

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**DESEMPEÑO DE MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS EN  
RESISTENCIA A COMPRESIÓN E HIDRATACIÓN EN PASTAS DE CEMENTO**



Por:  
**Juan David Valdés Uribe**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
VILLAVICENCIO  
2019**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
DESEMPEÑO DE MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS EN  
RESISTENCIA A COMPRESIÓN E HIDRATACIÓN EN PASTAS DE CEMENTO**

Por:  
**Juan David Valdés Uribe**

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de ingeniero civil

Aprobado por:  
**Ing. Bregy Hassler Choque Jiménez**  
Director

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
VILLAVICENCIO  
2019**

**Autoridades Académicas**

**P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.**

Rector General

**P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O.P.**

Vicerrector Académico General

**P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.**

Rector Sede Villavicencio

**P. RODRIGO GARCÍA JARA, O.P.**

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

**JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN**

Secretaria de División Sede Villavicencio

**JHON JAIRO GIL PELÁEZ**

Decano Facultad de Ingeniería Civil

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**JHON JAIRO GIL PELÁEZ**  
Decano Facultad Ingeniería Civil

---

**BREGY HASSLER CHOQUE JIMÉNEZ**  
Director Trabajo de Grado

---

**OSCAR FELIPE SÁENZ PARDO**  
Jurado

Villavicencio, junio de 2019

## **DEDICATORIA**

A mi madre, por su incondicional y sincero apoyo durante la realización de este proyecto, de mi carrera y de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

Especial agradecimiento al ing. Mauricio López Casanova PhD. por poner a mi disposición todos sus recursos y equipo técnico. A Mauricio Guerra y Pedro Berrios por su apoyo técnico en los laboratorios y a Felipe Vargas y María Oliva por sus consejos y aportes para la ejecución e interpretación de resultados.

## RESUMEN

Debido a las grandes emisiones de dióxido de carbono que genera la industria cementera, se ha investigado el uso de residuos agroindustriales como remplazos parciales del cemento, llamados materiales cementantes suplementarios. El propósito de este estudio es evaluar el desempeño de varios materiales cementantes suplementarios (Cenizas volantes, ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de lodos de alcantarilla y relaves de cobre) como remplazo parcial en pastas de cemento en varios niveles de remplazo. Se utilizó polvo de roca químicamente inerte para comparar el efecto físico. Se realizaron ensayos de análisis de distribución de partícula y termo gravimetría para caracterizar los materiales, se realizaron ensayos de resistencia a compresión en pastas de cemento para comparar el desempeño en edades tempranas y tardías, calorimetrías isotérmicas para medir la actividad hidráulica y la interacción de cemento con los materiales cementantes suplementarios, además, se utilizó el método  $R^3$  para estimar la actividad puzolánica de los materiales. Los materiales presentaron buenos desempeños en los dos niveles de remplazo, la ceniza de lodos residuales y la ceniza de cascarilla de arroz destacaron por su contribución a la ganancia de resistencia a edades tempranas y tardías. Así mismo, la ceniza volante de clase F presentó muy buen desempeño a la edad de 90 días. Los materiales más con mejores resultados en el ensayo  $R^3$  lograron la mayor cantidad de calor añadido en las calorimetrías de interacción de cemento y materiales cementantes suplementarios.

***Palabras Clave:*** *Materiales cementantes suplementarios, hidratación, resistencia, actividad hidráulica, actividad puzolánica, efecto físico.*

## ABSTRACT

Due to the large CO<sub>2</sub> emissions generated by the cement industry, the use of agro industrial wastes as partial replacements of cement called supplementary cementing materials has been investigated. The aim of this study is to evaluate the performance of a wide range of supplementary cementing materials (fly ash, rice husk ash, sewage sludge ash and copper tailings) as partial replacement in cement pastes at various replacement levels. Chemically inert rock dust was used to compare the physical effect. Tests of particle size distribution and thermogravimetry were carried out to characterize the materials, compression tests were performed on cement pastes to compare the performance at early and late ages, isothermal calorimetries were carried out to measure the hydraulic activity and interaction between cement and supplementary cementing materials, the R<sup>3</sup> method was used to estimate the pozzolanic activity of the materials. The materials presented good performances at the two replacement levels, sewage sludge ash and rice husk ash showed prominent results for their contribution to the gain of resistance at both early and late ages. Likewise, Class F fly ash presented very good performance at the age of 90 days. The materials with the best results in the R<sup>3</sup> procedure achieved the highest amount of added heat in the interaction calorimetries of cement and supplementary cementing materials.

**Key Word:** supplementary cementing materials, hydration, hydraulic activity, pozzolanic activity, filler effect.

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	13
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	14
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	14
3.	JUSTIFICACIÓN .....	15
4.	OBJETIVOS.....	16
4.1.	OBJETIVO GENERAL .....	16
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5.	ALCANCE.....	17
6.	MARCO DE REFERENCIA .....	18
6.1.	MARCO TEÓRICO .....	18
6.1.1	El cemento portland.....	18
6.1.2	Hidratación del Cemento Portland.....	18
6.1.3	Materiales Cementantes Suplementarios .....	20
6.1.4	Calor de hidratación.....	20
6.2.	MARCO CONCEPTUAL .....	21
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	22
6.3.1	Ceniza de cascarilla de arroz RHA. ....	22
6.3.2	Relaves de Cobre CT .....	23
6.3.3	Polvo de roca FIL .....	23
6.3.4	Cenizas volantes CFA & FFA.....	23
6.3.5	Ceniza de Lodos de Alcantarilla SSA .....	24
6.4.	MARCO NORMATIVO .....	24
7.	METODOLOGÍA .....	26
7.1.	MATERIALES .....	26
7.1.1	Cenizas Volantes clase F y C .....	26
7.1.2	Relaves de cobre térmicamente activados CT .....	26
7.1.3	Ceniza de lodos de alcantarilla SSA .....	26
7.1.4	Ceniza de cascarilla de arroz RHA .....	27
7.1.5	Polvo de roca FIL.....	27
7.2.	MÉTODOS .....	29
7.2.1	Etapa I .....	29
7.2.2	Etapa II .....	29
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
8.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	34
8.1.1	Desarrollo de resistencia .....	35
8.2.	CAPACIDAD HIDRÁULICA.....	40
8.3.	CAPACIDAD PUZOLÁNICA .....	41
8.5	INTERACCIÓN DE PASTAS DE CEMENTO CON REPLAZO DE SCMS ...	42
9.	RESULTADOS E IMPACTOS .....	45
10.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	46
10.1.	CONCLUSIONES .....	46

10.2. TRABAJOS FUTUROS .....	47
BIBLIOGRAFÍA .....	48
ANEXOS.....	52

## LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1 Abreviaciones de los principales óxidos y compuestos cristalinos del cemento..	18
Tabla 6.2 Estándares y normatividad del estudio .....	24
Tabla 7.1 Diseño de mezcla de las pastas de cemento con 2 niveles de remplazo.....	30
Tabla 7.2 Proporciones de materiales para el método R <sup>3</sup> .....	33
Tabla 8.1 Cocientes de resistencia a compresión referenciados a pastas de cemento 100% OPC con relaciones w/c equivalentes.....	38
Tabla 9.1 Resultados de la investigación .....	45
Tabla 9.2 Impactos esperados.....	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura 7.1.1 Esquema de la metodología empleada .....	28
Figura 7.2.1 Pasta de cemento en cuarto de curado a 23°C y HR 100%.....	31
Figura 7.2.2 Procedimiento de calorimetrías isotérmicas a materiales cementantes suplementarios .....	32
Figura 8.1.1 Tamaños de Partícula de los SCMs.....	34
Figura 8.1.2 Análisis termogravimétrico de los SCMs .....	35
Figura 8.1.3 Desempeño de resistencia a compresión de los SCMs respecto a la referencia 100% OPC w/c 0.4 a las edades 3, 7, 28 y 90 días para niveles de remplazo 20 y 40%.....	36
Figura 8.2.1 Calor liberado acumulado de calorimetrías isotérmicas hidráulicas.....	40
Figura 8.3.1 Calor liberado acumulado en calorimetrías isotérmicas utilizando el método R <sup>3</sup> .....	41
Figura 8.5.1 Calor de hidratación liberado acumulado de los sistemas de pastas de cemento /SCM.....	44
Figura 8.5.2 Calor de hidratación adicional normalizado de los SCMs en los 2 niveles de remplazo. ....	44

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria cementera genera alrededor del 5% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial generadas por el hombre, además, por cada tonelada de cemento producida se generan 0.87 toneladas de CO<sub>2</sub> [1]. Debido a las consideraciones ecológicas, el uso de materiales provenientes de residuos ha ganado gran importancia dentro de la industria de producción de cemento [2]. Los anteriores residuos, llamados materiales cementantes suplementarios (SCMS), constituyen, en altos niveles de remplazo, la mejor y más económica alternativa para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria del cemento [3].

Actualmente, se realizan estudios sobre una amplia variedad de materiales para ser usados como remplazos parciales de cemento en el concreto, así también, se continúan desarrollando y estandarizando métodos que permitan evaluar correctamente los efectos de cada SCMS en las reacciones de hidratación del cemento. En este estudio se utilizaron cinco materiales basados en sílice, además polvo de roca como material de relleno inerte químicamente. Ceniza de cascarilla de arroz, cenizas de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales o lodos de alcantarilla, dos cenizas volantes provenientes de la combustión de carbón y relaves de cobre fueron sometidos a distintos ensayos para caracterizar el material y la resistencia mecánica en pastas de cemento.

Así mismo, el estudio de SCMS a través de técnicas calorimétricas ha ganado gran relevancia gracias a que la medición continua permite obtener gran cantidad de información sobre la hidratación del cemento, en corto tiempo, con costo moderado y con buenas correlaciones [4]–[6]. En este sentido, se llevó a cabo un estudio calorimétrico para estimar la actividad hidráulica, actividad puzolánica y efectos en la interacción de los SCMS con el cemento durante la hidratación.

En el capítulo 2 se discute el planteamiento del problema, en el capítulo 3 se argumentan las razones que justifican la realización del proyecto, en el capítulo 4 de este documento, se presentan los objetivos que guiaron el desarrollo de este estudio, en el capítulo 5 se presentan los alcances del estudio, en el capítulo 6 se presenta un breve resumen de los conocimientos empleados para este estudio, donde se hace referencia al cemento portland, los materiales cementantes suplementarios y la importancia del calor de hidratación, también se presenta el estado del arte en las investigaciones realizadas a los materiales utilizados. En el capítulo 7 se presentan los materiales, origen y tratamiento a los que se sometieron, además las técnicas utilizadas para llevar a cabo el estudio. En el capítulo 8 se presentan y analizan los resultados de las diferentes técnicas utilizadas en el estudio. En el capítulo 9 se relacionan los resultados e impactos. Finalmente, en el capítulo 10 se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La investigación de materiales cementantes suplementarios es un proceso que requiere emplear técnicas complejas y costosas, tales como difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido, espectroscopia de energía dispersa, Adsorción de gas inerte BET, fluorescencia de rayos X, análisis termo gravimétrico, análisis térmico diferencial y calorimetría isotérmica. Las anteriores técnicas se utilizan para recabar la información necesaria para el desarrollo de modelos teóricos que permitan predecir el comportamiento de los materiales en una matriz cementicia.

Si bien existen investigaciones en una amplia variedad de materiales, el desarrollo de modelos teóricos aún está en proceso y los modelos existentes tienen dificultades para ajustarse a diferentes materiales puesto que se han desarrollado para un material determinado.

### **2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El desarrollo de estudios transversales con una amplia variedad de materiales contribuye a superar la limitación anteriormente mencionada, así también, permite determinar a donde deben enfocarse los esfuerzos de futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos. Sin embargo, comprender como influyen los distintos materiales cementantes suplementarios en la resistencia del concreto es una tarea tediosa puesto que la cantidad de variables involucradas es alta.

La ganancia de resistencia se ve afectada por características de los materiales como finura, área superficial, composición, cristalinidad, demanda de agua, entre otras. En ese sentido, estudiar la influencia de los materiales cementantes suplementarios en la hidratación del cemento mediante técnicas calorimétricas es una alternativa que permite predecir el comportamiento de los materiales en la matriz de cemento y su influencia en la ganancia de resistencia. Lo anterior se logra evaluando las actitudes de los materiales a reaccionar, esto es, la actividad hidráulica y actividad puzolánica, así como también la interacción entre el cemento y los SCMS desde un punto de vista calorimétrico.

Cabe mencionar, que las características de los materiales como finura, área superficial, composición química y cristalinidad varían ampliamente según el origen del material y los procedimientos que se utilizaron para su elaboración, tales como temperaturas máximas, tiempo de resiliencia, tasa de calentamiento, tiempo de molido, tamaño de las muestras entre otras. Por tal razón, se hace necesario caracterizar los materiales que se emplean en cada una de las investigaciones y una descripción detallada del proceso utilizado. Como hipótesis, se plantea que con excepción del polvo de roca, los pastas con remplazo de SCMs obtengan mayor resistencia que su respectiva referencia elaborada únicamente con cemento.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Como se menciona en [1], la industria cementera se ha visto presionada a reducir sus emisiones de CO<sub>2</sub>, lo anterior se logra a través de la optimización energética de las plantas de producción o mediante alternativas para reducir la cantidad de Clinker demandado. Sin embargo, la optimización energética de las plantas tiene un límite y no logra compensar el enorme crecimiento de la industria cementera [2]. Por lo anterior, el uso de materiales cementantes suplementarios se ha vuelto el centro de atención en materia de investigación y desarrollo de la industria [3].

En ese sentido, se han desarrollado investigaciones en una amplia variedad de materiales, entre los cuales se encuentran la ceniza de cascarilla de arroz, las cenizas volantes, las cenizas de lodos de alcantarilla y los relaves de cobre. Es preciso señalar, tales investigaciones indagan solamente en las propiedades del material de estudio y no comparan las similitudes o diferencias con otros SCMs, posiblemente, debido al alto costo y la demanda de tiempo que representan tales investigaciones.

Por otra parte, los materiales cementantes suplementarios constituyen una solución a problemáticas ambientales específicas, la disposición final de los relaves de cobre, la cascarilla de arroz, cenizas volantes y los lodos de plantas de tratamiento de agua residual son un problema para mineros, agricultores, empresarios y gobiernos. Utilizar tales residuos para remplazar parcialmente el cemento mitiga el impacto ambiental y reduce los costos de construcción, contribuyendo en la generación de un desarrollo sostenible.

En este proyecto se realiza un estudio transversal donde se comparan los resultados obtenidos por los materiales, tal conocimiento es esencial para enfocar el desarrollo de productos con fines comerciales y para el desarrollo de normatividad que sea lo suficientemente flexible para abarcar una amplia variedad de materiales. Así mismo, investigaciones futuras pueden emplear los resultados en este proyecto para seleccionar los materiales y variables a profundizar en sus estudios.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Comparar el desempeño de materiales cementantes suplementarios (cenizas volantes, ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de lodos de alcantarilla y relaves de cobre) como remplazo parcial en la resistencia a compresión de pastas de cemento y en la hidratación del cemento.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar los materiales cementantes suplementarios mediante ensayos de análisis distribución de tamaños de partícula y análisis termo-gravimétrico.
- Comparar el efecto de los materiales cementantes suplementarios en la hidratación del cemento mediante ensayos calorimetría Isotérmica de interacción, hidráulica y puzolánica.
- Comparar el desempeño en resistencia a compresión de los materiales cementantes suplementarios como remplazo parcial en pastas de cemento con dos niveles de remplazo, a las edades de 3, 7,28 y 90 días

## 5. ALCANCE

Los ensayos serán realizados en los laboratorios del departamento de ingeniería de construcción civil de la Universidad Católica de Chile, en Santiago de Chile, a quien interesan los resultados como validación de investigaciones anteriormente realizadas en el departamento. Personalmente existe un gran interés en realizar este proyecto como parte de mi formación y desarrollo profesional, además se servir como requisito de opción de grado.

La caracterización de los materiales se limitará a lo que se pueda concluir con la información de las técnicas mencionadas en el objetivo, análisis de distribución de tamaño de partícula y análisis termogravimétrico. Los resultados del análisis termogravimétrico se presentaran en gráficas y no se incluirán las tablas en los anexos, puesto que el ensayo entrega archivos de datos para cada material que sobrecargarían el documento. En caso de requerirlos pueden se pueden contactar con el autor y serán entregado en archivos .xlsx.

El estudio del efecto de los SCMs en la hidratación del cemento se llevará a cabo en los mismos niveles de remplazo que los utilizados en los ensayos de resistencia y a través de calorimetría isotérmica. Los resultados se presentaran a través de gráficos y se analizaran en sus secciones correspondientes. No se presentaran las tablas de datos como anexos, puesto que cada ensayo entrega archivos de datos enormes material que sobrecargarían el documento.

El estudio del desempeño de los SCMs en la resistencia a compresión se llevará a cabo en cubos de pastas de cemento con replicación triple, los ensayos de resistencia de las referencias 100% OPC se realizaran sin réplica. Los resultados se presentarán a través de gráficas de desempeño y los datos se ubicaran como anexos.

El proyecto se compone de tres grandes etapas, revisión bibliográfica, diseño y desarrollo del programa experimental, presentación y análisis de los resultados obtenidos. Como entregable final se entrega un documento en el formato de proyecto de grado aprobado por la facultad de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomás – Villavicencio. Así mismo, un artículo científico relatando el proceso de ingeniería del proyecto, resultados, análisis y conclusiones.

## 6. MARCO DE REFERENCIA

### 6.1. MARCO TEÓRICO

#### 6.1.1 El cemento portland

El cemento portland ordinario es un aglomerante hidráulico obtenido de pulverizar clinker, caliza y arcilla calcinadas a elevadas temperaturas [7], está compuesto principalmente por silicatos de calcio hidráulicos, pequeñas cantidades de sulfato de calcio y otras adiciones del proceso [8]. Generalmente, se usa la palabra cemento para hacer referencia al cemento portland sin adiciones, lo anterior puesto que es el tipo cemento más común.

El cemento portland está compuesto en más de un 97% por óxido de calcio, óxido de sílice, óxido de aluminio, óxido de hierro y óxido de azufre. En este sentido, cuando se hace referencia a los compuestos químicos que forman el cemento se utiliza una nomenclatura abreviada para facilitar su estudio, véase Tabla 6.1

Tabla 6.1 Abreviaciones de los principales óxidos y compuestos cristalinos del cemento.

Óxido	Abreviación	Compuesto	Abreviación
CaO	C	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
SiO <sub>2</sub>	S	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF
MgO	M	4CaO. 3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . SO <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> $\bar{S}$
SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$	3CaO. 2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub> H <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O	H	Ca SO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	C $\bar{S}$ H <sub>2</sub>

Fuente: Adaptado de [8]

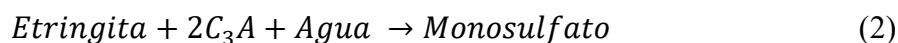
Los compuestos cristalinos presentes en la microestructura influyen la reactividad del cemento portland, así como también lo hacen la temperatura de hidratación y la finura del clinker [8]. Por ejemplo, al compuesto cristalino C<sub>2</sub>S se le atribuye la ganancia tardía de resistencia del concreto, al compuesto cristalino C<sub>3</sub>S y C<sub>3</sub>A se les atribuye la reacción y ganancia de resistencia temprana del concreto hidratado, el compuesto C<sub>4</sub>AF proporciona el color característico del cemento y poco aporta a la resistencia.

#### 6.1.2 Hidratación del Cemento Portland

El término hidratación del cemento hace referencia a las reacciones químicas que ocurren cuando el cemento Portland se pone en contacto con agua, generando productos de hidratación que provocan el fraguado y el endurecimiento. La hidratación del cemento puede ocurrir a través del mecanismo de hidratación en solución e hidratación en estado sólido [9]. En el primero, los compuestos del cemento se diluyen en sus compuestos iónicos creando una solución supersaturada de donde se precipitan los productos de hidratación, en el segundo, la hidratación tiene lugar directamente sobre la superficie de los gránulos anhidros sin que se disuelvan [8]. Los dos mecanismos tienen lugar al mismo tiempo y su influencia varía en función del tiempo, a edades tempranas el mecanismo de hidratación en solución es quien predomina.

Adicionalmente, la velocidad de hidratación de los compuestos del cemento es diferente, la pérdida de consistencia y el fraguado se atribuyen principalmente a la hidratación de aluminatos, los cuales reaccionan más rápido que los silicatos de calcio. Por otra parte, los silicatos de calcio componen hasta un 75% del cemento Portland y son los responsables del endurecimiento y ganancia de resistencia [8].

La primera reacción que toma lugar en la hidratación del cemento es la hidratación de los aluminatos, por ejemplo, el  $C_3A$  se hidrataría de forma instantánea sin la presencia de yeso el cemento y este no tendría ninguna utilidad práctica. Sin embargo, el yeso provoca la formación de etringita (Ec. 1), un compuesto inestable, de forma alargada y que ocupa bastante espacio, durante su formación se libera bastante calor. Cuando el sulfato en solución se agota, la etringita se transforma en Monosulfato (Ec. 2).



El monosulfato tiene una estructura más compacta que la etringita, aunque su aporte a la resistencia sigue sin ser significativo. La presencia de monosulfato en las fases sólidas hace del concreto vulnerable a un ataque sulfatos, donde la presencia de sulfato en el agua provoca que el monosulfato se reconvierta a etringita, una forma menos compacta, provocando la expansión del mismo.

Por otra parte, ya se mencionó que los silicatos de calcio constituyen la mayor parte de los minerales del cemento, cuando estos se hidratan forman una familia de productos con estructura similar pero con variaciones en su estequiometría, no obstante, las variaciones no tienen una influencia significativa en las propiedades físicas, por tanto, es común referirse a los silicatos de calcio hidratados como CSH. La estructura de los CSH varía desde una estructura pobre de filamentos cristalinos hasta una red reticular, su área superficial es muy alta y su resistencia se atribuye a las fuerzas de Van der Waals.

Cabe señalar, que los productos formados a partir del  $C_3S$  y  $C_2S$  son iguales en estructura y composición, la diferencia en las reacciones de hidratación radica en la cantidad de hidróxido de calcio formado (Ec. 3 y 4). El  $C_3S$  reacciona más rápido que el  $C_2S$ , contribuye en el fraguado final y en la ganancia de resistencia inicial, sin embargo, de su hidratación se forma una mayor cantidad de CH que hace más vulnerable el concreto a ataques de ácidos o aguas

con sulfatos [8]. El CH tiene una estequiometría definida  $\text{Ca(OH)}_2$ , su estructura tiene forma de cristales hexagonales y prismáticos de gran tamaño, tiene un área superficial muy baja, y por tanto su contribución a la resistencia es muy limitada. Algunos reglamentos limitan la cantidad máxima de  $\text{C}_3\text{S}$  que puede tener determinado tipo de cemento, otros recomiendan remover el exceso de hidróxido de calcio con el uso de puzolanas y aditivos.



### 6.1.3 Materiales Cementantes Suplementarios

El cemento en combinación con agregados pétreos, el concreto, constituye el material más usado por la industria de la construcción. Se estima que se producen cerca de 25 billones de toneladas de concreto en el mundo [10], lo que provoca que la industria cementera genere el 5% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  a nivel mundial producidas por el hombre, en detalle, por cada tonelada de cemento producida se generan 0.87 toneladas de  $\text{CO}_2$  [1].

Por tal razón, la industria cementera se ha visto bajo presión para reducir su consumo energético y su emisión de gases de efecto invernadero [11]. Sin embargo, aumentar la eficiencia de las plantas de producción tiene un límite, además, no logra compensar el enorme consumo de cemento debido esencialmente al enorme crecimiento de la industria de la construcción [12]. De esta forma, se inició un gran interés por remplazar, cada vez en mayores cantidades, partes del Clinker por materiales cementantes suplementarios [13]. Los anteriores, son materiales capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio presente en las reacciones de hidratación del cemento para formar productos de hidratación similares al del cemento, haciendo posible remplazar porciones de cemento sin afectar significativamente su desempeño [1].

El uso de residuos agro-industriales como las cenizas volantes, escoria de horno, ceniza de cascarilla de arroz, relaves de cobre entre otros, gana cada vez más importancia en la producción de cemento y materiales de construcción debido a las consideraciones ecológicas mencionadas [2]. De ahí que los residuos que constituyen un problema ambiental en sí mismos, como la cascarilla de arroz, relaves de cobre y lodos de alcantarilla sean de gran interés como materiales cementantes suplementarios.

### 6.1.4 Calor de hidratación

Los compuestos presentes en el cemento se encuentran en un estado de alta energía debido al proceso de combustión propio de la producción de cemento, y por tanto inestables, por ello, cuando el cemento se está hidratando, los compuestos reaccionan hacia una forma más estable y de bajo estado energético, liberando energía en forma de calor [8]. La cantidad de calor total liberado y la tasa de calor liberado son usadas comúnmente como índices de reactividad, para caracterizar y predecir el fraguado y endurecimiento temprano del cemento.

Cabe señalar que el calor de hidratación es una propiedad aditiva, por tanto se puede sumar la cantidad de calor producido por la hidratación de cada uno de los compuestos  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$  para obtener el calor total de hidratación. El estándar ASTM 150 clasifica los cementos portland en función a su calor liberado, por ejemplo el cemento portland tipo I produce desde 330 hasta 370 kJ/kg a los 7 días, similarmente, cemento portland tipo IV o de moderado calor, con límite de 250 kJ/kg a los 7 días de hidratación [8]. En este sentido, el uso de técnicas como las calorimetrías isotérmicas o adiabáticas ha ganado gran relevancia en el estudio de la hidratación del cemento y la caracterización de SCM.

## 6.2. MARCO CONCEPTUAL

**Materiales cementantes suplementarios:** Como se menciona en secciones anteriores, pueden considerarse como tales, aquellos materiales de origen residual cualquiera sea la actividad económica donde se generen y pueda ser usado para remplazar proporciones de cemento en el concreto por dicho material. Aunque no existe una definición exacta de lo que es un material cementante suplementario, en la práctica se acepta el concepto en el que un material cementante suplementario es aquel capaz de reaccionar con el hidróxido de calcio resultante de las reacciones de hidratación del cemento y formar nuevas familias de silicatos de calcio que aportan a la ganancia de resistencia del concreto. Además, los silicatos de calcio mencionados tienen composición y estructura similar a los formados en las reacciones de hidratación del cemento.

Cabe señalar, el concepto anterior implica que los materiales cementantes suplementarios tengan una composición química abundante en sílice, en ese sentido, las reacciones basadas en sílice se conocen comúnmente como reacciones puzolánicas. Por otra parte, el concepto de material cementante suplementario también alberga a materiales abundantes en óxido de calcio y otros minerales con la habilidad para reaccionar con agua y solidificarse, similar al cemento hidráulico, por tanto se les atribuye el nombre de materiales con carácter hidráulico, como es el caso de la escoria de alto horno o las cenizas volantes calcáreas.

**Materiales de relleno o “filler”:** Se conoce bien que la finura del cemento afecta en gran medida la velocidad de las reacciones de hidratación y el grado de hidratación final de la pasta de cemento portland, cuanto más pequeños sean los gránulos de cemento más probable es que el agua logre hidratar totalmente el cemento, lo anterior implica una mayor cantidad de productos de hidratación y mayor resistencia a la compresión. De lo anterior se puede deducir que la resistencia de una pasta de cemento está estrechamente ligada con el grado de hidratación, por lo tanto, al remplazar un pequeño volumen de cemento por un material con granulometría pequeña, se reduce la competencia por el agua de los granos de cemento adyacentes, logrando así una mejor hidratación y mayor resistencia al compararla con una pasta con mayor cantidad de cemento pero con menor grado de hidratación.

El término filler traduce del inglés “materiales de relleno” y hace referencia al efecto de aceleración que se produce al retirar una cantidad de cemento y remplazarla por cualquier otro material con finura similar, este efecto dificulta el estudio de los materiales cementantes suplementarios, puesto que se puede confundir la ganancia de resistencia de las reacciones puzolánica e hidráulicas con la ganancia de resistencia lograda por el efecto filler. Por tal razón, los estudios de materiales cementantes suplementarios suelen incluir ensayos

utilizando un material de relleno químicamente inerte como un esfuerzo por evitar la confusión con el efecto filler y obtener resultados objetivos.

**Amorfosidad/Cristalinidad:** La composición química de los materiales es un tema determinante en el comportamiento de los materiales cementantes suplementarios frente al agua y al cemento, no obstante, el grado de cristalinidad y Amorfosidad son también de gran importancia. Los materiales en estado sólido, según su estado de energía se acomodan en formas de alta o baja energía, lo anterior está estrechamente ligado al tratamiento térmico empelado en la elaboración de los materiales cementantes suplementarios y las características del material.

En ese sentido, con el tratamiento térmico adecuado se pueden elaborar materiales con estructura cristalina y de baja energía o con estructura amorfa y de alta energía, las estructuras cristalinas son poco reactivas y requieren tiempos de activación largos o catalizadores para lograr reaccionar adecuadamente con el agua y otros compuestos. Por lo tanto, cuanto más porcentaje de compuestos amorfos presente un material cementante suplementario mayor será la cantidad de reacciones de hidratación que se generen y mayor será su aporte a la resistencia a compresión del concreto.

**Resistencia temprana y resistencia tardía:** Las primeras horas de hidratación de un cemento se logra una ganancia de resistencia exponencial gracias a la hidratación de la mayor parte de los compuestos  $C_3A$  y  $C_3S$ , conforme se incrementa el tiempo de hidratación las reacciones del  $C_2S$  van ganando relevancia, y por tanto se les atribuye la ganancia de resistencia tardía. El efecto de la finura de un material acelera la hidratación de un material durante los primeros días, sin embargo, este efecto deja de ser importante cuando la superficie de todos los gránulos se ha hidratado. Además, es conocido que las reacciones de origen puzolánico tienen lugar pasado una gran cantidad de tiempo, su efecto es mínimo antes de los 28 días y gana relevancia a los 90 días.

En resumen, el efecto de la composición química de los materiales cementantes suplementarios es poco relevante durante los primeros días de hidratación, toda diferencia en resistencia se atribuye principalmente al efecto filler. En contra parte, a edades tardías el efecto de la finura es irrelevante, y la ganancia de resistencias de debida a las reacciones puzolánicas entre los compuestos del cemento y los materiales cementantes suplementarios. La afirmación anterior es válida para compuestos ricos en sílice, los materiales con carácter hidráulico mejoran la ganancia de resistencia en edades tempranas, similar a como ocurre con el cemento.

### 6.3. ESTADO DEL ARTE

#### 6.3.1 Ceniza de cascarilla de arroz RHA.

La cascarilla de arroz es un residuo de las actividades agrícolas, solo en Tailandia se generan aproximadamente 5 millones de toneladas anuales [14]. La cascara cruda contiene cerca de un 40% de celulosa, 30% de lignina y un 20% de sílice. Cuando es quemada, se genera una ceniza con 1/5 del peso inicial y que contiene cerca de un 80% de sílice [15]. Además, al

añadir el proceso de molienda se obtiene una RHA con un alta área superficial y un alto contenido de sílice en fase amorfa, características a las que se le atribuye la alta reactividad puzolánica que lo hace factible para utilizar como remplazo parcial del cemento en el concreto [15]. El contenido de sílice amorfo es afectado por la temperatura máxima de quemado y el tiempo, el área superficial es afectada por la estructura de mesoporos y el tamaño de partícula [16].

El efecto de la ceniza de cascarilla de arroz en la resistencia y durabilidad ha sido documentado en numerosos estudios, [17] estudió mezclas ternarias con RHA y filler de piedra caliza, [18] estudió el desempeño de la RHA baja en carbón molido, [19] estudio mezclas cuaternarias hechas con FA, RHA y polvo de caliza, [14] estudió el efecto puzolana de la RHA en un sistema cementicio. Los resultados muestran que las cenizas RHA incluso mejoran la resistencia de las pastas de cemento con remplazos de 20% en peso.

### **6.3.2 Relaves de Cobre CT**

La industria minera de cobre produjo aproximadamente 18.7 millones de toneladas en 2014 [20]. Por cada tonelada de cobre refinado producido se generan 196.5 toneladas de relaves de cobre [21]. Por otro lado, producir una tonelada de cobre refinado deja entre 2.2-3 toneladas de escoria de cobre [22]. Los relaves de cobre son una mezcla de desperdicios resultado de los procesos de extracción de minerales valiosos como el cobre [23], [24].

En este sentido, existen avances en la utilización de los relaves de cobre como SCMS en el concreto. [25] por ejemplo, encontró que a 10% de remplazo de cemento por CT incluso se mejora la resistencia del concreto a los 28 días. Por otro lado, [24] se menciona que los relaves de cobre pueden ser usados como remplazo de agregado fino, con hasta 60% sin causar alguna pérdida de resistencia. Los tratamientos térmicos mejoran el comportamiento de los relaves de cobre como SCMs, sin embargo, la influencia de los tratamientos térmicos en la resistencia a compresión no es significativamente superior a los relaves sin tratar [21].

### **6.3.3 Polvo de roca FIL**

Debido a que los efectos químicos y físicos de un SCMS se presentan en simultáneo, es decir, el efecto puzolana y Filler respectivamente [16], [21], [26], [27]. Se requiere de un polvo de roca inerte químicamente para medir el efecto físico por sí solo, y poder estimar la contribución química de cada uno de los SCMS [16]. Generalmente se utiliza polvo de roca caliza con un tamaño de partícula pequeño, para generar los sitios de nucleación adicionales que favorezcan la hidratación del cemento, efecto que es producido por los SCMs gracias a su gran finura.

### **6.3.4 Cenizas volantes CFA & FFA**

La ceniza volante es un residuo que se usa para remplazar parcialmente el cemento, se origina como desperdicio de las plantas termoeléctricas a carbón [28]. La influencia de las cenizas volantes en la resistencia a la compresión ha sido ampliamente investigada [29]–[32]. Las FA son de gran interés dado que por su morfología, además de presentar contribuciones

químicas y físicas importantes, permiten reducir la dosis de agua necesaria para la hidratación de las mezclas [29]. Las cenizas volantes están compuestas principalmente por silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio y otros metales, es decir, los mismos compuestos del Clinker de cemento.

Según la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM)[33], las FA clase F son el producto de quemar antracita o carbón bituminoso y tiene propiedades de puzolana, en ellas el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AL}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y suman en conjunto más del 70% de su composición química. El uso de en altos volúmenes de remplazo, de hasta 70%, es el objeto de estudio en la actualidad [34].

Por otra parte, las FA clase C son normalmente producidas de lignita o carbón bituminoso, sus principales compuestos,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AL}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y suman al menos un 50% de su composición química [33]. No obstante, las cenizas volantes clase C (CFA) tienen un mayor contenido de calcio, por lo tanto presentan mejor hidratación a edades tempranas, i.e., tiene propiedades cementantes [34].

### 6.3.5 Ceniza de Lodos de Alcantarilla SSA

La producción de lodos residuales de plantas de tratamiento de agua residual PTAR se está incrementando alrededor del mundo, estos lodos están compuestos por la materia sólida que queda después de efectuados todos los tratamientos en las PTAR [35]. El proceso de incineración de los lodos reduce su volumen entre un 90% y un 70% en masa, dejando una ceniza de lodos de alcantarilla[36]. No obstante, la disposición de las cenizas sigue siendo un problema, por tanto, se han realizado investigaciones donde se desarrollan distintas alternativas para su reciclaje, la más popular es el uso de SSA para la fabricación de ladrillos [37] y recientemente como SCMs. Las SSA están compuestas principalmente por óxidos de Sílice, aluminio, calcio, fierro y fosforo; su tamaño de partícula es principalmente la de finos y limos, su granulometría es similar a la de arena muy fina

## 6.4. MARCO NORMATIVO

En la Tabla 6.2 se presentan los estándares y referencias normativas que se tuvieron en cuenta para desarrollar el programa experimental.

Tabla 6.2 Estándares y normatividad del estudio

<i>Abreviatura</i>	<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>
<i>ASTM C150</i>	Specification for Portland Cement	La especificación abarca los 8 tipos de cementos portland, tipo I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV y V. Especifica los ingredientes que puede contener el cemento Portland, la composición química. Establece además los ensayos que deberán ser utilizados para categorizar un cemento.

**Desempeño de materiales cementantes suplementarios en resistencia a compresión e hidratación en pastas de cemento.**

<i>Abreviatura</i>	<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>
<i>ASTM C305</i>	Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.	El estándar define el procedimiento para la mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros con consistencia plástica.
<i>ASTM C109</i>	Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)	Provee el procedimiento y especificaciones para medir la resistencia a compresión del cemento hidráulico y morteros, los resultados se pueden usar para determinar el cumplimiento de otras especificaciones.
<i>ASTM C1702</i>	Standard Test Method for Measurement of Heat of Hydration of Hydraulic Cementitious Materials Using Isothermal Conduction Calorimetry	Describe el método para determinar el calor total de hidratación del cemento hidráulico en calorimetría isotérmica de conducción durante 7 días, establece las especificaciones técnicas del aparato y el procedimiento para elaborar los ensayos.
<i>ASTM C618</i>	Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete	Establece los requisitos químicos y físicos de cenizas volantes y puzolanas para ser usadas en el concreto, donde se desea actividad puzolánica, cementante u otras. Trata los ensayos de finura, índice de resistencia, requerimiento de agua, expansión y contracción autoclave.
<i>ASTM C1070</i>	Standard Test Method for Determining Particle Size Distribution of Alumina or Quartz by Laser Light Scattering	El método cubre la determinación de tamaños de partículas desde 0.1µm hasta 500µm a partir de la dispersión de rayos laser, se describe el procedimiento y dicta recomendaciones para el análisis y presentación de resultados.

Fuente: Propia

## 7. METODOLOGÍA

El programa experimental inicia con la obtención y procesado de materia prima para elaborar las cenizas utilizadas como SCMs, luego, el programa se dividió en dos etapas, en la primera etapa se caracterizaron los SCMs, y en la segunda etapa se realizaron los ensayos que permiten comparar las propiedades en estado endurecido y las dinámicas de hidratación ( Véase Figura 7.1.1) En el desarrollo del programa experimental se usó polvo de roca químicamente inerte como material de referencia del efecto físico, OPC de acuerdo con ASTM C150 y 5 SCMs:

- Ceniza de cascarilla de Arroz RHA
- Relaves de cobre térmicamente activados CT
- Ceniza volante clase F FFA
- Ceniza volante clase C CFA
- Ceniza de Lodos de alcantarilla. SSA

### 7.1. MATERIALES

#### 7.1.1 Cenizas Volantes clase F y C

Las cenizas volantes clase C (CFA) y cenizas volantes clase F (FFA) fueron recolectadas de la central termoeléctrica Ventana en Chile, la CFA es producto de un proceso en el que se usan tecnologías de desulfuración de gases de combustión para reducir las emisiones de dióxido de sulfuro resultantes de la quema de carbón, debido a lo anterior, en su composición se presenta un alto contenido de óxido de azufre y calcio. Por otra parte, la FFA fue obtenida de un proceso en el cual no se emplea la tecnología de desulfuración de gases de combustión, por tanto, presenta un bajo contenido de óxidos calcio y azufre.

#### 7.1.2 Relaves de cobre térmicamente activados CT

Los relaves de cobre fueron recolectados en Copiapo, Chile, fueron pasados a través de una malla No.30 (600  $\mu\text{m}$ ), molidos en una jarra rotacional con bolas de acero durante 30 minutos, luego fueron calentados hasta una temperatura de 700°C a una tasa de 20°C/min, se estabilizó la temperatura máxima durante 20 minutos y luego se dejó enfriar el horno libremente hasta temperatura ambiente. El tratamiento utilizado fue el que logró el mayor incremento de resistencia a compresión de las pastas de cemento con remplazo de SCMs tratados térmicamente, respecto a pastas de cemento con remplazo de SCMs sin tratar, ver [21].

#### 7.1.3 Ceniza de lodos de alcantarilla SSA

Los lodos de alcantarilla fueron recolectados de la planta de tratamiento de aguas residuales La Farfana en Santiago, Chile. Se secaron a 105°C durante 24 horas, luego se molieron en una jarra rotacional con bolas de acero durante 3 horas a 85 rpm, se pasaron a través de una malla No. 50 (300  $\mu\text{m}$ ). Seguidamente, los lodos de aguas residuales fueron incinerados en

un horno eléctrico a 692°C durante 72 minutos, luego se dejó enfriar a temperatura ambiente y se obtuvo las cenizas de lodos de tratamiento de aguas residuales (SSA). El tratamiento utilizado para elaborar las cenizas fue recomendación del [38]

#### **7.1.4 Ceniza de cascarilla de arroz RHA**

Las cenizas de cascarilla de arroz fueron obtenidas de un proceso de laboratorio, las cenizas fueron incineradas en un horno eléctrico a 750°C a una tasa de 20°C/minuto y se estabilizó la temperatura 750°C durante 180 minutos. Luego, el horno se dejó enfriar a temperatura ambiente y se extrajeron las cenizas, seguidamente, fueron molidas en una jarra rotacional con bolas de acero durante toda la noche. El tratamiento utilizado se eligió con base en los resultados de diferentes tratamientos para obtener las cenizas en [39].

#### **7.1.5 Polvo de roca FIL**

El Filler químicamente inerte (FIL) se usó como referencia de los efectos físicos para los 5 materiales mencionados arriba, lo que quiere decir que, fue usado para medir la interacción física de las partículas en la hidratación del cemento y su influencia en las propiedades medidas. Todo el programa experimental fue llevado a cabo utilizando cemento portland ordinario (OPC) de acuerdo con ASTM C150.

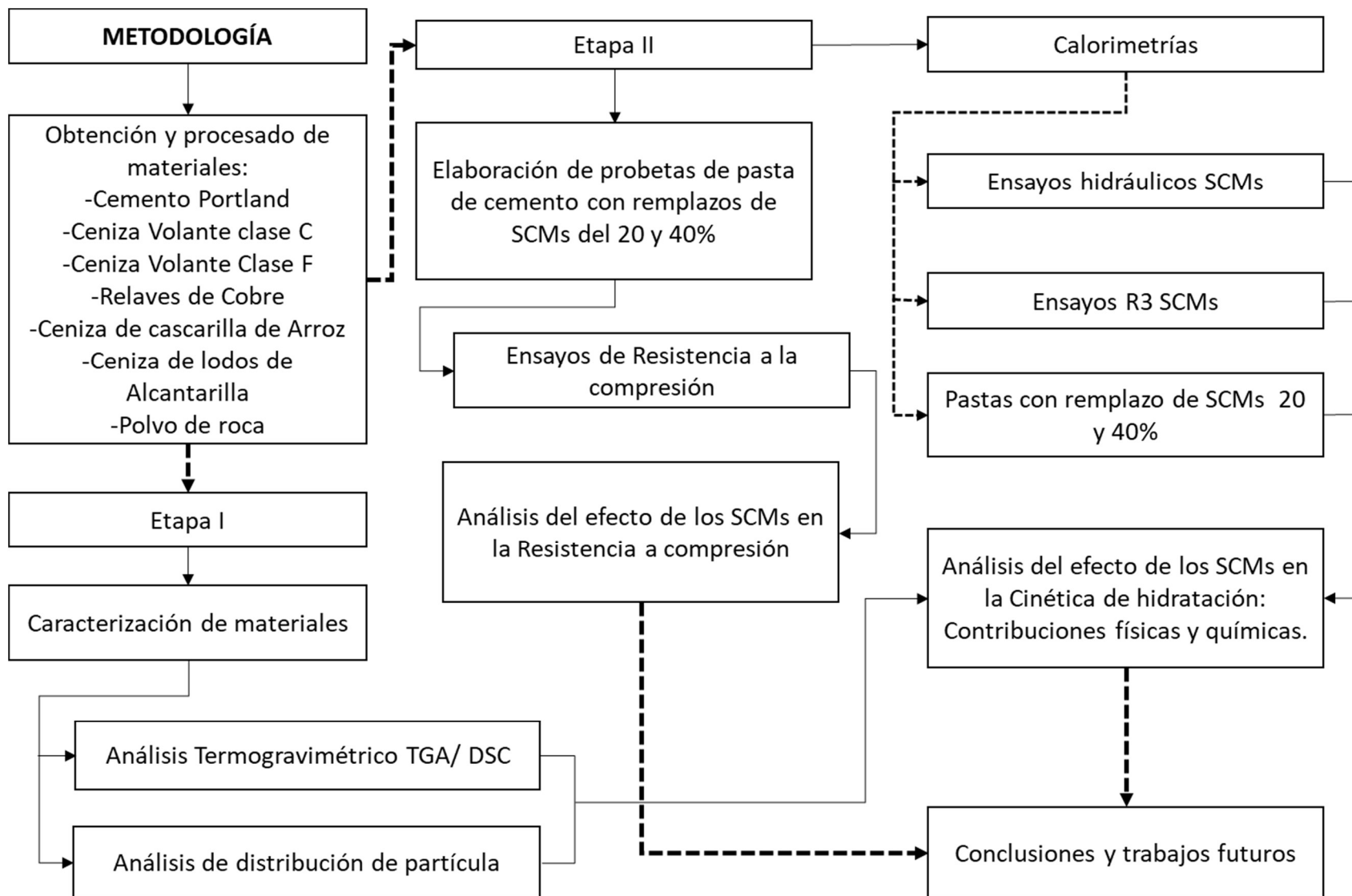


Figura 7.1.1 Esquema de la metodología empleada

## 7.2. MÉTODOS

### 7.2.1 Etapa I

El programa experimental se dividió en dos etapas, caracterización de materiales y comparación de desempeño. En la primera etapa, caracterización de materiales, se llevaron a cabo los ensayos que permiten comparar los materiales utilizados en el proyecto con otras referencias, los ensayos usados fueron el análisis de distribución de partícula y el análisis termogravimétrico con escaneo diferencial de barrido.

#### 7.2.1.1 Análisis de distribución de partículas

El tamaño y distribución de las partículas, es decir, la granulometría juega un papel importante en las reacciones de hidratación y la interacción entre los materiales, específicamente, el efecto filler es ampliamente modificado por los parámetros tamaño y distribución. En ese sentido, se realizó un análisis de distribución de partícula (PSD) en un Malvern Mastersizer 2000 laser diffractometer para medir la dispersión de un haz laser que atraviesa las partículas y determinar el tamaño de las partículas que componen el material.

Para todos los materiales se utilizó isopropanol con índice de refracción 1.378 como medio dispersante. Las muestras se hicieron circular en el equipo a 2000 rpm durante 12 segundos, se tomaron 6 mediciones para cada material y luego se realizó un promedio de las mismas. Se utilizó un índice de refracción 1.500 para FIL y SSA, un índice de refracción de 1.458 para FFA, CFA y RHA, un índice de refracción de 0.250 para CT y 1.680 para OPC.

#### 7.2.1.2 Análisis termogravimétrico con escaneo diferencial de barrido

La técnica TGA permite analizar transformaciones en el material como descomposición, sublimación o adsorción entre otros, a partir de cambios en el peso de una muestra que es calentada a una velocidad constante y de la cual se registra el peso de la muestra en cada delta de tiempo. Complementariamente, la técnica DSC permite estudiar procesos como transiciones de fase o fusiones a partir de la medición del flujo de energía de la muestra, originado por procesos de origen exotérmico o endotérmico.

En este sentido, se llevó a cabo un análisis TGA/DSC para todos los materiales en un TA instruments SDT Q600. Se utilizó un flujo de nitrógeno de 50 ml/ min como gas de atmosfera y las muestras se calentaron en crisoles de alúmina. En el proceso térmico, primero se estabilizó la temperatura a 30°C y luego se calentaron hasta 1000°C a una tasa de 20°C/min.

### 7.2.2 Etapa II

En la segunda etapa se llevaron a cabo los ensayos que permiten hacer la comparación de las propiedades en estado endurecido de los SCMs, así como la influencia en las dinámicas de hidratación de las pastas de cemento.

En esta etapa se emplearon pastas de cemento con remplazos parciales de OPC por SCMs, a causa de que los materiales utilizados tenían gravedades específicas diferentes se utilizó un remplazo ajustado por volumen. Se utilizaron dos niveles de remplazo, 20% y 40% por volumen, se utilizó una razón agua – materiales cementantes de 0.4 en masa. Los diseños de mezcla se presentan en Tabla 7.1 Diseño de mezcla de las pastas de cemento con 2 niveles de remplazo. En este sentido, se consideraron dos referencias, una pasta de cemento sin remplazo de SCMs, es decir 100% OPC, y una pasta de cemento con remplazos de 20 y 40% en volumen de filler inerte FIL.

Tabla 7.1 Diseño de mezcla de las pastas de cemento con 2 niveles de remplazo

ID	OPC (kg/m <sup>3</sup> )	SCM (kg/m <sup>3</sup> )	Solidos (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	w/c
FFA 20	1152	202	1354	541	0.4
CFA 20	1152	202	1354	541	0.4
RHA 20	1156	193	1349	540	0.4
SSA 20	1135	235	1370	548	0.4
CT 20	1119	266	1386	554	0.4
FIL 20	1134	237	1371	549	0.4
FFA 40	895	418	1313	525	0.4
CFA 40	895	418	1313	525	0.4
RHA 40	902	402	1304	521	0.4
SSA 40	868	479	1348	539	0.4
CT 40	844	536	1380	552	0.4
FIL 40	866	484	1350	540	0.4

Fuente: Propia.

#### 7.2.2.1 Resistencia Mecánica a compresión

Se estudió la resistencia a compresión de las pastas de cemento con remplazos de SCMs puesto que es la propiedad mecánica de mayor interés en la industria de la construcción y en la ingeniería de materiales, para ello se elaboraron especímenes cúbicos de 50 mm de lado de acuerdo al procedimiento en ASTM C305, con la única diferencia de que los materiales -OPC y SCMs- se homogeneizaron en seco y luego se añadió el agua en la mixer.

Luego de elaborados, los especímenes se rotularon y guardaron en una cámara de curado (Ver Figura 7.2.1) con temperatura de 23°C y humedad relativa 100% hasta el día en que

serían ensayados, las pruebas se realizaron a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, en 3 especímenes para cada edad y de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C109.



Figura 7.2.1 Pasta de cemento en cuarto de curado a 23°C y HR 100%  
Fuente: Propia

#### 7.2.2.2 Interacción SCMs- OPC / Calorimetría Isotérmica a Pastas de cemento.

El calor liberado por una mezcla de sólidos y agua es producto de las reacciones exotérmicas de hidratación, el calor liberado está correlacionado con la formación de los diferentes productos de hidratación en la microestructura y que contribuyen al desarrollo de resistencia mecánica. La calorimetría isotérmica es un ensayo sencillo pero poderoso en el que se cuantifica la cantidad de calor liberado por una muestra almacenada en un envase herméticamente sellado, dicho flujo de calor es comparado con el de una muestra de referencia para obviar las variaciones en el flujo de calor debido a factores ambientales. La temperatura es mantenida constante durante todo el ensayo ya que afecta significativamente la velocidad de reacción de los materiales.

En relación a lo anterior, se realizaron ensayos de calorimetría isotérmica a mezclas de pasta de cemento con dos niveles de remplazos de OPC por SCMs con el fin de comparar el desempeño del sistema OPC-SCMs- agua. Los ensayos se realizaron en un calorímetro isotérmico de aire TAM Air a 23°C durante 7 días con replicación simple de cada medición y de acuerdo a la norma ASTM C1702.

Como protocolo del ensayo, se estableció una línea base inicial durante 180 minutos antes de iniciar cada uno de los ensayos, utilizando agua destilada como referencia térmica, así mismo, se usó una línea base final de 180 minutos.

Similarmente, se utilizó el siguiente protocolo para elaborar las muestras: primero se pesaron las proporciones según el diseño de mezcla en recipientes limpios, secos y no porosos, luego

en un vaso de precipitados de unos 250 ml se mezclaron los sólidos con una espátula hasta homogeneizarlos, se añadió el agua y se mezcló a 1600 rpm durante 3 minutos. Con ayuda de un embudo se vertió dentro de los envases una cantidad aproximada de 15 g, se selló el envase, se colocó el ojal de bajado y luego se llevó dentro del calorímetro (Ver Figura 7.2.2).

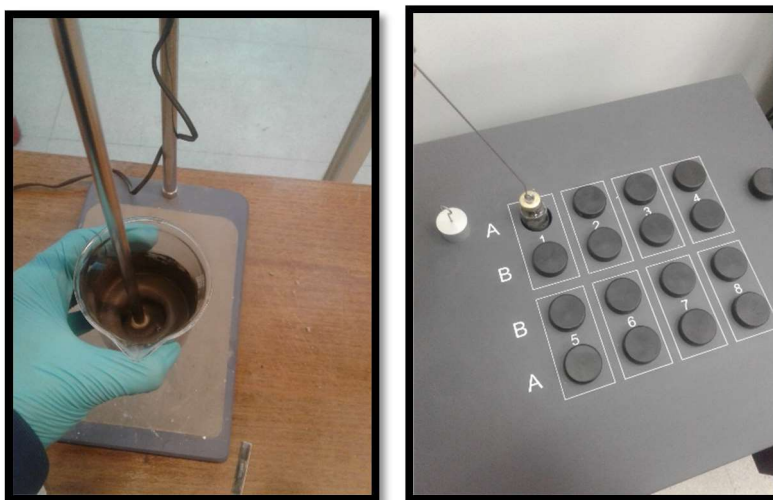


Figura 7.2.2 Procedimiento de calorimetrías isotérmicas a materiales cementantes suplementarios a) Mezclado de los materiales b) bajado de las muestras al equipo.

Cabe mencionar que a partir del momento en que se añade el agua a los sólidos, solo se cuenta con 15 minutos para colocar las muestras en el calorímetro, el peso de los envases vacíos, el peso del envase con la muestra son registrados para luego normalizar los datos a unidades de energía/ gramo de mezcla.

### 7.2.2.3 Método de ensayo $R^3$ .

Similarmente, la capacidad puzolánica de un SCMs puede ser resumida como la habilidad con que un material reacciona químicamente con algunos de los productos de hidratación del OPC, principalmente referido a la habilidad para reaccionar con la portlandita y formar un nuevo gel de silicatos de calcio hidratados, con composición similar a los CSH resultantes de la hidratación del OPC.

Previamente, Avet et al [40] desarrollaron un método para evaluar de forma adecuada, rápida y confiable la capacidad puzolánica de un material, llamado  $R^3$  por sus siglas en inglés. El método utiliza una solución química que permite la formación de productos de hidratación similares a los que se producen de la interacción OPC-SCMs-agua, además simula el pH de la solución de poros y acelera la velocidad de reacción. Dado que no se incluye Clinker en la mezcla, el calor cuantificado es producto únicamente de las reacciones del SCM con la solución o sistema LC<sup>3</sup>-50.

En este sentido, Se emplearon ensayos de  $R^3$  para cada SCMs, las calorimetrías se realizaron durante 7 días a  $40^\circ\text{C}$ , con replicación simple, usando el sistema sulfato/ álcali que simula el ambiente químico saturado de una mezcla de hidratación.

El protocolo para elaborar las muestras inicia pesando las proporciones indicadas en el método, Tabla 7.2 Proporciones de materiales para el método R3. Luego se mezclan y homogeneizan con espátula los sólidos, es decir SCMs, portlandita y calcita. Paralelo a ello, se mezcla la solución de agua destilada, sulfato de potasio e hidróxido de potasio en un recipiente adecuado. La solución y los sólidos son dejados en un horno a  $40^\circ\text{C}$  toda la noche, posteriormente se mezclan a 1600 rpm durante dos minutos, se vierten aproximadamente 15g de la solución en las ampollitas y se cierran herméticamente para impedir que escape la humedad. Se utiliza una línea base inicial y final de 180 minutos.

Tabla 7.2 Proporciones de materiales para el método  $R^3$

Material	Cantidades [g]
SCMs	11.11
CaCO <sub>3</sub>	33.33
C <sub>2</sub> OH	5.56
KOH	0.24
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.2
Agua Destilada	60

Fuente: Adaptada de [40].

#### 7.2.2.4 Capacidad hidráulica

Finalmente, se puede definir el calor liberado por la interacción del sistema OPC-SCMs-agua como el calor adicional generado respecto a la suma del calor liberado la hidratación del cemento y por la hidratación del SCM, es decir, los sistemas OPC-agua y SCMs-agua. La anterior afirmación permite señalar que los SCMs poseen la capacidad para reaccionar directamente con el agua y generar una matriz sólida, dicha habilidad para reaccionar químicamente se conoce como capacidad hidráulica.

Por tal razón, para evaluar la capacidad hidráulica de los SCMs se realizaron calorimetrías isotérmicas durante 7 días a  $23^\circ\text{C}$  a mezclas de cada SCMs con agua, en una proporción agua-sólidos 0.4 en peso, siguiendo el mismo procedimiento empleado para las calorimetrías de interacción. Los ensayos se realizaron con replicación simple. Este ensayo también se rige por el estándar ASTM C1702.

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Se presentan los resultados de PSD para todos los SCMs (Véase Figura 8.1.1), Se observa que CFA tiene un tamaño de partícula  $D_{50}$  de 13  $\mu\text{m}$ , similar a OPC, la uniformidad de CFA, FFA y CT son bastante semejantes. FFA y CT presentan tamaños de partículas muy similares, 29  $\mu\text{m}$  y 23  $\mu\text{m}$  respectivamente. SSA es bastante uniforme y el segundo con mayor tamaño de partícula medio, se ubica en 50  $\mu\text{m}$ . RHA es el material con menor tamaño de partícula 5  $\mu\text{m}$  y el único con tamaño menor al OPC, por tanto se espera tenga una mayor reactividad atribuida a una mayor cantidad de área superficial disponible para la nucleación de productos de hidratación, además tiene una distribución muy uniforme. Finalmente, FIL presenta el mayor tamaño de partícula con 140  $\mu\text{m}$ .

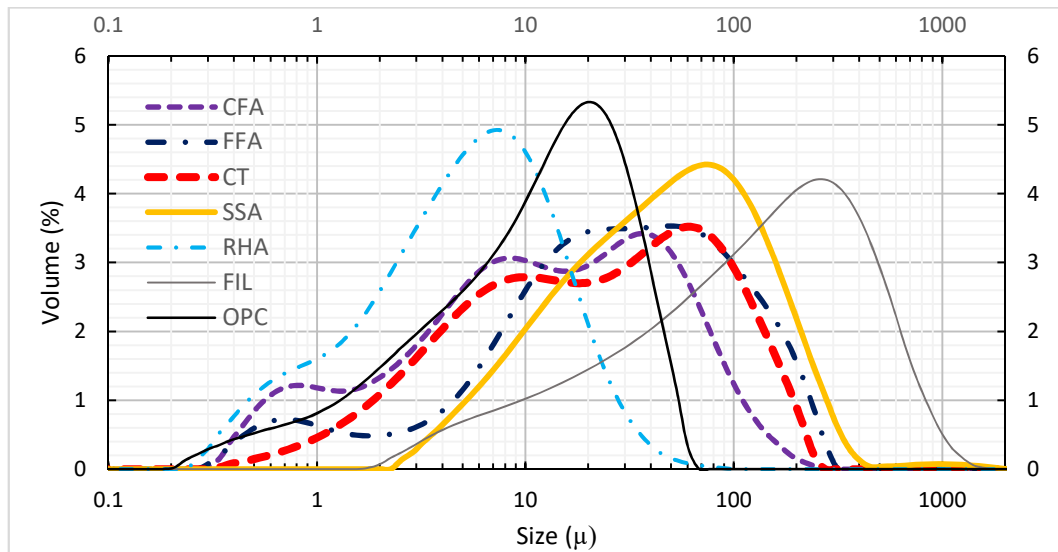


Figura 8.1.1 Tamaños de Partícula de los SCMs.

Los resultados obtenidos de TGA/DSC de los materiales se presentan en la Figura 8.1.2. Los resultados muestran que OPC, FFA y FIL presentan pérdidas de masa por ignición (LOI) pequeñas, entre 1 y 4%. Por otra parte, RHA, SSA, CFA y CT presentan LOIs mayores al 8%, en el caso de las cenizas con origen orgánico RHA y SSA se obtuvieron LOIs de 8% y 9% respectivamente. Lo anterior se atribuye a la descomposición de la materia orgánica que no incineró totalmente durante el proceso de elaboración de las cenizas. CT presenta un LOI de 10% que se produce principalmente entre los 700°C y 800°C, es decir, en el rango de temperaturas de carbonatación de los minerales calcita y dolomita [21]. Similarmente un LOI de 10% fue calculado para CFA, el cual se atribuye a la descomposición de los sulfatos presentes en la ceniza debido al proceso de desulfuración de gases de combustión.

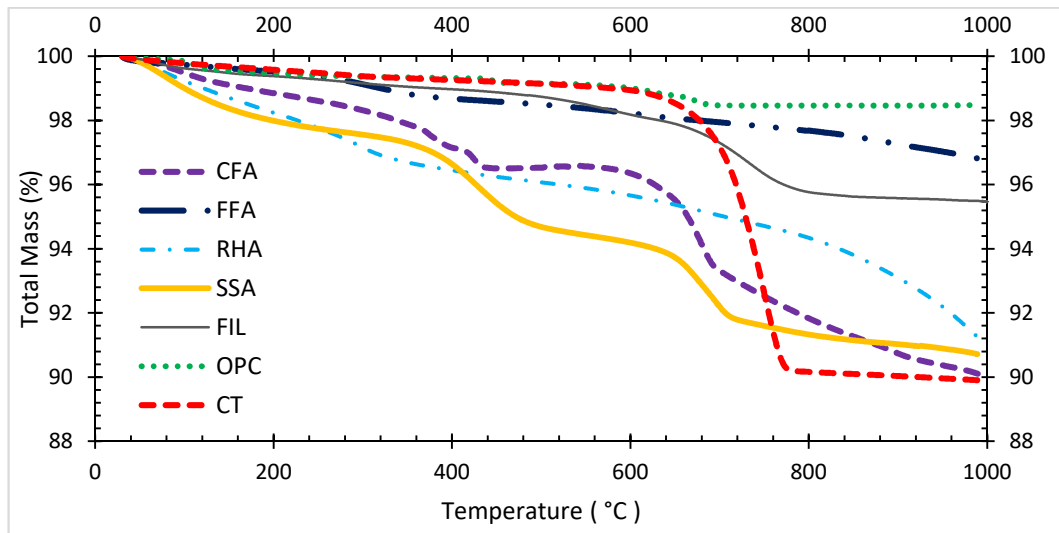


Figura 8.1.2 Análisis termogravimétrico de los SCMs

### 8.1.1 Desarrollo de resistencia

Los resultados de resistencia a compresión de las pastas de cemento con 20% y 40% de remplazo de OPC por SCM se compararon con una pasta 100% OPC con w/c 0.4, los desempeños se muestran en ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. En general, el menor valor de resistencia a compresión en los sistemas SCM/OPC con el nivel de remplazo en 20% (Figura 8.1.3) fue obtenido por FIL20 con 72% respecto al valor de referencia, es decir, 100% OPC w/c 0.4. Lo anterior se esperaba debido a la naturaleza químicamente inerte del polvo de roca utilizado. A la edad de 3 días los SCM obtuvieron resistencias de hasta un 95% respecto al valor de referencia, las mayores resistencias las obtuvieron CFA20, RHA20, SSA20 y FFA20 con 95%, 91%, 88%, 87% respectivamente.

Se observa similitud en las resistencias obtenidas que se explican considerando que, a edades tempranas la cantidad de reacciones de tipo puzolánica está limitada por la disponibilidad de portlandita resultante de las reacciones de hidratación del cemento además, las fases cementantes presentes en CFA20 favorecen la ganancia temprana de resistencia. Similarmente, además del carácter puzolánico de RHA20, la gran finura del material contribuye en la ganancia temprana de resistencia. Finalmente, cabe señalar que no se observa una diferencia significativa en la resistencia relativa obtenida por CT20 y FIL20 con 75%.

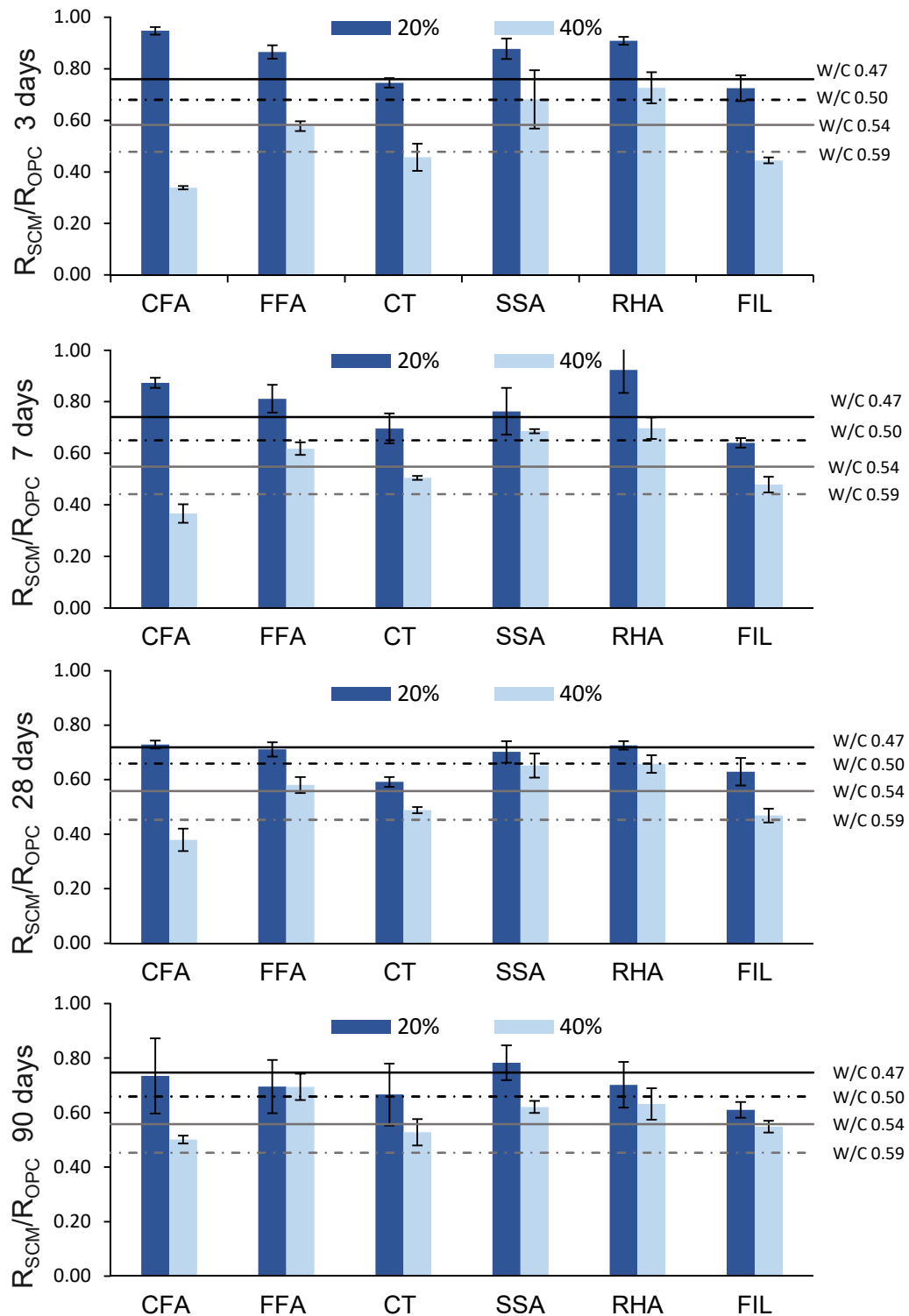


Figura 8.1.3 Desempeño de resistencia a compresión de los SCMs respecto a la referencia 100% OPC w/c 0.4 a las edades 3, 7, 28 y 90 días para niveles de remplazo 20 y 40%.

Una tendencia similar se observa en los resultados a 7 días de edad, los sistemas con 20% de remplazo obtuvieron resistencias entre 70% y 92% respecto a la referencia w/c 0.4. Se observa que el desempeño a los 7 días de RHA20 es de 92%, similar al obtenido a los 3 días. En segundo lugar se ubica CFA20 que obtuvo 87% de resistencia respecto a la referencia, la disminución en el desempeño se puede explicar considerando que la ganancia de resistencia atribuida a las fases cementantes presentes en la ceniza ya se han hidratado. Luego FFA20, SSA20 y CT20 obtuvieron resistencias de 81%, 76% y 70% respectivamente, ligeramente mayores a la obtenida por FIL20, con 64%.

Los resultados obtenidos a los 28 días de edad presentan valores muy similares para RHA20, CFA20, FFA20 y SSA20 con 73%, 73%, 71% y 70%, es decir, diferencias menores al 3% entre ellas. Respecto a CT20 y FIL20 no se observa una diferencia significativa en los resultados obtenidos, lo que indica que las contribuciones de CT a la ganancia de resistencia son esencialmente debidas al efecto físico.

Los desempeños obtenidos a la edad de 90 y 28 días son muy similares, el mejor desempeño en edades tardías lo obtuvo SSA20 con 78%, luego CFA20, RHA20, FFA20 y CT obtuvieron desempeños muy cercanos entre sí, con 73%, 70%, 70% y 67%. Por su parte FIL obtuvo un desempeño de 61% a la edad de 90 días. En general, a edades tardías se observa que la brecha entre la referencia 100% OPC y los SCMs no se incrementa, lo anterior se atribuye a la importante contribución de los productos de hidratación de originados de reacciones puzolánicas que ocurren entre las fases de cemento y las cenizas. Esto explicaría el mayor distanciamiento observado entre CT20 y FIL20; esto es, que CT20 muestra un incremento de origen puzolánicas entre 28 y 90 días que FIL20 no logra.

Se puede considerar que la pérdida de resistencia respecto a la referencia (100% OPC) debe ser proporcional a la cantidad de cemento que se retira de la mezcla, esto es, para una mezcla con 80% de cemento la resistencia debe disminuir un 20%. Bajo este enfoque y a la edad de 3 días, las mezclas CFA20, RHA20, SSA20 y FFA obtuvieron un desempeño superior al 80% de la resistencia de la referencia, lo que indica impactos positivos de los SCMs en las pastas de cemento, atribuidos principalmente al efecto físico. Por otra parte, efectos negativos también fueron observados en las pastas de cemento CT20 y FIL20, que pueden explicarse por el incremento de la razón agua-cemento debido al remplazo de OPC por SCM. A edades tardías (i.e., 90) días, se observa un impacto ligeramente negativo en todos los SCMs utilizados desde la perspectiva de resistencia mecánica.

Profundizando aún más, la diferencia de densidades de los SCMs utilizados derivó en la variación de las relaciones agua/cemento de las pastas, por lo anterior se compararon los resultados de resistencia a compresión de los sistemas OPC/SCM con los resultados de ensayos de pastas de cemento 100% OPC con w/c similares a las de cada uno (véase Tabla 8.1). CFA20, FFA20, RHA20 se compararon con una referencia 100% OPC con w/c 0.47, SSA20 y FIL20 se compararon con una referencia w/c 0.48 y CT20 se comparó con una referencia w/c 0.50. Similarmente, CFA40, FFA40, RHA40 se comparan con una referencia 100% OPC con w/c 0.54, SSA40 y FIL40 se compararon con una referencia w/c 0.57 y CT40 se comparó con una referencia w/c 0.59.

Tabla 8.1 Cocientes de resistencia a compresión referenciados a pastas de cemento 100% OPC con relaciones w/c equivalentes.

SCMs	Nivel de Reemplazo 20%				Nivel de Reemplazo 40%			
	3 días	7 días	28 días	90 días	3 días	7 días	28 días	90 días
CFA	1.24	1.18	1.01	0.98	0.58	0.67	0.73	0.90
FFA	1.13	1.10	0.99	0.93	0.99	1.13	1.12	1.24
CT	1.10	1.07	0.95	1.01	0.96	1.14	1.20	1.16
SSA	1.24	1.12	1.07	1.14	1.31	1.42	1.45	1.26
RHA	1.19	1.25	1.01	0.94	1.25	1.27	1.27	1.13
FIL	1.02	0.94	0.96	0.89	0.86	0.99	1.04	1.11

Fuente: Propia

Se observa que en general todas las pastas con reemplazo de 20% de cemento por SCMs igualaron o superaron la resistencia de sus referencias tanto a edad temprana como a edad tardía. SSA, CFA y RHA lograron resistencias un 20% superiores a las de sus respectivas referencias 100% OPC a la edad de 3 días. A la edad de 28 días la resistencia de las pastas con SCMs es la misma que la de una pasta sin reemplazos, a 90 días sin embargo el desempeño es ligeramente menor, siendo SSA el único SCM que supera ampliamente su referencia. Lo anterior sugiere que la contribución en el nivel de reemplazo 20% se debe principalmente a contribuciones de tipo físico.

Para resumir, los desempeños de los SCMs a edades tempranas en orden de mayor a menor en las pastas con reemplazo de 20% son RHA > CFA > SSA > FFA > CT > FIL. Similarmente, A edades tardías (90 días), los desempeños son SSA > CT > CFA > RHA > FFA > > FIL.

En los sistemas SCM/OPC con nivel de reemplazo 40%, hay diferencias significativas en los resultados obtenidos a 3 días para los diferentes SCMs. El mejor desempeño fue obtenido por RHA40 con 73% respecto a la referencia 100% OPC. Lo anterior indica que la combinación de finura, área superficial y elevado contenido de sílice amorfo tienen mayor impacto en niveles elevados de reemplazo. En segundo lugar SSA40 obtuvo un desempeño de 68% que también es atribuido a la combinación de finura, área superficial y contenido de sílice amorfo. FFA40, CT40, FIL40 obtuvieron desempeños de 58%, 46% y 44%. La diferencia entre los resultados de los SCMs con FIL40 es más pequeña que en el nivel de reemplazo 20%. Cabe señalar que la tendencia en desempeños a edad temprana en el nivel de reemplazo 40% es diferente a la obtenida en el nivel de reemplazo 20%, CFA pasó de tener el desempeño más alto al más bajo con 34%.

En general, los desempeños a la edad de 7 días mejoran ligeramente con respecto a los obtenidos a 3 días y mantuvieron la misma tendencia. Los mejores desempeños los obtuvieron RHA40 y SSA40 con 70% y 69% respectivamente. Luego FFA40, CT40, FIL40 y CFA40 obtuvieron desempeños de 62%, 50%, 48% y 37%. A la edad de 7 días tampoco se evidencia diferencias significativas entre CT40 y FIL40. Además, se observa una diferencia

de desempeños de aproximadamente 20% entre FIL con RHA y SSA, lo anterior se atribuye a las reacciones puzolánicas que ocurren entre las cenizas y el OPC.

Similarmente, los desempeños a la edad de 28 días varían ligeramente con respecto a los resultados obtenidos a 7 días y mantienen la misma tendencia. Los mejores desempeños los obtuvieron RHA40 y SSA40 con 66% y 65% respectivamente. Luego FFA40, CT40, FIL40 y CFA40 obtuvieron desempeños de 58%, 49%, 47% y 38%.

Finalmente, los desempeños a la edad de 90 días varían ligeramente con respecto a los resultados obtenidos a 28 días, no obstante, con una diferencia en la tendencia. El mejor desempeño lo obtuvo FFA40 con 69%, el anterior resultado es acorde a la bien conocida actividad puzolánica en edades tardías de las cenizas volantes. En segundo lugar, RHA40 y SSA40 obtuvieron desempeños de 63% y 62% respectivamente. Luego FIL40, CT40 y CFA40 obtuvieron desempeños de 53%, 55%, 50%.

Análogamente, considerando que al retirar el 40% del cemento se espera una pérdida de resistencia proporcional, los SCMs cuyo desempeño supere el 60% representan impactos positivos en las pastas de cemento. Utilizando tal enfoque se observa que a edad temprana (3 días) RHA y SSA tienen un impacto positivo en la ganancia de resistencia de las pastas de cemento de +13% y +8% con respecto al 60% de la resistencia de la pasta OPC. Del mismo modo, a edad tardía (90 días), se observa un impacto positivo en la ganancia de resistencia de las pastas de cemento con FFA, RHA y SSA de +9%, +3% y +2%.

Por otra parte, considerando nuevamente el enfoque de las referencias con relaciones w/c equivalentes a cada sistema OPC/SCMs, las pastas con 40% de remplazo SSA y RHA destacaron al obtener resistencias ampliamente superiores a sus correspondientes referencias a edad temprana, de 31 y 25% respectivamente ( véase Tabla 8.1). FFA,CT también obtuvieron resultados similares a los de sus referencias a 3 días de edad; únicamente CFA tuvo un desempeño inferior al de su referencia, sin embargo, a edad tardía 90 días el desempeño de CFA es similar al de su respectiva referencia. A los 28 días se observa que los SCMs excluyendo CFA tienen un desempeño entre 12 y 45% superior. A edad de 90 días, todos los SCMs tienen desempeños similares o superiores a los de su referencia 100% OPC. Se resalta que FFA40 presenta un desempeño a 90 días superior al de 28 días, lo que sugiere se continúan generando reacciones de tipo puzolánica que contribuyen a la ganancia de resistencia.

En síntesis, se indican los SCMs a edad temprana (3 días) en orden de mayor a menor según el desempeño en las pastas con remplazo de 40% RHA>SSA>FFA>CT>FIL>CFA. Por otra parte, A edad tardía (90 días), los SCMs según el desempeños son FFA>SSA > CT>RHA>FIL>CFA.

En general, a edades tempranas (3 y 7 días) se observa un decremento en el desempeño de los sistemas OPC/SCMs al aumentar el nivel de remplazo, con excepción de SSA y RHA, en los cuales se incrementa del desempeño. Además, a edades tardías (28 y 90 días) el desempeño de los SCMs es superior en el nivel de remplazo 40%.

En detalle, al comparar los SCMs con la referencia inicial w/c 0.4 se observa que CFA presentó buenos resultados en todas las edades en el nivel de remplazo 20%, no obstante, en el nivel de remplazo 40% se redujo considerablemente. FFA obtuvo buenos resultados a edad temprana en los dos niveles de remplazo, a edad tardía el desempeño al 40% de remplazo igualó al de menor nivel de remplazo. Lo anterior se explica en un aumento en la eficiencia de la FFA atribuido a una importante actividad puzolánica que a pesar de tener menos cemento incrementa la cantidad de sílice disponible y disminuye el exceso de portlandita, aumentando la cantidad de gel CSH secundario [30], [34]. CT obtuvo resultados aceptables a edad temprana en el nivel de remplazo 20%, atribuido a la contribución física debida a la finura del material y al área superficial. SSA obtuvo buenos resultados a edad temprana en los dos niveles de remplazo, a edad tardía el desempeño es bueno para los dos niveles de remplazo, se evidencia que se siguen produciendo reacciones de tipo puzolánico. RHA obtuvo buenos resultados en edad temprana en los dos niveles de remplazo, a edad tardía se observa que la ganancia de resistencia ocurre a menor velocidad que en la referencia OPC.

## 8.2. CAPACIDAD HIDRÁULICA

La capacidad hidráulica de los SCMs, medida como el calor acumulado liberado en calorimetría isotérmica a 23°C durante 7 días es presentado en la Figura 8.2.1. El SCM con mayor actividad hidráulica es SSA, este resultado se atribuye principalmente a que en su composición química presenta un cociente  $(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2$  superior a 1 y un bajo contenido de  $SiO_2$ . De acuerdo con [41] la capacidad hidráulica de la escoria de alto horno se incrementa con el contenido de óxido de aluminio, óxido de magnesio, óxido de calcio y disminuye con el contenido de óxido de sílice, además un cociente mayor a 1 de la relación  $(CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2$  asegura una alta alcalinidad y por tanto una alta actividad hidráulica.

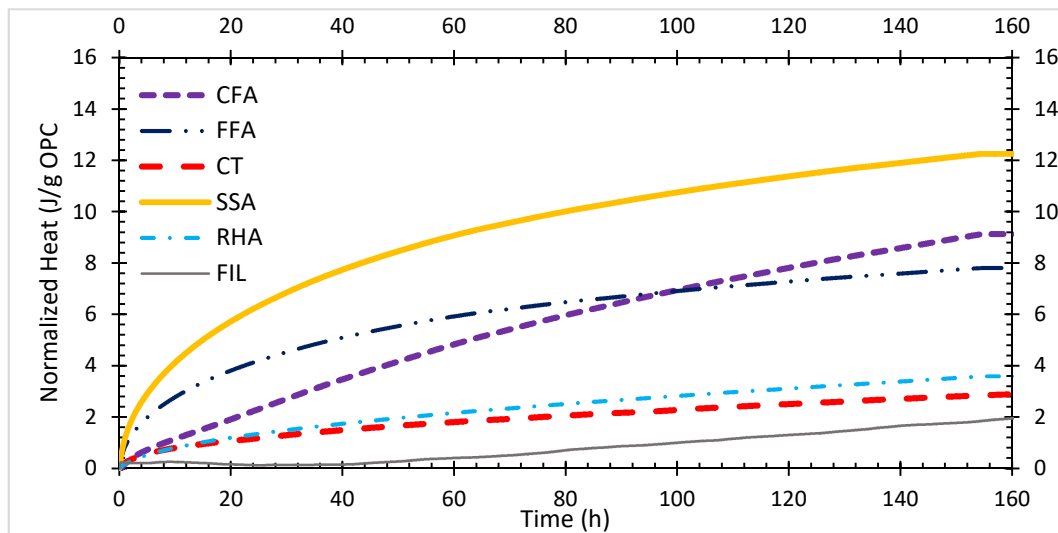


Figura 8.2.1 Calor liberado acumulado de calorimetrías isotérmicas hidráulicas.

Así mismo CFA y FFA también mostraron una cierta actividad hidráulica, 9 y 8 J/g SCM, estadísticamente similar a la de SSA y superior a la de RHA y CT. Estos resultados se explican debido que en su composición química CFA y FFA presentan también un relativamente alto contenido de CaO y un bajo contenido SiO<sub>2</sub>, lo que contribuye a una alta alcalinidad. CT y RHA presentan un alto contenido de SiO<sub>2</sub> y un bajo contenido de CaO, a lo cual se atribuye la pobre actividad hidráulica medida de 3 J/g SCM y 4 J/g SCM respectivamente.

Por otro lado, se conoce bien que la finura de un material influye en la velocidad de las reacciones y el grado de hidratación; no obstante, no se encontró una correlación entre los resultados de PSD y calorimetrías hidráulicas; es decir, hay poca influencia de la finura en la actividad hidráulica de los SCMs. En el mismo contexto, la actividad hidráulica demuestra estar más relacionada con la composición química y el grado de cristalinidad de los SCMs.

Añadido a lo anterior, se observa cierta correlación entre el calor de hidratación medido en las calorimetrías hidráulicas y el desempeño de las mezclas a compresión. Con excepción de RHA cuyo desempeño mecánico está fuertemente relacionado con su finura que promueve la hidratación del OPC restante, los materiales más hidráulicos como SSA, CFA, FFA obtuvieron buen desempeño mecánico en edad temprana (i.e., 3 días), mientras que materiales menos hidráulicos como CT y FIL obtuvieron desempeños más bajos a la misma edad.

### 8.3. CAPACIDAD PUZOLÁNICA

La capacidad puzolánica de los materiales, medida como el calor liberado acumulado en calorimetrías isotérmicas a 40°C durante 7 días usando el método de ensayo R<sup>3</sup> se presentan en la Figura 8.3.1.

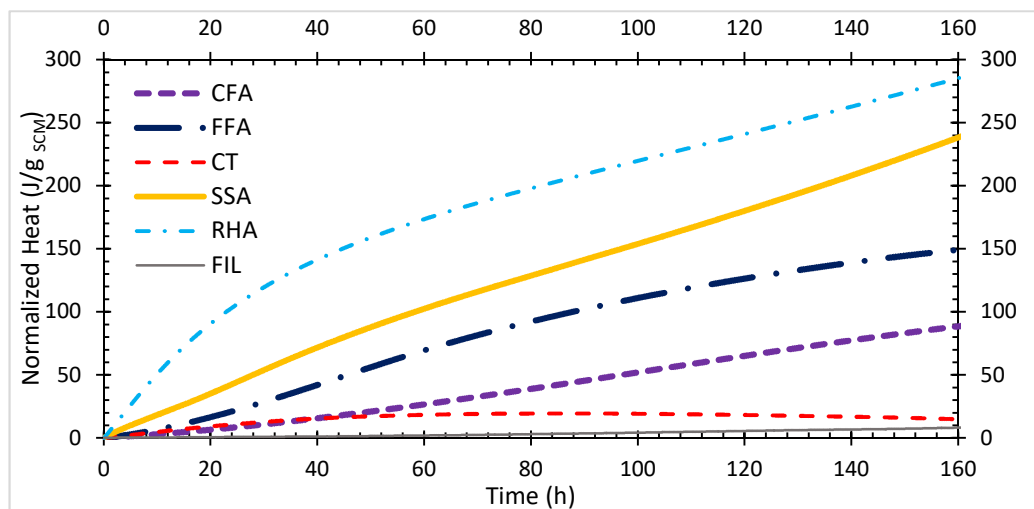


Figura 8.3.1 Calor liberado acumulado en calorimetrías isotérmicas utilizando el método R<sup>3</sup>.

Como era esperable, el menor valor de actividad puzolánica lo presenta FIL con un valor de 8.67 J/g SCM, en general los SCMs presentaron valores importantes de actividad puzolánica, con excepción de CT que presenta un valor de 14 J/g SCM, solo un 60% superior al valor de FIL. Lo anterior se atribuye a la ausencia de fases reactivas y la alta cristalinidad de los compuestos de CT [21]. Por otra parte, RHA liberó la mayor cantidad de calor con un valor de 294 J/g SCM, equivalente a 33 veces el calor liberado por FIL. La importante actividad puzolánica de RHA se atribuye principalmente a que posee un alto contenido de SiO<sub>2</sub> amorfo y una elevada área superficial específica, siendo esta última influenciada por la estructura de mesoporos y el tamaño de partícula [15], [42].

Similarmente SSA presenta una alta actividad puzolánica, con un valor de 251 J/g SCM y es el segundo material que más calor liberó, el calor liberado por SSA equivale a 29 veces el de FIL. La reactividad de SSA se atribuye a la alta área superficial que poseen estas cenizas [38]. Así mismo, Las cenizas volantes FFA y CFA también demuestran tener una alta actividad puzolánica, con un valor de 152 J/g SCM y 92 J/g SCM. La actividad puzolánica de FFA es 64% mayor que CFA, el resultado es esperado puesto que FFA es un material con carácter puzolánico importante que ha demostrado buenos resultados de resistencia en edades tardías y puede ser usado en altos volúmenes de remplazo [34].

En relación desempeño a compresión de las mezclas en edad tardía (90 días), se observa cierta correlación con el calor de hidratación medido en el método R<sup>3</sup>. Materiales con mayor actividad puzolánica como RHA, SSA, SSA y CFA obtuvieron los mejores desempeños, mientras que materiales con menos actividad puzolánica obtuvieron desempeños más bajos. El calor de hidratación de medido con el método R<sup>3</sup> explica con un correlación de 0.98 la ganancia de resistencia de las pastas con 40% de remplazo cuando CFA se excluye del cálculo.

## 8.5 INTERACCIÓN DE PASTAS DE CEMENTO CON REMPLAZO DE SCMS

La interacción entre SCM y OPC en los sistemas de pasta cemento con remplazos de 20% y 40% del OPC por SCMs fue medida como el calor de hidratación liberado acumulado en calorimetrías isotérmicas a 23°C durante 7 días, los resultados se muestran en la Figura 8.5.1. Los valores de calor de hidratación liberado por las mezclas con 20% de remplazo en 168h de ensayo variaron entre 204 J y 259 J/g<sub>OPC</sub> para FIL y SSA respectivamente. El calor de hidratación por gramo de OPC de las pastas OPC/SCMs es mayor al generado por OPC sólo, lo que indica que los SCMs promueven la hidratación del cemento, generando mayor cantidad de productos de hidratación. En el caso de FIL20, el calor de hidratación es muy similar a OPC, lo que indica que el filler no promueve la hidratación de las partículas de cemento. Lo anterior se esperaba dada su naturaleza químicamente inerte y reafirmada en los ensayos de capacidad puzolánica R<sup>3</sup> y capacidad hidráulica

El calor de hidratación adicional que logra generar por la adicción de un SCM a una mezcla es llamado calor de interacción Q<sub>int</sub> [38]. Se estima calculando el calor de hidratación

obtenido en las calorimetrías de pastas OPC/SCM y restando la suma de los calores de hidratación de cada uno de los constituyentes por si solos en sus proporciones correspondientes; es decir, el calor de hidratación obtenido en las calorimetrías hidráulicas para cada material. Así, en el nivel de remplazo 20%,  $Q_{int}$  se calcula sustrayéndole al calor de hidratación de los sistemas 80OPC/20SCM el 20% del calor de hidratación hidráulico de los SCMs y el 80% del calor de hidratación del cemento.

Los  $Q_{int}$  calculados para el nivel de remplazo de 20% variaron desde 37 hasta 91 J/g OPC, lo anterior representa incrementos en el calor de hidratación respecto al OPC debidos a la adición de SCMs, de 45% para SSA, 43% para RHA, 40% para CT, 37% para CFA, 36% para FFA y 19% para FIL. Además, se observa una correlación entre  $Q_{int}$  y la actividad puzolánica medida con el método R3, Los SCMs con más actividad puzolánica obtuvieron mayores valores de  $Q_{int}$

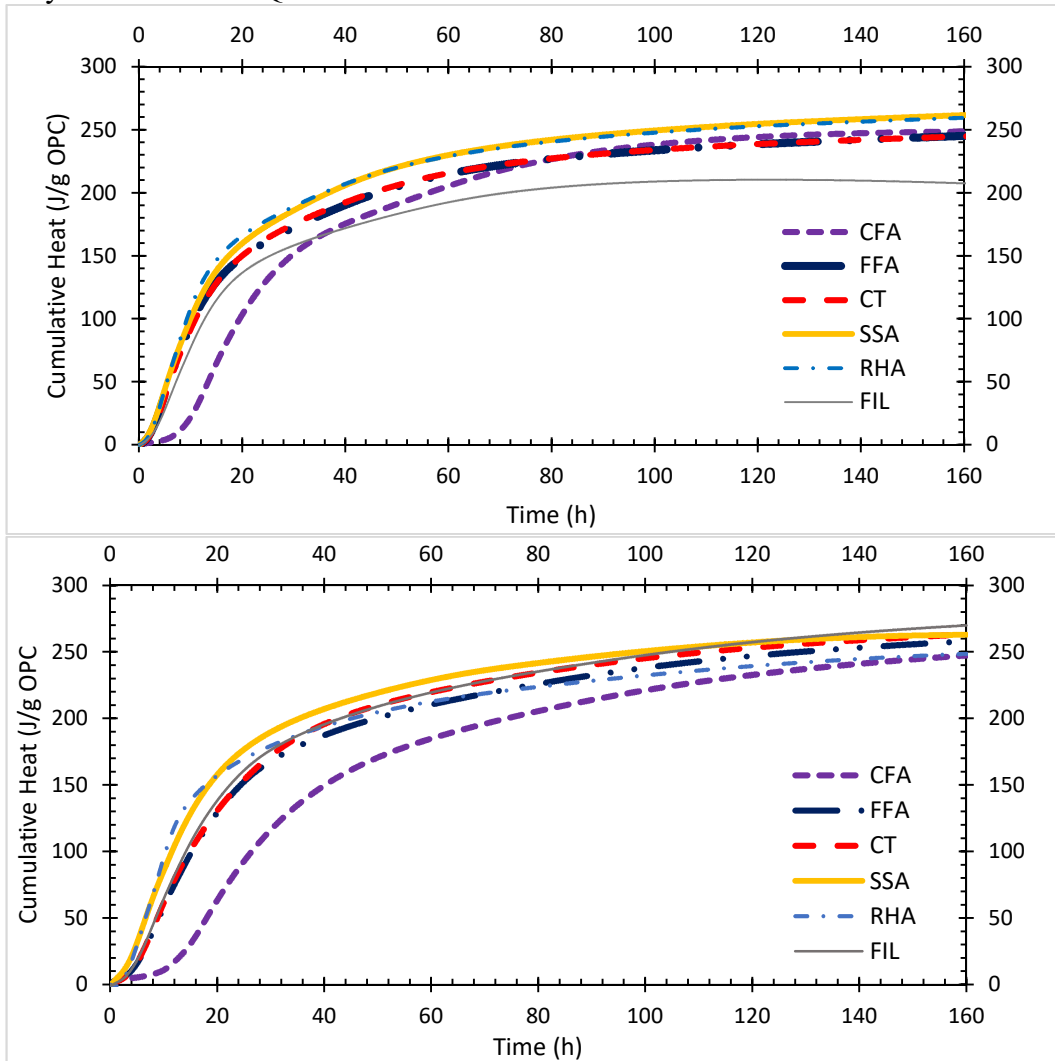


Figura 8.5.1 Calor de hidratación liberado acumulado de los sistemas de pastas de cemento /SCM. a) Sistemas con remplazo de 20% de OPC por SCM. b) Sistemas con remplazo de 40% de OPC por SCM.

Los valores de calor de hidratación liberado por las mezclas con 40% de remplazo en 168h de ensayo variaron desde 245 J/g OPC hasta 269 J/g OPC para FIL y CT respectivamente. El calor de hidratación de los sistemas OPC/SCMs con 40% de remplazo es en general superior al obtenido al 20% de remplazo. En el caso de FIL40, el calor de hidratación es superior a OPC y a los sistemas OPC/SCM, lo que indica que el promueve la hidratación de las partículas de cemento.

Los  $Q_{int}$  calculados para el nivel de remplazo de 40% variaron desde 105 hasta 137 J/g OPC, lo que representa incrementos respecto al calor de hidratación del OPC debido a la adición de SCMs de 68% para FIL, 63% para RHA, 62% para SSA, 61% para CT, 57% para FFA y 52% para CFA. El  $Q_{int}$  de todos materiales se incrementó al aumentar el nivel de remplazo, lo anterior indica que es posible utilizar niveles de remplazo superiores al 20% sin afectar negativamente la hidratación del cemento en la mezcla. FIL, FFA, CT y RHA obtuvieron los mayores incrementos en  $Q_{int}$  al aumentar el nivel de remplazo, FIL tuvo un incremento en  $Q_{int} / Q_{OPC}$  del 50%, superior a la cantidad de material añadida mientras que FFA, CT y RHA tuvieron un incremento del 20%, equivalente a la cantidad de SCM añadida (Ver Figura 8.5.2)

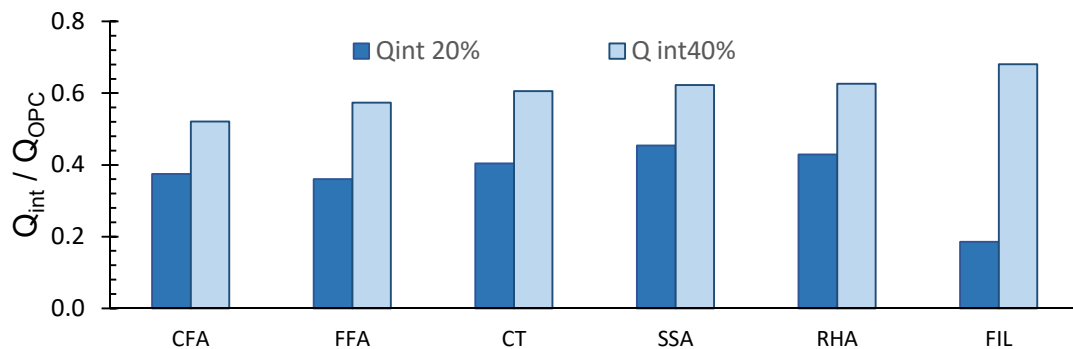


Figura 8.5.2 Calor de hidratación adicional normalizado de los SCMs en los 2 niveles de remplazo.

Finalmente, se observa una buena correlación entre el tamaño de partícula y el calor adicional introducido por los SCMs, los materiales más finos, i.e., menor  $D_{50}$  presentan mayor  $Q_{int}$ , lo antepuesto ocurre en los dos niveles de remplazo con algunas excepciones. SSA a pesar de tener un  $D_{50}$  mayor a los demás SCMs, presenta un mayor calor de hidratación que es atribuido a la química del material y al área superficial.

## 9. RESULTADOS E IMPACTOS

Los resultados obtenidos se discuten claramente en la sección análisis de resultados, las actividades propuestas en la metodología se relacionan con los objetivos y la sección en la tabla Tabla 9.1.

Tabla 9.1 Resultados de la investigación.

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Caracterización del material: Análisis de tamaño de partícula	Sección 8.1	Objetivo específico 1
Caracterización del material: Análisis termogravimétrico	Sección 8.1	Objetivo específico 1
Comparación del desempeño en resistencia a compresión	Sección 8.2	Objetivo específico 3
Análisis de Actividad Hidráulica	Sección 8.3	Objetivo específico 2
Análisis de Actividad Puzolánica	Sección 8.4	Objetivo específico 2
Análisis de interacción OPC/SCMs	Sección 8.5	Objetivo específico 2

Fuente: Autor

Los Impactos esperados del proyecto se presentan en la Tabla 9.2 , se identifican los aspectos a los que corresponde cada impacto y se señala un plazo esperado para cada uno.

Tabla 9.2 Impactos esperados

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Científico	Divulgación del método $R^3$ para medir la actividad puzolánica de los SCMS	Se publiquen los resultados y sean de interés para la comunidad científica	Mediano
Académico	Contribuye a la compresión de la influencia de los SCMs en la hidratación del cemento	Los resultados obtenidos sean tomados en cuenta al desarrollar modelos	Mediano
Social, ambiental	Las industria emplee los SCMS en la producción de cemento	Los resultados obtenidos sean utilizados para desarrollar productos	Largo
Científico	Contribución bibliográfica y ampliación del comportamiento de los SCMS en el hormigón	Se publiquen los resultados y sean de interés para la comunidad científica	Corto
Científico	Divulgación y estudio de relaves de los cobre térmicamente activados como SCMs	Se publiquen los resultados y sean de interés para la comunidad científica	Mediano

Fuente: Autor

## 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 10.1. CONCLUSIONES

El uso de materiales cementantes suplementarios como remplazo parcial del cemento constituye una buena alternativa para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria cementera. La efectividad de cada SCM está estrechamente relacionada con sus características físicas y químicas, como finura, área superficial, composición química y cristalinidad.

Se caracterizaron los SCMs usando la distribución de tamaños de partícula PSD, los valores de D<sub>50</sub> variaron ampliamente desde los 5µm hasta los 140µm. Los SCMs utilizados presentaron tamaños de partícula similares al OPC. Los resultados de TGA mostraron valores de pérdida de masa por ignición (LOI) apropiados en FFA, OPC y FIL. Se observó que los altos valores de LOI en RHA y SSA corresponden a materia orgánica que no se incineró completamente. El elevado valor de LOI de CFA corresponde con la descomposición de sulfatos presentes en la composición del material.

Se midió la resistencia a compresión de pastas de cemento con niveles de remplazo de 20% y 40% de cemento por SCMs a las edades de 3, 7, 28 y 90 días. Se encontró que en el nivel de remplazo 20%, todas las pastas con SCMs obtuvieron desempeños similares o superiores a las referencias con 100% OPC y w/c correspondiente. Especialmente CFA, FFA, RHA y SSA desarrollaron altas resistencias a temprana edad. En el nivel de remplazo 40% se obtuvieron desempeños inferiores a edad temprana, con excepción de SSA y RHA cuyos desempeños fueron superiores a los de sus referencias en todas las edades. Los desempeños de todos los SCMs mejoraron a edades tardías ( 28 y 90 días).

Se destaca que RHA y SSA obtuvieron muy buenos resultados en todas las edades en los dos niveles de remplazo realizados, los elevados desempeños a edad temprana se deben a contribuciones físicas y en edad tardía se atribuyen a contribuciones químicas. La combinación de tamaño de partícula, área superficial, química y cristalinidad los convierten en una buena alternativa a las convencionales puzolanas naturales y cenizas volantes que suelen afectar la resistencia temprana.

Se midió el calor de hidratación en calorimetrías isotérmicas sobre mezclas de SCMs con agua, se observó actividad hidráulica en SSA, CFA y FFA. Por su parte, baja actividad hidráulica se presentó en RHA y CT, atribuido principalmente al bajo contenido de óxido de calcio y alto contenido de sílice. La alta resistencia desarrollada por las pastas con RHA a edad temprana se debe principalmente a la finura del material y no a la composición química; CFA interfiere con la hidratación de las partículas de cemento, retrasando la ganancia de resistencia y la generación de calor de hidratación. Por tanto, se concluye que el calor hidráulico medido explica el incremento de resistencia a la edad de 3 días con un R<sup>2</sup> de 0.9 y 0.99 en los niveles de remplazo 20 y 40% respectivamente cuando se excluye RHA y CFA del cálculo por las razones mencionadas.

El calor de hidratación medido en calorimetrías isotérmicas usando el método  $R^3$  muestra alta actividad puzolánica en RHA, SSA, FFA y CFA, atribuido principalmente al alto contenido de sílice en estado amorfo de dichos SCMs, también se observó una cantidad considerable de calor de hidratación en CT, lo cual indica que es capaz de reaccionar con la portlandita para formar nuevos productos de hidratación. El calor de hidratación medido con el método  $R^3$  a los 7 días explica la ganancia de resistencia de los sistemas OPC/SCM con 40% de remplazo con un  $R^2$  de 0.98.

El calor de hidratación medido en calorimetrías isotérmicas a pastas de cemento con 20% de remplazo OPC por SCMs fue mayor al liberado por el OPC, lo que indica que la adición de SCMs mejora la hidratación del cemento. Añadir 20% de SSA, RHA y CT incrementó el calor de hidratación del OPC en más del 40%, es decir, un incremento mayor al de CFA y FFA, lo que explica la mayor ganancia temprana de resistencia de SSA, RHA y CT. En el nivel de remplazo 40%, el calor de hidratación medido en calorimetrías isotérmicas a pastas de cemento exhibió incrementos en el calor de hidratación del OPC desde 52% hasta 68%, superiores a los obtenidos en el nivel 20% de remplazo. Los resultados de calorimetrías y resistencia mecánica sugieren que el mejor nivel de remplazo para CFA es 20%, los otros SCMs presentaron buen comportamiento al aumentar el nivel de remplazo.

## 10.2. TRABAJOS FUTUROS

A fin de lograr un mejor entendimiento de la influencia de los SCMs se requiere realizar un estudio sobre efectos en la permeabilidad de las pastas de cemento, y así mismo, se complementa con ensayos para determinar el grado de hidratación de las pastas en diferentes edades. Estudios sobre efectos en permeabilidad de morteros y concretos son necesarios para determinar si pueden producirse efectos adversos por la adición de las SCMs.

Por otro lado, se requiere estudiar el nivel de remplazo óptimo de OPC por SCM para cada material, añadido también el estudio de consumo adicional o ahorro de agua que se logra a través de la adición de SCMs, con el ánimo de lograr recomendaciones para la correcta dosificación de SCMs. Además deben llevarse estudios sobre retracción de los morteros con remplazos de SCMs.

En otro contexto, el desarrollo de nuevos SCMs debe iniciarse con una completa caracterización del material para determinar las propiedades a optimizar, no obstante, el uso de calorimetrías isotérmicas de interacción, hidráulicas y  $R^3$  permite observar el comportamiento del SCMs al interactuar con el cemento, su actividad cementante y actividad puzolánica, sin requerir otros ensayos más complejos, costosos o de larga duración.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, “Sustainable development and climate change initiatives,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, 2008.
- [2] S. Javali *et al.*, “Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 9, pp. 2291–2304, 2017.
- [3] K.-H. Yang, Y.-B. Jung, M.-S. Cho, and S.-H. Tae, “Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 103, pp. 774–783, 2015.
- [4] X. Li *et al.*, “Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 51, no. 6, 2018.
- [5] K. L. Scrivener *et al.*, “TC 238-SCM: hydration and microstructure of concrete with SCMs: State of the art on methods to determine degree of reaction of SCMs,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 4, pp. 835–862, 2015.
- [6] R. Snellings and K. L. Scrivener, “Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: past and future,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 49, no. 8, pp. 3265–3279, 2016.
- [7] R. Trauchessec, J. M. Mechling, A. Lecomte, A. Roux, and B. Le Rolland, “Hydration of ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement blends,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 106–114, 2015.
- [8] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 2006.
- [9] E. Marie and J. Berodier, “Impact of the Supplementary Cementitious Materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration PAR,” ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2015.
- [10] M. R. Karim, M. F. M. Zain, M. Jamil, F. C. Lai, and M. N. Islam, “Use of wastes in construction industries as an energy saving approach,” *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 915–919, 2011.
- [11] M. C. G. Juenger, F. Winnefeld, J. L. Provis, and J. H. Ideker, “Advances in alternative cementitious binders,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1232–1243, 2011.
- [12] J. H. Xu, T. Fleiter, W. Eichhammer, and Y. Fan, “Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in China’s cement industry: A perspective from LMDI decomposition analysis,” *Energy Policy*, vol. 50, pp. 821–832, 2012.
- [13] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio, “Sustainable cement production-present and future,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 642–650, 2011.
- [14] M. Jamil, A. B. M. A. Kaish, S. N. Raman, and M. F. M. Zain, “Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 588–593, 2013.
- [15] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, and U. Rattanasak, “Influence of fineness of rice husk ash and additives on the properties of lightweight aggregate,” *Fuel*, vol. 88, no. 1, pp. 158–162, 2009.
- [16] F. Zunino and M. Lopez, “Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 65, pp. 19–28, 2016.
- [17] G. Rodríguez de Sensale and I. Rodríguez Viacava, “A study on blended Portland cements containing residual rice husk ash and limestone filler,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 873–888, 2018.
- [18] H. Kizhakkumodom Venkatanarayanan and P. R. Rangaraju, “Effect of grinding of low-carbon rice husk ash on the microstructure and performance properties of blended cement concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 348–363, 2015.
- [19] P. Kathirvel, V. Saraswathy, S. P. Karthik, and a. S. S. Sekar, “Strength and Durability Properties of Quaternary Cement Concrete Made with Fly Ash, Rice Husk Ash and Limestone Powder,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 589–598, 2013.
- [20] U.S. Geological Survey (USGS), “Mineral Commodity Summaries 2015 Mineral Commodity Summaries 2015,” pp. 1–196, 2015.
- [21] F. Vargas and M. Lopez, “Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings: Mechanical performance and analysis of factors,” *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 427–436, 2018.
- [22] C. Shi, C. Meyer, and A. Behnood, “Utilization of copper slag in cement and concrete,” *Resour.*

- Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 10, pp. 1115–1120, 2008.
- [23] C. Wang, D. Harbottle, Q. Liu, and Z. Xu, “Current State of Fine Mineral Tailings Treatment - A Critical Review on Theory and Practice,” vol. 58, pp. 113–131, 2014.
- [24] B. S. Thomas, A. Damare, and R. C. Gupta, “Strength and durability characteristics of copper tailing concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 894–900, 2013.
- [25] O. Onuaguluchi and Ö. Eren, “Cement mixtures containing copper tailings as an additive: durability properties,” *Mater. Res.*, vol. 15, no. 6, pp. 1029–1036, 2012.
- [26] P. Lawrence, M. Cyr, and E. Ringot, “Mineral admixtures in mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 12, pp. 1939–1947, 2003.
- [27] M. Cyr, P. Lawrence, and E. Ringot, “Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 719–730, 2005.
- [28] F. Ash, *Dictionary of architecture and construction*, 4 th Ed. New York, NY: Dictionary of Architecture and Construction, 2006.
- [29] A. Wang, C. Zhang, and W. Sun, “Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 12, pp. 2023–2029, Dec. 2003.
- [30] A. Oner, S. Akyuz, and R. Yildiz, “An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1165–1171, 2005.
- [31] L. . Bouzoubaâ, N, “Self Compacting Concrete Incorporating High-Volumes of Class F Fly Ash : Preliminary Results,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 413–420, 2001.
- [32] K. Celik, C. Meral, P. Gursel, P. Mehta, A. Horvath, and P. J. M. Monteiro, “Mechanical Properties, Durability, and Life-Cycle Analysis of Self-consolidating Concrete Mixtures Made with Blended Portland Cements Containing Fly Ash and Limestone Powder,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 59–72, 2014.
- [33] Astm, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use,” *Annu. B. ASTM Stand.*, no. C, pp. 3–6, 2010.
- [34] T. Hemalatha and A. Ramaswamy, “A review on fly ash characteristics--Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 147, pp. 546–559, 2017.
- [35] M. Jamshidi, A. Jamshidi, N. Mehrdadi, and F. Pacheco-Torgal, “Mechanical performance and capillary water absorption of sewage sludge ash concrete (SSAC),” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 228–234, 2012.
- [36] C. J. Lynn, R. K. Dhir, G. S. Ghataora, and R. P. West, “Sewage sludge ash characteristics and potential for use in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 767–779, 2015.
- [37] F. Baeza-Brotons, P. Garcés, J. Payá, and J. M. Saval, “Portland cement systems with addition of sewage sludge ash. application in concretes for the manufacture of blocks,” *J. Clean. Prod.*, vol. 82, pp. 112–124, 2014.
- [38] M. Oliva, F. Vargas, and M. Lopez, “Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 223, pp. 1029–1041, Jun. 2019.
- [39] D. Salazar-carreño, R. G. García-cáceres, and O. O. Ortiz-rodríguez, “Laboratory processing of Colombian rice husk for obtaining amorphous silica as concrete supplementary cementing material,” vol. 96, pp. 65–75, 2015.
- [40] F. Avet, R. Snellings, A. Alujas Diaz, M. Ben Haha, and K. Scrivener, “Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 85, pp. 1–11, 2016.
- [41] S. C. Pal, A. Mukherjee, and S. R. Pathak, “Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 9, pp. 1481–1486, 2003.
- [42] F. Zunino and M. Lopez, “A methodology for assessing the chemical and physical potential of industrially sourced rice husk ash on strength development and early-age hydration of cement paste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 869–881, 2017.



## GLOSARIO

SCMS: Material Cementante Suplementario. Ver pág. 20

RHA: Ceniza de cascarilla de arroz. Ver pág. 22

SSA: Ceniza de lodos de alcantarilla. Ver pág. 24

FIL: Polvo de roca. Ver pág. 23

CFA: Class C fly ash, ceniza volante clase C. Ver pág. 23

FFA: Class F fly ash, ceniza volante clase F. Ver pág. 23

CT: Cooper Tailings, relaves de cobre. Ver pág. 23

OPC: Ordinary portland cement, cemento portland ordinario. Ver pág. 18

CSH: Silicatos de Calcio Hidratados. Ver pág. 18

CH: Portlandita. Ver pág. 18

PSD: Distribución de tamaños de partícula. Ver pág. 29

TGA: Análisis termogravimétrico. Ver pág. 29

R<sup>3</sup>: Ensayo de actividad puzolánica. Ver pág. 32