porcentaje en peso de arena que se sustituye por escoria de coque. De cada mortero se realizaron 3 réplicas que garanticen la validez de los resultados.

Tabla 1. Cantidad de reactivos empleados en el diseño de mezcla I.

<b>ESCORIA DE COQUE [%]</b>	<b>CEMENTO [g]</b>	<b>ARENA [g]</b>	<b>ESCORIA [g]</b>	<b>AGUA [g]</b>
0	90,55	300,90	0,00	49,00
5	90,55	285,85	15,05	49,00
15	90,55	255,75	45,15	49,00
25	90,55	225,65	75,25	49,00

#### **1.5 EVALUACIÓN MECÁNICA DE COMPRESIÓN I**

El estudio de compresión de los morteros del diseño de mezcla I se realizó en la prensa hidráulica ubicada en el laboratorio Álvaro Beltrán Pinzón, adscrito a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander que se muestra

en la Figura 3. El montaje de las muestras se hace en cumplimiento con la norma NTC 673.

El método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a las probetas a una velocidad establecida por el equipo hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión se calcula como la carga máxima alcanzada durante el ensayo dividida entre el área de la sección transversal de la probeta. Las unidades utilizadas para la carga fueron Newton [N], mientras las unidades de área fueron [m<sup>2</sup>]. Este ensayo se realizó a los 7, 14 y 28 días de curado para cada mortero.

Figura 3. Prensa hidráulica para el ensayo de compresión.



A partir de los resultados de este ensayo se determina el porcentaje óptimo de escoria de coque como sustituto del agregado fino, siendo éste el porcentaje para el cual la probeta presente una mayor resistencia a la compresión.

## 1.6 DISEÑO DE MEZCLA II

En el diseño de mezcla II se realizó la sustitución del agregado fino por ceniza de cáscara de arroz en porcentajes peso de 5, 15 y 25. La cantidad de reactivos empleada para cada mortero se calcularon en el Anexo F y se resumen en la Tabla 2. El porcentaje óptimo de escoria de coque establecido en el ensayo de resistencia realizado anteriormente se mantiene constante para todos los morteros del diseño de mezcla II. El porcentaje mostrado para cada mortero corresponde a la cantidad de arena que se sustituye por ceniza de cáscara de arroz.

Tabla 2. Cantidad de reactivos empleados en el diseño de mezcla II.

<b>CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ [%]</b>	<b>CEMENTO [g]</b>	<b>ARENA [g]</b>	<b>ESCORIA [g]</b>	<b>CENIZA [g]</b>	<b>AGUA [g]</b>
5	90,55	270,80	15,05	15,05	49,00
15	90,55	240,70	15,05	45,15	49,00
25	90,55	210,60	15,05	75,25	49,00

## 1.7 EVALUACIÓN MECÁNICA DE COMPRESIÓN II

Este ensayo se aplicó sobre los morteros del diseño de mezcla II, y la metodología empleada es igual que en el numeral 1.5 “Evaluación Mecánica de Compresión I”. Los resultados de este ensayo de compresión II permitieron determinar el porcentaje óptimo de ceniza de cáscara de arroz como sustituto del agregado fino, equivalente al porcentaje para el cual la probeta presente mayor resistencia a la compresión.

## **1.8 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA SULFATACIÓN**

El ataque químico con sulfato de sodio fue realizado únicamente para el diseño de mezcla II con la mayor resistencia a la compresión. El protocolo de sulfatación consistió en la inmersión de la probeta de mortero en una solución de sulfato de sodio anhídrido de concentración 80 g/L, con el fin de evaluar y caracterizar los cambios observados en este una vez concluidos 6 ciclos de inmersión de 2 días de duración cada uno. Los detalles de la metodología se presentan en el Anexo G.

El análisis por difracción de rayos X se realizó empleando el equipo Bruker D8 Advance que se encuentra en el laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

## 2. RESULTADOS Y ANALISIS

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

**2.1.1 Granulometría:** Este procedimiento permitió determinar el módulo de finura de las mezclas de agregado fino con escoria de coque y ceniza de cáscara de arroz. Los cálculos se presentan en el Anexo H y el resumen se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Módulos de finura de los diseños de mezcla I y II.

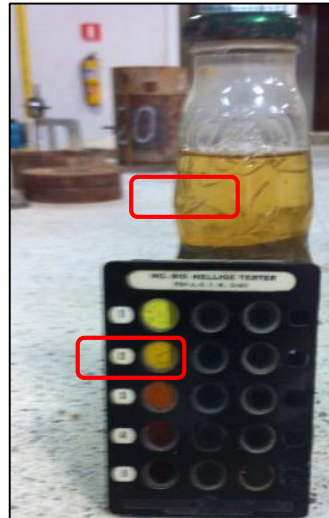
Diseño de mezcla	Agregado [%]			Módulo de finura
	Arena	Escoria	Ceniza	
I	100	0	0	3,4
	95	5	0	3,4
	85	15	0	3,4
	75	25	0	3,4
II	90	5	5	3,4
	80	5	15	3,2
	70	5	25	2,9

La disminución del módulo de finura que se presenta en las dos últimas muestras provoca un aumento en el contenido de cemento del mortero, y a su vez un aumento en el volumen de agua para cumplir la relación agua/cemento. Dado que el diseño de mezcla tiene como base 1 m<sup>3</sup> de mortero, la cantidad de agregado disminuye y puede causar que las propiedades mecánicas del mortero se modifiquen.

**2.1.2 Contenido de materia orgánica en la arena:** Esta evaluación reveló que la muestra presenta un tono semejante al N° 2 en la escala colorimétrica de Gardner,

como se muestra en la Figura 4. Esto indica que la arena no contiene impurezas orgánicas que impidan emplearla en la elaboración del mortero.

Figura 4. Prueba colorimétrica del agregado fino.



**2.1.3** Análisis químico elemental de la escoria de coque por FRX: En la Tabla 4 se presenta el análisis químico elemental FRX de la escoria de coque.

Estos resultados muestran la existencia de un alto contenido de silicio y aluminio en forma de óxidos ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Como se indicó anteriormente, los materiales puzolánicos presentan un gran contenido de estos dos compuestos, por lo cual es posible que la escoria de coque funcione como agregado sustituto de la arena [13].

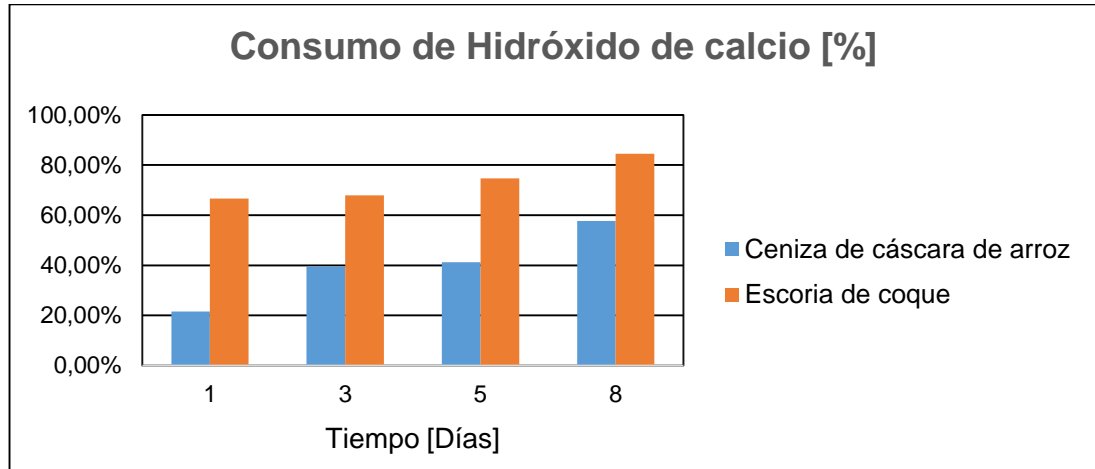
Adicionalmente, también se observa un gran contenido de materia orgánica, lo cual puede representar un problema durante la preparación de los morteros debido a que la materia orgánica no permite el desarrollo eficaz de las reacciones del cemento con el agua.

**2.1.4** Reactividad puzolánica: Los resultados de laboratorio obtenidos mediante este análisis se presentan en el Anexo I, y permiten comparar el comportamiento de actividad puzolánica de la escoria de coque y la ceniza de cáscara de arroz en solución saturada de hidróxido de calcio como se muestra en la Figura 5.

Tabla 4: Resultados del análisis químico elemental FRX.

<b>Elemento</b>	<b>Número atómico</b>	<b>Concentración</b>	<b>Óxido</b>	<b>Concentración [%w]</b>
Si	14	12,31%	SiO <sub>2</sub>	26,34%
Al	13	5,11%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,66%
Fe	26	2,35	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,36%
k	19	0,31%	K <sub>2</sub> O	0,34%
Ca	20	0,24%	CaO	0,34%
Ti	22	0,20%	TiO <sub>2</sub>	0,33%
Mg	12	20,00%	MgO	0,33%
Na	11	0,11%	Na <sub>2</sub> O	0,15%
S	16	0,05%	SO <sub>3</sub>	0,14%
V	23	0,03%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05%
Ba	56	0,02%	BaO	0,03%
P	15	0,02%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03%
Zr	40	0,01%	ZrO <sub>2</sub>	0,02%
Mn	25	0,01%	ZrO <sub>2</sub>	0,02%
Balance ( C,H,O)		.....	.....	58,80%

Figura 5. Reactividad puzolánica de la escoria de coque y la ceniza de cáscara de arroz.



Como se puede observar, la escoria de coque y la ceniza de cáscara de arroz presentan un consumo considerable de reactivo. Para la escoria de coque, el consumo de hidróxido de calcio en el primer día correspondió al 66,58% de la solución inicial y finalizó en 84,47% en el octavo día. Por su parte, la ceniza de cáscara de arroz tuvo un consumo inicial de 21,62% de hidróxido de calcio hasta alcanzar el 57,64% en el octavo día, indicando una menor actividad en comparación a la escoria de coque.

En esta gráfica se observa que la presencia de la escoria y la ceniza de cáscara de arroz generan una reacción con el hidróxido de calcio. Dicho compuesto es producido durante la hidratación del cemento, por lo cual es posible que reaccione con la escoria y la ceniza para obtener productos cementantes que contribuyan a la resistencia mecánica en compresión del mortero.

**2.1.5** Absorción de agua: Los resultados del análisis de absorción de agua se calculan en el Anexo J y se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Porcentaje de absorción de agua de los agregados.

<b>Material</b>	<b>% de absorción</b>
Arena	1,54%
Escoria de coque	1,86%
Ceniza de cáscara de arroz	4,51%

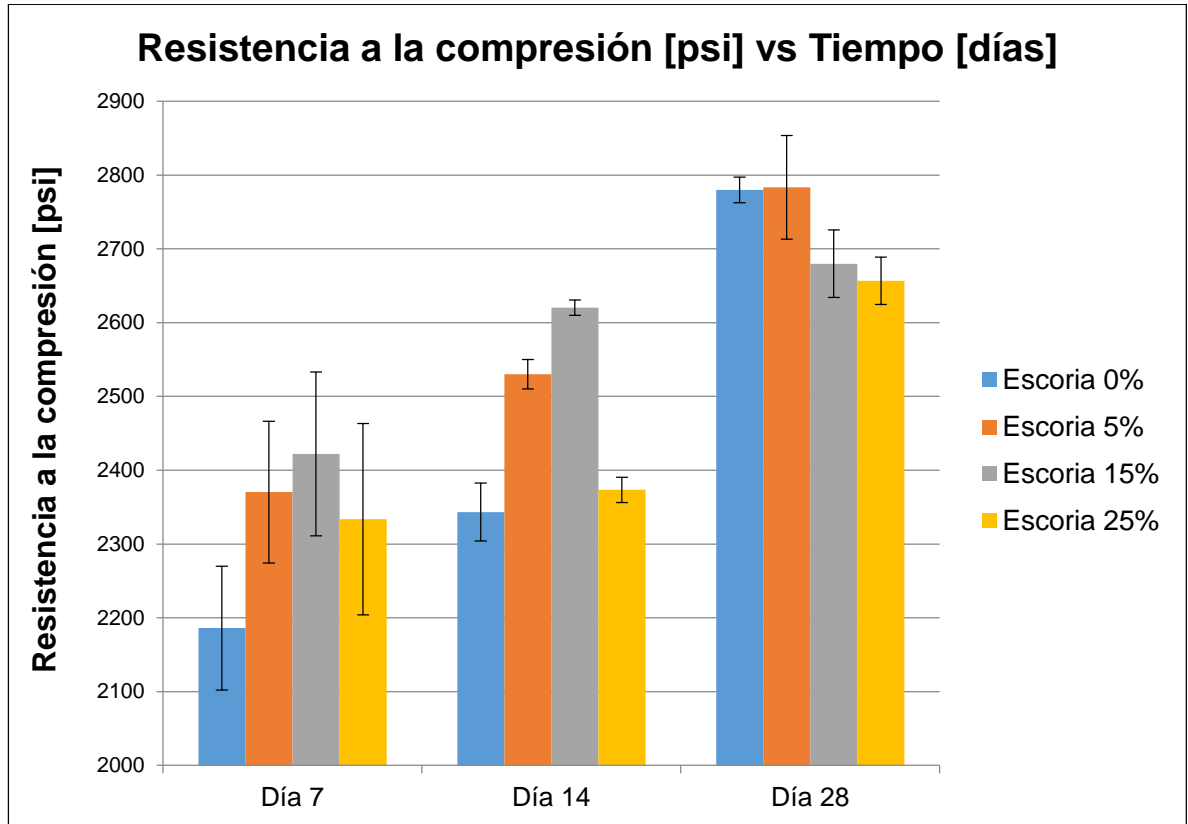
La escoria de coque y la ceniza de cáscara de arroz presentaron una absorción de agua mayor que el resultado obtenido para la arena. Esto indica que durante el proceso de fraguado los agregados tendrán un consumo relativamente mayor de agua. A medida que la cantidad de agua disponible para que el cemento disminuye se genera mayor cantidad de poros en el mortero, que pueden llegar a formar grietas internas y a disminuir la resistencia a la compresión.

## **2.2 EVALUACIÓN MECÁNICA EN COMPRESIÓN**

### **2.2.1** Diseño de mezcla I

En el Anexo K-Parte A se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para los morteros del diseño de mezcla I, evaluados a los 7, 14 y 28 días de curado, los cuales se presentan en la Figura 6.

Figura 6. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla I.



Como se puede observar, durante el tiempo de curado la resistencia a la compresión aumenta de forma progresiva para todos los morteros. Esto se debe a que a medida que avanzan las reacciones de hidratación del cemento, se presenta una mayor cantidad de productos cementantes, los cuales contribuyen a fortalecer la estructura aumentando la resistencia a la compresión.

En el día 28 se observa que el mortero con 5% de escoria de coque presenta una resistencia a la compresión ligeramente mayor que el mortero sin escoria, mientras aquellos con 15% y 25% tuvieron una resistencia considerablemente menor.

Es posible relacionar esta disminución de la resistencia con la mayor presencia de materia orgánica, ya que el cemento es un compuesto inorgánico que presenta fenómenos de inestabilidad frente a compuestos orgánicos, causando efectos negativos en los morteros como la pérdida de resistencia mecánica, ataque de sulfatos, asentamientos o dificultad en la manipulación del mortero fresco. La presencia de materia orgánica se atribuye a la escoria de coque, ya que el análisis químico elemental FRX de este reactivo indicó un contenido mayor al 50% de material orgánico.

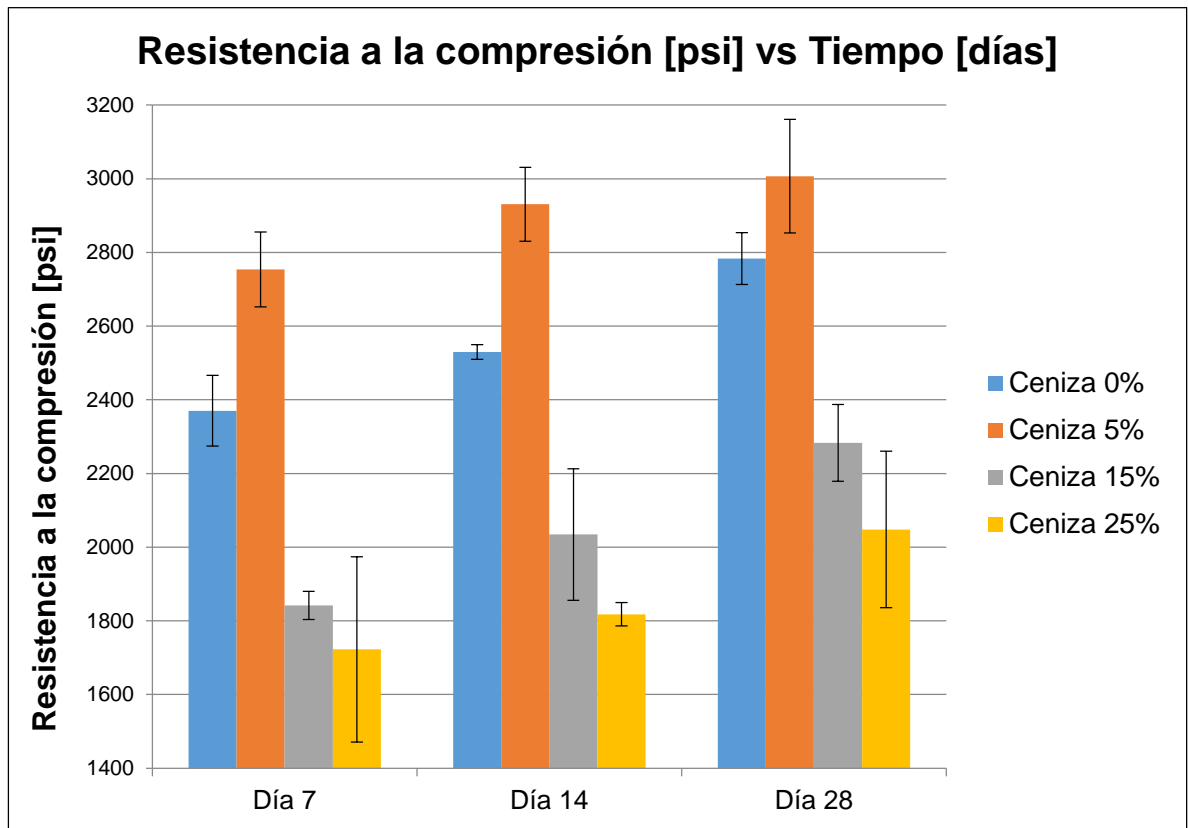
Así, de acuerdo a los resultados se puede afirmar que el contenido óptimo de escoria de coque corresponde al 5%, ya que es el mortero con mayor resistencia a la compresión. Este porcentaje se mantiene constante para la escoria de coque en el diseño de mezcla II, mientras se varía el porcentaje de ceniza de cáscara de arroz como sustituto del agregado fino.

### **2.2.2 Diseño de mezcla II:**

En el Anexo K-Parte B se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para los morteros del diseño de mezcla II, evaluados a los 7, 14 y 28 días de curado, los cuales se presentan en la Figura 7.

Tal como sucedió en el diseño de mezcla I, la resistencia a la compresión aumenta a medida que transcurre el tiempo de curado, ya que las reacciones del cemento avanzan progresivamente. Se puede observar que la incorporación de 5% de ceniza de cáscara de arroz al mortero genera un aumento de alrededor de 220 [psi] de resistencia a la compresión en comparación al mortero de mejores condiciones del diseño de mezcla I.

Figura 7. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla II.

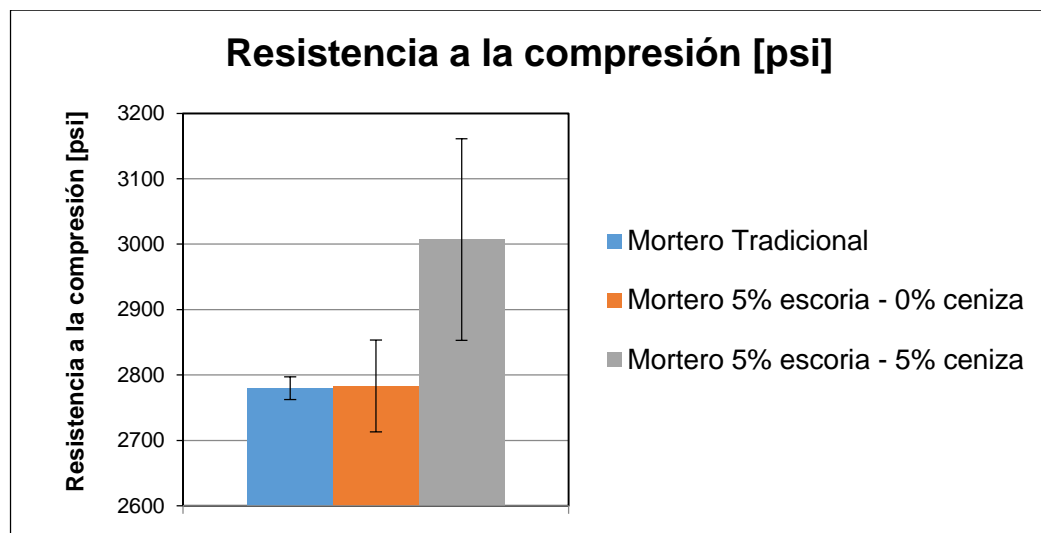


Por el contrario, la resistencia presentada por los morteros con 15% y 25% es notablemente menor, lo cual puede ser atribuido a la absorción de agua de la ceniza que es aproximadamente 3 veces mayor que la absorción de la arena. Así, la cantidad de agua disponible para las reacciones de hidratación del cemento disminuirá en presencia del agregado con mayores cantidades de ceniza, y esto conducirá a reducir la formación de los productos cementantes que le confieren al mortero su resistencia a la compresión.

### 2.2.3 Resistencia a la compresión de los diseños de mezcla I y II:

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos a los 28 días de curado, es posible determinar la variación en la resistencia a la compresión de los dos diseños de mezcla en comparación al mortero tradicional, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Resistencia a la compresión del mortero tradicional y de los diseños de mezcla I y II a los 28 días.

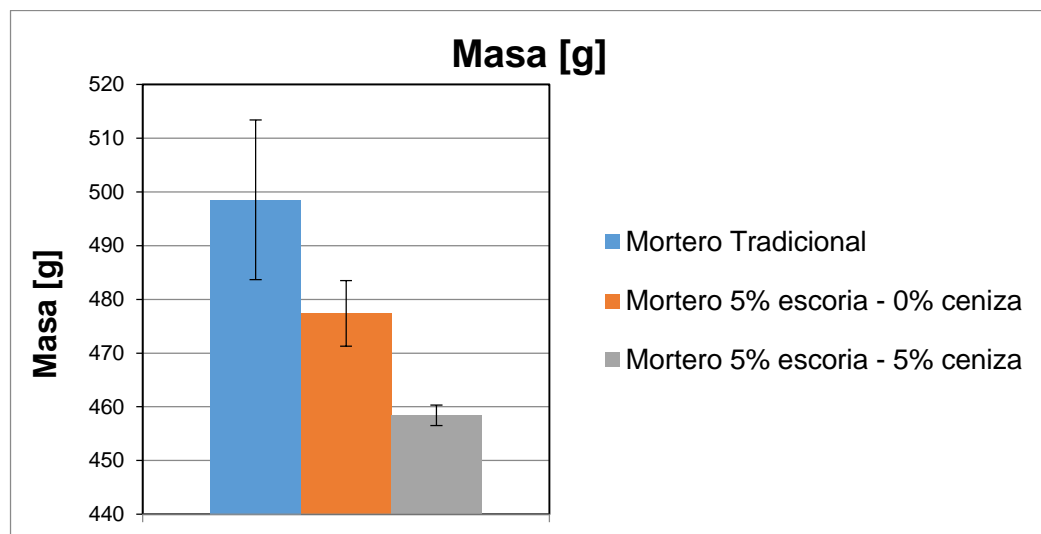


En la Figura 8 se observa que la resistencia a la compresión aumenta considerablemente tras la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz con un valor promedio de 3007 [psi], superando así los 3000 [psi] establecidos en el diseño de mezcla. Esto indica que la ceniza de cáscara de arroz proporciona resistencia a la estructura debido a la producción de material cementante mediante la reacción puzolánica, con un porcentaje óptimo de sustitución del agregado fino del 5%.

## 2.3 RELACIÓN ENTRE COMPORTAMIENTO MÁSSICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Como se puede observar en la Figura 9, la masa del mortero con 5% de escoria y 5% de ceniza disminuyó considerablemente en comparación al mortero tradicional al mismo tiempo que la resistencia a la compresión aumentó. Dichos valores se resumen en el Anexo L. Este resultado es de gran interés debido a que el mortero obtenido presenta una mayor resistencia por unidad de masa, lo cual reduciría el peso de las estructuras diseñadas con este material.

Figura 9. Comportamiento másico del mortero tradicional y de los diseños de mezcla I y II a los 28 días.



## 2.4 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA SULFATACIÓN

El ataque por sulfatación fue realizado al mortero tradicional y al mortero con 5 % escoria-5% ceniza de cáscara de arroz debido a que presentó los mejores resultados en la evaluación mecánica en compresión.

#### 2.4.1 Análisis cualitativo:

Como se señala en la Figura 10, el mortero tradicional presentó agrietamiento en la parte superior de la estructura. La posible causa para este fenómeno es la formación de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , la cual tiene la capacidad de expandirse y aumentar la densidad de la microestructura generando tensión dentro del mortero, lo cual conduce a la formación de grietas y seguida por la falla del material .

Por el contrario, el mortero con 5% de escoria de coque y 5% de ceniza de cáscara de arroz no presentó agrietamiento superficial ante el ataque con sulfatos, lo cual puede explicarse debido a la actividad puzolánica de los dos agregados sustitutos, la cual reduce la presencia de hidróxido de calcio libre en el mortero.

Figura 10. Resultado del proceso de sulfatación finalizados los 6 ciclos de inmersión del mortero tradicional.



Figura 11. Resultado del proceso de sulfatación finalizados los 6 ciclos de inmersión del mortero con 5% de escoria y 5% de ceniza.

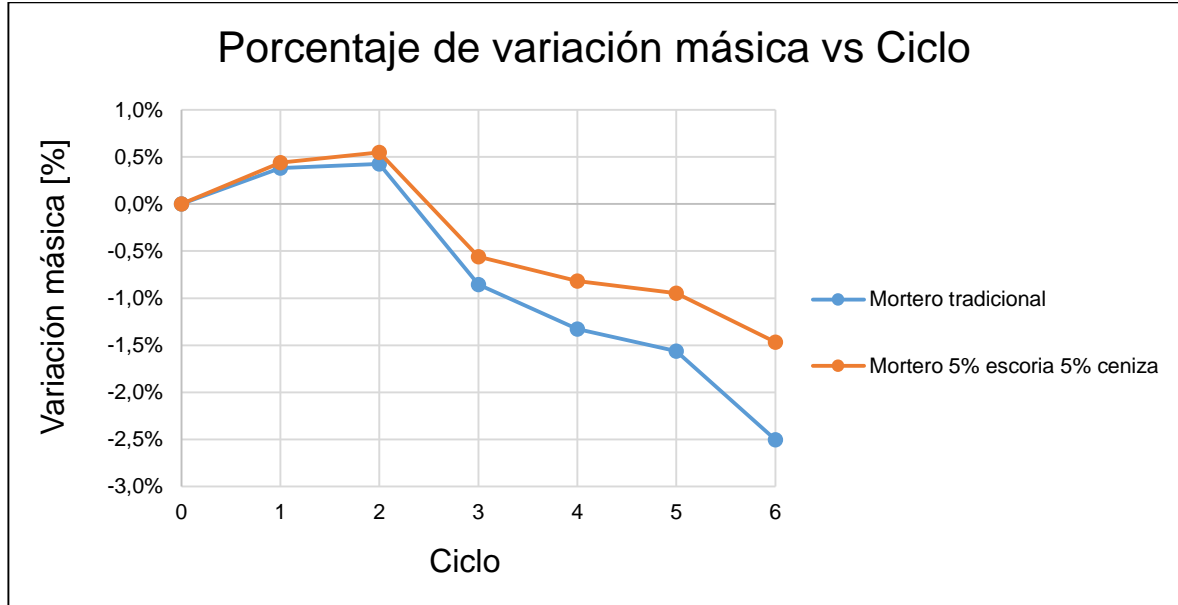


#### **2.4.2 Análisis cuantitativo:**

Los resultados del ensayo de inmersión de los morteros en solución de sulfato de sodio se muestran en la Figura 12.

Como se muestra en la gráfica, los morteros presentaron un aumento de la masa durante los dos primeros ciclos. Es posible que esto se deba a la cristalización del sulfato de sodio sobre la estructura de los morteros, lo cual aumentó ligeramente la masa de las probetas. Sin embargo, después del tercer ciclo se presentó una disminución en la masa de ambos morteros, lo cual se puede atribuir al desprendimiento de material por la expansión de la estructura.

Figura 12. Variación porcentual másica del proceso de sulfatación durante los 6 ciclos de inmersión.



#### 2.4.3 Análisis por Difracción de Rayos X:

Este análisis permitió determinar las fases cristalinas de los morteros antes y después del proceso de sulfatación. Los resultados para las 2 probetas se muestran de la Tabla 6 a la Tabla 9.

Para las dos probetas se puede observar la presencia de portlandita antes del proceso de sulfatación, en menor cantidad para el mortero con escoria y ceniza debido a la reacción puzolánica presente durante el curado.

Después del proceso de sulfatación no se cuantifica porcentaje para la portlandita, mientras se da la aparición de yeso en ambos morteros. Estos dos comportamientos se pueden justificar de acuerdo a la reacción mostrada anteriormente del sulfato de sodio con la portlandita para formar yeso, hidróxido de sodio y agua.

Tabla 6. DRX para mortero tradicional antes de la sulfatación.

	FASE	PDF	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$\text{Si O}_2$	000-85-0795	Cuarzo	43,0%
	$\text{Ca (C O}_3)$	000-86-2334	Calcita	8,0%
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	000-89-6424	Albita	7,9%
	$\text{K Al Si}_3 \text{ O}_8$	000-72-1114	Microclina	4,0%
	$\text{K Al}_3 \text{ Si}_3 \text{ O}_{10} (\text{O H})_2$	000-84-1302	Moscovita	5,1%
	$\text{Mg}_{2.5} \text{Fe}_{1.65} \text{Al}_{1.5} \text{Si}_{2.2} \text{Al}_{1.8} \text{O}_{10} (\text{O H})_8$	000-89-2972	Clinocloro	0,6%
	$\text{Ca}_2 (\text{Mg, Fe})_4 \text{Al} (\text{Si}_7 \text{Al}) \text{O}_{22} (\text{OH, F})_2$	000-85-2158	Magnesiohornblenda	0,4%
	$\text{K Al}_2 (\text{Al Si}_3 \text{ O}_{10}) (\text{O H})_2$	000-82-0577	Moscovita	N.C
	$\text{K Fe}_3 (\text{Fe Si}_3) \text{O}_{10} (\text{O H})_2$	000-72-1113	Anita férrica	N.C
	$\text{Mg}_3 (\text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{O H})_4)$	000-86-0403	Lizardita	0,8%
	$\text{Ti O}_2$	000-77-0444	Rutilo	N.C
	$\text{Ca (O H)}_2$	000-76-0571	Portlandita	1,0%
	$\text{Ca S O}_4 (\text{H}_2 \text{O})_2$	000-76-1746	Yeso	N.C
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	000-89-6426	Albita	N.C
	$\text{Ca Mg (C O}_3)_2$	000-74-1687	Dolomita	N.C
$\text{Fe Ti O}_3$	000-75-1205	Ilmenita	N.C	
Total Cristalino				70,8%
Amorfos y otros				29,2%

Tabla 7. DRX para mortero tradicional después de la sulfatación.

	FASE	PDF	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	$\text{Si O}_2$	000-85-0796	Cuarzo	47,8%
	$\text{Fe}_3 \text{O}_4$	000-89-0951	Magnetita	N.C
	$\text{Ca (C O}_3)$	000-86-2334	Calcita	4,2%
	$\text{Na (Al Si}_3 \text{ O}_8)$	000-89-6424	Albita	3,5%
	$\text{K Al Si}_3 \text{ O}_8$	000-72-1114	Microclina	2,8%
	$\text{Ca (S O}_4) (\text{H}_2 \text{O})_2$	000-70-0984	Yeso	1,1%
	$\text{K Al}_3 \text{ Si}_3 \text{ O}_{10} (\text{O H})_2$	000-84-1302	Moscovita	4,9%
	$\text{Mg}_{2.5} \text{Fe}_{1.65} \text{Al}_{1.5} \text{Si}_{2.2} \text{Al}_{1.8} \text{O}_{10} (\text{O H})_8$	000-89-2972	Clinocloro	0,5%
	$\text{Ca (C O}_3)$	000-86-2340	Calcita	N.C
	$\text{K Al}_2 (\text{Al Si}_3 \text{ O}_{10}) (\text{O H})_2$	000-82-0577	Moscovita	N.C
	$\text{Na}_{15.2} \text{Al}_{15.2} \text{Si}_{32.8} \text{O}_{96}$	000-83-1295	Chabasita sódica	N.C
	$\text{Fe Ti O}_3$	000-75-1206	Ilmenita	0,5%
	$\text{Cu}_6 \text{Al} (\text{S O}_4) (\text{O H})_{12} \text{Cl} (\text{H}_2 \text{O})_3$	000-81-1424	Spangolita	0,4%
	$\text{Ca}_3 \text{Fe}_2 (\text{Si O}_4)_3$	000-79-1660	Andradita	N.C
	$\text{Na}_2 \text{S O}_4$	000-74-1738	Thenardita	N.C
Total Cristalino				65,7%
Amorfos y otros				34,3%

Tabla 8. DRX para mortero 5% escoria 5% ceniza antes de la sulfatación.

	FASE	PDF	NOMBRE	CUANTITATIVO
<b>Cristalino</b>	Si O <sub>2</sub>	000-85-0796	Cuarzo	32,7%
	Ca ( C O <sub>3</sub> )	000-72-1652	Calcita	4,2%
	Ca ( C O <sub>3</sub> )	000-86-2340	Calcita	1,5%
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	000-89-6424	Albita	2,5%
	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	000-72-1114	Microclina	2,5%
	K Al <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	000-84-1302	Moscovita	3,8%
	Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>1.65</sub> Al <sub>1.5</sub> Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>8</sub>	000-89-2972	Clinocloro	0,2%
	Ca ( O H ) <sub>2</sub>	000-76-0571	Portlandita	0,1%
	K Al <sub>2</sub> ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ) ( O H ) <sub>2</sub>	000-82-0577	Moscovita	1,2%
	Mg <sub>3</sub> ( Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	000-73-0147	Talco	N.C
	Ca Mg ( C O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	000-74-1687	Dolomita	0,8%
	Mg <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>4</sub>	000-79-2092	Lizardita	N.C
	Fe Ti O <sub>3</sub>	000-75-1206	Ilmenita	0,2%
	Total Cristalino			
Amorfos y otros				50,3%

Tabla 9. DRX para mortero 5% escoria 5% ceniza después de la sulfatación.

	FASE	PDF	NOMBRE	CUANTITATIVO	
<b>Cristalino</b>	Si O <sub>2</sub>	000-85-0796	Cuarzo	46,0%	
	Ca ( C O <sub>3</sub> )	000-86-2334	Calcita	12,5%	
	Na <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>	000-74-1738	Thenardita	3,3%	
	Na ( Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	000-89-6424	Albita	2,3%	
	K Al Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	000-72-1114	Microclina	2,7%	
	Ca ( S O <sub>4</sub> ) ( H <sub>2</sub> O ) <sub>2</sub>	000-70-0984	Yeso	0,8%	
	K Al <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>	000-84-1302	Moscovita	2,2%	
	Mg <sub>2.5</sub> Fe <sub>1.65</sub> Al <sub>1.5</sub> Si <sub>2.2</sub> Al <sub>1.8</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>8</sub>	000-89-2972	Clinocloro	N.C	
	Ca <sub>2</sub> Fe Al O <sub>5</sub>	000-70-2764	Brownmillerita	N.C	
	Si O <sub>2</sub>	000-82-1235	Cristobalita	N.C	
	Ca ( C O <sub>3</sub> )	000-86-2340	Calcita	N.C	
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	000-89-0950	Magnetita	N.C	
	Total Cristalino				69,8%
	Amorfos y otros				30,2%

### 3. CONCLUSIONES

- La incorporación de la escoria de coque y la cáscara de arroz al proceso de producción del mortero genera un impacto ambiental positivo debido a que dichos materiales se consideran residuos en la industria.
- El mortero producido mediante la sustitución de 10% del agregado fino por escoria de coque y ceniza de cáscara de arroz en partes iguales presenta una resistencia a la compresión de 3007 [psi], superior a los 2780 [psi] del mortero tradicional.
- El mortero con los agregados sustitutos presenta una pérdida de masa alrededor del 8% con respecto al mortero tradicional, lo cual hace que el material tenga potencial para ser usado en la industria al disminuir el peso de las construcciones.
- El mortero tradicional presenta grietas cuando es evaluado ante el ataque por sulfatos, mientras el mortero con 10% de sustitutos mantiene su integridad y resistencia a la compresión.

#### 4. RECOMENDACIONES

- La materia orgánica que se encuentre en el mortero no permite una buena cohesión entre el cemento y los agregados, por lo cual se debe evitar su presencia en la mezcla.
- Estudiar el efecto que tiene la variación en la absorción de agua de los diferentes agregados y la forma en que esto afecta la resistencia mecánica del mortero final.
- Realizar un estudio que permita determinar el efecto de la modificación simultánea del porcentaje de las dos variables estudiadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARDOSO, Marcia, SCHMITT, Candice, ONOREVOLI, Bruna, VALMIR, Edilson, & BASTOS, Elina. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. *Fuel*, ELSEVIER, pp. 56–61 (2012).

CHAO-LUNG, H., ANH-TUAN, B. LE, & CHUN-TSUN, C. 2011. Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and Building Materials*, ELSEVIER, pp. 3768–3772.

CHINDAPRASIRT, Prinya, KANCHANDA, P., SATHONSAOWAPHAK, A. & CAO, H. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, ELSEVIER. pp. 1356–1361 (2007).

Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2014). Informe de rendición pública de cuentas.

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (2015). Análisis del comportamiento del PIB minero en el año 2014, segundo semestre y cuarto trimestre de 2014.

FLOREZ GEREZ, Diego. & RUIZ CUADROS, Julian. Obtención de un material cerámico de construcción a partir de las escorias del proceso de coquización del carbón. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica, pp. 39, (2009).

GUTIÉRREZ, Libia. El concreto y otros materiales para la construcción. Bogotá, Colombia. Editorial UN, pp. 115 (2003).

GIRALDO, Manuel. & Tobón, Jorge. Mineralogical evolution of portland cement during hydration process. Medellin, Colombia. Scielo, pp. 69–81 (2005).

GÓMEZ GONZÁLEZ, Antonio. Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos en cementos, aplicación en viviendas de bajo coste. Proyecto de fin de carrera. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia, pp. 20 (2009).

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2007). Norma Técnica Colombiana NTC 77: Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizados de los agregados finos y gruesos.

Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (2007). Norma ASTM C125: Terminología estándar para el hormigón y los agregados de concreto.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000). Norma Técnica Colombiana NTC 127: Concretos. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000). Norma Técnica Colombiana NTC 174: Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1995). Norma Técnica Colombiana NTC 237: Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.

Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (2015). Norma ASTM C618: Especificación estándar para cenizas volátiles de carbón y crudo o puzolana natural calcinada para hormigón

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2010). Norma Técnica Colombiana NTC 673: Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

KHALIL, Roya, CHRYSS, Andrew, JOLLANDS, Margaret & BHATTACHARYA, Satinath. Effect of coupling agents on the crystallinity and viscoelastic properties of composites of rice hull ash-filled polypropylene. (Springer USA) Journal of Materials Science, pp. 10219-10227, (2007).

KOSMATKA, Steven, KERKHOFF, Beatrix, PANARESE, William & TANESI, Jussara. Diseño y control de mezclas de concreto. Portland cement association. Illinois, USA pp.5 (2004).

MAES, Mathias. & DE BELIE, Nele. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. Cement & Concrete Composites, pp. 59–72 (2014).

MAFLA, Andres. Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción. Trabajo de grado Ingeniero Civil. UNIMINUTO. Facultad de Ingeniería Físico- Mecánica. pp. 74–78 (2009).

NIE, Qingke, ZHOU, Changjun, LI, Huawei, SHU, Xiang, GONG, Hongren, & HUANG, Boashan. Numerical simulation of fly ash concrete under sulfate attack. Construction and Building Materials, ELSEVIER, pp. 261–268 (2015).

PICO CORTÉS, Carlos. Propuesta de concreto con agregado fino de escoria de cubilote como aporte al estudio de la durabilidad y propiedades acústicas. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil, pp. 22 (2012).

QUIROS VELASCO, Gilberto & SANTAMARIA URREA, Ruth. Evaluación del efecto del ataque de sulfatos sobre concreto, mediante la técnica de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). Bucaramanga. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander, Escuelas de Ingeniería Metalúrgica e Ingeniería Civil, pp. 22 (2010).

RIVIERA, Gerardo. Agregados para mortero o concreto. Popayán, Colombia. Universidad de Popayán, pp. 41 (2004).

ROBAYO, Rafael, MATTEY, Pedro & DELVASTO, Silvio. Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero. Revista de la construcción, pp. 139–151 (2013).

SANCHEZ, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá, Colombia. Pontificia Universidad Javeriana, pp. 39 (2001).

TIRONI, Alejandra. Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica. Tesis doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Departamento de Química, pp. 51 (2013).

## BIBLIOGRAFÍA

- Aggarwal, Y. y Siddique, R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. En: Construction and Building Materials. 2014. vol 54, pp. 210–223.
- Andrade, L., Rocha, J. y Cheriaf, M. Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. En: Waste Management. 2007. vol 27, no. 9, pp. 1190–1199.
- Andrade, L., Rocha, J. y Cheriaf, M. Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. En: Construction and Building Materials. 2009. vol 23, pp. 609–614.
- Bouikni, A., Swamy, R. y Bali, A. Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag. En: Construction and Building Materials. 2009. vol 23, pp. 2836–2845.
- Calleja, J. La Portlandita -hidróxido de calcio- y la Tobermorita -silicatos de calcio hidratados- de la pasta de cemento: tratamiento estequiométrico de sus comportamientos. En: Cemento y Hormigón. 2001. vol 72, pp. 526–542.
- Duan, P et al. Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases. En: Applied Clay Science. 2013. vol 83, pp. 115–121.
- Hill, J. y Sharp, J. The mineralogy and microstructure of three composite cements with high replacement levels. En: Cement and Concrete Composites. 2002. vol 24, pp. 191–199.

## **ANEXOS**

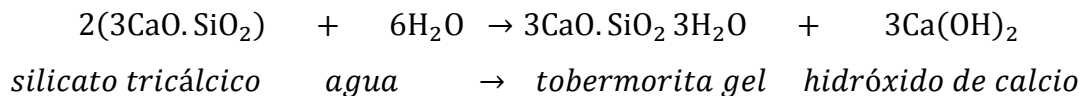
**ANEXO A**  
**MINERALOGÍA Y REACCIONES DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO**  
**PORTLAND**

Tabla 10. Mineralogía general del cemento Portland. Adaptada de la referencia.

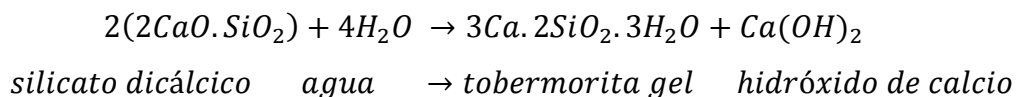
NOMBRE	FORMULA MOLECULAR	ABREVIATURA
Silicato tricálcico	SiO <sub>3</sub> .3CaO	(S3O)
Silicato dicálcico	SiO <sub>3</sub> .2CaO	(S2O)
Aluminoferrito tetracálcico	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .4CaO	(AF4C)
Aluminato tricálcico	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .3CaO	(A3C)
Ferrito dicálcico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2CaO	(F2C)

**REACCIONES DE HIDRATACION**

- El C3S (alita) es el silicato cálcico más inestable de los presentes en el cemento, el cual reacciona con el agua para convertirse en silicato de calcio hidratado (conocido como tobermorita gel) y en hidróxido de calcio, así:

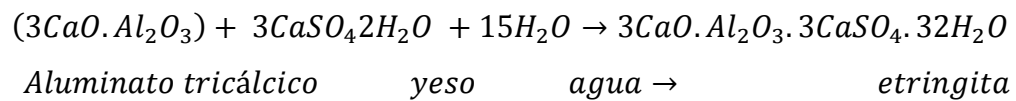


- La belita o silicato dicálcico (C2S) también forma tobermorita gel e hidróxido de calcio al hidratarse. Sin embargo, a diferencia de la reacción anterior se produce menos hidróxido de calcio:

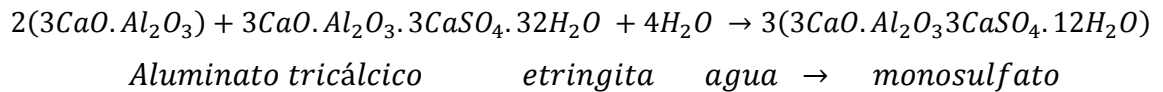


El hidróxido de calcio y la tobermorita gel son las fases que se endurecen y se adhieren a los agregados por fuerzas moleculares. La intensidad de esta unión cementante es mayor para el hidróxido de calcio comparado al gel de sílice, pero el área de contacto es mayor para el gel de sílice.

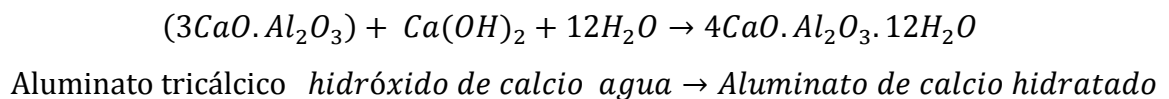
- La celita o aluminato tricálcico (C3A) produce la etringita al combinarse con yeso y agua de acuerdo a la reacción:



El aluminato tricálcico reacciona con la etringita y agua para producir monosulfato:



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



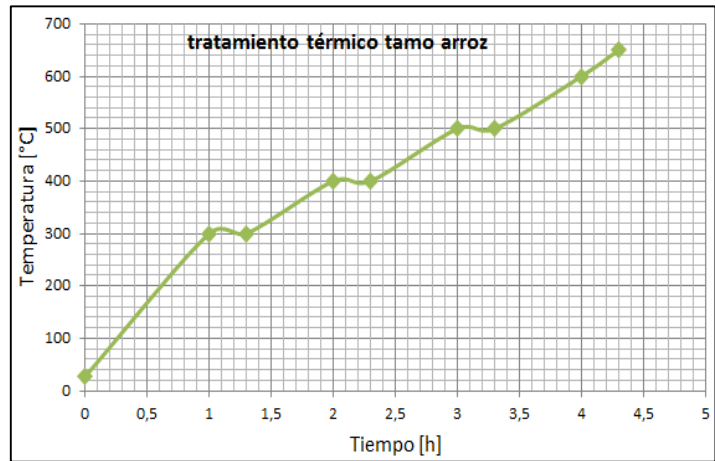
## ANEXO B

### CALCINACIÓN DE LA CÁSCARA DE ARROZ

Figura 13. Proceso de calcinación de la cáscara de arroz.



tiempo [h]	temperatura [°C]
0	28
1	300
1,3	300
2	400
2,3	400
3	500
3,3	500
4	600
4,3	650



### CÁLCULO DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

A: Peso muestra inicial: 3g

B: Peso final después de calcinar: 2,4478 g

$$\% = \left[ \frac{A - B}{A} \right] * 100 = \left[ \frac{3 - 2,4478}{3} \right] * 100 = 18,43\%$$

## ANEXO C

### CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS AGREGADOS ARENA Y ESCORIA DE COQUE

Norma técnica colombiana NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.

Esta norma abarca la determinación de la distribución de tamaños de las partículas que componen los agregados finos y gruesos a través de un proceso de tamizado.

Figura 14. Equipos empleados para el proceso de tamizado de los agregados.



## PROTOCOLO

- Secar la muestra hasta que alcance una masa constante a 110°C de temperatura. La muestra empleada para la arena fue de 1000 [g], mientras la muestra de escoria es de 900 [g].
- Realizar el tamizado teniendo en cuenta el tamaño de abertura de los tamices que se muestran en la Tabla 11. El tamizado mecánico se realiza durante 20 minutos.

Tabla 11. Diámetro de abertura de acuerdo al número de tamiz.

Tamiz	Abertura [mm]
4	4,75
8	2,36
16	1,18
30	0,6
50	0,3
100	0,15

- Pesar la muestra recolectada en cada uno de los tamices.
- Calcular el módulo de finura (MF) de acuerdo a la ecuación:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ Retenido acumulado desde el tamiz } N^{\circ}4 \text{ al } N^{\circ}100}{100}$$

## ANEXO D

### DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN AGREGADO FINO

Norma técnica colombiana NTC 127: Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.

Esta norma presenta el procedimiento para la determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales para el agregado fino usado en mortero de cemento hidráulico o en concreto, en este caso arena.

Para determinar las impurezas se necesita la arena de río como agregado fino, una botella de vidrio con tapa, la placa orgánica de colores Gardner y solución 3% de hidróxido de sodio.

Figura 15. Instrumentos empleados para la determinación de impurezas.



### PROTOCOLO

- Agregar la arena en la botella.
- Añadir la solución de hidróxido de sodio.

- Tapar y agitar vigorosamente.
- Dejar en reposo por 24 horas.
- Transcurrido este tiempo se realiza la comparación colorimétrica con la placa orgánica de colores.

## ANEXO E

### METODOLOGÍA DE DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA

Norma técnica colombiana NTC 237: Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.

Este método de ensayo permite determinar la densidad aparente, la densidad nominal y la absorción según la norma NTC 385 llamada Terminología del cemento y concreto. Se aplica para cada uno de los tres agregados: Arena, escoria de coque y ceniza de cáscara de arroz.

Figura 16. Proceso de determinación de absorción de agua de los agregados.



## PROTOCOLO

- Dejar la muestra en agua durante 24 horas.
- Filtrar la muestra y colocarla al sol hasta perder el máximo de humedad.
- Pesar la muestra seca.
- Pesar el balón aforado lleno de agua.

- En el balón aforado vacío se agrega la muestra de agregado y se adiciona agua hasta alcanzar el volumen del balón.
- Pesarse el balón aforado con la muestra.
- Secar la muestra en el horno y pesarla después del secado.

## VARIABLES Y ECUACIONES

### VARIABLES

- A:       Peso del balón aforado lleno de agua [g].
- B:       Peso de muestra en condiciones S.S.S\* en el aire [g].
- C:       Peso de la muestra, con agua en el balón aforado [g].
- D:       Peso de la muestra secada al horno [g].

\*S.S.S significa "Saturada y superficialmente seca".

### ECUACIONES

- Porcentaje de absorción:  $\frac{B-D}{D} * 100\%$
- Gravedad específica real:  $\frac{D}{A-C+D}$
- Gravedad específica aparente:  $\frac{D}{A+B-C}$
- Gravedad específica aparente S.S.S:  $\frac{B}{A+B-C}$

## ANEXO F

### DISEÑO DE MEZCLA DEL MORTERO

El diseño de mezcla se realiza para la resistencia a la compresión definida de 3000 [psi] o 210 [Kg/cm<sup>2</sup>], con una fluidez entre 102 y 113 %. El módulo de finura de la arena es de 3,42.

Inicialmente se determina la cantidad de cemento a usar por cada m<sup>3</sup> de mortero a partir de la resistencia a la compresión de 210 [Kg/cm<sup>2</sup>] (ubicada en el eje y) junto con la curva aproximada de módulo de finura 3,42 de la Figura 17, para un tiempo de curado de 28 días. Como resultado se obtiene que es necesaria una cantidad de 470 [Kg] de cemento.

Mediante la Figura 18, empleando la resistencia a la compresión en el eje y se obtiene la relación entre el agua y el cemento de aproximadamente 0,5 [L] de agua por [Kg] de cemento.

A partir de los dos resultados anteriores se determina el volumen de agua aproximado de 0,25 [m<sup>3</sup>]:

$$V_{agua} = 0,5 \left[ \frac{L}{Kg \text{ cemento}} \right] * 470 [Kg \text{ cemento}] \approx 250 L = 0,25 m^3$$

Se calcula el volumen de cemento empleado en el mortero teniendo en cuenta la densidad del cemento de 3080 [Kg/m<sup>3</sup>]:

$$V_{cemento} = \frac{470 [Kg]}{3080 [Kg/m^3]} = 0,15 [m^3]$$

Dado que el cálculo se realiza para 1 m<sup>3</sup> de mortero, el volumen de arena es:

Figura 17. Determinación del contenido de cemento del mortero. Tomado y adaptado de la referencia.

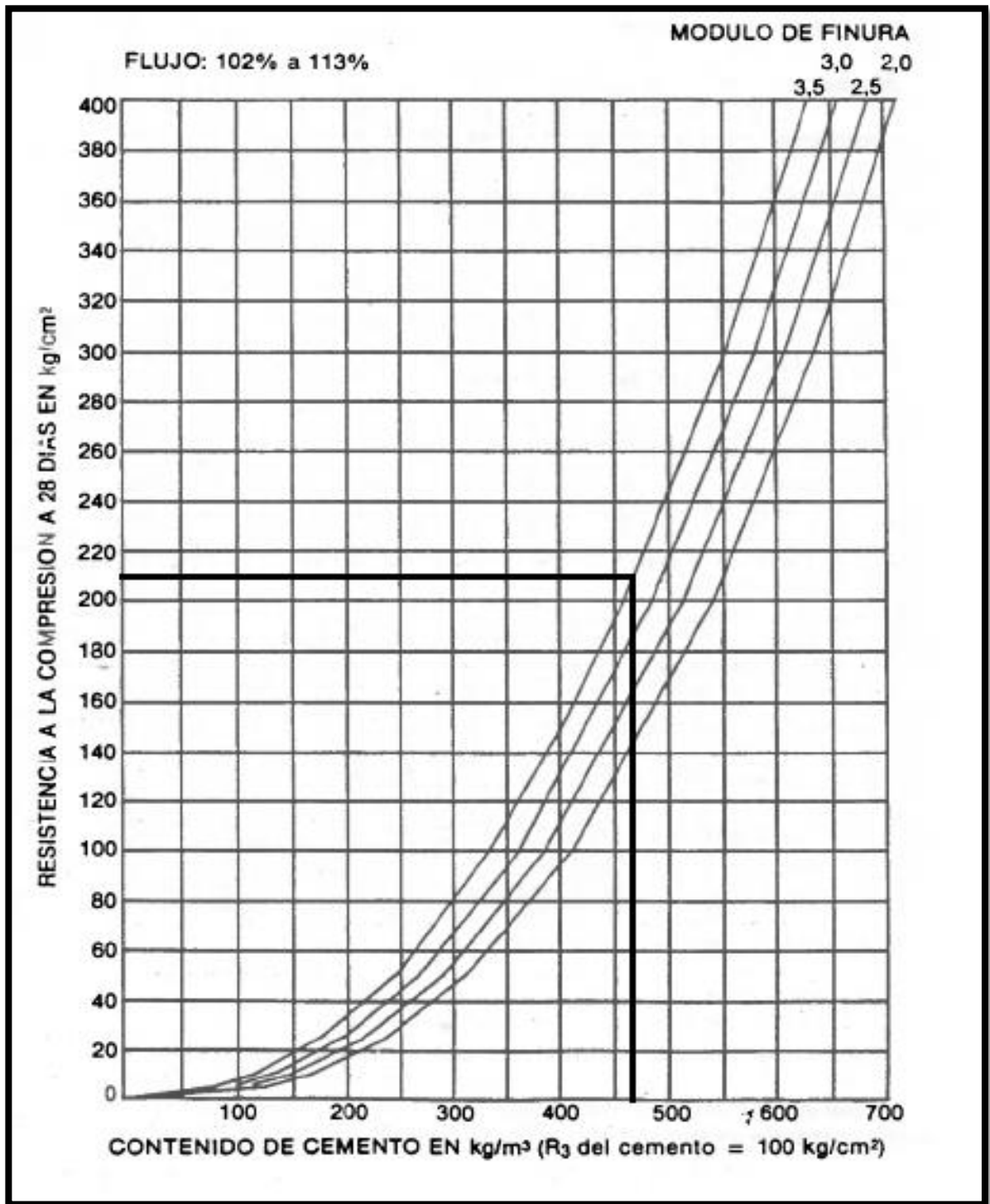
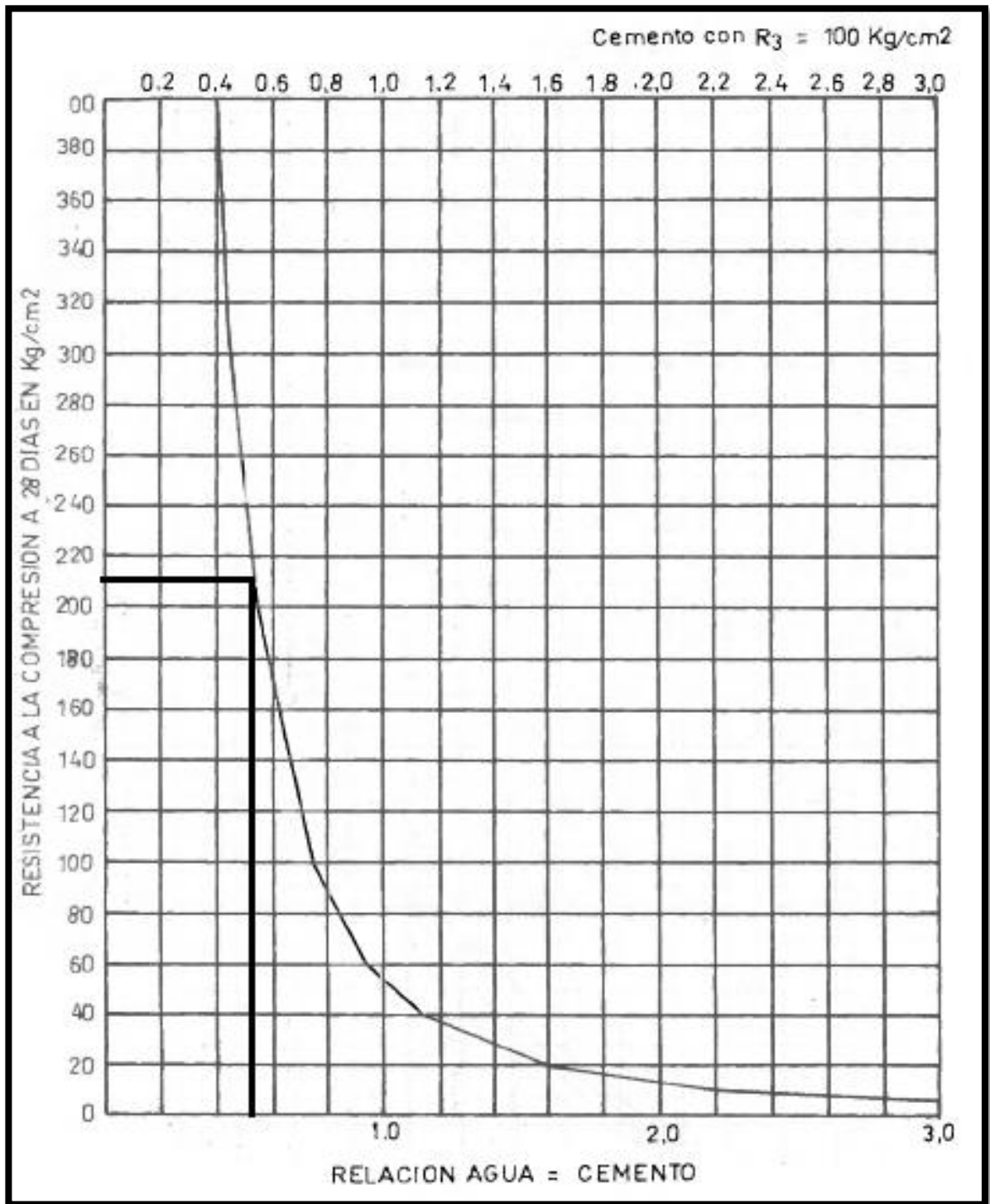


Figura 18. Determinación de la relación agua cemento del mortero. Tomado y adaptado de la referencia [7].



$$V_{arena} = 1 - V_{cemento} - V_{agua} = 1 - 0.15 - 0.25 [m^3]$$

$$V_{arena} = 0.60 [m^3]$$

Ahora se calcula el volumen de los cilindros que se emplean durante el estudio. Las medidas de los cilindros son 5 [cm] de diámetro y 10 [cm] de altura.

$$V_{cilindro} = \pi * r^2 * H = \pi * 0,025^2 * 0,1$$

$$V_{cilindro} = 1.96 * 10^{-4} [m^3]$$

Con este resultado se realiza el escalamiento del volumen de cada componente (cemento, arena y agua) y se determina la masa como:

➤ Cemento:

$$V_{cemento} = 0,15 \frac{[m^3 \text{ de cemento}]}{[m^3 \text{ de mortero}]} * 1.96 * 10^{-4} \frac{[m^3 \text{ de mortero}]}{[cilindro]}$$

$$V_{cemento} = 2,94 * 10^{-5} \frac{[m^3 \text{ de cemento}]}{[cilindro]}$$

$$m_{cemento} = V_{cemento} * \rho_{cemento}$$

$$m_{cemento} = 2,94 * 10^{-5} \frac{[m^3 \text{ de cemento}]}{[cilindro]} * 3080 \frac{[Kg \text{ de cemento}]}{[m^3 \text{ de cemento}]} * \frac{1000 [g]}{1 [Kg]}$$

$$m_{cemento} = 90,55 \frac{[g \text{ de cemento}]}{[cilindro]}$$

➤ Arena:

$$V_{arena} = 0,60 \frac{[m^3 \text{ de arena}]}{[m^3 \text{ de mortero}]} * 1,96 * 10^{-4} \frac{[m^3 \text{ de mortero}]}{[cilindro]}$$

$$V_{arena} = 1,18 * 10^{-4} \frac{[m^3 \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{arena} = V_{arena} * \rho_{arena}$$

$$m_{arena} = 1,18 * 10^{-4} \frac{[m^3 \text{ de arena}]}{[cilindro]} * 2550 \frac{[Kg \text{ de arena}]}{[m^3 \text{ de arena}]} * \frac{1000 [g]}{1 [Kg]}$$

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

➤ Agua:

$$V_{agua} = 0,25 \frac{[m^3 \text{ de agua}]}{[m^3 \text{ de mortero}]} * 1,96 * 10^{-4} \frac{[m^3 \text{ de mortero}]}{[cilindro]}$$

$$V_{agua} = 4,90 * 10^{-5} \frac{[m^3 \text{ de agua}]}{[cilindro]}$$

$$m_{agua} = V_{agua} * \rho_{agua}$$

$$m_{agua} = 4,90 * 10^{-5} \frac{[m^3 \text{ de agua}]}{[cilindro]} * 1000 \frac{[Kg \text{ de agua}]}{[m^3 \text{ de agua}]} * \frac{1000 [g]}{1 [Kg]}$$

$$m_{agua} = 49,00 \frac{[g \text{ de agua}]}{[cilindro]}$$

Para los morteros con agregados sustitutos se realiza el mismo procedimiento, y se calcula la masa empleada de arena y agregado de acuerdo a los porcentajes especificados para cada mortero.

➤ Mortero 5% escoria de coque:

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 95\% = 285,85 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{escoria} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 5\% = 15,05 \frac{[g \text{ de escoria}]}{[cilindro]}$$

➤ Mortero 15% escoria de coque:

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 85\% = 255,75 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{escoria} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 15\% = 45,15 \frac{[g \text{ de escoria}]}{[cilindro]}$$

➤ Mortero 25% escoria de coque:

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 75\% = 225,65 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{escoria} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 25\% = 75,25 \frac{[g \text{ de escoria}]}{[cilindro]}$$

➤ Mortero 5% escoria de coque 5% ceniza de cáscara de arroz:

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 90\% = 270,80 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{escoria} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 5\% = 15,05 \frac{[g \text{ de escoria}]}{[cilindro]}$$

$$m_{ceniza} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 5\% = 15,05 \frac{[g \text{ de ceniza}]}{[cilindro]}$$

➤ Mortero 5% escoria de coque 15% ceniza de cáscara de arroz:

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 80\% = 240,70 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{escoria} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 5\% = 15,05 \frac{[g \text{ de escoria}]}{[cilindro]}$$

$$m_{ceniza} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 15\% = 45,15 \frac{[g \text{ de ceniza}]}{[cilindro]}$$

➤ Mortero 5% escoria de coque 25% ceniza de cáscara de arroz:

$$m_{arena} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 70\% = 210,60 \frac{[g \text{ de arena}]}{[cilindro]}$$

$$m_{escoria} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 5\% = 15,05 \frac{[g \text{ de escoria}]}{[cilindro]}$$

$$m_{ceniza} = 300,90 \frac{[g]}{[cilindro]} * 25\% = 75,25 \frac{[g \text{ de ceniza}]}{[cilindro]}$$

## ANEXO G

### PROTOCOLO EXPERIMENTAL DE SULFATACIÓN

El protocolo se desarrolla de la siguiente forma:

- Preparar una solución de sulfato de sodio anhídrido ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) con 48 horas de anticipación a la prueba, cuya concentración es 80 [g/L].
- Pasados 28 días de curado y 30 días de secado, pesar las probetas en estado seco con una balanza de precisión para conocer la masa de referencia ( $M_{ref}$ ).
- Realizar la inmersión cíclica de las probetas en la solución de sulfato de sodio, en un proceso que se compone de 3 etapas: inmersión, secado y enfriamiento. Cada uno de los 6 ciclos que se llevan a cabo durante la prueba tiene una duración de 48 horas.
- La etapa de inmersión consiste en dejar la probeta dentro de la solución durante 24 horas, para lo cual se utiliza un recipiente con diferencias de nivel en su base que garantiza la difusión del sulfato en la parte inferior de las probetas.
- La etapa de secado se lleva a cabo en un horno a 105 °C durante 8 horas.
- La etapa de enfriamiento consiste en dejar las probetas a temperatura ambiente durante 16 horas.
- Se mide la masa de cada probeta al finalizar cada ciclo para determinar la variación másica en el tiempo de acuerdo a la ecuación:

$$\text{cambio de masa (\%)} = \frac{M_x - M_{ref}}{M_{ref}} \times 100\%$$

**ANEXO H**  
**TABLAS GRANULOMÉTRICAS**

Tabla 12. Granulometría arena de río.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	110,5	11,05	11,05	88,95
8	181,7	18,17	29,22	70,78
16	164,5	16,45	45,67	54,33
30	190,3	19,03	64,7	35,3
50	283,3	28,33	93,03	6,97
100	56,8	5,68	98,71	1,29
FONDO	8,72	0,872	99,582	0,418
TOTAL	1000	100	M.F	3,4238

Tabla 13. Granulometría 95% arena de río – 5% escoria de coque.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	55.35	5.535	5.535	94.465
8	108.2	10.82	16.355	83.645
16	312.7	31.27	47.625	52.375
30	343.2	34.32	81.945	18.055
50	133.3	13.33	95.275	4.725
100	27.8	2.78	98.055	1.945
FONDO	11.27	1.127	99.182	0.818
TOTAL	991.82	99.182	M.F	3.4

Tabla 14. Granulometría 85% arena de río – 15% escoria de coque.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	65.6	6.56	6.56	93.44
8	109.6	10.96	17.52	82.48
16	211.8	21.18	38.7	61.3
30	338.4	33.84	72.54	27.46
50	198.9	19.89	92.43	7.57
100	49.2	4.92	97.35	2.65
FONDO	23.25	2.325	99.675	0.325
TOTAL	996.75	99.675	M.F	3.4

Tabla 15. Granulometría 75% arena de río – 25% escoria de coque.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	64.1	6.41	6.41	93.59
8	109.3	10.93	17.34	82.66
16	263.5	26.35	43.69	56.31
30	338.2	33.82	77.51	22.49
50	166.2	16.62	94.13	5.87
100	43.3	4.33	98.46	1.54
FONDO	15.4	1.54	100	0
TOTAL	1000	100	M.F	3.4

Tabla 16. Granulometría 90% arena – 5% escoria – 5% ceniza.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	53.18	5.318	5.318	94.682
8	90.4	9.04	14.358	85.642
16	313.3	31.33	45.688	54.312
30	390.5	39.05	84.748	15.252
50	122	12.2	96.948	3.052
100	23.3	2.33	99.278	0.722
FONDO	6.3	0.63	99,908	0.092
TOTAL	998.48		M.F	3.4

Tabla 17. Granulometría 80% arena – 5% escoria – 15% ceniza.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	54.9	5.49	5.49	94.51
8	202.8	20.28	25.77	74.23
16	185.4	18.54	44.31	55.69
30	225.3	22.53	66.84	33.16
50	220.5	22.05	88.89	11.11
100	78.5	7.85	96.74	3.26
FONDO	32.3	3.23	99.97	0.03
TOTAL	999.7	99.97	M.F	3.2

Tabla 18. Granulometría 70% arena – 5% escoria – 25% ceniza.

No. TAMIZ	PESO RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	NO RETENIDO
	[g]	[%]	[%]	[%]
4	36.3	3.63	3.63	96.37
8	83.7	8.37	12	88
16	161.1	16.11	28.11	71.89
30	348.6	34.86	62.97	37.03
50	223.9	22.39	85.36	14.64
100	72.1	7.21	92.57	7.43
FONDO	22.1	2.21	94.78	5.22
TOTAL	947.8	94.78	M.F	2.9

# ANEXO I

## RESULTADOS DE LA PRUEBA DE REACTIVIDAD PUZOLÁNICA

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	<b>Código:</b> F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	<b>Versión:</b> 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>Fecha:</b> 2012/01/16 <b>Página</b> 1 de 2	



*"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1111 de 2015, en los parámetros pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas"*



*"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"*

<b>Informe de resultados No.</b>	I-15-409	<b>Fecha de emisión:</b>	Septiembre 30 de 2015
<b>Cliente:</b>	PAOLA DURAN PLAZAS		
<b>Dirección del cliente:</b>	Calle 14 No. 27-33		
<b>Solicitud de servicio No.</b>	15-369	<b>No. de muestras:</b>	2
<b>Fecha de recepción de las muestras:</b>	Agosto 31 de 2015		
<b>Muestras recibidas por:</b>	Amparo López		
<b>Fecha de análisis:</b>	Septiembre 15 de 2015 – Septiembre 24 de 2015		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO

<b>Codificación de la Muestra:</b>	15-369-01	<b>Tipo de muestra:</b>	Puntual
<b>Identificación de la muestra:</b>	CENIZA DE ARROZ		
<b>Matriz de la muestra:</b>	Cenizas		
<b>Muestreo realizado por:</b>	El Cliente		
<b>Lugar y punto de muestreo:</b>	Laboratorio de Ingeniería Química		
<b>Fecha del muestreo:</b>	Julio 30 de 2015		

PARAMETRO	Inicial	1 día	3 días	4 días	8 días
Hidróxido de Calcio (mg/L Ca(OH) <sub>2</sub> )	607,6	131,34	240,4	250,6	350,23
Hidróxido de Calcio (% Ca(OH) <sub>2</sub> )	-----	21,62	39,60	41,24	57,64

### 2. ANALISIS FISICOQUIMICO

<b>Codificación de la Muestra:</b>	15-369-02	<b>Tipo de muestra:</b>	Puntual
<b>Identificación de la muestra:</b>	ESCORIA DE COKE		
<b>Matriz de la muestra:</b>	Cenizas		
<b>Muestreo realizado por:</b>	El Cliente		
<b>Lugar y punto de muestreo:</b>	Laboratorio de Ingeniería Química		
<b>Fecha del muestreo:</b>	Julio 30 de 2015		

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	<b>Código:</b> F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	<b>Versión:</b> 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>Fecha:</b> 2012/01/16 Página 2 de 2	

Informe de resultados No. I-15-409 Solicitud de servicio No. 15-369

PARAMETRO	Inicial	1 día	3 días	4 días	8 días
Hidróxido de Calcio (mg/L Ca(OH) <sub>2</sub> )	607,6	404,57	412,89	453,66	513,26
Hidróxido de Calcio (% Ca(OH) <sub>2</sub> )	-----	66,58	67,95	74,66	84,47

**Observaciones:** Método Titrimétrico con Ácido Clorhídrico. Todas las condiciones de análisis fueron después de estar las muestras en los días mencionados siempre a 40º C.

**Nota 1:** Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

**Nota 2:** En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

**Estimado cliente:** Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:

**Luz Yolanda Vargas Fiallo**  
Directora del Laboratorio  
Química. M.Sc Química UIS  
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G

## ANEXO J

### DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS AGREGADOS

#### ARENA DE RIO

- A: 653,0 [g] Peso del balón aforado lleno de agua [g]
- B: 500,0 [g] Peso de muestra en condiciones S.S.S en el aire [g].
- C: 951,0 [g] Peso de la muestra, con agua en el balón aforado [g].
- D: 492,4 [g] Peso de la muestra secada al horno [g].

➤ Porcentaje de absorción:  $\frac{B-D}{D} * 100\% = 1,54\%$

➤ Gravedad específica real:  $\frac{D}{A-C+D} = 2,19$

➤ Gravedad específica aparente:  $\frac{D}{A+B-C} = 2,43$

➤ Gravedad específica aparente S.S.S:  $\frac{B}{A+B-C} = 2,47$

#### ESCORIA DE COQUE

- A: 622,5 [g] Peso del balón aforado lleno de agua [g]
- B: 95,15 [g] Peso de muestra en condiciones S.S.S en el aire [g].
- C: 657,7 [g] Peso de la muestra, con agua en el balón aforado [g].
- D: 93,41 [g] Peso de la muestra secada al horno [g].

➤ Porcentaje de absorción:  $\frac{B-D}{D} * 100\% = 1,86\%$

➤ Gravedad específica real:  $\frac{D}{A-C+D} = 1,60$

➤ Gravedad específica aparente:  $\frac{D}{A+B-C} = 1,55$

➤ Gravedad específica aparente S.S.S:  $\frac{B}{A+B-C} = 1,67$

### CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ

- A: 652,5 [g]      Peso del balón aforado lleno de agua [g]
- B: 97,15 [g]      Peso de muestra en condiciones S.S.S\* en el aire [g].
- C: 671,4 [g]      Peso de la muestra, con agua en el balón aforado [g].
- D: 92,95 [g]      Peso de la muestra secada al horno [g].

➤ Porcentaje de absorción:  $\frac{B-D}{D} * 100\% = 4,51\%$

➤ Gravedad específica real:  $\frac{D}{A-C+D} = 1,25$

➤ Gravedad específica aparente:  $\frac{D}{A+B-C} = 1,19$

➤ Gravedad específica aparente S.S.S:  $\frac{B}{A+B-C} = 1,24$

**ANEXO K**  
**COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA COMPRESIÓN**

**PARTE A: RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA I**

Tabla 19. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla I.

Diseño de mezcla I					
Tiempo		Resistencia a la compresión [psi]			
		Escoria 0%	Escoria 5%	Escoria 15%	Escoria 25%
Día 7	Medida 1	2231	2471	2530	2465
	Medida 2	2238	2360	2428	2206
	Medida 3	2089	2280	2308	2330
	Promedio	2186,0	2370,3	2422,0	2333,7
	Desv. Est.	84,1	95,9	111,1	129,5
Día 14	Medida 1	2357	2510	2631	2354
	Medida 2	2374	2550	2610	2387
	Medida 3	2299	2530	2620	2379
	Promedio	2343,3	2530,0	2620,3	2373,3
	Desv. Est.	39,3	20,0	10,5	17,2
Día 28	Medida 1	2790	2850	2690	2670
	Medida 2	2790	2710	2630	2680
	Medida 3	2760	2790	2720	2620
	Promedio	2780,0	2783,3	2680,0	2656,7
	Desv. Est.	17,3	70,2	45,8	32,1

## PARTE B: RESULTADOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLA II

Tabla 20. Resistencia a la compresión del diseño de mezcla II.

Diseño de mezcla II					
Tiempo		Resistencia a la compresión [psi]			
		Ceniza 0%	Ceniza 5%	Ceniza 15%	Ceniza 25%
Día 7	Medida 1	2471	2638	1810	1435
	Medida 2	2360	2793	1884	1832
	Medida 3	2280	2830	1832	1901
	Promedio	2370,3	2753,7	1842,0	1692,7
	Desv. Est.	95,9	101,9	38,0	303,1
Día 14	Medida 1	2510	2837	2054	1847
	Medida 2	2550	2918	2202	1784
	Medida 3	2530	3037	1847	1822
	Promedio	2530,0	2930,7	2034,3	1817,7
	Desv. Est.	20,0	100,6	178,3	31,7
Día 28	Medida 1	2850	3184	2246	2268
	Medida 2	2710	2933	2401	2032
	Medida 3	2790	2904	2202	1844
	Promedio	2783,3	3007,0	2283,0	2048,0
	Desv. Est.	70,2	154,0	104,5	212,5

**ANEXO L**  
**COMPORTAMIENTO MÁSSICO**

Tabla 21. Masa de las muestras.

Medida	Masa [g]		
	Mortero Tradicional	Mortero 5% escoria - 0% ceniza	Mortero 5% escoria - 5% ceniza
1	487,8	480,2	456,5
2	492,3	470,4	458,5
3	515,5	481,6	460,3
Promedio	498,5	477,4	458,4
Desv. Est.	14,9	6,1	1,9