

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DURABILIDAD DE  
MORTEROS GEOPOLIMÉRICOS SINTETIZADOS A PARTIR DE CENIZAS DE  
CASCARILLA DE ARROZ PROVENIENTE DEL TRILLO SANTA ROSA**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

**Br. Stephanie de los Ángeles Sinclair López.**

**Br. Anielka Patricia Pacheco Sánchez.**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO.**

TUTOR:

**M. en C. Léster Javier Espinoza Pérez.**

Managua, Nicaragua 2016

## DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

Dios por permitirnos llegar a este momento especial en nuestras vidas, él nos ha dado la vida, la salud y la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo que hemos enfrentado durante estos 5 años de carrera, y en los meses de la realización de este trabajo, sin su ayuda y bendición no estuviéramos alcanzando esta gran meta.

A nuestros padres, quienes nos han acompañado durante todo el trayecto, sin su esfuerzo no sería posible culminar esta etapa de nuestras vidas, siempre han estado con nosotras y nos han ayudado en los momentos más difíciles, apoyándonos incondicionalmente y animándonos a seguir adelante en los momentos de debilidad.

A nuestra familia, amigos y personas que de una u otra manera nos han acompañado en los momentos buenos y malos, y nos han mostrado su cariño y apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería Química por facilitarnos las instalaciones y parte de los materiales, indispensables para la realización de este trabajo.

Agradecemos a la Facultad de la Tecnología de la Construcción por facilitarnos el Laboratorio de Materiales y Suelo para el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos al personal, trabajadores y técnicos del Laboratorio de Ambiente y del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química, así como del Laboratorio de Materiales y Suelo de la Facultad de la Tecnología de la construcción, por su apoyo durante la realización de la investigación.

Agradecemos el apoyo y dedicación de tiempo al M en C. Léster Espinoza Pérez, quien durante la realización de este trabajo compartió sus conocimientos, con mucha paciencia, y acompañarnos hasta la etapa final de este trabajo.

Y finalmente agradecemos a las personas que de algún u otro modo participaron durante la realización de esta tesis.

## RESUMEN

Con la finalidad de evaluar el efecto de la sustitución de la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) sobre las propiedades físico-mecánicas y durabilidad de morteros activados alcalinamente con una solución de silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e hidróxido de sodio (NaOH) se realizó, como parte de la caracterización de las cenizas de cascarilla de arroz, un estudio de Espectroscopía de absorción infrarroja (FT-IR) el cual mostró que la ceniza se comporta como un material puzolánico predominantemente amorfo.

La ceniza se obtuvo mediante la calcinación controlada de la cascarilla de arroz. La temperatura óptima de calcinación se determinó mediante un ensayo de actividad puzolánica, obteniéndose una temperatura óptima de  $700^\circ\text{C}$ .

Se elaboraron morteros con niveles de sustitución en porcentajes en peso de ceniza por cal hidratada (CH) de 90/10, 80/20 y 75/25, en los que se varió el porcentaje en peso de  $\text{Na}_2\text{O}$  y el módulo de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (MS) en la solución activante con el fin de evaluar las propiedades físico-mecánicas de los mismos mediante ensayos de resistencia mecánica a la compresión (RMC). Se comprobó que conforme aumenta el porcentaje de ceniza en las mezclas disminuyen los valores de RMC. Se evidencia además, un desarrollo temprano de las resistencias, debido a que las distintas formulaciones alcanzaron sus resistencias a los primeros 3 días de curado y no presentaron mayores evoluciones al transcurrir el tiempo.

Al analizar los resultados de la resistencia mecánica a la compresión de los morteros elaborados con las distintas formulaciones se determinaron los niveles óptimos a los cuales debe fijarse cada variable de estudio, obteniéndose que para maximizar dichos valores de resistencia se deberá utilizar un porcentaje de ceniza del 75%, un  $\%\text{Na}_2\text{O}$  del 10% y un MS de 1.5.

Se identificaron los productos de reacción en pastas mediante el análisis de espectroscopía infrarroja, que se realizó a los 1, 7, 14, 21 y 28 días de curado de pastas elaboradas con los niveles óptimos. Entre los principales compuestos identificados se encuentra el silicato de calcio hidratado (C-S-H) y carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Se expusieron a un tratamiento térmico los morteros elaborados con los niveles óptimos. Las propiedades de los morteros expuestos se ven sustancialmente modificadas debido a la aparición de fisuras que afectan su estructura y valores de RMC muy pobres de 4.59 MPa, presentando una resistencia residual del 51.79 %.

Los mejores resultados en términos de RMC se obtuvieron para el sistema CCA-CH5, alcanzando valores de 9.53 MPa a los 28 días de curado.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivo General .....	3
2.2	Objetivos Específicos .....	3
III.	MARCO TEÓRICO.....	4
3.1	Geopolímeros.....	4
3.1.1	Reacción de geopolimerización.....	4
3.1.2	Composición química de geopolímeros.....	6
3.1.3	Propiedades de geopolímeros.....	7
3.2	Materiales alternativos .....	7
3.2.1.	Puzolanas.....	8
3.2.2.	Tipos de puzolanas.....	8
3.2.3.	Cascarilla de arroz.....	10
3.2.4.	Cenizas de Cascarillas de arroz .....	12
3.3.	Morteros.....	13
3.3.1.	Propiedades de morteros .....	13
3.3.2.	Curado de Morteros.....	15
3.4.	Componentes de morteros.....	16
3.4.1.	Cal .....	16
3.4.2.	Adiciones activas.....	17
3.4.3.	Agregados .....	18
3.4.4.	Aditivos .....	18
3.4.5.	Agua .....	18
3.5.	Activación alcalina.....	19
3.5.1.	Solución Activante .....	20
3.6.	Técnicas de Caracterización.....	21
3.6.1.	Técnicas de caracterización química de cenizas de cascarilla de arroz 21	
3.6.2.	Técnicas de caracterización del agregado fino.....	22

3.6.3.	Determinación de propiedades físicas en pastas CCA/CH.....	26
3.6.4.	Determinación de propiedades físicas en morteros frescos .....	27
3.6.5.	Determinación de propiedades física/mecánicas en morteros endurecidos .....	28
3.6.6.	Técnicas de caracterización en pastas endurecidas .....	29
4	METODOLOGÍA .....	31
4.1.	Lugar de desarrollo .....	31
4.2.	Materiales y Equipos .....	31
4.2.1.	Equipos.....	31
4.2.2.	Materiales .....	36
4.2.3.	Obtención de las cenizas de cascarilla de arroz.....	38
4.3.	Métodos .....	39
4.3.1.	Variables de estudio .....	39
4.3.2.	Diseño Experimental.....	41
4.3.3.	Preparación de sistemas .....	42
4.3.4.	Determinación de propiedades físicas en pastas CCA/CH.....	43
4.3.5.	Determinación de propiedades físicas en morteros frescos .....	43
4.3.6.	Determinación de propiedades física/mecánicas en morteros endurecidos .....	44
4.3.7.	Técnicas de caracterización en pastas endurecidas .....	44
5	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	45
5.1.	Resultados de la Caracterización de materiales .....	45
5.1.1.	Caracterización de la CCA .....	45
5.1.2.	Caracterización del agregado.....	46
5.2.	Resultados de Ensayo de Actividad Puzolánica .....	49
5.3.	Resultados de fluidez en morteros frescos .....	52
5.4.	Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión de morteros CCA/CH .....	53
5.5.	Comparación entre morteros óptimos CCA/CH y morteros de referencia 100% Cemento Portland .....	61
5.6.	Resultados de Tiempo de fraguado .....	62
5.7.	Resultados de Productos de Reacción en Pastas Endurecidas.....	63

5.8. Resultados de Prueba de Durabilidad.....	65
6 CONCLUSIONES.....	68
7 RECOMENDACIONES.....	69
8 NOMENCLATURA.....	70
9 REFERENCIAS .....	73
ANEXO A Ensayo de Actividad Puzolánica .....	79
ANEXO B Monitoreo de conductividad eléctrica y pH a distintas temperaturas ....	83
ANEXO C Formulaciones de Morteros CCA/CH .....	85
ANEXO D Determinación de propiedades físicas del agregado.....	88
ANEXO E Resultados de RMC en morteros geopoliméricos CCA/CH.....	90

### **LISTADO DE ECUACIONES**

Ecuación 1. Cálculo de peso unitario seco suelto (PVSS) .....	22
Ecuación 2. Cálculo de peso unitario seco compacto (PVSC) .....	22
Ecuación 3. Cálculo de gravedad específica corriente (GE).....	23
Ecuación 4. Cálculo de gravedad específica en condición saturado superficialmente seca ( $GE_{sss}$ ).....	23
Ecuación 5. Cálculo de gravedad específica aparente ( $GE_a$ ).....	23
Ecuación 6. Cálculo de porcentaje de absorción.....	24
Ecuación 7. Cálculo de contenido de humedad.....	24
Ecuación 8. Cálculo de tiempo de fraguado.....	27
Ecuación 9. Cálculo de porcentaje de fluidez.....	27
Ecuación 10. Cálculo de resistencia mecánica a la compresión .....	28
Ecuación 11. Cálculo de resistencia residual .....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Clasificación de las estructuras de polisialatos .....	4
Tabla 3.2 Composición química de la cáscara de arroz .....	11
Tabla 3.3 Características físicas de la cáscara de arroz .....	11
Tabla 3.4 Límites de agregado según ASTM C 136.....	25
Tabla 3.5 Clasificación del agregado de acuerdo al módulo de finura .....	25
Tabla 4.1 Características químicas de CH .....	36
Tabla 4.2 Composición química de SS .....	37
Tabla 4.3 Composición química de NaOH .....	37
Tabla 4.4 MS en la solución activante .....	40
Tabla 4.5 Porcentaje en peso de Na <sub>2</sub> O .....	40
Tabla 4.6 Niveles de sustitución de CCA por CH .....	40
Tabla 4.7 Arreglo Ortogonal Taguchi L <sub>9</sub> (3 <sup>3</sup> ) .....	41
Tabla 5.1 Propiedades físicas de CCA.....	46
Tabla 5.2 Propiedades físicas del agregado .....	48
Tabla 5.3 Niveles óptimos de factores de estudio para morteros CCA/CH .....	60
Tabla 5.4 Contenido de agua para pastas de consistencia normal .....	62
Tabla 5.5 Resultados de RMC de morteros expuestos a 900°C por 2 horas .....	65
Tabla 5.6 Resultados de variación en peso de morteros expuestos a 900°C por 2 horas .....	67
Tabla B.1 Monitoreo de conductividad eléctrica a distintas temperaturas .....	83
Tabla B.2 Monitoreo de pH a distintas temperaturas .....	84
Tabla C.1 Dosificaciones de morteros CCA/CH .....	85
Tabla D.1 Análisis granulométrico del agregado .....	88
Tabla D.2 Determinación de PVSS del agregado .....	88
Tabla D.3 Determinación de PVSC del agregado .....	89
Tabla D.4 Determinación de GE, GESSS, GEa y porcentaje de absorción .....	89
Tabla E.1 Resultados de evolución de desarrollo de RMC en el tiempo para morteros CCA/CH .....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema de reacción de geopolimerización .....	5
Figura 3.2 Composición química del cemento Portland y de materiales alternativos .....	7
Figura 3.3 Clasificación de materiales puzolánicos .....	10
Figura 3.4 Representación esquemática del evaluación de conductividad eléctrica.....	22
Figura 3.5 Aparato de Vicat.....	26
Figura 3.6 Tipos de vibraciones moleculares .....	30
Figura 4.1 Molino de bolas o máquina de degaste de materiales .....	32
Figura 4.2 Mezcladora eléctrica de sólidos .....	32
Figura 4.3 Máquina compresora.....	33
Figura 4.4 Horno para acondicionamiento de agregado .....	33
Figura 4.5 Muffla utilizada para la calcinación.....	34
Figura 4.6 Mesa de fluidez .....	34
Figura 4.7 Medición de fraguado por aparato de Vicat.....	35
Figura 4.8 Espectroscopio infrarrojo para análisis FT-IR .....	35
Figura 4.9 Diagrama de flujo de obtención de CCA .....	39
Figura 5.1 Espectros IR para CCA .....	45
Figura 5.2 Análisis granulométrico del agregado .....	47
Figura 5.3 Impurezas orgánicas de agregados por Colorimetría.....	48
Figura 5.4 Monitoreo de conductividad eléctrica .....	49
Figura 5.5 Velocidad de consumo de iones OH .....	51
Figura 5.6 Variación de fluidez de morteros frescos para formulaciones CCA-CH52	
Figura 5.7 Resultados de evolución de RMC con respecto al tiempo para morteros CCA/CH.....	54
Figura 5.8 Gráfica de superficie de respuesta de RMC a 28 días vs %Na <sub>2</sub> O, %CCA de morteros CCA/CH .....	56
Figura 5.9 Gráfica de superficie de respuesta de RMC a 28 días vs MS, %CCA de morteros CCA/CH .....	57

Figura 5.10 Gráfica de contorno de RMC a 28 días frente a relación %CCA y %Na <sub>2</sub> O de morteros CCA/CH.....	58
Figura 5.11 Gráfica de contorno de RMC a 28 días frente a relación %CCA y MS de morteros CCA/CH .....	59
Figura 5.12 Gráfica de efectos principales para resistencias de morteros CCA/CH a 28 días.....	60
Figura 5.13 Morteros de formulación óptima CCA/CH vs morteros de referencia 100% CP .....	61
Figura 5.14 Resultados de tiempo de fraguado inicial y final de pastas CCA/CH .	63
Figura 5.15 Bandas de transmitancia para pastas geopoliméricas óptimas a 1, 7, 14, 21 y 28 días de curado.....	64
Figura 5.16 RMC de morteros óptimos antes y después de la exposición a las altas temperaturas .....	66
Figura 5.17 Aspectos físico de los morteros a) antes y b) después de la exposición a 900°C .....	66
Figura A.1 Limpieza de cascarilla de arroz .....	79
Figura A.2 Cascarilla de arroz calcinada a distintas temperaturas.....	80
Figura A.3 CCA pulverizada .....	80
Figura A.4 Beakers utilizados para la preparación de suspensiones .....	81
Figura A.5 Solución saturada de CH .....	81
Figura A.6 Suspensiones cal/puzolana .....	82

## I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de materiales de construcción sustentables es una necesidad que cobra cada vez más fuerza en la mayoría de los países del mundo, convirtiéndose en algo vital, sobre todo para los países en desarrollo. El efecto ecológico negativo que provoca la producción de materiales de construcción base cemento portland, para lo cual se consumen cuantiosos recursos energéticos, ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes de materia prima, siendo los residuos industriales agrícolas objetos de fuentes de investigación creciente.

La obtención de cemento implica un alto consumo energético y grandes volúmenes de emisiones de gases de efecto invernadero (la producción de una tonelada de clinker genera aproximadamente una tonelada de CO<sub>2</sub>), lo que convierte en un material costoso y contaminante.

A pesar de ello, la producción mundial de cemento mantiene tendencias crecientes: los países en vías de desarrollo están en proceso de construir su infraestructura, y para ello necesitan grandes cantidades de cemento Portland.

Las puzolanas son materiales inorgánicos que endurecen en agua al ser mezclados con hidróxido cálcico. Estos materiales pueden reemplazar cantidades significativas de cemento Portland en morteros, incluso de hasta el 50% dependiendo del tipo de puzolana.

Una buena parte de los materiales puzolánicos, son subproductos de procesos agrícolas o industriales, que son generados en grandes cantidades, constituyendo en muchos casos un verdadero problema de gestión ambiental, por lo que su uso supone una ventaja medioambiental y económica, además de que pueden mejorar algunas propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros en los que se utilizan. Es decir, en comparación al cemento Portland, estos materiales puzolánicos, contribuyen a una reducción de costes económicos y ecológicos, mejorando en la mayoría de los casos la calidad del producto.

La cascarilla de arroz constituye un subproducto industrial, considerado como un residuo agrícola abundante y hasta ahora poco utilizable para fines productivos, representa aproximadamente un 20% en peso del grano de arroz.

Este subproducto está compuesto de un 94.1% de sílice (SiO<sub>2</sub>), por lo cual es especialmente apto para ser utilizado como materia prima para la elaboración de materiales de construcción no tradicionales (Sosa, 2000). Su aprovechamiento podría generar muchos beneficios como disminución del consumo de

combustibles fósiles, disminución global de gases efecto invernadero, reducción del impacto global de disposición no adecuada de residuos, reducción de costos de producción y la mejora de las propiedades mecánicas y durabilidad de los morteros.

La cáscara del arroz es muchas veces descartada o su aprovechamiento se ha limitado a una estrecha gama de productos agrícolas de bajo valor, como fertilizante, alfombras ganaderas debido a sus propiedades duras y abrasivas y para la elaboración de combustibles.

El cultivo del arroz es uno de los cultivos más importantes en el sector agropecuario y en la dieta de los nicaragüenses, es un producto básico con demanda en el ámbito nacional. Por su bajo precio, el arroz ha sido, entre los granos básicos, el que ha experimentado la más alta tasa de crecimiento en los últimos 10 años (40.2%); pues pasó de 72.9 libras per cápita/año en 1994 a 102.2 libras per cápita en 2003 (INTA, 2009).

Según el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA) en el año 2012 Nicaragua produjo 4.8 millones de quintales de grano de arroz para su propio consumo, teniendo un rendimiento promedio de 2.5 toneladas por hectárea. La cáscara constituye el 20% en peso, por lo que en dicho año se acumuló 96,000 toneladas de cáscara de arroz y la ceniza representa el 20% de la cáscara de arroz, lo que se traduce en 19,200 toneladas de ceniza disponibles para su aprovechamiento.

El arroz se cultiva en todo el territorio nacional en alturas entre 0 y 800 m.s.n.m. Teniendo un crecimiento óptimo a temperaturas entre 25-30°C, siendo la máxima 40°C. Temperaturas de 17 a 18 °C disminuyen el crecimiento del arroz. Entre las zonas del país en las que se produce este grano básico se encuentran el Pacífico Norte (Chinandega y León), Pacífico Sur (Granada, Masaya y Rivas), Las Segovias (Nueva Segovia), Centro Norte, Centro Sur (Boaco y Chontales), RAAN, RAAS y Río San Juan.

Siendo Nicaragua un importante productor de arroz y no poseer alternativas viables económicamente para el aprovechamiento de un residuo de la producción arroceras como lo es la cascarilla de arroz se vislumbra un área de desarrollo potencial que merece ser explotado.

## II. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

- Evaluar las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad de morteros geopoliméricos sintetizados a partir de cenizas de cascarilla de arroz y cal apagada activada alcalinamente para su uso como sustituto total del cemento Portland.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la temperatura óptima de calcinación de la cascarilla de arroz, en el rango de 600-900 °C, mediante mediciones de actividad puzolánica.
- Evaluar el efecto de los porcentajes de sustitución de cal en compósitos de ceniza- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el porcentaje en peso de  $\text{Na}_2\text{O}$  y el módulo de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en la solución activante, sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros (frescos y endurecidos) mediante ensayos de resistencia mecánica a la compresión.
- Seleccionar los niveles óptimos de estudio que influyen sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros a partir de análisis estadísticos.
- Identificar posibles productos de reacción de pastas endurecidas elaboradas con niveles óptimos mediante espectroscopía Infrarroja.
- Evaluar la durabilidad de morteros óptimos mediante prueba de resistencia al fuego.

### III. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Geopolímeros

Son polímeros inorgánicos formados por redes 3D amorfas de tetraedros alternados de  $AlO_4^-$  y  $SiO_4$ , que presentan gran estabilidad térmica y química, con buenas propiedades mecánicas y procesables a temperaturas inferiores a 100 °C. (Álvarez, 2010).

Según Davidovits (1988), el término hace referencia a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química de geopolimerización.

##### 3.1.1 Reacción de geopolimerización

El elemento base de un geopolímero es una cadena tetraédrica de silicio y aluminio mediante un intercambio de átomos de oxígeno. La principal unidad básica que lo compone es un sialato (Davidovits, 1991).

Davidovits (1999), clasificó los tipos de polímeros basándose en el número de átomos de silicio sustituidos por el aluminio, entre ellas: Si-O-Al en polisialato (PS), polisialatosiloxo (PSS) y polisialatodisiloxo (PSDS). En la Tabla 3.1, se muestran las estructuras de sus respectivos polisialatos.

Tabla 3.1 Clasificación de las estructuras de polisialatos

<b>Clasificación</b>	<b>Estructura monomérica</b>
Polisialato (PS) Si: Al=1:1	Mn-(Si-O-Al-O-)n
Polisialatosiloxo (PSS) Si: Al=2:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-)n
Polisialatodisiloxo (PSDS) Si: Al=3:1	Mn-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)n

Fuente: Davidovits (1991)

PSS y PS pueden ser fácilmente sintetizados a temperatura ambiente. Sin embargo, PSDS posee propiedades físicas y térmicas superiores, por lo que se puede utilizar como revestimiento refractario o como herramienta en la preparación de materiales compuestos (Davidovits, 1991).

La reacción de geopolimerización, se produce mediante condiciones alcalinas entre un polvo de aluminosilicato y una solución activante a condiciones ambientales. El proceso de polimerización se lleva a cabo al poner el material



Estas reacciones indican por lo tanto, que cualquier material rico en Si o Al pueden ser fuentes de geopolimerización (Van Jaarsveld, 1997). Se incluyen dos etapas en el proceso químico de geopolimerización, entre ellas:

- Disolución de los materiales de partida en soluciones alcalinas para formar una gel rica en  $Al^{+3}$  y  $Si^{4+}$  sobre las superficies de los materiales
- Policondensación para formar cadenas poliméricas.

### 3.1.2 Composición química de geopolímeros

Los geopolímeros representan fases amorfas metaestables de zeolies (precursores zeolíticos) que se convierten en una fase cristalina (zeolitas), esto siempre y cuando las condiciones y las concentraciones de los reactivos sean adecuados (Van Deventer, 2002).

Las reacciones de geopolimerización se dividen en tres etapas: disolución/hidrólisis, reestructuración y policondensación/gelatinización. La cinética en cada etapa varía según el tipo de aluminosilicato, relación sólido solución, concentración de silicato alcalino, contenido de agua y condiciones de reacción.

Las etapas se describen a continuación:

- ✓ Disolución/hidrólisis: La geopolimerización inicia con la hidrólisis de los iones hidrógeno ( $H^+$ ) con cationes monovalentes ( $Na^+$ ,  $K^+$ ), seguido por la disolución continua de aluminosilicatos, productos de la disolución de la ruptura de bandas de Si-O-Si ó Si-O-Al, en las partículas de los aluminosilicatos para formar reactivos precursores,  $Si(OH)_4$  y  $Al(OH)_4^-$  en la solución. Se produce la gelatinización de aluminosilicato, pasada la disolución, que ocurre en la superficie sólida debido a que la densidad del gel es mayor.
- ✓ Reestructuración: Los aluminosilicatos precursores en la solución, son movibles y son capaces de orientarse parcialmente un estado termodinámicamente estable.
- ✓ Gelatinización: Cuando la concentración de las especies son mayores a las concentraciones de los saturados, se alcanza una condición súper-saturada. En este punto, la polimerización de  $Al^{+3}$  y  $Si^{4+}$  se produce de inmediato.

### 3.1.3 Propiedades de geopolímeros

Los geopolímeros poseen una serie de propiedades que los hace competitivos para productos cementicios. Entre algunas de estas propiedades se tienen:

- ✓ Alta resistencia a la compresión (Van Jaarsveld et al, 1997), llegando a alcanzar hasta 100 Mpa y elevada integridad estructural.
- ✓ Buena resistencia a la abrasión.
- ✓ Curado y endurecimiento rápidos y controlados. En la mayoría de los casos, el 70% de la resistencia a la compresión se alcanza a las 4 horas (Van Jaarsveld et al, 1997).
- ✓ Resistencia al fuego, superior a 1000°C y no emisión de humos tóxicos cuando se calientan (Duxson et al., 2007).
- ✓ Baja permeabilidad (Van Jaarsveld et al., 1997).
- ✓ Buena resistencia a ciclos de hielo-deshielo (Davidovits, 1994).
- ✓ Baja conductividad térmica (Duxson et al., 2007).
- ✓ Fácil adhesión a hormigones, acero, vidrio y cerámicas.

### 3.2 Materiales alternativos

Se puede definir un material alternativo como aquel que tenga propiedades cementosas, esto es que puedan emplearse como sustituto parcial o total del cemento Portland. En la Figura 3.2 se muestra la composición química aproximada de los distintos materiales alternativos empleados en construcción.

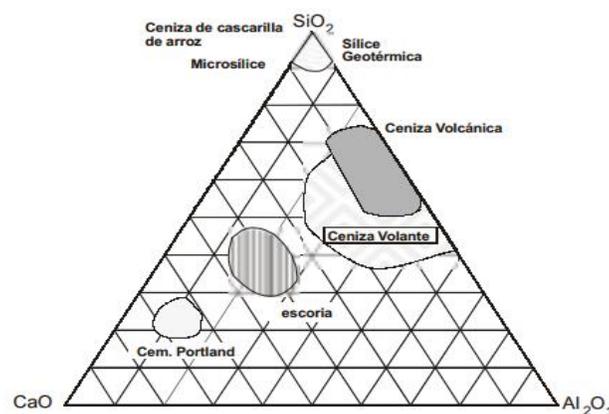


Figura 3.2 Composición química del cemento Portland y de materiales alternativos

Fuente: Escalante, J. (2002)

### 3.2.1. Puzolanas

Según la ASTM C-618 (American Society for Testing and Materials) la puzolana es "un material silíceo o sílico aluminoso que por sí solo posee muy poco o ningún valor cementante; pero que finamente pulverizado y en presencia de agua, reaccionara químicamente con hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), a temperatura ambiente, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes."

Las puzolanas contienen normalmente una gran cantidad de material amorfo y de minerales (olivino, piroxenas, hornablendas, feldespatos), desarrollando la mayoría de ellas su actividad hidráulica como consecuencia del material amorfo, materiales activos (zeolitas) y la superficie específica que les caracteriza, cualidades y compuestos que favorecen la reacción con el hidróxido de calcio.

### 3.2.2. Tipos de puzolanas

Las puzolanas, según su origen, se clasifican en dos grandes grupos: las naturales (calcinadas o no) y las artificiales (subproductos industriales). En la figura 5.2 se clasifican dichos materiales.

- **Puzolanas Naturales**

Este grupo de materiales tienen en común un comportamiento similar frente a la cal. Las puzolanas naturales son productos silíceos, este nombre se debe al alto contenido de silicio y aluminio que contienen.

**Cenizas volcánicas:** Se forman por erupciones de carácter explosivo, producidas por enfriamiento brusco de la lava., originando la formación del estado vítreo.

**Tobas volcánicas (zeolitas):** Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación diagenética.

**Tierras de diatomeas (diatomitas):** Es una puzolana de origen orgánico, formada por rocas porosas silíceas sedimentarias, en su mayor parte se forman por depósitos de caparzones o esqueletos silíceos procedentes de organismos unicelulares, tales como las algas acuáticas unicelulares (diatomeas) y los protozoos radiolarios.

- **Puzolanas Artificiales**

Se definen como materiales que deben su condición a un tratamiento térmico adecuado. Dentro de esta condición cabe distinguir dos grupos: el formado por materiales silicatados de naturaleza arcillosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos, y otro el constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales, que en virtud de su naturaleza y de las transformaciones en las mismas, adquieren propiedades puzolánicas.

**Humo de sílice (microsílice):** Es un subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para la producción de silicio o aleaciones de ferrosilicio. Este puede ser mezclado con el clinker del cemento Portland en la cementera o puede añadirse al hormigón.

**Cenizas volantes:** Son las cenizas que se producen en la combustión de carbón mineral (lignito) fundamentalmente en las plantas térmicas de generación de electricidad.

**Arcillas activadas o calcinadas artificialmente:** Las arcillas naturales no presentan actividad puzolánica a menos que su estructura cristalina sea destruida mediante un tratamiento térmico a temperaturas del orden de 600 a 900°C. Entre estas se encuentran, por ejemplo, residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

**Escorias de fundición:** Principalmente de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos. Estas escorias deben ser violentamente enfriadas para lograr que adquieran una estructura amorfa.

**Ceniza de cascarilla de arroz:** Durante la operación de descascarillado del arroz se produce un material de baja densidad global y que, por tanto, representa un grave problema para su vertido o almacenamiento. Cada tonelada de arroz virgen produce 200 kilogramos de cascarilla, que después de su combustión produce aproximadamente 40 kilogramos de cenizas.

Si no se controla la calcinación de la cascarilla, las cenizas producidas están formadas, principalmente, por cristobalita y tridimita y deben de molerse muy finamente para que posean propiedades puzolánicas. Sin embargo, las cenizas producidas a baja temperatura contienen sílice en forma celular y no cristalina por consiguiente un producto altamente puzolánico.

En la Figura 3.3 se presenta un esquema de los materiales puzolánicos y su clasificación.

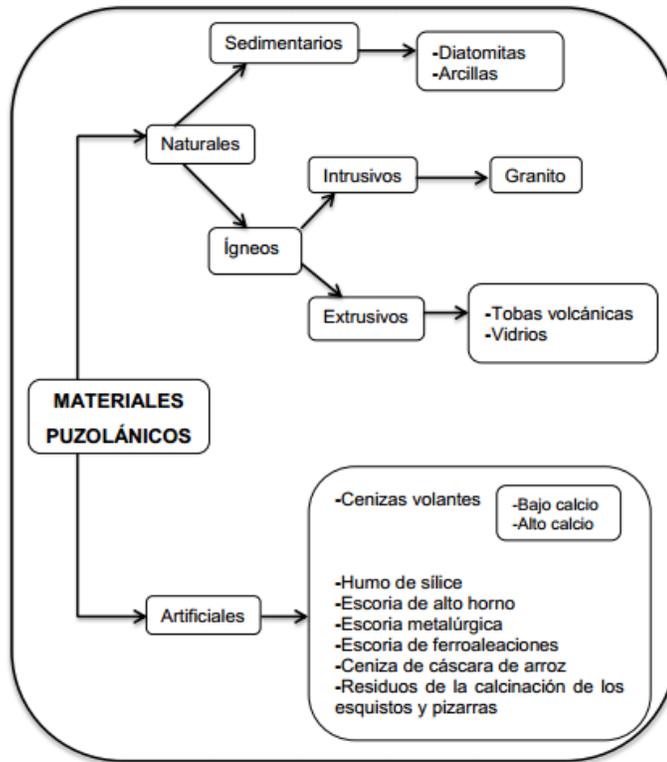


Figura 3.3 Clasificación de materiales puzolánicos

Fuente: Juárez, B. (2012)

### 3.2.3. Cascarrilla de arroz

La cascarilla de arroz, denominada pajilla, se obtiene del proceso de pilado, en la cual la cáscara se separa del grano haciendo pasar el arroz en cáscara entre rodillos.

La cascarilla de arroz está compuesta principalmente por celulosa, lignina y sílice, en porcentajes de 50%,30% y 20% en peso, respectivamente. La celulosa y la lignina se eliminan por medio de calcinación controlada de la cascarilla, por lo que la sílice constituye el componente primario de la ceniza obtenida, esta existe en forma opalina, es decir una forma amorfa e hidratada de la sílice.

Es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del rojizo al púrpura oscuro. Debido a su baja densidad esta al apilarse ocupa espacios grandes. Su peso específico es de 125 kg/m<sup>3</sup>, es decir, que 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m<sup>3</sup> a granel (Varón, 2005).

## Usos

La cáscara del arroz es un residuo agrícola abundante ya que está ligado a la producción de un grano básico, este subproducto del proceso de producción del arroz presenta en su composición los elementos esenciales, indispensables para su uso como materia prima para la producción de materiales de construcción. Sin embargo en la actualidad su aprovechamiento es limitado, ya que se utiliza para la elaboración de fertilizantes, alfombras ganaderas y como combustible. En este trabajo de investigación se pretende evaluar la posibilidad de aprovechar este desecho como material cementante.

## Propiedades

La composición química de la cascarilla de arroz se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 Composición química de la cascarilla de arroz

Componente	Porcentaje (%)
Ceniza de Sílice (SiO <sub>2</sub> )	94.1
Óxido de Calcio (CaO)	0.55
Óxido de Magnesio (MgO)	0.95
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	2.10
Óxido de Sodio (Na <sub>2</sub> O)	0.11
Sulfato	0.06
Cloro	0.05
Óxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> )	0.05
Óxido de Aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.12
Otros componentes (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.82

Fuente: Varón, 2005

La capacidad calorífica de la cascarilla es 3,281.6 Kcal/Kg, su combustión se dificulta debido a su estructura cerrada y al alto contenido de sílice (20%), es muy resistente a la degradación natural. El área superficial de las cenizas puede variar entre 50-152 m<sup>2</sup>/g, lo cual la hace altamente reactiva.

Las características físicas de la cascarilla de arroz se presentan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características físicas de la cascarilla de Arroz

<b>Características</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Densidad real	0.780
Densidad global sin compactar	0.108
Densidad global compactado	0.143

Fuente: Gonzáles de la Cotera, M. (1993)

#### **3.2.4. Cenizas de Cascarillas de arroz**

Es el residuo de la calcinación de la cáscara de arroz, la temperatura juega un papel importante en la producción de la CCA, ya que para que posea buenas propiedades puzolánicas es necesario controlar la quema de la misma. La temperatura no debe sobrepasar los 700°C, sino la sílice cristaliza, perdiendo así su grado de reactividad (Juárez, 2012).

Las condiciones en el proceso de calcinación influyen sobre las características de la ceniza que se obtenga, es decir, si esta se incinera a bajas temperaturas, la parte orgánica de la cascarilla no se eliminaría por completo, quedando considerables cantidades de carbón en las cenizas; si por el contrario la temperatura es muy elevada se corre el riesgo de que la sílice sufra un proceso de cristalización. Ambas condiciones supondrían una disminución de la reactividad de la CCA, pudiendo incluso llegar a convertirla en totalmente inerte.

Con el aumento de la temperatura de calcinación, la sílice presente en la CCA se transforma en formas cristalinas, como son la cristobalita y tridimita y por lo tanto se requerirá de una superficie específica mayor, de un grado mayor de molienda para desarrollar la actividad puzolánica (Metha, 1989).

Los estudios han demostrado que la quema de cascarilla de arroz a 700 °C produce una ceniza con la composición óptima de un material puzolánico (Metha, 1989).

El color de la CCA dependerá del contenido de carbón residual, la ceniza parcialmente quemada contiene carbón y por lo tanto presentará un color negro, siendo la ceniza más reactiva de color gris claro a blanco.

De forma general puede considerarse la relación de arroz/ceniza de la siguiente forma: La cascarilla representa el 20% en peso del grano de arroz y la ceniza obtenida representa el 20% de la cascarilla.

Al controlar la calcinación de la cascarilla de arroz se controla de igual manera la cantidad de sílice en la fase amorfa presente, por lo cual:

- A 100 °C se desprende el agua absorbida, con una pérdida de peso de 4 a 8%.
- A 350 °C se pierden los componentes volátiles e inicia la calcinación.
- La calcinación del carbón ocurre a temperaturas superiores a 350°C. Uno de los problemas en la oxidación del carbón es la oxidación de la capa superficial de la cáscara que no permite oxidar con facilidad la parte central de volumen calcinado a menos que el aire pase a través de la superficie. Aproximadamente el 45% de la pérdida de peso ocurre en la segunda etapa mientras que la pérdida de peso restante sucede en esta tercera etapa.
- Cristalización de la sílice (amorfa) de la ceniza a temperaturas superiores a 700 °C, con formación de cristobalita y tridimita.

### **3.3. Morteros**

Se denomina mortero a cualquier mezcla natural o artificial cuyas características constructivas esenciales son su plasticidad inicial, que permite trabajarla y moldearla según la necesidad, y su posterior endurecimiento y aumento de la resistencia mecánica, que lo hace útil como material de construcción.

Este material ha sido utilizado como material de construcción, ya que cumple con las siguientes funciones:

- Estructurales: Constituye el material de base para la construcción de muros, paredes, cubiertas, etc. armado en estructuras de ramas, palmas, maderas, etc. Y el material de unión y asentamiento de bloques de piedra, de ladrillos y de las piezas labradas que forman los elementos constructivos.
- Decorativas: constituye el material de revestimientos y estucados, que además de una función estética, protegen a los elementos constructivos que recubren de la acción de la intemperie.

#### **3.3.1. Propiedades de morteros**

- **Propiedades de morteros en estado plástico**

**Manejabilidad:** Es una medida de la facilidad de manipulación de la mezcla, es decir de la facilidad para dejarse manejar. Está relacionada con la consistencia de

la mezcla en cuanto a blanda o seca, tal que como se encuentra en estado plástico; depende de la proporción de arena, cemento, forma, módulo y finura de la arena.

**Retención de agua:** Se refiere a la capacidad del mortero de mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado. Para mejorar la retención de agua se puede agregar cal, o aumentar el contenido de finos en la arena, o emplear aditivos plastificantes.

La retención de agua influye en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, pues un mortero que no retenga el agua no permite la hidratación del cemento.

**Velocidad de endurecimiento:** Los tiempo de fraguado inicial y final de un mortero están entre 2 y 24 horas; estas dependen de la composición de la mezcla y de las condiciones ambientales como el clima y la humedad.

- **Propiedades de los morteros en estado endurecido**

**Retracción:** Se debe principalmente a la retracción de la pasta de cemento y se ve aumentada cuando el mortero tiene altos contenidos de cemento. Para mejorar esta retracción y evitar agrietamientos es conveniente utilizar arenas con granos de textura rugosa, y tener en cuenta además que en clima caliente y de muchos vientos, el agua tiende a evaporarse más rápidamente produciendo tensiones internas en el mortero, las que se traducen en grietas visibles.

**Adherencia:** Es la capacidad de absorber, tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y a una estructura.

**Resistencia:** Si el mortero es utilizado como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si el mortero va a ser utilizado para soportar cargas altas, debe poseer una alta resistencia a la compresión. El tamaño de los granos de la arena juega un papel muy importante; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento. A mayores densidades el mortero es más resistente y más impermeable.

El contenido de agua también influye sobre la resistencia; los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, por lo que pueden ser más densamente compactados.

**Durabilidad:** Se define como la resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como, baja temperatura, penetración de agua, desgaste por abrasión y

agentes corrosivos. En general puede decirse que los morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad.

**Apariencia:** La apariencia del mortero después del fraguado, juega un papel importante en mampostería de ladrillos a la vista; para lograr una buena apariencia es necesario aplicar morteros de buena plasticidad.

### **3.3.2. Curado de Morteros**

El curado es un período crítico del proceso de endurecimiento de los morteros de cemento frescos, en el que desarrolla sus principales características en condiciones específicas. Un curado adecuado requiere principalmente una disponibilidad permanente de humedad que permita las reacciones de hidratación a temperaturas moderadas y, en ausencia de fuerzas externas, en las primeras edades. También es sabido que la temperatura afecta a las propiedades del mortero.

El curado tiene por objetivo impedir el secado prematuro del concreto:

- La reacción química del agua y del cemento se interrumpe por falta del agua necesaria, de modo que el concreto no adquiere las propiedades que su composición permitiría;
- Se produce una contracción precoz, generando la formación de fisura. Al evaporarse, el agua desarrolla fuerzas que generan, en el cemento en fase de endurecimiento, una contracción cuyo valor puede sobrepasar la resistencia a la tensión del concreto en proceso de endurecimiento.

#### ➤ **Tiempo de Curado**

Un criterio adecuado para determinar el período mínimo de curado es el plazo necesario para alcanzar un 70% de la resistencia especificada.

Para un concreto de resistencia normal (21 a 35 Mpa a 28 días), se le deberá dar un tiempo mínimo de curado de 7 días. Por otra parte para un concreto de alta resistencia inicial debe curarse en 3 días. Sin embargo, estas especificaciones parten de la convicción de que la estructura curada completará la hidratación del cemento y se alcanzará la resistencia específica a los 28 días.

#### ➤ **Temperatura de Curado**

La temperatura es un factor importante en un curado apropiado, basándose en la velocidad de hidratación, es mayor el desarrollo de resistencias a altas

temperaturas. Generalmente la temperatura debe mantenerse por encima de los 10°C, para un adecuado desarrollo de resistencias. La temperatura debe mantenerse uniforme mientras esté ganando resistencia, para evitar grietas debido a choques térmicos (National Ready Mixed Concrete Association, s.f).

### 3.4. Componentes de morteros

#### 3.4.1. Cal

Existen dos tipos de cal de acuerdo a su composición química, cal aérea e hidráulica.

- **Cal aérea**

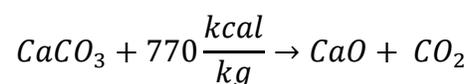
La cal aérea es producida por la calcinación de calizas o dolomías, constituidas por óxido o hidróxido de calcio y/o magnesio. Carecen de propiedades hidráulicas y no son susceptibles a endurecer bajo el agua.

La cal aérea se clasifica:

- Cállicas: Calcinación de rocas calizas puras > 95% de riqueza en calcio.
- Dolomíticas: Calcinación de piedras dolomíticas que contienen magnesio (MgO > 5%).
- Cales vivas: Compuestas por óxido de calcio y magnesio.
- Cales hidratadas: Resultante del apagado de la cal viva, compuestas por hidróxido de calcio y magnesio.

#### **Obtención de cal cálcica**

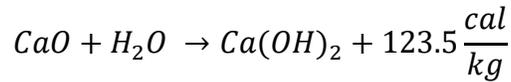
La cal aérea cálcica se obtiene por calcinación de calizas, como son CaCO<sub>3</sub> con una pureza > 95% y a una temperatura de 900 °C, según la siguiente reacción:



Se debe de utilizar cal hidratada completamente apagada para evitar fisuras y otra serie de desperfectos en la superficie, por aumento de volumen debido a su hidratación a posteriori aplicación del mortero.

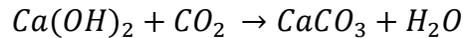
#### **Hidratación o apagado de la cal viva**

El producto obtenido, o hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub>, se conoce como cal hidratada o apagada, producto de la reacción:



### **Endurecimiento de cal hidratada (carbonatación)**

La reacción de carbonatación tiene lugar a:



Se dá desde la superficie hacia adentro, conservando un núcleo húmedo que es el que le confiere sus propiedades de transpiración y plasticidad. Se disminuye la tendencia a la fisuración.

- **Cal hidráulica**

Es una mezcla de óxido de calcio más silicatos y aluminatos cálcicos. La parte del óxido de comporta como cal aérea, el óxido de calcio pasa a hidróxido de calcio y tiene lugar una reacción con el aire. La parte de los silicatos y aluminatos reacciona cuando se mezcla con agua, dando lugar a silicatos y aluminatos cálcicos hidratados.

Estas se clasifican según el Proyecto de Norma 459-1 en:

- Cales hidráulicas naturales: Proceden de la calcinación de una roca con una mezcla de margas y arcillas ricas en sílice.
- Cales hidráulicas artificiales: Constituidas por hidróxido de calcio, silicatos de calcio y aluminatos de calcio producidos por la mezcla de constituyentes adecuados.
- Cales formuladas: Cales con propiedad hidráulicas compuestas por cal aérea y/o cal hidráulica natural, con adiciones de material hidráulico y/o puzolánicos

#### **3.4.2. Adiciones activas**

Materiales inorgánicos que finamente divididos se pueden utilizar en la fabricación de morteros con el fin de mejorar ciertas propiedades. Por su mezcla con la cal desarrollan propiedades hidráulicas.

- **Materiales con propiedades puzolánicas**

Sustancias naturales o artificiales de composición silíceas o sílico-aluminosas o en combinación de ambas que no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan con el hidróxido de calcio para formar silicatos y aluminatos capaces de desarrollar resistencia tanto a corto como a largo plazo.

### **3.4.3. Agregados**

Los agregados constituyen el 75% del volumen, de una mezcla de cemento. Este término comprende las arenas, gravas naturales y la piedra triturada. La granulometría y el tamaño máximo de los agregados son importantes debido a su efecto en la dosificación, trabajabilidad, porosidad y contracción del cemento. Para la gradación de los agregados se utilizan una serie de tamices.

### **3.4.4. Aditivos**

Son sustancias o materiales añadidos en pequeñas cantidades (su proporción < 5% en peso del total de contenido de conglomerante), que aportan a las propiedades del mortero, tanto en estado fresco como endurecido, determinadas modificaciones definidas, mejorando las características de estos. Los aditivos más comunes se clasifican según las propiedades que confieren al mortero en los siguientes tipos: Aireantes, plastificantes, retardantes, Hidrofugantes, retenedores de agua y resinas.

### **3.4.5. Agua**

Es importante la calidad del agua que se utilice en la elaboración de los morteros, debido a que ciertos parámetros pueden afectar el desarrollo de las propiedades físicas y mecánicas de los mismos, por ejemplo, el agua no debe contener sustancias en suspensión o disueltas que alteren el fraguado del cemento. Por lo tanto, debe utilizarse agua potable. Algunas de las sustancias que con mayor frecuencia se encuentran en las aguas y que inciden en la calidad del concreto se presentan a continuación:

- Si se registra presencia de carbonatos y bicarbonatos de sodio o de potasio en el agua de la mezcla, estos pueden reaccionar con el cemento

produciendo rápido fraguado; en altas concentraciones también disminuyen la resistencia del concreto.

- Las aguas ácidas con pH por debajo de 3 pueden crear problemas en el manejo u deben ser evitadas en lo posible.
- Cuando el agua contiene aceite mineral, en concentraciones superiores a 2%, pueden reducir la resistencia del concreto en un 20%.

El agua cumple con una función vital en el desarrollo del concreto, como agua de mezclado. Por lo tanto, se puede utilizar cualquier agua natural apta para consumo, de acuerdo a las Normas CAPRE.

En general el agua que tenga menos de 2,000 ppm (partes por millón) de sólidos disueltos puede usarse para la fabricación del concreto y evitar a toda costa que esté contaminada de sulfatos que son agresivos al cemento. Si no se eliminan las impurezas excesivas contenidas en el agua de mezcla, pueden afectar no solo el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto, sino que a su vez pueden producir corrosión.

Por lo tanto, se considera que si el agua es clara y no tiene algún sabor pronunciado, puede ser usada como agua de mezclado, sin necesidad de mayores pruebas. Pero, si el agua no procede de una fuente de suministro de agua potable, se compara con los requisitos físico-químicos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NMX- C- 122.

### **3.5. Activación alcalina**

La activación alcalina es un proceso químico en el cual un material pulverulento de naturaleza silicoaluminosa se mezcla con un activador alcalino para generar una pasta con capacidad de fraguar y endurecer en un corto período de tiempo. El principal producto de reacción en este proceso es un gel de silicoaluminato sódico (gel N-A-S-H), amorfo a la DRX, que presenta estructura tridimensional. Estos materiales, a los que genéricamente se les denomina polímeros inorgánicos alcalinos, y también geopolímeros, geocementos, zeocerámicas, etc., pueden presentar una amplia variedad de propiedades y características (elevada resistencia mecánica inicial, resistencia al fuego, a los ácidos, etc.) dependiendo de las condiciones en las que se desarrolla el proceso (tipo de activador, temperatura, tiempo, etc.) (Monzó, Fernández et al, 2008).

La activación alcalina de materiales es un proceso químico que permite la transformación de determinados productos, parcial o totalmente amorfos y/o metaestables, en compactos esqueletos cementantes (Tailing et al., 1989).

La activación alcalina de materiales silicoaluminosos de configuración parcial o totalmente amorfa o vítrea (en estado de fina división) con disoluciones fuertemente alcalinas y tras un corto período de curado térmico suave (50-100°C), permite obtener un material con buenas propiedades cementantes (Duxson et al., 2007; Skvara et al., 2005; Fernández & Palomo 2005 a).

Usualmente los álcalis cáusticos o las sales alcalinas son usados como activadores alcalinos para cementos y hormigones activados alcalinamente. Estos se pueden clasificar en seis grupos de acuerdo a sus composiciones químicas (Shi, Pavel & Roy, 2006):

1. Álcalis Cáusticas: MOH
2. Sales ácidas débiles sin silicatos:  $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF, etc.
3. Silicatos:  $M_2O_{(n)}SiO_2$
4. Aluminatos:  $M_2O_{(n)}Al_2O_3$
5. Aluminosilicatos:  $M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$
6. Sales ácidas fuertes sin silicatos:  $M_2SO_4$

Donde M es un ión alcalino del tipo Na, K o Li. De todos estos activadores, el NaOH,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2O_{(n)}SiO_2$  y el  $Na_2SO_4$  son los más utilizados por su amplia disponibilidad y economía.

### 3.5.1. Solución Activante

Un activador alcalino se define como la solución responsable de acelerar la reacción de la fuente de aluminosilicato, favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta con estos hidratos. Ejercen la función de solubilizar la fuente de aluminosilicatos, favorecer la formación de hidratos solubles y así formar una estructura compacta con estos hidratos.

### **3.6. Técnicas de Caracterización**

#### **3.6.1. Técnicas de caracterización química de cenizas de cascarilla de arroz**

##### **➤ Medición de Actividad puzolánica de la ceniza de cascarilla de Arroz**

El Ensayo de Puzolanidad da una idea de la reactividad química del material, es decir del grado de reacción entre la puzolana y el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento Pórtland (Vásquez & Villanueva, 1998).

Se puede evaluar la actividad de puzolanas por medidas de conductividad eléctrica y pH, basándose en un registro de dichos datos en suspensiones cal/puzolana. Con este método se verifica la reducción en los valores de pH y conductividad debido a la disminución en la concentración de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  en la solución. Este método es eficaz y, lo que es más importante, los tiempos de ensayo son relativamente cortos cuando se comparan con los otros métodos existentes (Bonilla et al, 2008).

En 1989, Luxán et al. Proponen un método para evaluar la actividad puzolánica de materiales donde se determinaba la pérdida de conductividad de una solución saturada de hidróxido de calcio al añadir una puzolana. Esta técnica permite determinar la actividad puzolánica de materiales de carácter silíceo a 40°C de temperatura.

En la presente tesis, se prepararon suspensiones cal/puzolana con un exceso de hidróxido de calcio. Con este tipo de suspensiones se determina el tiempo en el que se alcanza la insaturación con respecto al hidróxido de calcio, así como también se monitorea la reducción de la concentración de los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$ , debido a la reacción entre el hidróxido de calcio y la adición, es decir, debido a la reacción puzolánica.

La metodología de este ensayo consiste en el monitoreo de la conductividad eléctrica de suspensiones acuosas cal/puzolanas. El ensayo de conductividad eléctrica permite medir la reactividad de las muestras calcinadas en las primeras horas y con períodos cortos entre cada medición.

En general, en este tipo de ensayo, a partir de cierto tiempo de reacción se observa una reducción en los valores de conductividad eléctrica, indicando que el avance de la reacción puzolánica llega a producir la insaturación de la disolución con respecto al hidróxido de calcio. Estos valores disminuyen debido a la reacción entre los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$  con las partículas de puzolanas, para formar compuestos cementantes. La presencia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sólido sin disolver hace que

se mantenga las concentraciones constantes de este compuesto en la suspensión (saturación), y que a medida que se consuman los iones en la disolución, se producirá una mayor solubilización del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente en forma de sólido (Mitsuuchi, M. 2012).

Esto se cumplirá, hasta que todo el sólido se consuma, momento a partir del cual se podrá advertir un descenso significativo de los valores de pH y conductividad, puesto que el sistema estará insaturado con respecto al hidróxido de calcio.

En la Figura 3.4 se muestra una representación esquemática del ensayo para la evaluación de la actividad puzolánica a través de medidas de conductividad eléctrica.

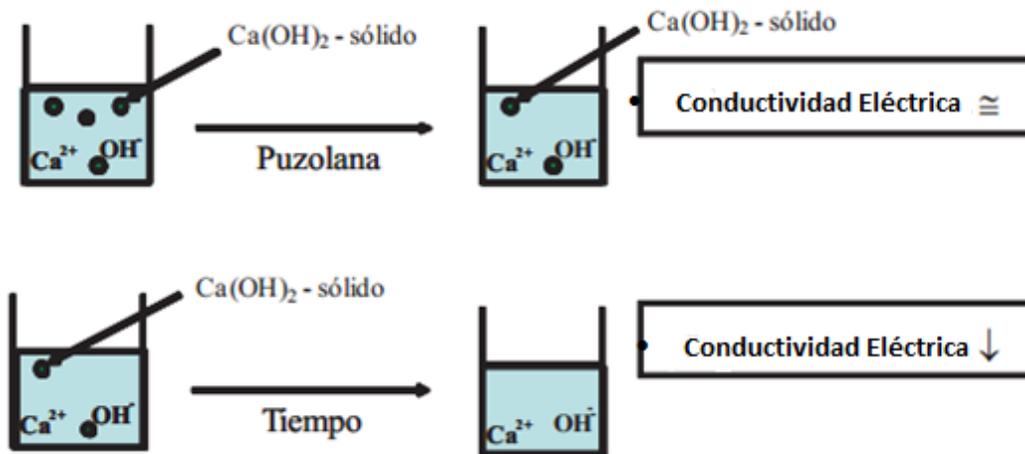


Figura 3.4 Representación esquemática de evaluación de conductividad eléctrica

Fuente: Mitsuuchi, M. (2012)

### 3.6.2. Técnicas de caracterización del agregado fino

#### ➤ Determinación de pesos unitarios secos sueltos y secos compactos

Se define el peso unitario del agregado como la relación entre el peso de una determinada cantidad de material y el volumen ocupado por el mismo. Para establecer dichas relaciones, se determinará el Peso Unitario Seco Suelto (PVSS) y Peso Unitario Seco Compacto (PVSC).

Según ASTM C29, el PVSS y PVSC se calculan mediante las ecuaciones 1 y 2, respectivamente:

$$PVSS = \frac{m_{ms+R} - m_R}{V_R} \quad (1)$$

Dónde:

PVSS: Peso volumétrico seco suelto en Kg/m<sup>3</sup>, m<sub>ms+R</sub>: Masa del material suelto + la masa del recipiente en Kg, m<sub>R</sub>: Masa del recipiente en Kg.

$$PVSC = \frac{m_{mc+R} - m_R}{V_R} \quad (2)$$

Dónde:

PVSC: Peso volumétrico seco compacto en Kg/m<sup>3</sup>, m<sub>mc+R</sub>: Masa del material compacto + la masa del recipiente en Kg, m<sub>R</sub>: Masa del recipiente, en Kg.

➤ **Determinación de gravedad específica y porcentaje de absorción**

La gravedad específica, también llamada peso específico, es la relación en peso de una cantidad determinada de árido seco y el peso de un volumen igual de agua; tomando en cuenta que el volumen incluye tanto las partículas del mismo como sus orificios o vacíos intergranulares.

Con este método se logrará determinar, la gravedad específica corriente (GE), la gravedad específica saturada superficialmente seca (GE<sub>sss</sub>) y la gravedad específica aparente (GE<sub>a</sub>), para lo cual se seguirá la Norma ASTM C128.

- La gravedad específica corriente (GE) se calcula utilizando la Ecuación 3:

$$GE = \frac{A}{V - W} \quad (3)$$

Expresando la Ecuación 3 de otra forma:

$$W = d - (B + C)$$

- La gravedad específica en condición saturado superficialmente seca (GE<sub>ss</sub>) se obtiene mediante la Ecuación 4:

$$GE_{sss} = \frac{B}{V - W} \quad (4)$$

- Gravedad específica aparente (GEa)

$$GE_a = \frac{A}{(V-W)-(B-A)} \quad (5)$$

Dónde

GE: Gravedad específica corriente en g/cm<sup>3</sup>, GEss: Gravedad específica saturada superficialmente seca en g/cm<sup>3</sup>, GE<sub>a</sub> : Gravedad específica aparente en g/cm<sup>3</sup>, Abs<sub>a</sub>: Porcentaje de absorción de la arena en porcentaje, A: Peso de la muestra seca en g, B: Peso de la muestra en condición saturada superficialmente seca en g, C: Peso del frasco seco y limpio en g, d: Peso del frasco + peso del material seco + peso agua añadida en g, V: Capacidad del frasco en mL, W: Agua añadida al frasco en g.

La absorción se refiere al aumento en el peso de los agregados debido al agua contenida en los poros del material. Es una propiedad de gran importancia ya que indica la cantidad de agua que puede penetrar en los poros permeables de los agregados en 24 horas, cuando estos se encuentran sumergidos en agua.

$$Abs_a = \left[ \frac{500-A}{A} \right] * 100\% \quad (6)$$

#### ➤ **Determinación del contenido de humedad**

Se define como la cantidad de agua presente en el agregado al momento del ensayo, expresada en porciento del peso seco.

La Norma ASTM C566-84 expresa el contenido de humedad mediante la Ecuación número 7:

$$H_a = \left[ \frac{m_{mh} - m_{ms}}{m_{ms}} \right] * 100\% \quad (7)$$

Dónde:

Ha: Humedad de la arena en porcentaje, m<sub>mh</sub>: masa de la muestra húmeda en g, m<sub>ms</sub>: masa de la muestra seca en g.

#### ➤ **Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico determina la distribución de los tamaños de partículas que constituyen una masa de agregado, el cual consiste en dividir una muestra

representativa del agregado en fracciones de igual tamaño de partículas; la medida de la cuantía de cada fracción se denomina granulometría.

La distribución de los tamaños de las partículas se realiza mediante el empleo de mallas de aberturas cuadradas, de los tamaños 3/8", números 4, 8, 16, 30, 50 y 100.

La prueba consiste en hacer pasar la muestra a través del juego de mallas y se determina el porcentaje de material retenido cada una. Los resultados se grafican y se comparan con las especificaciones estandarizadas.

En la Tabla 3.4 se muestran los límites establecidos para el agregado, según la Norma ASTM C136.

Tabla 3.4 Límites de agregado según ASTM C136

<b>Malla</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Porcentaje que pasa</b>
3/8'	9.52 mm	100
No.4	4.75 mm	95 a 100
No.8	2.38 mm	80 a 100
No.16	1.19 mm	50 a 85
No.30	0.60 mm	25 a 60
No.50	0.30 mm	10 a 30
No.100	0.15 mm	2 a 10

Para una mejor comprensión e interpretación de los resultados, el análisis granulométrico se presenta gráficamente, mediante la curva de granulometría, en el eje de las ordenadas se encuentra el porcentaje de agregado que pasa por cada malla y en las abscisas la abertura de los tamices.

### **Módulo de finura**

El módulo de finura es el índice aproximado que describe la proporción de finos o de gruesos de las partículas que constituyen los agregados. Es un indicador de la finura de un agregado, cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado. Este módulo se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en las mallas número 4, 8, 16, 30, 50 y 100 y dividiendo el total entre cien.

En la Tabla 3.5 se presenta la clasificación de los agregados en función del módulo de finura obtenido.

Tabla 3.5 Clasificación del agregado de acuerdo al módulo de finura

<b>Módulo de finura</b>	<b>Agregado fino</b>
Menor que 2.00	Muy fino o extra fino
2.00-2.30	Fino
2.30-2.60	Ligeramente fino
2.60-2.90	Mediano
2.90-3.20	Ligeramente grueso
3.20-3.50	Grueso
Mayor que 3.50	Muy grueso o extra grueso

### 3.6.3. Determinación de propiedades físicas en pastas CCA/CH

#### ➤ Tiempo de fraguado

Según Cement and Concrete Terminology ACI 116R-00 define al fraguado como: La condición alcanzada por una pasta cementicia, mortero u hormigón que ha perdido plasticidad hasta un nivel arbitrario, generalmente medido en términos de la resistencia a la penetración. El tiempo de fraguado inicial es aquel que determina el período de tiempo desde el amasado de la pasta, en el cual esta se encuentra en un estado que permite ser moldeada sin alterar sus propiedades; el fraguado final se refiere al período de tiempo, medido desde el amasado de la pasta, hasta el momento en que debido a las reacciones de hidratación esta contiene la consistencia de un material rígido.

La determinación del tiempo de fraguado por el método de la aguja de Vicat, se realizará según la norma ASTM C191-82, se mide la resistencia que ejerce una pasta de cemento, amasada solamente con agua, a lo largo del tiempo a la penetración de una aguja metálica, de forma cilíndrica, de 1 mm de diámetro y una masa de  $300 \pm 1$  g (Ver Figura 3.5).

Por lo tanto, el tiempo de fraguado se determina midiendo la penetración de la aguja en una pasta de cemento de consistencia normal, hasta que esta no deje huella apreciable sobre su superficie (0 a 3mm).

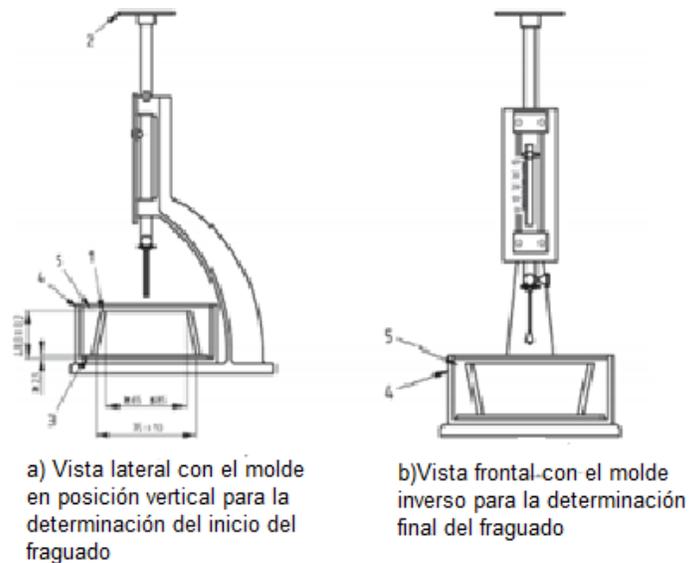


Figura 3.5 Aparato de Vicat

Fuente: González, E. (2008)ó

Según la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN 0158), el tiempo de fraguado inicial se calcula mediante la Ecuación 8:

$$TF_i = \left[ \frac{(H-E)}{(C-D)} * (C - 25) \right] + E \quad (8)$$

Dónde:

C: Lectura de penetración al tiempo E, D: Lectura de penetración al tiempo H, E: Tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25 mm, H: Tiempo en minutos de la primera penetración mayor que 25 mm.

El tiempo de fraguado final se calcula mediante la determinación del tiempo transcurrido entre el tiempo inicial de contacto entre el cemento y el agua y el tiempo en el cual la aguja no marca visiblemente la pasta de cemento, con aproximación de 5 minutos.

### 3.6.4. Determinación de propiedades físicas en morteros frescos

#### ➤ Prueba de fluidez

La trabajabilidad de una mezcla de mortero tiene que ver con, la facilidad de manejar la mezcla sin que se produzcan problemas de segregación, el tiempo en que la mezcla puede trabajar sin que frague o se seque, la facilidad de colocación

y la capacidad que posee la mezcla para retener agua. La trabajabilidad de las mezclas se mide de manera indirecta por medio de la prueba de fluidez.

Según la ASTM en su designación C109 la fluidez de los morteros debe tener valores dentro del rango  $110 \pm 5\%$ .

La fluidez por lo tanto, representa el aumento del diámetro de la muestra, expresado como un porcentaje del diámetro de la base mayor del molde, determinado según la Ecuación 9:

$$F_m = \left[ \frac{\bar{D}_f - \bar{D}_i}{D_i} \right] * 100\% \quad (9)$$

Dónde:

$F_m$ : Fluidez de la mezcla en porcentaje,  $\bar{D}_f$ : Diametro promedio final en pulgadas,  $\bar{D}_i$ : Diametro promedio inicial en pulgadas.

### **3.6.5. Determinación de propiedades física/mecánicas en morteros endurecidos**

#### **➤ Resistencia a la compresión**

La prueba de resistencia a la compresión, según la Norma ASTM C109, consiste en medir el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. Se calcula a partir de la carga máxima soportada, o de ruptura, dividida por el área de la sección que resiste la carga (área transversal de una probeta de ensayo), mediante la Ecuación 10:

$$R = \frac{P_{max}}{S} \quad (10)$$

Dónde:

$P_{max}$ : Carga máxima en KgF,  $S$ : Área de la sección transversal del cubo en  $cm^2$ .

#### **➤ Durabilidad de los morteros**

Según el comité 201 del ACI, la durabilidad del concreto se define como la resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. De tal manera que un concreto durable debe mantener

su forma, calidad y sus propiedades originales al estar expuesto al medio ambiente. Por lo tanto, la durabilidad depende del ambiente al que se exponga el concreto.

### **Resistencia al fuego**

Las propiedades del concreto se modifican cuando se somete a altas temperaturas, ocurren importantes transformaciones físico-químicas que causan el deterioro del mismo y aparecen micro y microfisuras que afectan su estructura.

Un mortero bien curado, endurecido y seco puede resistir temperaturas de hasta 100 °C sin grandes pérdidas de resistencia. Puede resistir incluso varias horas a temperaturas alrededor de 300 °C con escasa pérdida de resistencia. Esta pérdida, que es mayor conforme se incrementa la temperatura, es causada por la deshidratación total o parcial del  $\text{Ca(OH)}_2$  y/o silicatos de calcio hidratados, con alteraciones en la estructura y una eventual destrucción de dichos compuestos. Para que esto ocurra con el  $\text{Ca(OH)}_2$  la temperatura debe ser alrededor de los 600°C. Por tanto, el efecto de la exposición a mayores temperaturas sobre la resistencia del concreto es insignificante por debajo de los 300°C, pero al sobrepasar los 400°C puede ocurrir una pérdida muy importante de RMC.

La exposición al fuego introduce altos gradientes de temperaturas, y como consecuencia, las capas calientes de la superficie tienden a descascararse y separarse de la parte interior que está más fría, provocando el agrietamiento del cemento. Para valorar el daño del material a altas temperaturas se determina la resistencia residual utilizando la Ecuación 11:

$$R_R = \left[ \frac{R_1 - R_2}{R_1} \right] * 100\% \quad (11)$$

Dónde:

$R_R$ : Resistencia residual en porcentaje,  $R_1$ : Resistencia antes de la exposición a altas temperaturas y a sulfatos,  $R_2$ : Resistencia después de la exposición a altas temperaturas y a sulfatos.

### **3.6.6. Técnicas de caracterización en pastas endurecidas**

#### **➤ Espectroscopía infrarroja FT-IR**

Esta técnica se fundamenta en la absorción de la radiación IR por las moléculas en vibración. Una molécula absorberá la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se dé una

transición vibracional de la molécula. Es decir, la molécula comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía que se le suministra mediante luz infrarroja.

Pueden distinguirse dos categorías básicas de vibraciones: de tensión y de flexión. Las vibraciones de tensión son cambios en la distancia interatómica a lo largo del eje del enlace entre dos átomos. Las vibraciones de flexión están originadas por cambios en el ángulo que forman dos enlaces. En la Figura 3.6 se representan los diferentes tipos de vibraciones moleculares.

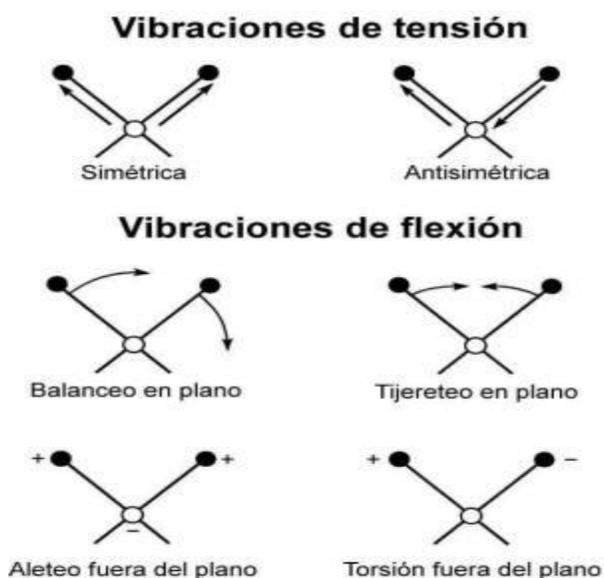


Figura 3.6 Tipos de vibraciones moleculares

Fuente: (Rubinson K.A, 2000)

En principio, cada molécula presenta un espectro IR característico, debido a que todas las moléculas tienen algunas vibraciones que, al activarse, provocan la absorción de una determinada longitud de onda en la zona del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo.

De esta forma, analizando cuales son las longitudes de onda que absorbe una sustancia en la zona del infrarrojo, podemos obtener información acerca de las moléculas que la componen.

## **IV. METODOLOGÍA**

En este capítulo se describen detalladamente los materiales a utilizar y las técnicas desarrolladas en la presente tesis. La evaluación de las propiedades físico-mecánicas y durabilidad de moteros se llevó a cabo mediante la implementación de técnicas experimentales.

### **4.1. Lugar de desarrollo**

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la Facultad de Tecnología de Construcción (FTC), del Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios (UNI-RUPAP), Laboratorio de Operaciones Unitarias y Laboratorio de Ambiental de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), del Recinto Universitario Simón Bolívar (UNI-RUSB).

### **4.2. Materiales y Equipos**

Los materiales y equipos utilizados para el desarrollo de la investigación fueron los siguientes:

#### **4.2.1. Equipos**

##### **Molino de bolas**

Debido a su principio de aplicación, se utilizó una máquina de desgastes de materiales que funcionó como un auténtico molino de bolas, con el que se pulverizó la CCA hasta obtener la finura deseada. Esta máquina contiene esferas de acero que actúan como medio moedor, consta de un tambor de acero rotatorio de  $710 \pm 6$  mm de diámetro interior y de  $510 \pm 6$  mm de longitud interna, montado horizontalmente sobre vástagos axiales, uno de los cuales tiene un dispositivo de polea para acoplamiento del motor. Tiene una abertura para introducir la muestra con una tapa provista de tornillos para fijarla en su lugar y asegurar la estanqueidad al polvo (ver Figura 4.1). Su rotación está comprendida en 33 revoluciones por minuto, con un voltaje de 110 V y una potencia de 3 HP.

Se encuentra ubicado en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la FTC en el RUPAP (UNI).



Figura 4.1 Molino de bolas o máquina de desgaste de materiales

### **Mezcladora Eléctrica**

Para la elaboración de las distintas formulaciones de morteros, se utilizó una mezcladora marca Hobart, modelo A200 de 110 voltios y una potencia de 2 HP, de movimiento planetario de tres velocidades. Cuenta con una olla de acero inoxidable, con gancho de paleta de acero, con dimensiones 41x53x75 cm (LxWxH) (ver Figura 4.2), ubicada en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la FTC en el RUPAP (UNI).



Figura 4.2 Mezcladora eléctrica de sólidos

### **Máquina de Compresión**

La máquina de resistencia a la compresión se utilizó para ensayar los especímenes, midiendo la carga máxima que pueden soportar a los 3, 7 y 28 días de curado (ver Figura 4.3), la cual se encuentra ubicada en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la FTC en el RUPAP (UNI).



Figura 4.3 Máquina compresora

### Horno Industrial

Horno Despatch modelo LBB1-69B-1, alcanza una temperatura máxima de 204°C/400°F, voltaje de 240 V y una potencia de 1 HP (ver Figura 4.4), ubicado en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la FTC en el RUPAP (UNI). Requerido para eliminar la humedad de las muestras de arena para su uso en los distintos ensayos realizados.



Figura 4.4 Horno para acondicionamiento de agregado

### Mufla

Para la calcinación de la cascarilla de arroz a una temperatura de 700°C, se utilizó una mufla Thermolyne tipo F30400, con temperatura programable entre 100-1,093°C, aislada con fibra de cerámica, ubicada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FIQ en RUSB (UNI).

Para el ensayo de actividad puzolánica, se utilizó una mufla Thermolyne modelo F-B1415M con una corriente de 12.6 amperios (ver Figura 4.5), ubicada en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la FIQ en el RUSB (UNI).



Figura 4.5 Mufla utilizada para la calcinación

### **Mesa de Fluidez**

Se trata de una mesa a como se muestra en la figura 4.6, que consta de un soporte, un árbol y una plataforma circular, ubicada en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la FTC en el RUPAP (UNI). La plataforma es circular de  $255 \pm 2.5$  mm de diámetro y 7.62 mm de espesor; es de bronce y tiene en la cara inferior 6 nervios integrales de refuerzo dispuestos radialmente. La cara superior es plana, pulida y libre de efectos superficiales.



Figura 4.6 Mesa de fluidez

### **Aparato de Vicat**

Para la determinación del tiempo de fraguado de las pastas selectas, se utilizó el aparato de Vicat, ubicado en el Laboratorio de Materiales y Suelos de la FTC en el RUPAP (UNI). Constituido de una sonda de metal con forma de un cilindro recto,

con una longitud de  $50 \pm 1\text{mm}$  y un diámetro de  $10 \pm 0.05\text{ mm}$ . La medición se determinó por un indicador que se mueve a lo largo de la escala graduada en milímetros, tal como se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7 Medición de fraguado por aparato de Vicat

### **Espectroscopio infrarrojo**

Marca Mattson Génesis IIFIR™, en un rango de frecuencia comprendido entre  $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  (ver Figura 4.8), ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FIQ en el RUSB (UNI).



Figura 4.8 Espectroscopio infrarrojo para análisis FT-IR

## 4.2.2. Materiales

### ➤ Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz se obtuvo del trillo arrocero Santa Rosa, ubicado en el departamento de Granada, mismo que se dedica a la distribución de arroz y otros comestibles. En el trillo se realiza el proceso de limpieza del arroz y se almacena la cascarilla en bodegas.

La cascarilla se limpió manualmente para eliminar cualquier tipo de impurezas que pudieran estar presentes y que pudiesen afectar las propiedades de los morteros que se elaborarían posteriormente. Se determinó el porcentaje de humedad colocándola en un horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C hasta obtener un peso constante de la muestra analizada. El porcentaje de humedad fue de 9.43%.

### ➤ Hidróxido de Calcio o Cal Hidratada (CH)

La cal que se utilizó fue cal natural, cuyo nombre comercial es el hidróxido de calcio (CH), proveniente del grupo Calidra de México, la cual fue adquirida en Prefabricados de Nicaragua, S.A (PREFANICSA). Las características químicas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Características químicas de CH

Compuesto	%
Ca(OH) <sub>2</sub>	86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤0.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤0.14
MgO	≤1.00
SO <sub>3</sub>	≤1.00
SiO <sub>2</sub>	≤1.00

### ➤ Silicato de Sodio (SS)

Se utilizó silicato de sodio como parte de la solución activante, cuyo módulo (relación en peso SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) tomó los valores de 1, 1.5 y 2, alterando así su naturaleza de origen, al variar los porcentajes de la relación en peso de sus componentes. El SS se adquirió en TRANSMERQUIM SA, las especificaciones para el silicato de sodio módulo 2 se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Composición química de SS

<b>Componente</b>	<b>% en peso</b>
Na <sub>2</sub> O	14.82
SiO <sub>2</sub>	30.82
H <sub>2</sub> O	54.36

➤ **Hidróxido de Sodio (NaOH)**

El hidróxido de sodio se adquirió en forma de pellets en Cam Internacional (SANCHEZ & MARTÍNEZ, S.A). La función principal del NaOH en la solución alcalina es modificar la concentración de SS, incorporando moles de Na<sub>2</sub>O, beneficiando así la trabajabilidad de las pastas. Se prepararon distintas soluciones en las cuales los pellets de NaOH se diluyeron en el agua de mezclado correspondiente para cada tratamiento. Las especificaciones se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Composición química de NaOH

<b>Componente</b>	<b>% en peso</b>
Na <sub>2</sub> O	77.5
H <sub>2</sub> O	22.5

➤ **Agregado**

Se utilizó arena tradicional del cerro Motastepe, a la cual se le realizó un análisis granulométrico y se comparó con las especificaciones estipuladas en la Norma ASTM C 136, tal como se muestra en la Figura 5.2.

➤ **Agua de Mezclado**

El agua que se utilizó para la elaboración de las distintas formulaciones y para la saturación del agregado fue agua potable suministrada por los laboratorios donde se llevaron a cabo los experimentos (UNI RUSB y UNI RUPAP). Por ser agua destinada para consumo humano se asume que cumple con los parámetros establecidos en las Normas CAPRE, y debido a que no es objetivo de estudio, no fue necesaria su caracterización.

La relación en peso a/c constituye un factor de suma importancia para obtener una trabajabilidad y consistencia adecuadas de las pastas, además de influir directamente en la resistencia del mortero.

### 4.2.3. Obtención de las cenizas de cascarilla de arroz

La ceniza se obtuvo mediante la calcinación controlada de la cascarilla de arroz, para ello se consideraron dos parámetros, la temperatura y el tiempo. Para seleccionar la temperatura óptima de calcinación se realizó el Ensayo de Actividad Puzolánica (ver Anexo A). Según Salas, J. (1986), la sílice permanece en estado amorfo cuando la temperatura permanece entre 450°C - 700°C por un período de 3-4 horas. Por lo que en la presente investigación, se estableció un tiempo de calcinación de 4 horas.

Para la calcinación se utilizó una mufla, se colocó la cascarilla de arroz en cápsulas de porcelana y se controló la temperatura y el tiempo de calcinación, con el objetivo de obtener cenizas altamente puzolánicas. Al finalizar el tiempo de calcinación se extrajeron las cápsulas de la mufla, conteniendo la cascarilla calcinada, y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente, para posteriormente colocar las cápsulas en un desecador y así evitar que las cenizas adquieran humedad.

La ceniza presentó un color grisáceo y partículas pequeñas de color negro, debido al carbón residual presente en la misma. Según Sosa (2000), las cenizas debe quedar lo más blanca posible, como índice del bajo contenido de carbón, para lo cual debe garantizarse la oxigenación suficiente de la cascarilla durante la calcinación y el enfriamiento.

La finura de la ceniza es un elemento esencial para su calidad, puesto que al incrementar la finura aumenta la capacidad de reacción de la sílice con la cal. Otros investigadores han demostrado que, al lograr una mayor reactividad de la ceniza, aumenta la resistencia a la compresión (Salas, J., 1986).

La finalidad de moler las cenizas se centra en el hecho de aumentar la superficie específica de las partículas y así incrementar su capacidad de reacción. Con el objetivo de cumplir con los requisitos normalizados de finura para adición en la mezcla de morteros, de acuerdo con la Norma ASTM C-595, se trabajó con una finura semejante a la del cemento terminado. En este trabajo de investigación se procuró moler el material hasta que el 95-100% atravesara el tamiz N° 500. Se tomaron 100 gramos de CCA y se tamizó en húmedo, hasta que no pasó material por dicha malla. Se logró que el 100% del material atravesara el tamiz, por lo que se determinó experimentalmente que el tiempo de molienda necesario para alcanzar esta condición fue de 4 horas.

La disminución del tamaño de las partículas de la CCA se llevó a cabo utilizando un molino de bolas, con una relación en peso de 2 Kg de CCA/ 5 Kg de bolas, con una velocidad de rotación de 33 rev/min.

En la figura 4.9 se presenta el diagrama de flujo de la obtención de las CCA.

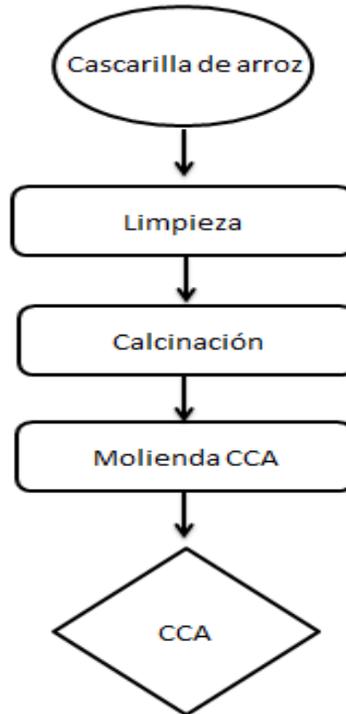


Figura 4.9 Diagrama de flujo de obtención de CCA

### 4.3. Métodos

#### 4.3.1. Variables de estudio

Se elaboraron probetas cúbicas de morteros de 5 cm por arista, utilizando las CCA como fuente de aluminosilicatos con alto contenido de sílice, sustituyendo la CCA por CH en distintos porcentajes en peso. La solución activante estuvo constituida por una mezcla de silicato de sodio a diferentes módulos, e hidróxido de sodio. El objetivo principal de la presencia del NaOH en la solución fué variar la concentración del SS.

Se estudiaron tres variables con tres niveles de estudio, para determinar los niveles óptimos que maximicen la RMC de los morteros.

➤ **MS en la solución activante**

Se estudió el efecto del módulo de sílice en la solución activante, sobre las propiedades de los morteros geopoliméricos, con tres distintos niveles, los cuales se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 MS en la solución activante

<b>MS</b>
1
1.5
2

➤ **Porcentaje en peso de Na<sub>2</sub>O**

El Na<sub>2</sub>O se incorporó a la matriz geopolimérica en forma de SS e NaOH, de este modo se varió la concentración de la solución alcalina. Al incorporar un mayor %Na<sub>2</sub>O soluble, de manera teórica se beneficia la trabajabilidad de los morteros. Los niveles de estudio se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Porcentaje en peso de Na<sub>2</sub>O

<b>%Na<sub>2</sub>O en peso</b>
8
10
12

➤ **Niveles de sustitución de CCA/CH**

Se evaluó el efecto de la sustitución de CCA por cal hidratada en diferentes porcentajes en peso, tal como se muestra en la Tabla 4.6

Tabla 4.6 Niveles de sustitución de CCA por CH

<b>% en peso CCA</b>	<b>% peso CH</b>
90	10
80	20
75	25

### 4.3.2. Diseño Experimental

El desarrollo del diseño experimental se llevó a cabo mediante el método Taguchi. El método Taguchi es una herramienta eficiente en el diseño y optimización de productos, el que puede considerarse como un proceso donde ingresan diversas variables que interactúan para producir un resultado. Las variables que ingresan al proceso se denominan variables de entrada, y el resultado, variable de salida.

La búsqueda de combinaciones óptimas de las variables de entrada da lugar al diseño experimental, que es una prueba durante la cual se realizan cambios sistemáticos y controlados a las variables de entrada para medir el efecto sobre la variable de salida.

Se estudió la influencia de factores como el MS en la solución activante, el porcentaje en peso de Na<sub>2</sub>O en la activación alcalina y los niveles de sustitución de CCA por CH sobre el desarrollo de las propiedades físico-mecánicas de los morteros. En la Tabla 4.7 se muestra el arreglo ortogonal Taguchi L<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>), para la elaboración de morteros activados alcalinamente, empleándose para la elaboración de la misma el Software Minitab.

Tabla 4.7 Arreglo Ortogonal Taguchi L<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>)

<b>Sistemas</b>	<b>MS</b>	<b>% Na<sub>2</sub>O</b>	<b>CCA/Ca(OH)<sub>2</sub></b>
<b>CCA-CH1</b>	1	8	90/10
<b>CCA-CH2</b>	1	10	80/20
<b>CCA-CH3</b>	1	12	75/25
<b>CCA-CH4</b>	1.5	8	80/20
<b>CCA-CH5</b>	1.5	10	75/25
<b>CCA-CH6</b>	1.5	12	90/10
<b>CCA-CH7</b>	2	8	75/25
<b>CCA-CH8</b>	2	10	90/10
<b>CCA-CH9</b>	2	12	80/20

### 4.3.3. Preparación de sistemas

#### Elaboración de probetas cúbicas

De acuerdo al arreglo experimental, se elaboraron 81 probetas cúbicas con un volumen de 125 cm<sup>3</sup> cada una. El procedimiento para la elaboración de los cubos se describe a continuación:

- Se pesaron las materias primas a utilizar para cada formulación
- Se determinó la cantidad de agua necesaria para cada mezcla, considerando una relación a/c de 0.8, se preparó la solución activante en un frasco de vidrio mezclando el Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> y NaOH con la cantidad de agua encontrada y se dejó enfriar
- Se midió la cantidad de agua de absorción de la arena, y se mezcló con la arena por 90 segundos
- Se colocó en la mezcladora eléctrica la solución alcalina, se agregó la CCA más CH y se inició a mezclar a velocidad baja (140 ± 5 rpm) durante 30 segundos
- Se agregó la arena total de mezclado en un período de 30 segundos, a velocidad baja
- Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar la mezcla por 90 segundos. Se aprovecharon los primeros 15 segundos para limpiar las paredes de la mezcladora con una espátula
- Al transcurrir el período de reposo, se encendió la mezcladora y se mezcló a velocidad media durante 60 segundos
- Se colocó la mezcla de mortero en los moldes previamente engrasados, colocándolo en dos capas de aproximadamente 1 pulgada de espesor cada una
- Se aplicó a cada capa 16 golpes con ayuda de un pisón tamper distribuidos en dos rondas ortogonales entre sí
- Al aplicar los golpes a la segunda capa, se observa si el nivel del mortero desciende, por lo que se rellena antes de enrasar
- Se enrasó la parte superior de los moldes con la espátula, hasta dejar la superficie lisa
- Se colocaron los especímenes en un cuarto de curado a temperatura ambiente por 24 horas
- Luego de haber transcurrido las 24 horas de curado, se retiraron los especímenes de los moldes

#### **4.3.4. Determinación de propiedades físicas en pastas CCA/CH**

##### **➤ Tiempo de fraguado**

Para la realización del tiempo de fraguado en primer lugar se determinó la consistencia normal de las pastas seleccionadas siguiendo la Norma ASTM C 197-86, determinando la cantidad de agua a agregar. Para dichos análisis se seleccionaron las tres mejores formulaciones que alcanzaron los mejores resultados en RMC a los 28 días.

Se prepararon pastas de 650 g y se colocaron en el aparato que contiene la aguja de Vicat según la ASTM C191-82. Se determinó la penetración de la aguja (dejando caer la aguja por un período de 30 segundos a partir de la colocación de la muestra), en intervalos de 15 minutos hasta que se logró una penetración entre 3 a 0 mm. Se registraron todos los datos y por medio de la Ecuación 8 se determinó el tiempo correspondiente para una penetración de 25 mm; este corresponderá al tiempo de fraguado inicial. El tiempo de fraguado final es aquel en el que la misma aguja no penetró visiblemente la pasta.

#### **4.3.5. Determinación de propiedades físicas en morteros frescos**

##### **➤ Prueba de fluidez**

La prueba de fluidez se realizó a cada uno de los sistemas del diseño experimental, siguiendo la Norma ASTM C109. El procedimiento se describe a continuación:

- Se limpió el plato de la mesa de fluidez y se colocó el molde troncónico en el centro del mismo.
- Se colocó el mortero en el molde, en dos capas de aproximadamente una pulgada de espesor cada una y se aplicó 20 golpes a cada capa usando un pisón tamper, se enrasó la parte superior del molde y se secó alrededor del mismo
- Se retiró de forma vertical el molde metálico y se aplicó 25 golpes en 15 segundos en la mesa de fluidez
- Se determinó el promedio del diámetro ensanchado (obteniendo 4 diámetros finales en distintas posiciones) y se calculó el porcentaje de fluidez comparándolo con el diámetro inferior inicial que es de 4 pulgadas, siguiendo la Ecuación 9.

#### **4.3.6. Determinación de propiedades física/mecánicas en morteros endurecidos**

##### **➤ Resistencia mecánica a la compresión (RMC)**

La RMC se midió para todos los sistemas, realizando el ensayo a los 3, 7 y 28 días de curado a temperatura ambiente, para ello se tomaron tres cubos por cada formulación con el objetivo de obtener un promedio representativo para cada medición y se aplicó una carga continua con un rango de velocidad de  $35 \pm 7$  psi/s. La proporción de la carga dependió del tamaño de los especímenes, sometidos a presión, aplicando una carga hasta que el espécimen falló. Se registró así la máxima carga soportada.

##### **➤ Durabilidad**

#### **Resistencia al fuego**

Para evaluar el efecto de la durabilidad frente a altas temperaturas, se elaboraron morteros con las dosificaciones óptimas y se curaron a temperatura ambiente hasta los 28 días. Al transcurrir el período de curado los morteros fueron expuestos a una temperatura de 900 °C durante dos horas, para luego ser ensayados mediante la medición de RMC.

#### **4.3.7. Técnicas de caracterización en pastas endurecidas**

##### **➤ Espectroscopía Infrarroja**

La espectrometría infrarroja se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. La muestra se preparó mezclando cierta cantidad de la sustancia que se desea analizar con una sal altamente purificada (bromuro de potasio). Esta mezcla se trituró y se prensó con el fin de formar una pastilla translúcida por la que pueda atravesar el haz de luz. El bromuro de potasio no absorbe la radiación infrarroja, por lo que las únicas líneas espectrales provendrán del analito. Un haz de luz infrarroja es generado y dividido en dos rayos, uno pasa por la muestra, y el otro por una referencia que suele ser la sustancia en la que está disuelta o mezclada la muestra. Ambos haces se reflejan de vuelta al detector, pero primero pasan a través del separador, que alterna rápidamente cuál de los dos rayos entra en el detector. Las dos señales se comparan y, a continuación, se registran los datos.

## V. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Resultados de la Caracterización de materiales

#### 5.1.2 Caracterización de la CCA

##### ➤ Resultados de Espectroscopia Infrarroja FT-IR de la CCA

Se identificaron los compuestos presentes en la CCA, los cuales están involucrados en la reacción de geopolimerización, mediante el análisis de FT-IR, a como se muestra en la Figura 5.1.

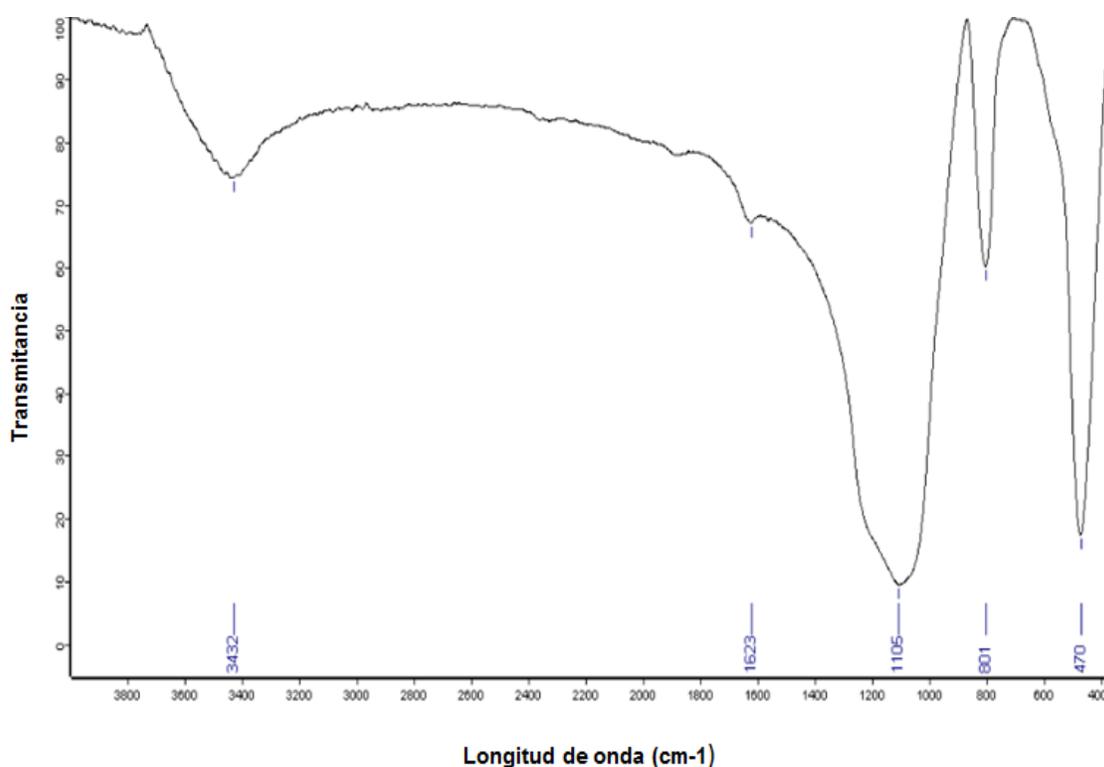


Figura 5.1 Espectros IR para CCA

En la Figura 5.1 se muestran los espectros IR característicos de la CCA en estudio, en la cual aparecen bandas específicas de las vibraciones de los enlaces de Si-O a 1600 cm<sup>-1</sup> y 466 cm<sup>-1</sup>, observándose un espectro propio de la sílice, caracterizado por una banda ancha entre los 900 - 1100 cm<sup>-1</sup>, que de igual manera corresponden al enlace Si-O. También se aprecia una banda de la sílice en estado amorfo entre 795-800 cm<sup>-1</sup>. La banda existente entre los 3100-3700 cm<sup>-1</sup> indica la presencia de agua en la estructura interna de la ceniza.

➤ **Resultados de propiedades físicas de la CCA**

Como parte de la caracterización de la CCA, se determinaron ciertas propiedades físicas, como el PVSS, PVSC, el porcentaje de humedad, gravedad específica y finura. Debido a la falta de normas para la determinación de dichas propiedades para este material, se siguió el procedimiento establecido en las normas ASTM para cemento y agregados. En la Tabla 5.1 se muestran los resultados.

Tabla 5.1 Propiedades físicas de CCA

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>	<b>Norma ASTM</b>
PVSS	Kg/m <sup>3</sup>	482.14	ASTM C 29
PVSC	Kg/m <sup>3</sup>	525.95	ASTM C 29
Humedad	%	3.24	ASTM C 566-84
Gravedad específica	g/cm <sup>3</sup>	2.53	ASTM C-188-84

### 5.1.3 Caracterización del agregado

➤ **Resultados de análisis granulométrico**

En la Figura 5.2, se muestra el análisis granulométrico del agregado empleado, comparado con los límites de granulometría del agregado fino de acuerdo a la Norma ASTM C 136.

La principal razón para establecer límites en la granulometría y el tamaño máximo del agregado es que afectan la cantidad de agua y de cemento necesarios para las mezclas, la manejabilidad y porosidad del concreto. Por lo general, los agregados deben de tener una distribución del tamaño de las partículas con el fin de que las partículas pequeñas llenen los espacios entre las partículas más grandes, obteniendo de esta forma una cantidad mínima de huecos.

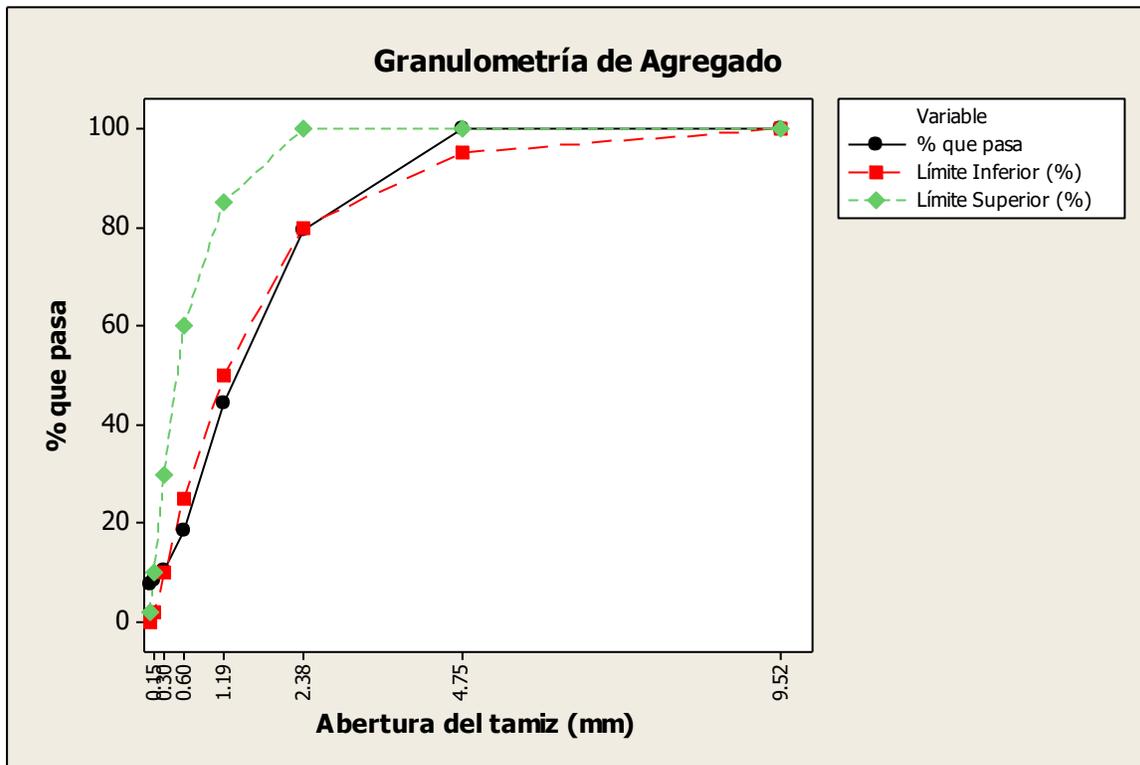


Figura 5.2 Análisis granulométrico del agregado

De acuerdo con la Figura 5.2, se observa que la distribución de tamaños de partículas del agregado utilizado se encuentra parcialmente por debajo del límite inferior establecido en la norma ASTM C136 en un 80%. Sin embargo los límites de granulometría establecidos corresponden a la clasificación de agregado fino, por lo que el tipo de arena utilizada corresponde a arena gruesa. Afirmación que se puede comprobar con el módulo de finura, ya que se obtuvo un valor de 3.40 y de acuerdo a la Tabla 3.5 este valor corresponde a la clasificación de arena gruesa.

➤ **Resultados de contenido de materia orgánica por colorimetría**

Se realizó el análisis de materia orgánica del agregado por colorimetría, para lo que se colocó en un frasco de vidrio el agregado hasta la marca de 4.5 onzas y se completó con una solución de NaOH al 3% hasta 7 onzas, se dejó reposar por 24 horas y se comparó el color del líquido sobrenadante con la tabla de colorimetría (ver Figura 5.3).



Figura 5.3 Impurezas orgánicas de agregados por Colorimetría

Se observa en la Figura 6.12 que el color del líquido corresponde al color número 4 de la tabla de referencia, por lo tanto se tiene un agregado con un alto contenido de materia orgánica, y por consiguiente se necesitará de una mayor cantidad de cemento para que las partículas de la arena se puedan adherir y así no se vean afectadas las propiedades del mortero.

➤ **Resultados de propiedades físicas del agregado**

En la Tabla 5.2 se presentan las propiedades físicas del agregado y las normas que se utilizaron para su determinación.

Tabla 5.2 Propiedades físicas del agregado

Propiedades físicas	Unidades	Valor	Norma ASTM
PVSS	Kg/m <sup>3</sup>	1,424.80	ASTM C 29
PVSC	Kg/m <sup>3</sup>	1,507.60	ASTM C 29
Humedad	%	3.36	ASTM C 566-84
Absorción	%	6.61	ASTM C 128
GE	g/cm <sup>3</sup>	2.47	ASTM C 128
GE <sub>SSS</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.64	ASTM C 128
GE <sub>a</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2.96	ASTM C 128
Módulo de finura		3.40	ASTM C 136

## 5.2 Resultados de Ensayo de Actividad Puzolánica

Para determinar la temperatura óptima de calcinación se utilizó el método Luxán, en el que se evaluó la actividad puzolánica de la CCA por medio de mediciones de la conductividad y pH (ver Anexo A). El monitoreo del avance de la reacción puzolánica se realizó por 12 horas debido a que este tiempo es suficiente para analizar el comportamiento de las suspensiones cal-puzolana (Tironi, 2013). Transcurridas las 12 horas los datos no variaban significativamente y se mantenían constantes. La conductividad de una de las suspensiones (900 °C) disminuyó hasta 0 y las otras dos tomaron valores muy cercanos como consecuencia de la reacción entre los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{OH}^-$  con las partículas de puzolanas para formar compuestos cementantes.

Se observó que la ceniza calcinada a 600°C es de color negro, mientras que las cenizas calcinadas a 700°C y 900°C adquirieron un color más claro, de tonalidad gris-blanco, con pequeñas partículas de color negro (ver Figura A.2). Esto indica presencia de materia orgánica en mayores cantidades en la ceniza calcinada a 600°C, por lo tanto mayor cantidad de carbón presente y menores cantidades de sílice. En la Figura 5.4 se resume las medidas de conductividad eléctrica obtenidas en el monitoreo en un período de 12 horas para las tres temperaturas de calcinación de la cascarilla de arroz (600°C, 700°C, 900°C).

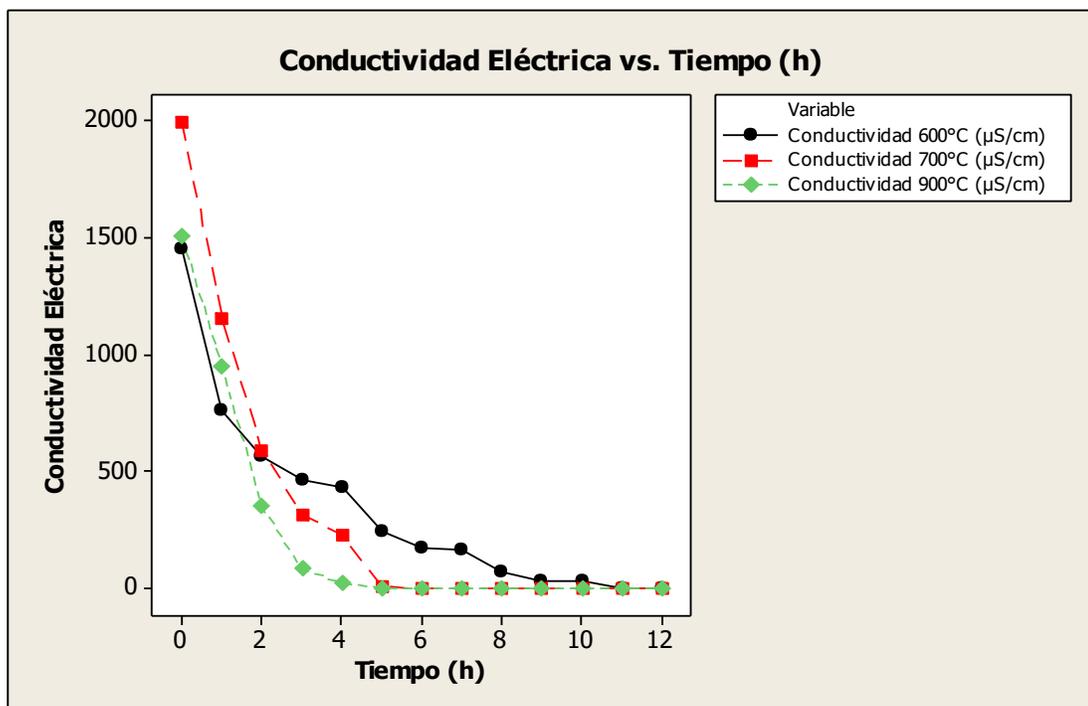


Figura 5.4 Monitoreo de conductividad eléctrica

En la Figura 5.4 se puede apreciar que para los tres casos la conductividad disminuye a medida que avanza la reacción puzolánica. Para la temperatura de 900 °C entre las 0 y 4 horas hubo una disminución apreciable y a partir de ese tiempo la conductividad se mantuvo constante, por lo que se produce la insaturación de la disolución con respecto al hidróxido de calcio en un tiempo menor respecto a las demás. Seguido por la temperatura de 700°C, en la que se obtuvieron valores constantes a partir de las 5 horas de ensayo y por último la temperatura de 600°C disminuyó apreciablemente las medidas de conductividad hasta las 8 horas de monitoreo.

Con base en los análisis realizados sobre la variación de las mediciones de conductividad eléctrica se observa que con la temperatura de 700 °C existen mayores pérdidas de conductividad con respecto al tiempo y en comparación con las demás temperaturas evaluadas. Por lo tanto se llegó a la conclusión que la temperatura adecuada para la calcinación de la cascarilla de arroz es la de 700°C.

Como parte del monitoreo se recogieron datos de la variación de pH de las suspensiones con CCA calcinada a las distintas temperaturas analizadas con respecto al tiempo y consecuentemente se obtuvieron valores de los iones  $\text{OH}^-$  presentes, a partir de los cuales se determinó la velocidad de consumo de  $\text{OH}^-$ .

En la Figura 5.5 se muestra la variación de la velocidad de consumo de iones  $\text{OH}^-$  con respecto al tiempo.

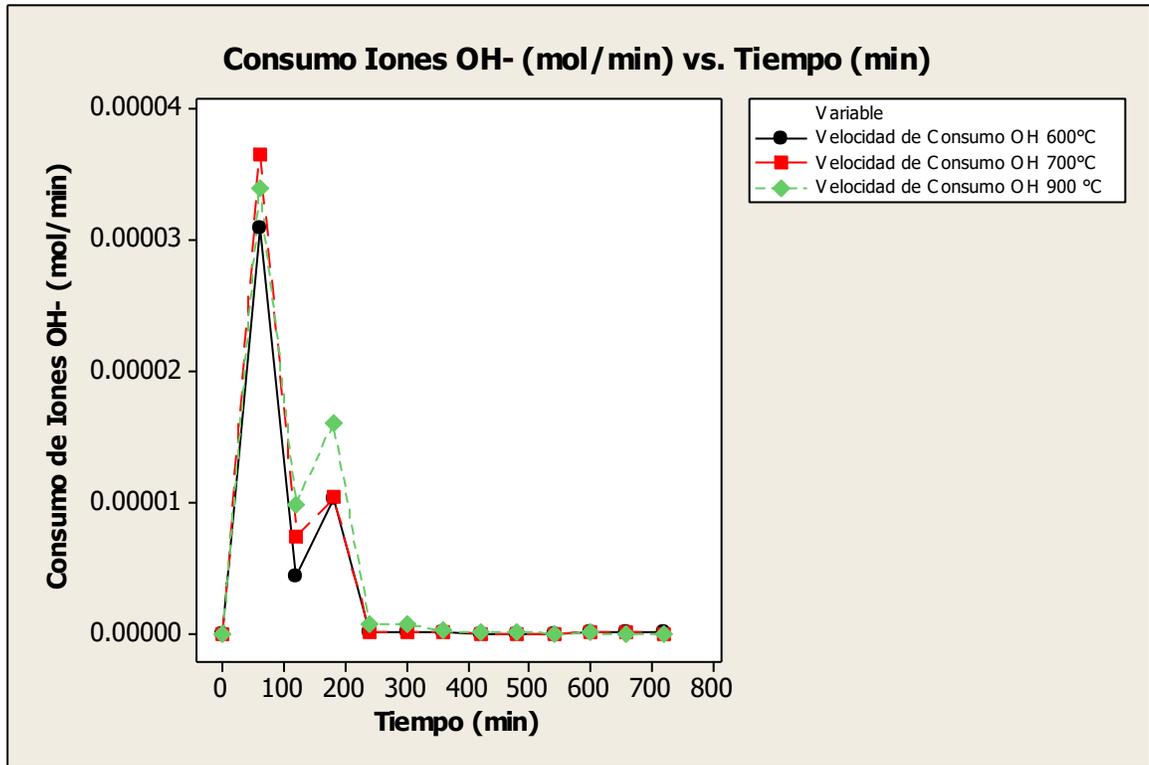


Figura 5.5 Consumo de iones OH

En la Figura 5.5 se puede observar que las suspensiones a las tres distintas temperaturas tienen un comportamiento similar con respecto a la velocidad de consumo de los iones OH<sup>-</sup>, sin embargo uno de ellos alcanzó mayor consumo en el mismo tiempo de medición. Con la temperatura de 700°C se alcanza una mayor velocidad de consumo de iones OH<sup>-</sup>, seguido por la temperatura de 900°C y finalmente por la de 600°C.

Con base en este análisis y en el monitoreo de disminución de la conductividad se llega a la misma conclusión de que la temperatura óptima de calcinación es la de 700°C, coincidiendo este resultado con los datos reportados en la literatura, ya que con la temperatura de 600°C se obtiene una ceniza con mayor cantidad de carbón presente según el color de la misma, y por lo tanto con menor cantidades de sílice y menor capacidad de reacción y la temperatura de 900 °C es muy cercana a la temperatura a la que se forman estructuras cristalinas.

### 5.3 Resultados de fluidez en morteros frescos

Uno de los principales factores que afecta directamente la resistencia del mortero es la relación agua-cemento ( $a/c$ ), por lo que inicialmente se tomó una relación en peso de  $a/c$  de 0.5, siguiendo con las especificaciones de la Norma ASTM en su designación C150.

Al realizar las pruebas a los morteros frescos con la relación establecida no fue posible determinar los valores de fluidez, ya que al momento de mezclar ocurría el fenómeno de fraguado flash y la norma establece que la fluidez de morteros debe estar en el rango  $110 \pm 5\%$ . Por lo tanto, se realizaron distintas mezclas variando la cantidad de agua de mezclado, hasta que con una relación  $a/c$  de 0.8 se obtuvieron morteros menos rígidos, manipulables y con valores de fluidez dentro de los valores admisibles.

En la figura 5.6 se presenta la variación del porcentaje de fluidez en los morteros elaborados. Los resultados se analizaron agrupando los sistemas con mismo % de CCA, con el fin de comparar la influencia de cada variable, y sus distintos niveles, sobre la fluidez.

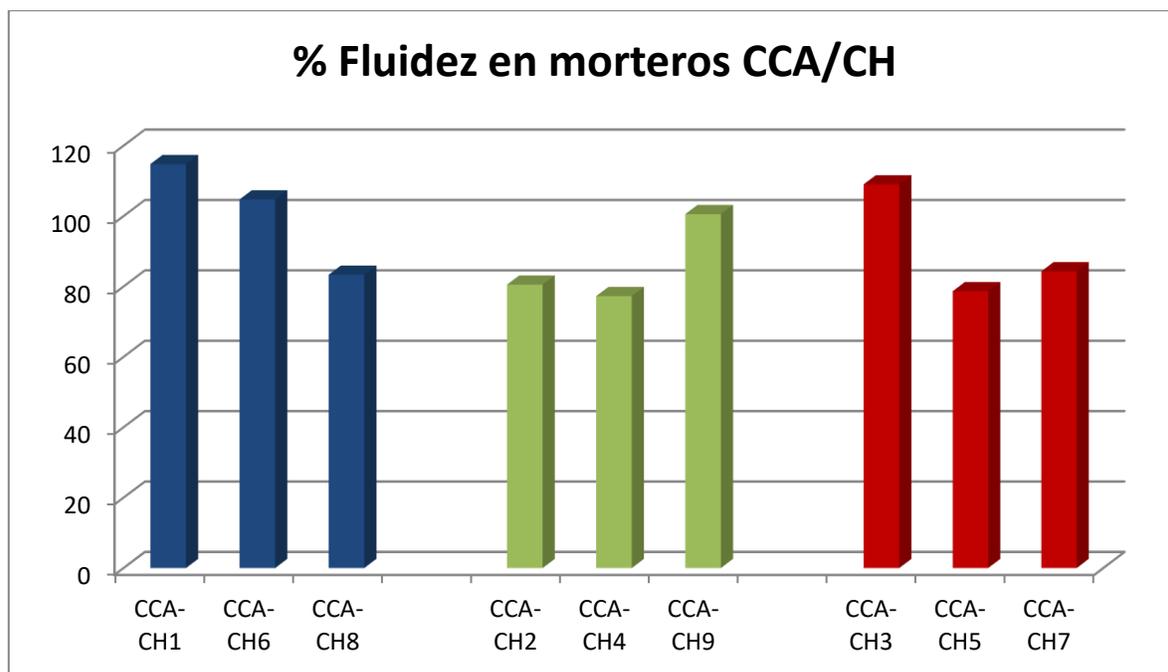


Figura 5.6 Variación de fluidez de morteros frescos para formulaciones CCA-CH

En la Figura 5.6 se muestra la fluidez de los morteros en estado fresco. El primer grupo (CCA-CH1, CCA-CH6, CCA-CH8) tiene el mismo porcentaje de sustitución de CCA (90%). Al mantener constante este factor y aumentar el MS, la fluidez

disminuye. Con los niveles extremos (mayor y menor) de %Na<sub>2</sub>O la trabajabilidad de los morteros se ve beneficiada, ya que se obtienen mayores valores de fluidez; sin embargo esta disminuye al utilizar valores intermedios de %Na<sub>2</sub>O.

Se observa que al aumentar el porcentaje de sustitución en peso de la CCA la fluidez se ve afectada significativamente, esto se puede atribuir a que al aumentar la cantidad de ceniza en la mezcla, esta retiene una mayor cantidad del agua de amasado, debido a la elevada superficie específica y alta porosidad de la CCA.

Con respecto al segundo grupo (CCA-CH2, CCA-CH4, CCA-CH9), en el que el porcentaje de CCA es del 80%, con el mayor valor de MS, la fluidez aumenta, mientras que, con el nivel intermedio esta disminuye significativamente. Al analizar el efecto de la variable %Na<sub>2</sub>O se tiene que la fluidez aumenta, conforme se incrementa el valor de este factor.

Para el tercer grupo (CCA-CH3, CCA-CH5, CCA-CH7), con menor porcentaje de sustitución de CCA (75%), se observa que se obtienen mayores valores de fluidez al utilizar el nivel más bajo de MS, seguido del nivel superior y por último, con valores intermedios de MS se alcanzan los menores valores de fluidez. El %Na<sub>2</sub>O tiene el efecto contrario, ya que con los niveles más altos se obtiene una mayor fluidez, y con valores intermedios se obtiene una fluidez baja.

#### **5.4 Resultados de ensayo de resistencia mecánica a la compresión de morteros CCA/CH**

Al realizarse los ensayos de resistencia mecánica a la compresión (RMC) a morteros geopoliméricos con distintas formulaciones de CCA/CH, se obtuvieron los resultados para los tres días de curados establecidos (3, 7 y 28 días). En la Figura 5.7 se muestra el desarrollo de RMC para cada día de prueba, dichos valores se reportan en la Tabla E.1 (ver Anexo E).

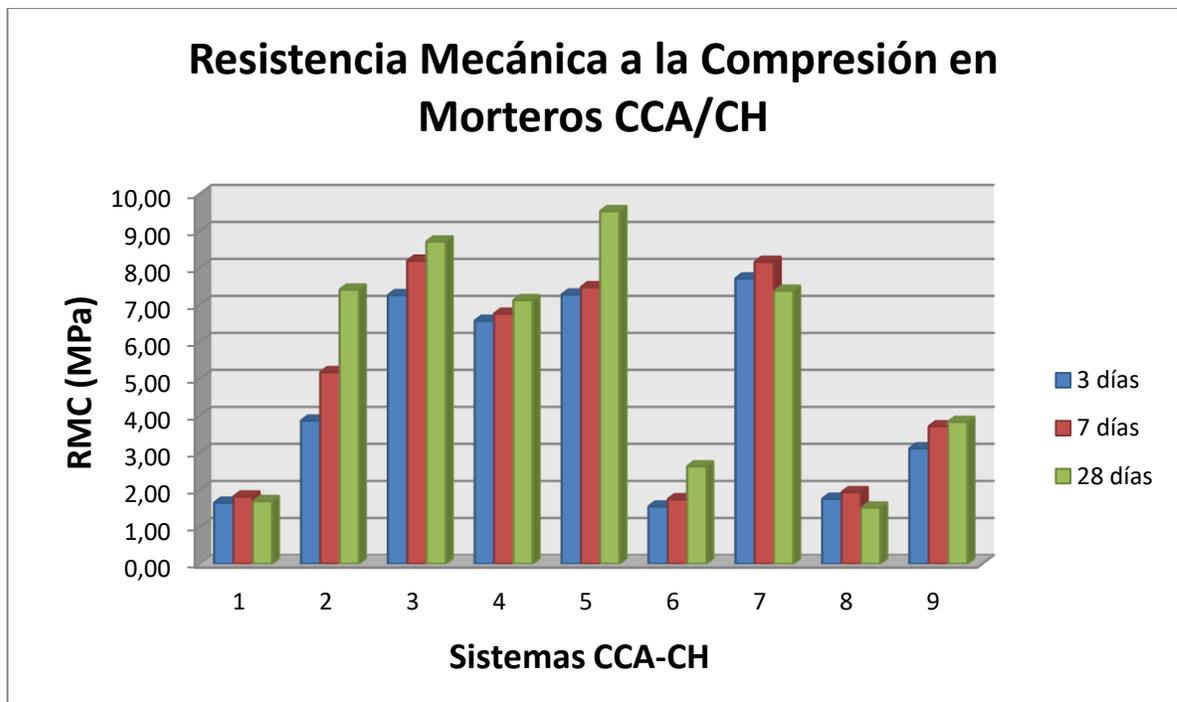


Figura 5.7 Resultados de la evolución de RMC con respecto al tiempo para morteros CCA/CH

En la Figura 5.7 se observa que los sistemas CCA-CH1, CCA-CH6 Y CCA-CH8 son los que alcanzaron los resultados más bajos de resistencia mecánica a la compresión, estos están constituidos por un 90% de CCA, por lo tanto se puede decir que el porcentaje en peso de CCA es inversamente proporcional a las propiedades mecánicas de los morteros, ya que un aumento en la cantidad de ceniza en las mezclas provoca una disminución de la resistencia mecánica a la compresión.

Sin embargo estas propiedades también se ven afectadas por los demás factores implicados, como es el MS y el %Na<sub>2</sub>O. Se evidencia además, valores de resistencias tempranas debido a que las distintas formulaciones alcanzaron sus resistencias a los primeros 3 días de curado y no presentaron mayores evoluciones al transcurrir el tiempo.

El sistema CCA-CH1 alcanzó resistencias muy bajas teniendo una evolución mínima de 2.42% entre el día 3 y el día 7, sin embargo se observó una disminución que corresponde al 7.14% entre el día 7 y el día 28 de curado. Para el sistema CCA-CH2 se observó una mayor evolución de la RMC, ya que pasó de 3.87 MPa el día 3 a 7.41 MPa el día 28, lo que representa una evolución del 91.47%, siendo una de las formulaciones con mejores resultados de resistencia. El sistema CCA-CH3 tuvo un incremento de resistencia del 19.97%, alcanzando al

día 28 8.71 MPa, esta es uno de los sistemas con mejores resultados ya que alcanzó el segundo valor más alto de RMC.

En el caso de CCA-CH4 alcanzó una resistencia de 7.12 MPa al día 28 de curado, teniendo un incremento del 8.54%. El sistema CCA-CH5 alcanzó uno de los valores más altos de RMC al día 3, de 7.27 MPa, con una evolución del 31.09% alcanzó al día 28 una resistencia de 9.53 MPa. Esta es la formulación que tuvo la mejor evolución de las propiedades mecánicas ya que registró el valor más alto de RMC en comparación con los demás sistemas. CCA-CH6 se obtuvo resistencias bajas, de apenas 2.63 MPa al día 28 de curado.

El sistema CCA-CH7 alcanzó el valor más alto de resistencia al día 3, de 7.71 MPa, con una evolución de 5.84% entre el día 3 y el día 7, sin embargo entre el día 7 y el día 28 la RMC sufrió un decremento del 9.55%. La formulación CCA-CH8 registró el valor más bajo de resistencia en comparación con los demás sistemas, de 1.52 MPa. Finalmente, el sistema CCA-CH9 alcanzó una RMC de 3.83 MPa al día 28 de curado.

Al analizar los tratamientos se concluye que un aumento en el porcentaje de CCA en las mezclas tiene un efecto negativo en el desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión, y que los mejores resultados se obtuvieron para los sistemas con una mayor cantidad de cal, siendo el sistema CCA-CH5 el que registró el valor más alto de RMC, de 9.53 MPa, constituido por un 75% de CCA y 25% de CH.

En la figuras 5.8 y 5.9 se muestran las gráficas de superficie de respuesta de RMC a los 28 días. El principal objetivo de estas gráficas es establecer los niveles de los factores que optimizan el valor de la variable respuesta de interés, como es la resistencia mecánica a la compresión; mostrando la interacción de dos factores a la vez para cada gráfica.

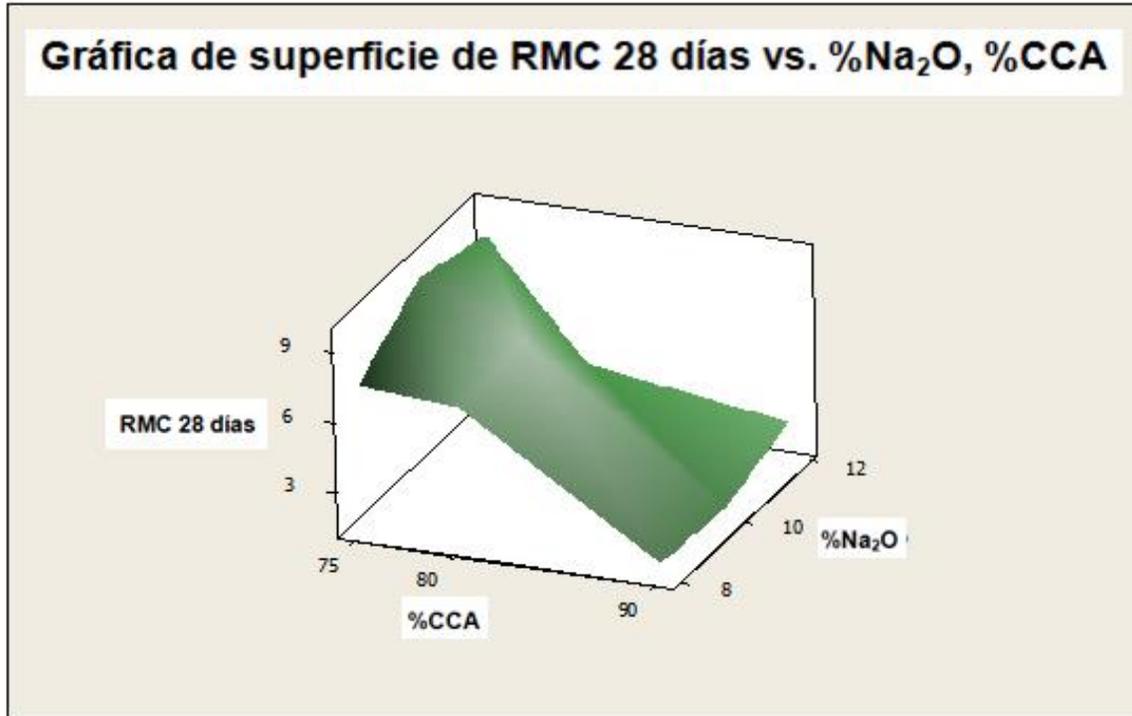


Figura 5.8 Gráfica de superficie de respuesta de RMC a 28 días vs %Na<sub>2</sub>O, %CCA de morteros CCA/CH

En la Figura 5.8 se muestra la interacción de la variable respuesta RMC a los 28 días con dos de los factores involucrados (%CCA y %Na<sub>2</sub>O) en sus distintos niveles. Se observa que a medida que el %CCA aumenta (90%) y se combina con el nivel más bajo de Na<sub>2</sub>O (8%) las resistencias disminuyen. Sin embargo con el nivel medio de Na<sub>2</sub>O (10%) y con menores valores de %CCA la RMC aumenta. Es decir, la gráfica indica que para maximizar la resistencia mecánica a la compresión se requiere de un %CCA del 75% y un %Na<sub>2</sub>O del 10%.

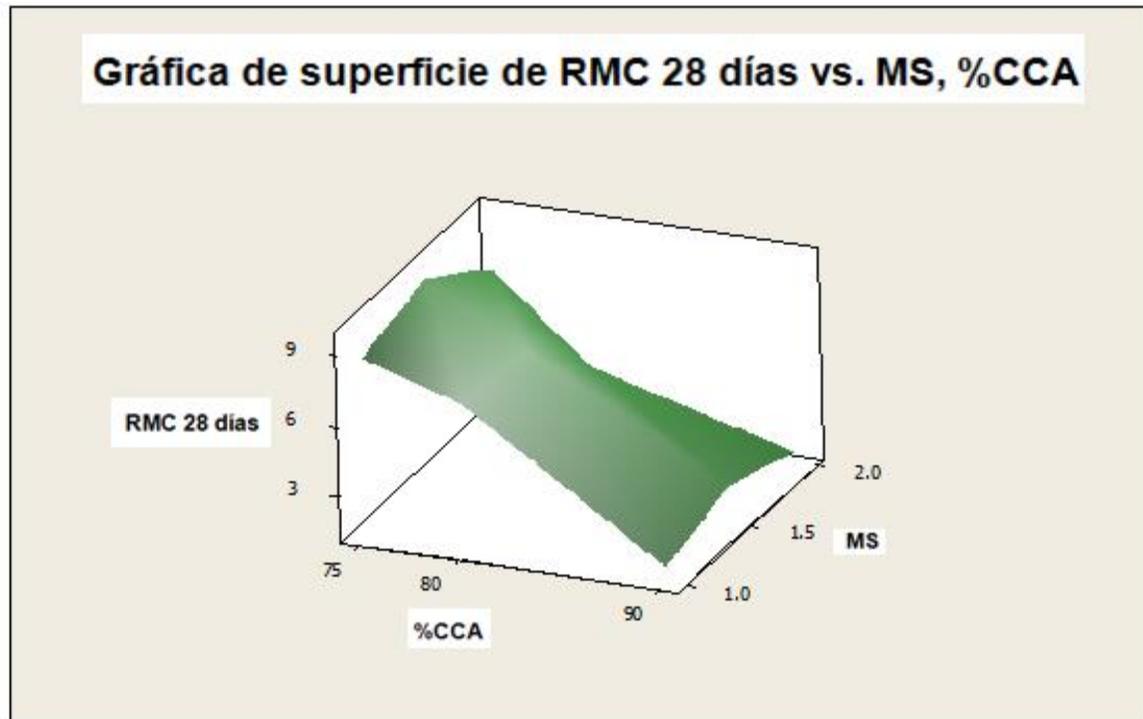


Figura 5.9 Gráfica de superficie de respuesta de RMC a 28 días vs MS, %CCA de morteros CCA/CH

En la Figura 5.9 se observa la interacción de la variable respuesta RMC a los 28 días con los factores %CCA y MS. Se aprecia que con un bajo nivel de MS y un mayor %CCA las resistencias disminuyen. Caso contrario ocurre si se utiliza un valor medio de MS (1.5), con el cual las resistencias se maximizan a medida que disminuye el %CCA. Por lo tanto, para lograr mejores resultados de resistencia mecánica a la compresión el MS deberá tener un valor de 1.5.

En las Figuras 5.10 y 5.11, se presentan las gráficas de contorno de RMC a los 28 días, las cuales representan la relación existente entre la variable de respuesta y los factores en sus distintos niveles, lo que permite visualizar posibles cambios en la forma o altura de la superficie de respuesta con la perspectiva desde la vista de planta.

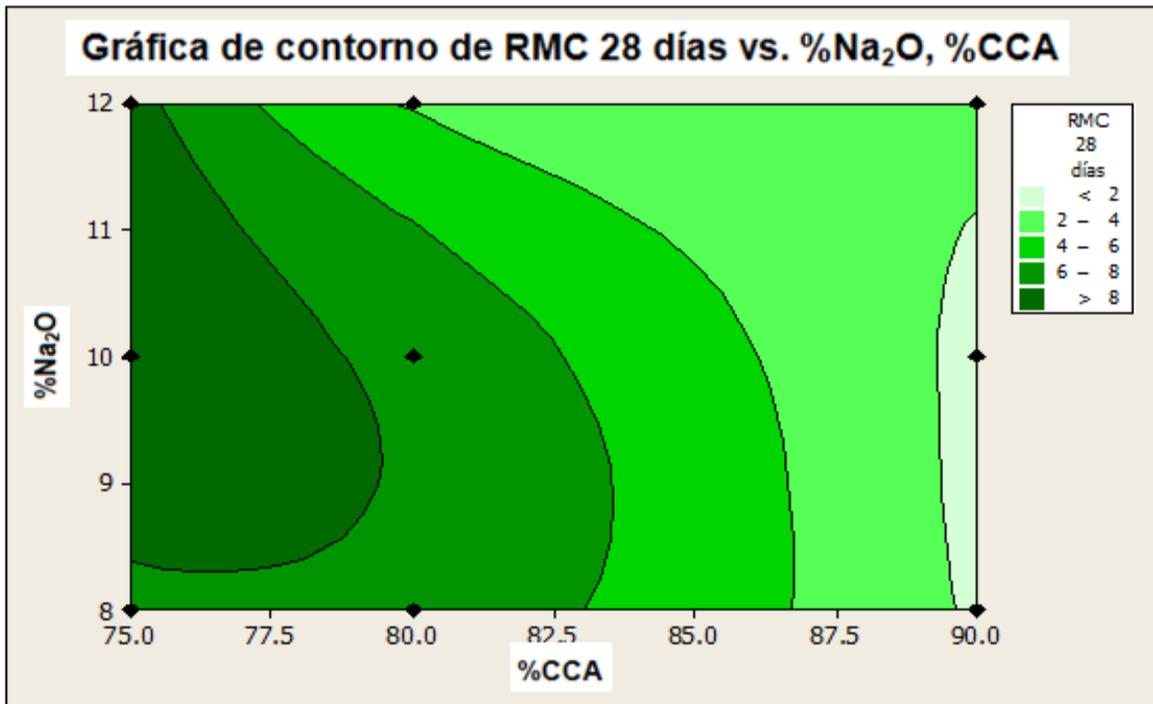


Figura 5.10 Gráfica de contorno de RMC a 28 días frente a relación %CCA y %Na<sub>2</sub>O de morteros CCA/CH

En la Figura 5.10 se aprecia que a medida que las regiones se tornan más oscuras representan valores más altos de RMC a los 28 días. Las líneas de contorno revelan un pico centrado en un %Na<sub>2</sub>O mayor del 8% y menor del 12% con un %CCA menor del 80%. Las RMC en dicha región son superiores a 8 MPa. Por tanto, la gráfica indica que para maximizar las resistencias se debe utilizar un % Na<sub>2</sub>O del 10% y un %CCA menor al 80%.

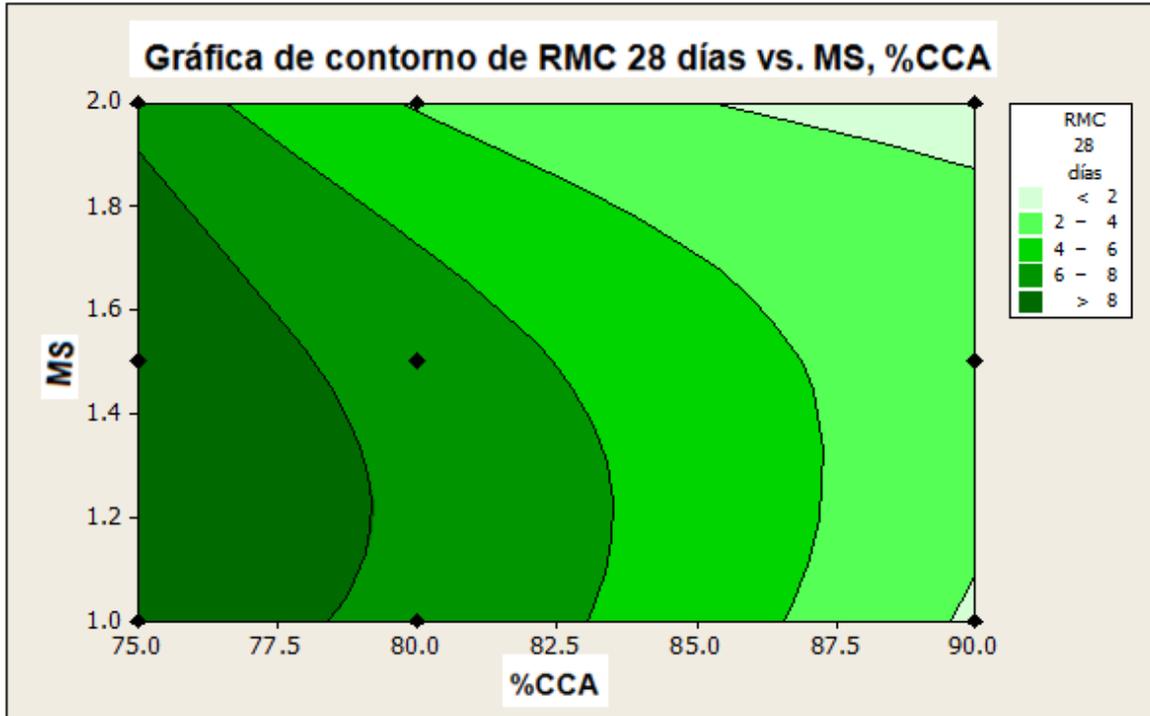


Figura 5.11 Gráfica de contorno de RMC a 28 días frente a relación %CCA y MS de morteros CCA/CH

La Figura 5.11 muestra la relación que existe entre la variable RMC a los 28 días con los factores %CCA y MS. Dicha gráfica indica que para maximizar la resistencia mecánica a la compresión se debe de utilizar un MS mayor a 1 y menor que 2 y un %CCA menor al 80%.

Con el objetivo de definir los niveles óptimos en que debe fijarse cada factor, se analizó de qué manera afectan los diferentes niveles a la variable de respuesta (RMC) por medio de un análisis del diseño propuesto por Taguchi utilizando el software estadístico Minitab 15, a través de la gráfica de efectos principales, tal como se muestra en la Figura 5.2, en la que se analizan las diferencias entre las medias para cada nivel de los factores involucrados.

Dicho análisis proporciona una estimación de la RMC obtenida para los niveles de cada factor, en donde los puntos de la gráfica representan las medias de la variable de respuesta y debido a que se desea maximizar la RMC, se seleccionaron los niveles que produjeron las medias más altas, siendo estos los niveles óptimos.

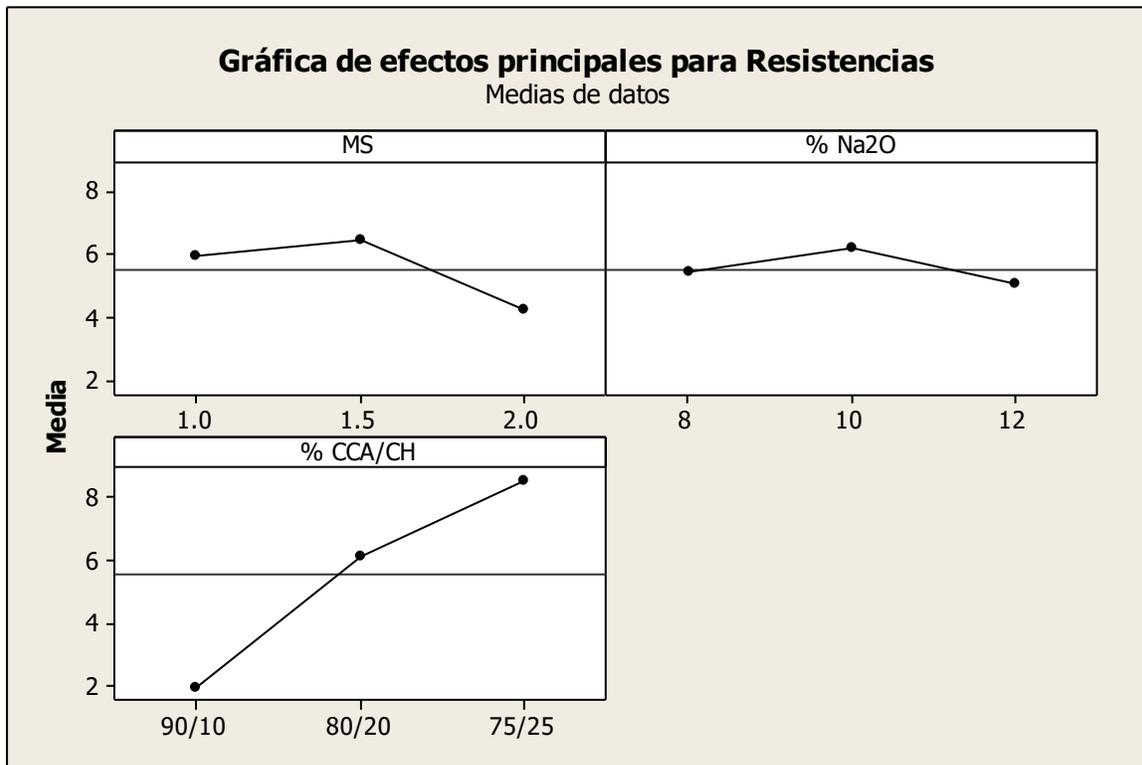


Figura 5.12 Gráfica de efectos principales para resistencias de morteros CCA/CH a 28 días

En la Figura 5.12 se observa que para el caso del MS se alcanza una mayor resistencia al utilizarlo en el nivel de 1.5, seguido por 1.0 y 2.0. En el caso del %Na<sub>2</sub>O muestra que las resistencias se maximizan al emplearlo en el nivel 10%, seguido por los niveles 8% y 12%. Finalmente, para el factor %CCA indica que con un 75% se logran las mayores resistencias.

En la Tabla 5.3 se muestran los niveles óptimos de los factores estudiados, que conducen al incremento de las propiedades mecánicas de los morteros CCA/CH.

Tabla 5.3 Niveles óptimos de factores de estudio para morteros CCA/CH

Factor	Nivel
MS	1.5
%Na <sub>2</sub> O	10
%CCA/CH	75/25

## 5.5 Comparación entre morteros óptimos CCA/CH y morteros de referencia 100% Cemento Portland

En la Figura 5.13 se muestra la comparación entre los resultados de la resistencia mecánica a la compresión de morteros elaborados con la formulación óptima y morteros de referencia 100% CP.

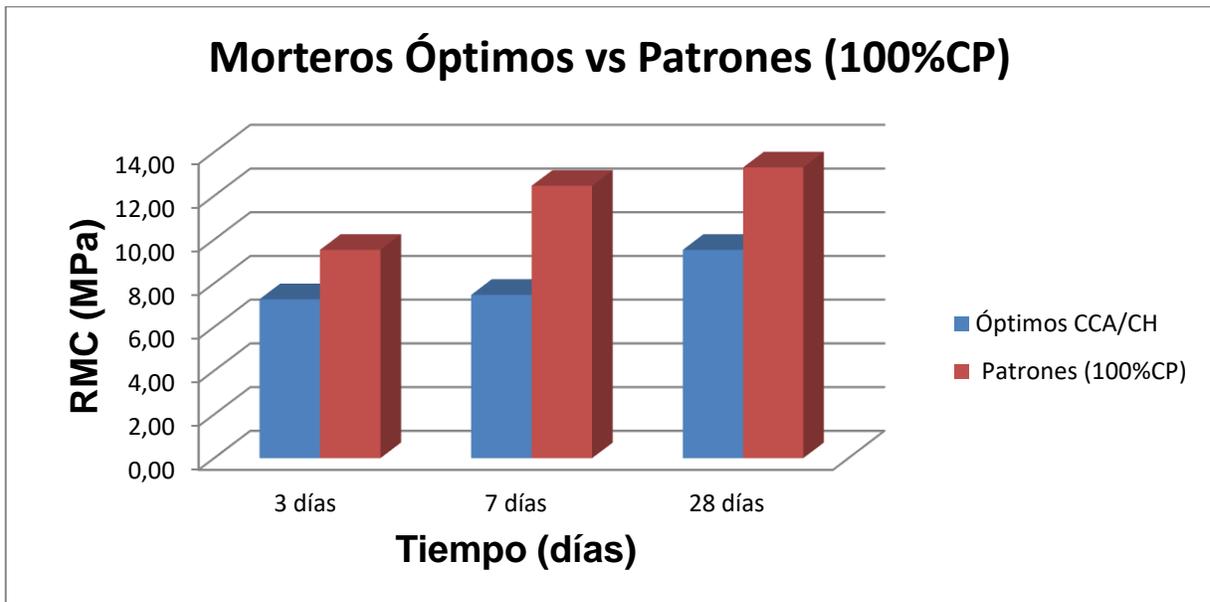


Figura 5.13 Morteros de formulación óptima CCA/CH vs a morteros de referencia 100% CP

En la Figura 5.13 se puede apreciar que los valores de resistencias desarrolladas por los morteros óptimos CCA/CH no superan las resistencias de los morteros patrones o de referencia. Se observa además que a los 28 días de curado los morteros óptimos alcanzan el mismo valor de resistencia que los morteros de referencia a los 3 días de curado.

Si se comparan los resultados de resistencia mecánica a la compresión obtenidos en los distintos días en que se realizaron los ensayos, se tiene que a los 3 días la RMC de los morteros óptimos alcanzó un valor menor que la resistencia de los morteros de referencia en un 31.09%. Mientras que, a los 7 días de curado la resistencia de los morteros óptimos es 7.47 MPa, siendo 66.80% menor con respecto al valor obtenido para los morteros patrones (12.46 MPa). Finalmente a las 28 días de curado el valor de RMC alcanzado por los morteros de referencia es un 39.56% mayor que el valor alcanzado por los morteros óptimos. Es decir, si se evalúa el desarrollo de la resistencia en el tiempo, la RMC de los morteros de referencia aumentó en un 39.56% en el período de curado evaluado, mientras que

los morteros óptimos aumentaron los valores de resistencia desde el día 3 hasta el día 28 en un 31.09%.

## 5.6 Resultados de Tiempo de fraguado

En la Tabla 5.4 se muestran los resultados del contenido de agua para pastas de consistencia normal. Para realizar las pruebas se seleccionaron las formulaciones que alcanzaron los tres mejores resultados en términos de resistencia normal a la compresión, incluyendo el sistema con la formulación óptima (CCA-CH5).

Tabla 5.4 Contenido de agua para pastas de consistencia normal

Sistema	% CCA/CH	MS	%Na <sub>2</sub> O	% Agua
CCA-CH5	75/25	1.5	10	70.13
CCA-CH3	75/25	1	12	65
CCA-CH2	80/20	1	10	65

Con base en la Tabla 5.4 se pueden comparar los sistemas que contienen el mismo porcentaje de CCA (75/25). Se demanda una mayor cantidad de agua para aquellas pastas que contienen niveles medios de MS y %Na<sub>2</sub>O (1.5 y 10% respectivamente), como es el caso del sistema CCA-CH5, que requirió de 70.13% de agua. Sin embargo si se mantiene constante el porcentaje de sustitución de CCA por CH, disminuye el MS y aumenta el %Na<sub>2</sub>O, se necesita de una menor cantidad de agua (65%). En el caso del sistema CCA-CH2, al aumentar el % de sustitución de CCA (80/20) y mantener los demás factores en los niveles más bajos, se requiere una cantidad de agua de 65%, por lo que se puede decir que el porcentaje de sustitución de CCA no es determinante en la cantidad de agua para pastas de consistencia normal, sino que los demás factores también influyen.

En la Figura 5.14 se muestran los resultados obtenidos en la determinación del tiempo de fraguado en las pastas de consistencia normal, para los mejores sistemas de acuerdo a las resistencias obtenidas.

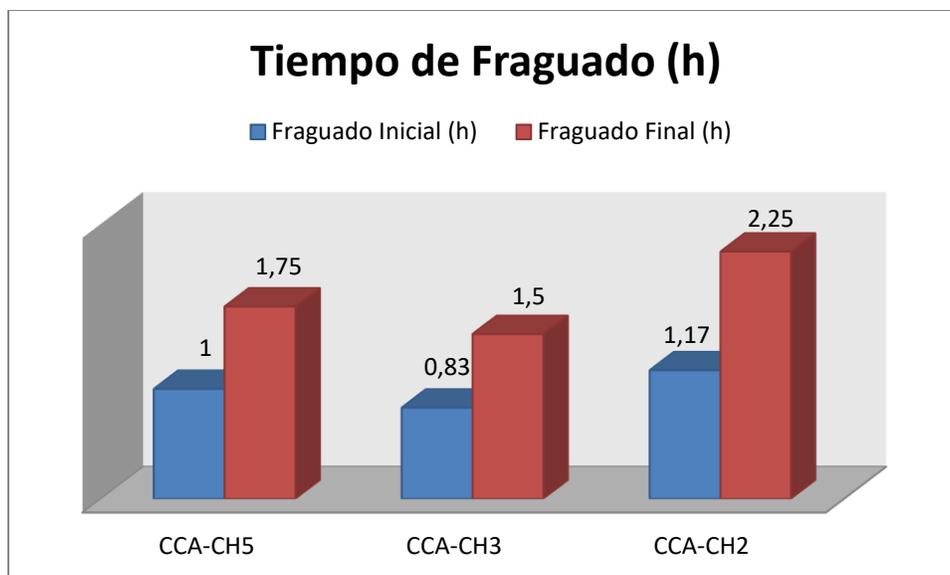


Figura 5.14 Resultados de tiempo de fraguado inicial y final de pastas CCA/CH

En la Figura 5.14 se muestra que, para las pastas que contienen un 75% de CCA, se alcanzan menores tiempos de fraguado inicial y final con respecto a las pastas sustituidas en un 80%. Por lo que, un aumento en el porcentaje de sustitución de CCA provoca un incremento en los tiempos de fraguado. Se comparan además, las pastas que contienen el mismo porcentaje de sustitución (CCA-CH5 y CCA-CH3), obteniéndose menores tiempos de fraguado al disminuir el MS y aumentar el %Na<sub>2</sub>O. Al mantener los factores evaluados en sus niveles más bajos a como se muestra en las pastas CCA-CH2 se alcanzan mayores tiempos de fraguado en comparación a las demás pastas evaluadas.

Según las especificaciones para tiempos de fraguado descritos en la Norma ASTM C150-02, se deberá cumplir con un tiempo de fraguado mínimo de 1 hora y un tiempo máximo de 6 horas. Se comprueba que todos los sistemas evaluados cumplen con dicha norma, ya que los resultados obtenidos se encuentran dentro de lo especificado, teniendo un tiempo máximo de 2.25 horas.

### 5.7 Resultados de Productos de Reacción en Pastas Endurecidas

Se Identificaron los posibles productos de reacción mediante la técnica de espectroscopía infrarroja (FT-IR) para pastas endurecidas elaboradas a partir de la formulación óptima. Se realizó el análisis a los 1, 7, 14, 21 y 28 días de curado, los resultados se muestran en la Figura 5.15.

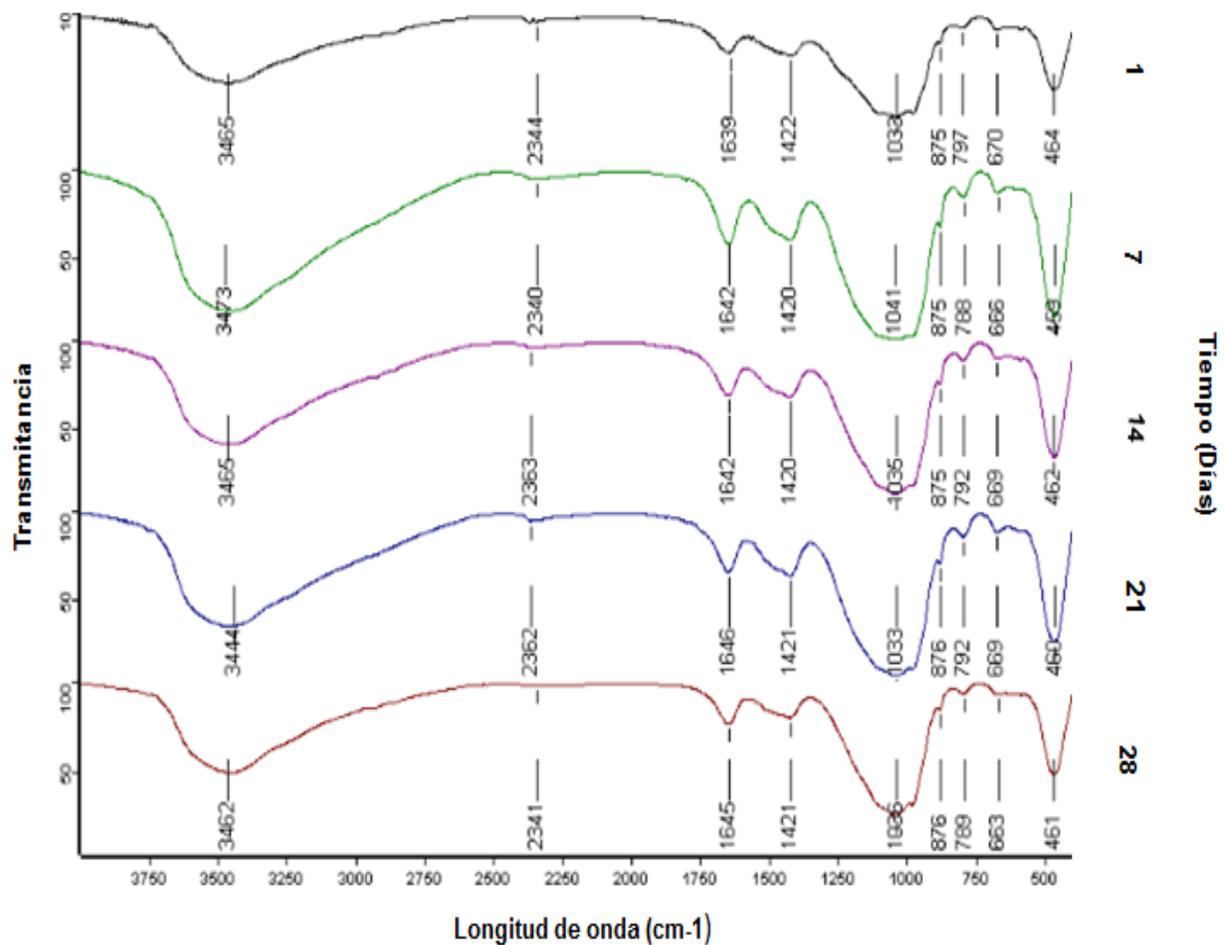


Figura 5.15 Bandas de transmitancia para pastas geopoliméricas óptimas a 1, 7, 14, 21 y 28 días de curado

En la Figura 5.15 se muestran las bandas de frecuencias específicas, producidas por las vibraciones de los compuestos formados en la reacción polimérica. Se puede observar que las bandas registradas en los distintos días de análisis no presentan mayores cambios y no aparecen nuevos picos que evidencien la formación de nuevos compuestos.

La reacción de geopolimerización avanza de manera lenta, presentando el mayor avance en los primeros días de curado de las pastas, esto se comprueba con el análisis de conductividad eléctrica, ya que la sílice presente en la ceniza reacciona en las primeras horas, ya que a las 12 horas de monitoreo la conductividad disminuyó significativamente, alcanzando un valor cercano a cero.

Sin embargo el avance de la reacción se evidencia con el aumento de la resistencia mecánica a la compresión entre los días 1 y 28, lo que se puede

atribuir a la formación del gel silicato de calcio hidratado, producto de la reacción entre el silicato de sodio de la solución activante y la cal hidratada.

La banda de absorción que se observa en las longitudes de onda comprendidas entre  $3100\text{ cm}^{-1}$  hasta  $3700\text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones producidas por el agua, comprobando así la presencia de la misma en la estructura interna de la molécula. La banda que se extiende en el rango de  $970\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$  corresponde al silicato de calcio hidratado (C-S-H), observándose la formación temprana de la misma al primer día de curado, siendo este el principal responsable de las resistencias tempranas del concreto. Todos los silicatos muestran una fuerte absorción en las proximidades de los  $1000\text{ cm}^{-1}$ , asociadas a las vibraciones de enlaces Si-O. El pico registrado entre las frecuencias de vibración de  $1414\text{ cm}^{-1}$  hasta  $1460\text{ cm}^{-1}$  se debe al carbonato de calcio presente, la banda de vibración de los  $870\text{ cm}^{-1}$  también corresponde a este compuesto. En  $1642\text{ cm}^{-1}$  aparece una banda débil, característica de las vibraciones de deformación H-O-H del agua libre. La banda de deformación del enlace Si-O-Si corresponde a la frecuencia de los  $667\text{ cm}^{-1}$ .

## 5.8 Resultados de Prueba de Durabilidad

En la Tabla 5.5 se presentan los resultados obtenidos de la medición por triplicado de la resistencia mecánica a la compresión de los morteros con la formulación óptima curados a temperatura ambiente por 28 días y posteriormente expuestos a altas temperaturas.

Tabla 5.5 Resultados de RMC de morteros expuestos a  $900^{\circ}\text{C}$  por 2 horas

Cubo	RMC (MPa)
1	4.37
2	4.62
3	4.77
<b>Promedio</b>	<b>4.59</b>

En la Tabla 5.5 se puede observar que la resistencia mecánica a la compresión de los cubos expuestos a  $900^{\circ}\text{C}$  por 2 horas apenas alcanza un valor promedio de 4.59 MPa, el cual, comparado con los 9.52 MPa que alcanzó la formulación óptima a los 28 días, representa una resistencia residual del 51.79 %. En la Figura 5.16 se observa la disminución de la RMC en los morteros expuestos a las altas temperaturas.

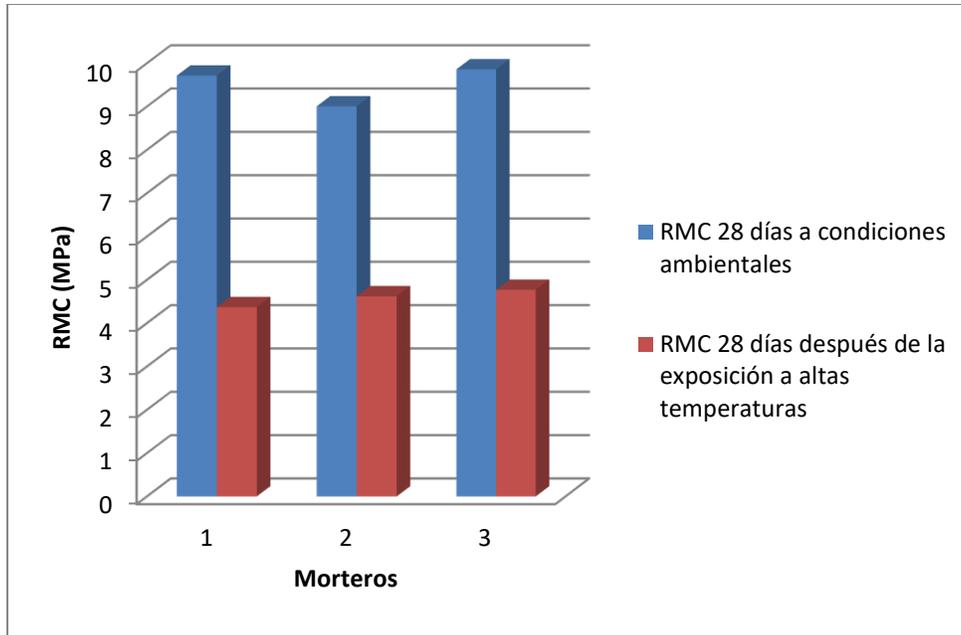


Figura 5.16 RMC de morteros óptimos antes y después de la exposición a las altas temperaturas

En la Figura 5.17 se presenta el aspecto físico de morteros luego de la exposición a 900°C por 2 horas y su posterior enfriamiento por 24 horas.

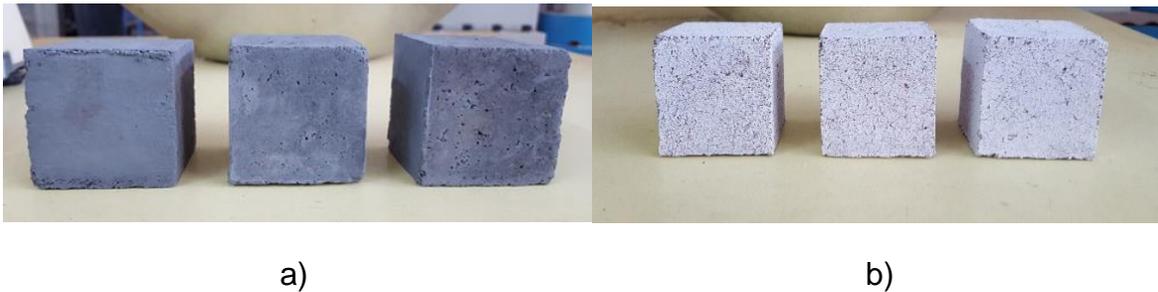


Figura 5.17 Aspecto físico de los morteros a) antes y b) después de la exposición a 900°C

Como se observa en la Figura 5.17, luego del tratamiento térmico las probetas cambiaron de color, de grisáceo a blanco, esto se debe a la eliminación de las partículas de carbón residual presentes en la ceniza antes de la exposición, el nuevo color adquirido por los cubos evidencian el índice del bajo contenido de carbón. Los cubos también presentaron fisuras, lo que se evidencia en la disminución de la RMC, y cambios en su peso ya que luego de la exposición a altas temperaturas este disminuyó en un 12%, los datos se presentan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Resultados de variación en peso de morteros expuestos a 900°C por 2 horas

<b>Cubo</b>	<b>Peso de los Cubos (Kg)</b>	
	<b>Antes de la exposición</b>	<b>Después de la exposición</b>
1	0.233	0.204
2	0.237	0.205
3	0.229	0.205
<b>Promedio</b>	<b>0.233</b>	<b>0.205</b>

## VI. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en los distintos análisis y ensayos realizados se concluye que:

Se determinó que la temperatura óptima de calcinación de la cascarilla de arroz es 700 °C.

Los resultados de RMC obtenidos señalan que el valor más alto de resistencia alcanzado fue de 9.53 MPa, para el sistema CCA-CH5.

Se seleccionó la formulación óptima, constituida por un porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz del 75%, módulo de silicato de sodio de 1.5 y porcentaje de óxido de sodio del 10%.

La de RMC de morteros de formulación óptima no superan las resistencias de los morteros de referencia 100% CP.

Los mayores tiempos de fraguado inicial y final registrados fueron de 1.17 horas y 2.25 horas, respectivamente.

Entre los principales productos de reacción identificados en las pastas elaboradas con los niveles óptimos se encuentran el gel CSH y el carbonato de calcio.

Los morteros óptimos sometidos a 900°C por 2 horas presentaron una resistencia residual del 51.79%, además de sufrir cambios físicos como cambio de color y fisuramiento.

## VII. RECOMENDACIONES

- ❖ Curar los morteros geopoliméricos a temperaturas en el rango de 50°C-100 °C con el fin de evaluar el aumento de la misma sobre las propiedades físico-mecánicas.
- ❖ Utilizar aditivos retardadores de fraguado tipo B según la ASTM C 494, con el fin de aumentar el tiempo durante el cual la pasta es trabajable.
- ❖ Determinar la composición mineralógica de CCA y de pastas óptimas mediante análisis de difracción de rayos X, con el objetivo de identificar las fases amorfas y cristalinas de los compuestos formados.
- ❖ Analizar mediante FT-IR los sistemas CCA-CH1, CCA-CH7 y CCA-CH8, que sufrieron una disminución de la resistencia mecánica a la compresión entre los días 7 y 28, y así descartar que esto se deba a la aparición de compuestos malignos que ocasionen ese efecto negativo.
- ❖ Dar seguimiento al monitoreo de la resistencia mecánica a la compresión de los morteros hasta los 56, 90 y 180 días de curado para analizar su desarrollo y poder predecir su comportamiento.

## VIII. NOMENCLATURA

### **Abreviaturas**

CCA: Ceniza de cascarilla de arroz

CH: Cal hidratada

ASTM: American Society for Testing and Materials

NTON: Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense

INTA: Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria

NMX: Norma Oficial Mexicana

CP: Cemento portland

EAH: Escoria de alto horno

IAP: Índice de actividad puzolánica

a/c: Relación agua/cemento

are/c: Relación arena/cemento

RMC: Resistencia mecánica a la compresión

FTC: Facultad de Tecnología de la Construcción

FIQ: Facultad de Ingeniería Química

RUSB: Recinto Universitario Simón Bolívar

RUPAP: Recinto Universitario Pedro Arauz Palacios

### **Materiales**

H<sub>2</sub>O: Agua

CCA: Ceniza de cascarilla de arroz

Ca(OH)<sub>2</sub>: Hidróxido de calcio

NaOH: Hidróxido de sodio

Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>: Silicato de sodio

### **Fórmulas químicas**

Na<sub>2</sub>O: Óxido de sodio

SiO<sub>2</sub>: Óxido de silicio

SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O: Módulo de silicato de sodio

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

C-H-S: Silicato de calcio hidratado

### **Otros Símbolos químicos**

AlO<sub>4</sub>: Tetra óxido de aluminio

SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>: Tetra óxido de silicio

Al<sup>+3</sup>: Ion Aluminio

Si<sup>+4</sup>: Ion Silicio

Na<sup>+</sup>: Ion Sodio

K<sup>+</sup>: Ion Potasio

Ca<sup>+</sup>: Ion Calcio

OH<sup>-</sup>: Ion Oxhidrilo

SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O: Módulo de silicato de sodio

### **Unidades de Medida**

Cm: Centímetro

cm<sup>2</sup>: Centímetro cuadrado

m: Metro

m<sup>3</sup>: Metros cúbicos

m.s.n.m: metros sobre el nivel del mar

g: Gramo

Kg: Kilogramo

Ton: Tonelada

°C: Grado Celsius

°K: Grado Kelvin

MPa: Mega Pascal

Kcal: Kilocaloría

V: Volt

A: Ampere

### **Técnicas de Caracterización**

ICP-OES: Espectroscopía de Plasma Inducido

FT-IR: Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier

## IX. REFERENCIAS

Álvarez, H. (2010). *Síntesis y caracterización de las propiedades físico-mecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria*. Obtenido de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1102/2/133488.pdf>

Allauca, L. (2009). *Uso de sílice en hormigones de alto desempeño*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/7684/1/Usode%20de%20s%C3%ADlice%20en%20hormigones%20de%20alto%20desempe%C3%B1o.pdf>

ASTM C 29. *Determinación de pesos unitarios seco sueltos y seco compacto de agregado fino*. Disponible en <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C29C29M-07-SP.htm>

ASTM C 109. *Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico*. Disponible en <http://www.astm.org/Standards/C109C109M-SP.htm>

ASTM C 128. *Determinación de gravedad específica y porcentaje de absorción de agregado*. Disponible en <http://www.astm.org/Standards/C127.htm>

ASTM C 133-84. *Determinación de la gravedad específica del cemento*. Disponible en <http://ingenieriasalva.blogspot.com/2009/04/astm-designacion-c-188-95.html>

ASTM C 136. *Análisis granulométrico por tamices de los agregados finos*. Disponible en <http://www.conred.gob.gt/www/normas/NRD3/NTG41010h1.pdf>

ASTM C 150. *Especificación Normalizada para Cemento Portland*. Disponible en <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C150-07-SP.htm>

ASTM C 150-02. *Standard Specification for Portland Cement*. Disponible en <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C150-02.htm>

ASTM C 191-82. *Determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico por el método de la aguja de Vicat*. Disponible en <http://www.ibertest.es/producto/astm-c191-8/>

ASTM C 197-86. *Determinación de la consistencia normal del cemento hidráulico*. Disponible en <http://www.astm.org/Standard/alpha-lists/D.html>

ASTM C 566-84. *Determinación del contenido de humedad de agregado*. Disponible en <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C566-97R04-SP.htm>

ASTM C 595. *Especificaciones normalizadas para cementos adicionales hidráulicos.* Disponible en <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C595C595M-09-SP.htm>

ASTM C 618. *Especificación normalizada para ceniza volante de carbón y puzolana natural en crudo o calcinada para uso en concreto.* Disponible en <http://www.astm.org/Standards/C618-SP.htm>

Bonilla, M. (2008). *Evaluación de la actividad de puzolanas: un nuevo método.* Obtenido de <http://www.mondragon.edu/cnm08/Abstract/238.pdf>

CAPRE. *Normas sobre calidad del agua para consumo humano.* Disponible en <http://cidbimena.desastres.hn/pdf/spa/doc5430/doc5430-contenido.pdf>

Castro, C. (2014). *Valoración de ceniza de bagazo de caña de azúcar proveniente del Ingenio Monte Rosa mediante activación alcalina para la síntesis de geopolímeros.* Managua

Cincotto, M.A.; V. Agopyan y V.M. John. 1990. *Optimization of Rice Husk Ash Production.* Salvador de Bahía. Vegetable Plants and Their Fibres as Building Materials, Proceedings of the Second International Symposium, RILEM, CIB, UFBA, pp. 334-342.

Dalimier, Th. 1986. *Producción de un cemento puzolánico en Colombia.* Materiales, técnicas y economía de la construcción en los países en desarrollo, Actas del Coloquio Internacional. pp. 37-43. París.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new Materials, *Journal of Thermal Analysis.*

Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements.* First International Conference on Alkaline Cements and Concretes.

Davidovits, J. (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology in the proceedings of geopolymer '99.

Díaz, P. (2012). *Estudio de factibilidad de obtención de hormigones geopolímeros a partir de desechos minerales.* Chile

Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J.L., Lukey C.C, Palomo A., van Deventer J.S.J., (2007), "Geopolymer technology: The current state of the art", *J. Mater. Sci.* 42, 2917-2933

Escalante, J., (2002). *Materiales alternativos al cemento portland*, vol 21.

Espinoza, L & Escalante, I. (2008). *Comparación de las propiedades del concreto utilizando scoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cement Pórtland ordinario*. Nexa Revista Científica. Vol 21, N° 01, pp 11-18

Farías, J. S. A. y Recena, F. A. P. (1990) *Estudio de cemento de cascarilla de arroz brasileño. Plantas, vegetales, y sus fibras como materiales de construcción, Procedimientos del Segundo Simposio Internacional*, RILEM, CIB, UFBA. Salvador de Bahía.

Fernández-Jiménez A., Palomo A., (2005a), "*Composition and Microstructure of alkali activated fly ash mortars. Effect of the activator*. *Cem. and Concret. Res.* 35, 1984-1992.

Gabalec, M. (2008). *Tiempo de fraguado del hormigón*. Obtenido de [http://lemac.frp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/Tesis2008\\_Anabela Gabalec\\_Tiempo-de-Fraguado-del-Hormigon.pdf](http://lemac.frp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/Tesis2008_Anabela_Gabalec_Tiempo-de-Fraguado-del-Hormigon.pdf)

Gaitán, J., & Tórriz, B. (2013). *Influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar proveniente del Ingenio Monte Rosa sobre las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de morteros de cemento tipo Gu*. Managua

González, M. (s.f). *Morteros ligeros de cáscara de arroz*. Obtenido de [http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f\\_doc/concreto/MGC30\\_morteros\\_arroz.pdf](http://www.asocem.org.pe/scmroot/bva/f_doc/concreto/MGC30_morteros_arroz.pdf)

González de la Cotera, M. (1993). *Adiciones minerales al Cementos Portland*. Obtenido de [http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f\\_doc/cemento/adicionado/Congreso%20de%20Ingenieria%20Quimica.pdf](http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/cemento/adicionado/Congreso%20de%20Ingenieria%20Quimica.pdf)

Guzmán, V. (2009). *Manual de prácticas de concreto hidráulico*. Obtenido de <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30537/1/GuzmanDiaz.pdf>

Hammond, A. (1983). *Pozzolana Cements for Low Cost Housing*.

Huang, C.L. y D.S. Wu. 1989. *Properties of Cement Paste Containing Rice Husk Ash*. Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, pp. 733- 762. Trondheim.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2002). *Terminología del Cemento y del Concreto: ACI 116R-00*. México: [s.n]

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2002). *Terminología del Cemento y del Concreto: ACI 201*. México: [s.n].

Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria INTA. (2009). *Cultivo de Arroz*. Managua. Obtenido de <http://www.magfor.gob.ni/programas/pea/salva/Gu%C3%ADa%20T%C3%A9cnica%20de%20ARROZ%20FINAL.pdf>

Juárez, B. (2012). *La utilización de cáscara de arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolana artificial en el diseño de morteros para acabados*. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3424\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3424_C.pdf)

Macías, D.(2012). *Tópicos de nuevos materiales catalíticos: Difracción de Rayos X*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/mtrodavidmaciasferrer/difraccin-de-rayos-x>.

Mafla, A. (2009). *Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción*. Obtenido de <http://biblioteca.uniminuto.edu/ojs/index.php/Inventum/article/viewFile/47/46>

Mendoza, L. (2011). *Evaluación de tres materiales puzolánicos del bajío para su aplicación como materiales de construcción sustentable*. Obtenido de <http://www.uteq.edu.mx/tesis/IA/041.pdf>

Metha, P.K. 1989. *Puzzolanic and Cementitious By-Products in Concrete - Another look*. Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, pp. 1-43. Trondheim.

Mitsuuchi, M. (2012). *Producción y caracterización de materiales cementantes a partir de silicoaluminato cálcico vítreo*. Obtenido de [http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado\\_cs\\_ing/quintana/TESIS\\_COMPLETA.pdf](http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/quintana/TESIS_COMPLETA.pdf)

Monzó, A., Fernandez et al. (2008). *Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado*. Cerámica y vidrio.

National Ready Mixed Concrete Association. (s.f). *Curado del concreto en el lugar*. Obtenido de <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP11es.pdf>

NMX C-111-ONNCCE 2004. Agregados para cemento hidráulico-Especificaciones y métodos de prueba. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/87185618/111-Especificaciones-y-Metodos-de-Prueba-Para-Agregados#scribd>

NMX-C-165-ONNCE-2004. Método de prueba para la determinación de la masa específica aparente y absorción del agregado fino. Disponible en <http://www.revistacyt.com.mx/images/problemas/2011/pdf/AGOSTO.pdf>

NTE INEN 0156. *Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.* Disponible en <ftp://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0156.2009.pdf>

NTE INEN 0158. *Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.* Disponible en <ftp://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0158.2009.pdf>

Luxán M., Madruga F., Saavedra J. (1989). Rapid evaluation of puzzolanic activity of natural products by conductivity measurements. *Cement and concrete research*, Vol 19.

Prada, A. (2010). *La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral.* Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rori/v14s1/v14s1a13.pdf>

Robayo, E. (2013). *Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente.* Obtenido de <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/11159/1/RobayoNunezEstefania2013.pdf>

Rubinson K.A. (2000). *Espectroscopia Infrarroja.* Disponible en <http://es.scribd.com/doc/14175170/2-ESPECTROSCOPIA-INFRARROJA>.

Salas, J., Castillo, P., M.I. Sanchez de Rojas y J. Veras. (1986): "Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros". *Materiales de construcción*, Vol. 36, N° 203. P. 21-39. Madrid.

Shi, C., Pavel, K., & Roy, D. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes.* New York, USA: Taylor & Francis.

Skvara F., Jilek T., Kopecky L. (2005) "Ceopolymer materials based on fly ash" *Ceramics-Silikáty*, 3, 195-204

Smith, R.G. 1989. "Cemento hecho a base de ceniza de cáscara de arroz". Méjico. Tercer Simposio, CIB, RILEM, pp. 228-240.

Smith, R.G. y G.A. Kamwanja. 1986. "The Use of Rice Husks for Making a Cementitious Material". *Use of Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials*, Joint Symposium, RILEM. Bagdad, pp. E85-E94.

Sosa, M. (2000). *Tecnología productiva de cemento puzolánico a partir de la ceniza de cascarilla de arroz.* Obtenido de <http://tribunadelinvestigador.com/ediciones/2000/2/art3.pdf>

Suguita, S.; M. Shoya y H. Tokuda. 1992. "Evaluation of Pozzolanic Activity of Rice Husk Ash". Fourth International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Instambul, pp. 495-512.

Sulaiman, M.; N. Mansoor y K. Kan. 1983. "Experimental and demonstration low cost house built at building station. Appropriate Building Materials for Low Cost Housing", Proceedings of a Symposium, CIB, RILEM. Nairobi, pp. 107-116.

Tailing, B. Brandster, J. (1989). Present state and future of alkali –activated slag concretes. 3<sup>rd</sup> International Conference of Fly Ash, Silica Fume, slag and Pozzolans in Concrete. Tondheim SP 114-74, pp. 1519-1546.

United Nations Centre For Human Settlements (Habitat). (1993): "*Kenya: Development of Pozzolanic Cement using Rice Husk Ash*". Endogenous Capacity-Building for the production of building materials in the construction industry. Selected Case studies. Nairobi. P66-81.

UNE-EN 196-3 (2008). *Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen.*

UNE-EN 459-1 (2011). *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones y especificaciones y criterios de conformidad.*

Valenzuela, M. (2013). *Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural.* Obtenido de [http://www.tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114679/cfvalenzuela\\_mh.pdf?sequence=1](http://www.tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114679/cfvalenzuela_mh.pdf?sequence=1)

Van Deventer, J. S. J and Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite- based geopolymers, Chemical Engineering Journal, 89, 1-3, 63-7.

Varón, C. (2005). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz.* Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/478/47802513.pdf>

Vásquez, A. Velásquez. (1998). *Las cenizas de cáscara de arroz, adición puzolánica en cemento y concreto.* Obtenido de [http://www.asocem.org.pe/bivi/RE/IC/ADI/cenizas\\_cascara.pdf](http://www.asocem.org.pe/bivi/RE/IC/ADI/cenizas_cascara.pdf)

Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J. S. J and Lorenzen, L., (1997). The potencial use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: Part I. Theory and applications, Minerals Engineering, 10, 7, 659-669

## ANEXO A

### Ensayo de Actividad Puzolánica

---

#### A.1 Objetivo de ensayo

- ✓ Seleccionar la temperatura óptima de calcinación de la cascarilla de arroz por medio de ensayo de Actividad Puzolánica.

#### A.2 Aplicación del método

Las muestras de cascarilla de arroz, se calcinaron en una mufla, desde temperatura ambiente hasta las temperaturas correspondientes de calcinación seleccionadas (600 °C, 700°C y 900 °C). El tiempo de ensayo fue de 12 horas.

#### A.3 Preparación de las muestras

Con el objetivo de extraer cualquier materia extraña que pudiera estar presente en la cascarilla de arroz (arena, piedras, etc.) y que pudieran inducir a errores en las mediciones a realizarse, esta se limpió manualmente (ver Figura A.1).

Considerando que la ceniza representa un 20% en peso de la cascarilla de arroz, se pesaron 30 g de cascarilla de arroz en una balanza analítica Sartorius modelo CP224S para las tres temperaturas a las que se realizó el análisis.



Figura A.1 Limpieza de cascarilla de arroz

#### A.4 Preparación de suspensiones

- La cascarilla de arroz anteriormente pesada, se colocó en cápsulas de porcelana para la calcinación a 600 °C y 700 °C y en crisoles para la de 900°C, posteriormente se introdujeron para el tratamiento térmico de la misma, en una mufla marca Thermolyne modelo F-B1415M por un período de 4 horas.
- Al transcurrir el tiempo de calcinación, el material calcinado se dejó enfriar dentro de la mufla por aproximadamente una hora hasta temperatura ambiente y se pulverizó hasta obtener una finura similar a la del cemento Portland según ASTM C 595, luego se colocó la ceniza en un desecador para evitar que absorbiera humedad del ambiente.

En la Figura A.2 se muestran el material calcinado extraído de la mufla, a sus diferentes temperaturas.



Figura A.2 Cascarilla de arroz calcinada a distintas temperaturas

El material pulverizado se muestra se muestra en la Figura A.3.



Figura A.3 CCA pulverizada

- Se tomaron 3 beakers de 100 mL, uno para cada temperatura de calcinación, y se añadió 20 mL de agua desionizada.
- Los beakers se colocaron en una plancha termostática, para que el agua alcanzara la temperatura de ensayo (40 °C), a como se muestra en la Figura A.4.



Figura A.4 Beakers utilizados para la preparación de suspensiones

- Se añadió 5 g de hidróxido de calcio, para que este se disolviese hasta saturación, a como se muestra en la Figura A.5.



Figura A.5 Solución saturada de CH

- Se añadió 2 gramos de muestra calcinada (CCA) a las diferentes temperaturas al beakers correspondiente a como se muestra en la Figura A.6.



Figura A.6 Suspensiones cal/puzolana

- A partir de este momento se comenzaron a tomar datos, para monitorear el avance de la reacción puzolánica en función de las mediciones de conductividad eléctrica. Durante todo el período de ensayo, las suspensiones se agitaron continuamente con el fin de facilitar los procesos de la reacción puzolánica, por lo que se utilizó un agitador magnético.
- Las mediciones se realizaron en intervalos de 1 hora y el tiempo de ensayo fue de 12 horas.

#### A.5 Análisis de datos

Se analizaron gráficamente en el Software Minitab 15, los resultados de los datos obtenidos del monitoreo de la conductividad eléctrica de las suspensiones donde se mostraron la variación de la conductividad, el pH de la solución, la concentración de los iones  $\text{OH}^-$ , el índice de actividad puzolánica y la velocidad de consumo de los iones  $\text{OH}^-$ , con respecto al tiempo de ensayo (12 horas).

El criterio que se tomó en cuenta para la determinación de la temperatura de calcinación:

Al comparar los datos contenidos a las temperaturas correspondientes, se seleccionó la temperatura de calcinación a la cual se obtienen mayor pérdidas de conductividad eléctrica y mayor velocidad de consumo de iones  $\text{OH}^-$ .

## ANEXO B

### Monitoreo de conductividad eléctrica y pH a distintas temperaturas

---

En las Tablas B.1 y B.2 se resumen los datos obtenidos del ensayo de Actividad Puzolánica, realizado en un tiempo de monitoreo de 12 horas de: Conductividad eléctrica, pH, pOH e OH<sup>-</sup>.

Tabla B.1 Monitoreo de conductividad eléctrica a distintas temperaturas

Tiempo (h)	Conductividad (μs/cm) 600 °C	Conductividad (μs/cm) 700 °C	Conductividad (μs/cm) 900 °C
0	1447	1991	1505
1	761	1150	946
2	563	591	348
3	459	311	81.2
4	431	224.5	19.90
5	239.1	4.61	1.76
6	174.7	0.62	0.39
7	159.8	0.40	0.10
8	72.3	0.34	0
9	29.8	0.18	0
10	26.25	0.18	0
11	1.58	0.15	0
12	0.34	0.10	0

Tabla B.2 Monitoreo de pH a distintas temperaturas

Tiempo (h)	pH 600 °C	pH 700 °C	pH 900 °C	pOH 600°C	pOH 700°C	pOH 900°C	OH <sup>-</sup> 600 °C	OH <sup>-</sup> 700°C	OH <sup>-</sup> 900°C
0	11.64	11.79	11.81	2.36	2.21	2.19	0.0043650	0.0061660	0.0066070
1	11.40	11.60	11.66	2.60	2.40	2.34	0.0025120	0.0039810	0.0045710
2	11.30	11.49	11.53	2.70	2.51	2.47	0.0019950	0.0030900	0.0033880
3	10.21	11.09	10.71	3.79	2.91	3.29	0.0001622	0.0012300	0.0005129
4	10.18	10.33	10.53	3.82	3.67	3.47	0.0001513	0.0002138	0.0003388
5	10.15	10.14	10.13	3.85	3.86	3.87	0.0001413	0.0001380	0.0001349
6	10.09	10.12	9.8	3.91	3.88	4.2	0.0001230	0.0001318	0.0000631
7	10.08	9.99	9.54	3.92	4.01	4.46	0.0001202	0.0000977	0.0000347
8	10.07	9.68	9.23	3.93	4.32	4.77	0.0001175	0.0000479	0.0000178
9	10.06	9.51	9.19	3.94	4.49	4.81	0.0001148	0.0000324	0.0000155
10	9.94	9.35	8.59	4.06	4.65	5.41	0.0000871	0.0000224	0.0000039
11	9.85	9.33	8.5	4.15	4.67	5.50	0.0000708	0.0000214	0.0000032
12	9.37	9.30	8.5	4.63	4.7	5.5	0.00002344	0.00001995	0.000003162

## ANEXO C

### Formulaciones de Morteros CCA/CH

Para el cálculo de las dosificaciones de cada uno de los materiales utilizados en la mezcla, se utilizó una hoja de cálculo de Excel, en la cual es posible realizar modificaciones como variar las condiciones dadas, de modo que las cantidades del material necesario se ajustan acorde a los cambios que se deseen realizar. Las cantidades de los materiales que conforman los morteros, en función de las formulaciones, se muestran en la Tabla C.1:

Tabla C.1 Dosificaciones de morteros CCA/CH

Sistemas	CCA (g)	CH (g)	Arena (g)	Agua Total (g)	Agua Adicional (g)	NaOH (g)	SS (g)
CCA-CH1	900	100	3000	800	941.2524	57.496047	114.992094
CCA-CH2	800	200	3000	800	926.9905	71.870059	143.740118
CCA-CH3	750	250	3000	800	912.7286	86.244071	172.488141
CCA-CH4	800	200	3000	800	916.3156	67.957866	135.915732
CCA-CH5	750	250	3000	800	895.8195	84.947333	169.894665
CCA-CH6	900	100	3000	800	875.3234	101.9368	203.873598
CCA-CH7	750	250	3000	800	900.3198	74.668658	149.337316
CCA-CH8	900	100	3000	800	875.8247	93.335822	186.671645
CCA-CH9	800	200	3000	800	851.3297	112.00299	224.005973

Para encontrar las dosificaciones de los morteros a partir del diseño experimental (Tabla B.1), se tomaron en cuenta las distintas consideraciones:

- ✓ El peso total del mortero será de 4,000 g correspondiente a la capacidad de la mezcladora a utilizar.
- ✓ La cantidad de arena corresponde al 75% en peso del peso total del mortero (3,000 g).
- ✓ El 25% en peso restante, corresponde a CCA/ Ca(OH)<sub>2</sub> (1,000 g).
- ✓ Se utilizó una relación de a/c de 0.8.
- ✓ La cantidad de agua total corresponde al 80% en peso de CCA/ Ca(OH)<sub>2</sub>.

Para encontrar las cantidades de NaOH y SS en gramos, se utilizó un sistema de ecuación considerando la relación SS/NaOH:

Según Díaz, P. (2012), al utilizar una razón de 2.0, ocurre un aumento en la resistencia a la compresión. Al utilizar valores mayores resulta un aumento de exudación y que con valores menores a 2.0 la mezcla precipita y por lo tanto no es posible mezclarla físicamente con el resto de los componentes. Por lo tanto, para el presente estudio, se tomará una relación constante de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  igual a:

$$\frac{\text{Silicato de sodio } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)}{\text{Hidróxido de sodio } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)} = 2.0$$

De la relación presentada, se obtuvo entonces la primera ecuación:

$$\text{Relacion } \frac{SS}{NaOH} = 2$$

$$g \text{ SS} = 2 * g \text{ NaOH} \quad (1)$$

$$(\%N_2O_{SS})(g \text{ SS}) + (\%N_2O_{NaOH})(g \text{ NaOH}) = \%N_2O * 1000g \quad (2)$$

Sustituyendo (1) en (2)

$$(\%N_2O_{SS})(2 * g \text{ NaOH}) + (\%N_2O_{NaOH})(g \text{ NaOH}) = \%N_2O * 1000g$$

$$g \text{ NaOH}(2 * \%N_2O_{SS} + \%N_2O_{NaOH}) = \%N_2O * 1000g$$

$$g \text{ NaOH} = \frac{[(\%N_2O)(1000g)]}{[(2 * \%N_2O_{SS} + \%N_2O_{NaOH})]}$$

El módulo de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $\% \text{SiO}_2/\% \text{Na}_2\text{O}$ ), se varió en 1, 1.5 y 2, variando así para cada módulo los porcentajes en peso de los componentes que lo conforman ( $\% \text{Na}_2\text{O}$ ,  $\% \text{SiO}_2$  y  $\% \text{H}_2\text{O}$ ).

El % en Peso de  $\text{Na}_2\text{O}$  con respecto al peso de CCA se varió en tres diferentes niveles (ver Tabla 8.1), en 8%, 10% y 12%.

Para encontrar la cantidad de agua aportada por el NaOH y SS, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

*Cantidad de agua aportada por el SS ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ):*

$$g \text{ H}_2\text{O}_{SS} = (g_{SS})(\% \text{ H}_2\text{O}_{SS})$$

*Cantidad de agua aportada por el NaOH:*

$$g H_2O_{NaOH} = (g_{NaOH})(\% H_2O_{NaOH})$$

Por lo tanto, la cantidad de agua aportada por la solución activante, corresponde a la sumatoria de la cantidad de agua aportada por el SS y NaOH:

$$g H_2O_{Sln\ activante} = g H_2O_{SS} + g H_2O_{NaOH}$$

Para conocer la cantidad de agua adicional, se restan las cantidades de agua aportadas por el SS y NaOH ( $g H_2O$  de la solución activante) de la cantidad de agua total:

$$g H_2O_{Adicional} = 800\ g - g H_2O_{Sln\ activante}$$

## ANEXO D

### Determinación de propiedades físicas del agregado

#### D.1 Análisis granulométrico

Tabla D.1 Análisis granulométrico del agregado

Tamiz	Peso retenido en cada tamiz	%Retenido Parcial	%Retenido acumulado	% que pasa	Especificaciones %que pasa
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00	100
N°4	0.00	0.00	0.00	100.00	95-100
N°8	103.73	20.75	20.75	79.25	80-100
N°16	174.63	34.93	55.67	44.33	50-85
N°30	129.00	25.80	81.47	18.53	25-60
N°50	40.37	8.07	89.55	10.45	10-30
N°100	10.73	2.15	91.69	8.31	2-10
N°200	3.43	0.69	92.38	7.62	0-2
Pasa N°200	38.10	7.62	100.00	0.00	
SUMA	500.00	100.00			

#### D.2 Determinación de PVSS

Los análisis se realizaron por triplicado con el fin de reforzar la confianza en los resultados de los ensayos y así obtener como resultado una media de datos.

Tabla D.2 Determinación de PVSS del agregado

Ensayo N°	1	2	3
Recipiente N°	1	2	3
Volumen del recipiente (m <sup>3</sup> )	3.15E-03	3.19E-03	3.25E-03
Peso del recipiente (Kg)	2.888	2.888	2.888
Peso del agregado suelto + recipiente (Kg)	7.476	7.412	7.437
Peso del agregado seco suelto (Kg)	4.588	4.524	4.549
Peso volumétrico seco suelto (Kg/m <sup>3</sup> )	1456.508	1418.182	1399.692
Peso volumétrico seco suelto promedio (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1424.794</b>		

### D.3 Determinación de PVSC

Tabla D.3 Determinación de PVSC del agregado

Ensayo N°	1	2	3
Recipiente N°	1	2	3
Volumen del recipiente (m <sup>3</sup> )	3.15E-03	3.19E-03	3.25E-03
Peso del recipiente (Kg)	2.888	2.888	2.888
Peso del agregado compacto + recipiente (Kg)	7.732	7.689	7.698
Peso del agregado seco compacto (Kg)	4.844	4.801	4.810
Peso volumétrico seco suelto (Kg/m <sup>3</sup> )	1537.778	1505.016	1480.000
Peso volumétrico seco suelto promedio (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>1507.598</b>		

### D.4 Determinación de la gravedad específica y porcentaje de absorción

Tabla D.4 Determinación de GE, GE<sub>SSS</sub>, GE<sub>a</sub> y porcentaje de absorción

Ensayo N°	1	2	3
Frasco N°	1	2	3
Peso de matraz seco y limpio (g)	179.2	179.2	179.2
Peso arena en condición SSS (g)	500	500	500
Peso matraz + arena + agua (g)	990	989.7	988.8
Peso tara (g)	164	164	178.7
Peso tara + material seco (g)	640.3	633.7	640
Peso seco arena (g)	476.3	469.7	461.3
GE de arena (g/cm <sup>3</sup> )	2.52	2.48	2.42
GESSS arena (g/cm <sup>3</sup> )	2.64	2.64	2.63
GE <sub>a</sub> arena (g/cm <sup>3</sup> )	2.88	2.95	3.04
% Absorción	4.98	6.45	8.39
GE promedio (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.47</b>		
GESSS promedio (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.64</b>		
GE <sub>a</sub> promedio (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.96</b>		
% Absorción promedio	<b>6.61</b>		

## ANEXO E

### Resultados de RMC en morteros geopoliméricos CCA/CH

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la evolución de la resistencia mecánica a la compresión para las formulaciones CCA/CH, a los distintos días de curado seleccionados. Se presentan además entre paréntesis la desviación estándar obtenida con el promedio de las mediciones realizadas por triplicado para cada día de ensayo.

Tabla E.1 Resultados de evolución de desarrollo de RMC en el tiempo para morteros CCA/CH

Formulación	MS	%Na <sub>2</sub> O	CCA/CH	Edad de Ensayos		
				RMC 3 días	RMC 7 días	RMC 28 días
CCA-CH1	1	8	90/10	1.65 (±0.026)	1.82 (±0.020)	1.69 (±0.048)
CCA-CH2	1	10	80/20	3.87 (±1.217)	5.17 (±0.298)	7.41 (±0.710)
CCA-CH3	1	12	75/25	7.26 (±0.358)	8.19 (±1.073)	8.71 (±1.234)
CCA-CH4	1.5	8	80/20	6.56 (±0.652)	6.76 (±0.135)	7.12 (±1.137)
CCA-CH5	1.5	10	75/25	7.27 (±0.573)	7.47 (±0.927)	9.53 (±0.458)
CCA-CH6	1.5	12	90/10	1.55 (±0.078)	1.74 (±0.038)	2.63 (±0.399)
CCA-CH7	2	8	75/25	7.71 (±0.199)	8.16 (±0.494)	7.38 (±0.028)
CCA-CH8	2	10	90/10	1.76 (±0.076)	1.93 (±0.276)	1.52 (±0.060)
CCA-CH9	2	12	80/20	3.12 (±0.524)	3.71 (±0.291)	3.83 (±0.437)