

**PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN EN EL GRUPO DE MATERIALES Y  
ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN INME EN APOYO A LA LÍNEA DE:  
NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍAS DEL  
CONCRETO**

**JOHANA ALEJANDRA GARCÍA ROMERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

**PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN EN EL GRUPO DE MATERIALES Y  
ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN INME EN APOYO A LA LÍNEA DE:  
NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍAS DEL  
CONCRETO**

**JOHANA ALEJANDRA GARCÍA ROMERO**

**Trabajo de grado como requisito para optar por el título de ingeniera Civil.**

**Director:**

**LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ**

**Ph D en Ingeniería Civil**

**Codirector:**

**SERGIO RUIZ MARTÍNEZ**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2018**

## **Dedicatoria**

*A Dios, por guiarme para emprender este proyecto y darme fuerzas en los momentos de debilidad, por permitirme llegar hasta este punto y cumplir un sueño más.*

*A mis padres Luis Carlos García y Gloria Romero; mi mayor inspiración, por depositar en mí toda su confianza, apoyo y amor a lo largo de mi vida, por llenar mis días de alegría y darme el mejor ejemplo para seguir adelante. Los amo con mi vida.*

*A mi tía Ana, Lili y Dana, por su paciencia, ánimos y siempre estar presentes en mi proceso.*

*A Andrés Celis, por su amor incondicional durante estos años y estar conmigo en todo momento.*

*A Orlando Serrano, gracias infinitas por estar pendiente de mi proceso y motivarme a cumplir mis metas.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi director Luis Eduardo Zapata Ordúz y codirector Sergio Ruiz Martínez, por su dirección y enseñanzas que me formaron académicamente para lograr culminar con éxito.

A los laboratoristas Jairo Hernández, Germán Hernández, Jaime Cadena y Álvaro Novoa, por su apoyo incondicional e invaluable en este proyecto.

Al equipo administrativo de la escuela de ingeniería civil, Sonia Ayala y Ludy Cáceres, por su paciencia y colaboración durante toda la carrera.

Finalmente, al grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción (INME), por brindarme sus equipos e instalaciones para la elaboración del proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. METODOLOGÍA .....	19
2.1 MATERIALES .....	19
2.1.1 Agregado grueso (AG): .....	19
2.1.2 Agregado Fino (AF): .....	20
2.1.3 Cemento (CP): .....	20
2.1.4 Escoria de alto horno (GGBFS): .....	20
2.1.5 Residuo de arena de fundición (WFS): .....	20
2.1.6 Superplastificante (SP): .....	21
2.1.7 Agregado grueso (AG):.....	21
2.1.8 Agregado Fino (AF): .....	21
2.1.9 Cemento (CP): .....	22
2.1.10 Superplastificante (SP): .....	22
2.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.3 PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO .....	23
2.3.1 Proceso De Mezclado .....	26
2.4. ENSAYOS.....	27
2.4.1. Ensayos en estado fresco.....	27
2.4.1.1. Slump Flow y T50: .....	27
2.4.1.2. J-Ring:.....	28
2.4.1.3. L-Box:.....	29
2.4.1.4. Ensayo de reología: .....	29

2.4.2. Ensayos en estado endurecido:.....	30
2.4.2.1. Compresión Uniaxial: .....	31
2.4.2.2. Tracción indirecta:.....	31
2.4.2.3. Conductividad eléctrica aparente:.....	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	34
3.1 BASE DE DATOS .....	34
3.2 ENSAYOS EN ESTADO FRESCO .....	37
3.2.1 Slump y T50:.....	37
3.2.2 J-Ring y L-Box: .....	39
3.2.3 Reología:.....	39
3.3 ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO .....	41
3.3.1 Resistencia a la compresión uniaxial .....	41
3.3.2 Tracción indirecta.....	43
3.3.3 Conductividad eléctrica .....	44
4. CONCLUSIONES .....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS.....	52

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Malla estadística experimental.....	24
Figura 2. Ensayo Slump Flow .....	28
Figura 3. Ensayo J-Ring .....	28
Figura 4. Ensayo L-Box .....	29
Figura 5. Reómetro ICAR. ....	30
Figura 6. Compresión uniaxial .....	31
Figura 7. Tracción indirecta. ....	32
Figura 8. (a) Conductividad eléctrica aparente (b) Secciones de 100 mm x 30 mm.....	33
Figura 9. Publicaciones de artículos de investigación en CAC. ....	34
Figura 10. Curva de flujo.....	40
Figura 11. Resistencias a la compresión uniaxial. ....	43
Figura 12. Resistencia a la tracción indirecta. ....	43
Figura 13. Muestra sometida a tracción indirecta. ....	44

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Granulometría agregado grueso .....	19
Tabla 2. Granulometría agregado fino: .....	20
Tabla 3. Granulometría del residuo de arena de fundición. ....	20
Tabla 4. Granulometría agregado grueso. ....	21
Tabla 5. Granulometría agregado fino: .....	22
Tabla 6. Cantidades de diseño de mezclas iniciales.....	25
Tabla 7. Diseños de mezclas finales.....	26
Tabla 8. Diseño de mezcla para reómetro, J-Ring y L-Box.....	30
Tabla 9. Resultados Slump y T50 para mezclas iniciales. ....	37
Tabla 10. Resultados Ensayos Slump y T50 para mezclas finales estabilizadas. .	39
Tabla 11. Resultados Ensayos J-Ring y L-Box.....	39
Tabla 12. Resultados parámetros relativos.....	40
Tabla 13. Resultados parámetros fundamentales.....	41
Tabla 14. Conductividad eléctrica. ....	44

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Informes .....	52
Anexo B. Materiales que se han implementado en mezclas binarias, ternarias y cuaternarias utilizados en la base de datos. ....	64
Anexo C. Criterios de conformidad para las propiedades en estado fresco de los CAC según EFNARC.....	66
Anexo D: Base de datos .....	67

## RESUMEN

**TÍTULO:** PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN EN EL GRUPO DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS DE CONSTRUCCIÓN INME EN APOYO A LA LÍNEA DE: NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍAS DEL CONCRETO\*

**AUTORA:** JOHANA ALEJANDRA GARCÍA ROMERO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Concreto autocompactante, estado fresco, estado endurecido, escoria de alto horno, residuo de arena de fundición.

En este documento se dan a conocer las labores desempeñadas durante la pasantía de investigación con el grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, colaborando en actividades vinculadas a la búsqueda científica para la elaboración de una base de datos relacionada con los reemplazos de materiales alternativos que ha tenido el concreto autocompactante en los últimos 20 años, realizando un análisis comparativo de los reemplazos óptimos, materiales implementados, ensayos y resultados obtenidos. Durante el periodo de 4 meses que conformó la pasantía se realizaron ensayos en estado fresco y endurecido de concreto autocompactante tales como: flujo de cono de asentamiento, T50, capacidad de paso por J-ring y L-box, viscosidad plástica y esfuerzo de fluencia por medio de ensayo en reómetro, compresión uniaxial, conductividad eléctrica aparente y tracción indirecta con distintos reemplazos del material cementante y del agregado fino, por escoria de alto horno y residuo de arena de fundición, respectivamente. Se observó que el análisis realizado a los artículos de la base de datos científicas permitió indicar algunos comportamientos para la realización de los ensayos, comprobando que el uso de materiales alternativos en porcentajes de reemplazo es viable para realizar concreto autocompactante como una solución en la construcción sostenible; todo esto con el fin de contribuir y apoyar en el avance de las investigaciones requeridas del grupo INME.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Luis Eduardo Zapata Orduz, Codirector Sergio Ruiz Martínez

## ABSTRACT

**TITLE:** RESEARCH INTERNSHIP IN THE BUILDING MATERIALS AND STRUCTURES INME GROUP IN SUPPORT OF THE LINE OF: NEW CONCRETE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES\*

**AUTHOR:** JOHANA ALEJANDRA GARCÍA ROMERO\*\*

**KEYWORDS:** Self-compacting concrete, fresh state, hardened state, ground granulated blast furnace slag, waste foundry sand.

This document presents the work carried out during the research internship at the *Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción* (INME) of the Faculty of Civil Engineering of the *Universidad Industrial de Santander*, involved in activities related to scientific research for the development of an alternative material substitution database for self-compacting concrete over the past 20 years, through a comparative analysis of optimal replacement, implemented materials, tests and obtained results. During the 4-month internship tests were performed in the fresh and hardened state in self-compacting concrete, such as: slump flow, T50, J-ring and L-box flow blocking ratio, plastic viscosity and yield stress with rheometer testing, compressive strengths, apparent electrical conductivity and splitting tensile strength with various substitutions of cementitious material and fine aggregates, particularly ground granulated blast furnace slag and waste foundry sand. It was observed that the analysis made to the articles in the scientific database allowed to indicate some behaviors for the realization of the tests, verifying that the use of alternative materials in replacement percentages is viable to perform self-compacting concrete as a solution in the construction sustainable; all this in order to contribute and to support the research progress of the INME Group.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Luis Eduardo Zapata Orduz, Codirector Sergio Ruiz Martínez

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el concreto es el principal insumo de la industria de la construcción, con una producción anual de aproximadamente  $10^{10}$  toneladas <sup>1</sup>. La investigación en tecnologías del concreto ha permitido el desarrollo de tipos de concretos novedosos, que cumplen con diversos requisitos constructivos, y su desarrollo es únicamente posible con el uso de materiales alternativos y de dosificaciones diferentes a las de un concreto convencional. Entre estos concretos, se encuentra el concreto autocompactante (CAC), de poco y reciente uso en el ámbito colombiano. Este es un concreto muy fluido, que es capaz de llenar las formaletas y pasar a través del refuerzo sin necesidad de vibración, propiedades que se mejoran y complementan mediante el uso de adiciones minerales y aditivos químicos con modificaciones en la dosificación <sup>2, 3</sup>.

Sin embargo, el uso a gran escala del concreto a nivel mundial, ha llevado a una sobreexplotación de los recursos naturales, como la arena de río y la grava, acarreando problemas de sostenibilidad <sup>4</sup>.

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la comunidad de ingeniería civil es a ejecutar proyectos en armonía con la naturaleza, utilizando el concepto de desarrollo sostenible que implica el uso de materiales reutilizables producidos a un costo razonable <sup>5</sup>. En el contexto del concreto, que es el material de construcción

---

<sup>1</sup> WRAY P.. "Straight talk with Karen Scrivener on cements, CO2 and sustainable development". American Ceramic Society bulletin, vol. 91, No 5, 2012, pp. 47-50

<sup>2</sup> EFNARC, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete," 2002 y 2005

<sup>3</sup> BURÓN M., FERNÁNDEZ J. y GARRIDO L., "Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización", IECA instituto español del cemento y sus aplicaciones, vol. 887, 2006, pp. 52-64

<sup>4</sup> NIETO D. Estudio de hormigón autocompactante con árido reciclado (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, 2015

<sup>5</sup> DINAKAR P., BABU K., and SANTHANAM M. "Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes", Cement and concrete composites, vol. 30, No. 10, 2008, pp. 880-886

predominante, es necesario identificar los sustitutos de cemento menos costosos. En los últimos años, muchos investigadores han establecido que el uso de materiales cementicios suplementarios como cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, metacaolín, ceniza de cáscara de arroz, etc., puede mejorar las diversas propiedades en estado fresco y endurecido del concreto, así como como disminuir el aumento en los costos de construcción <sup>6</sup>.

Además, el uso de materiales alternativos en la producción de concreto autocompactante no solo proporciona beneficios económicos, sino que también reduce el calor de hidratación <sup>7</sup>.

El residuo de arena de fundición (Waste Foundry Sand, WFS, por sus siglas en inglés); es un subproducto de las industrias de fundición de metales ferrosos y no ferrosos, es uno de esos materiales prometedores que puede utilizarse como una alternativa a la arena natural en el concreto. En las últimas décadas se han realizado varios estudios para investigar el efecto de la adición de residuo de arena de fundición como reemplazo parcial y completo de arena natural de río en las mezclas de concreto. Se ha encontrado que es adecuado para ser utilizado como reemplazo parcial de arena en concreto de calidad estructural <sup>8</sup>. En Estados Unidos, la industria de WFS descarta hasta 10 millones de toneladas de arena cada año, ofreciendo un recurso potencial abundante para reemplazar la arena en productos de concreto, lo que indica un uso rentable y ecológico <sup>9</sup>.

---

<sup>6</sup> *Ibíd.*

<sup>7</sup> RAMANATHAN P., BASKAR I., MUTHUPRIYA P., and VENKATASUBRAMANI R.. "Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures". *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 17, No. 2, 2013, pp. 465-472

<sup>8</sup> NIETO D. *Op. Cit.*

<sup>9</sup> ŞAHMARAN M., LACHEMI M., ERDEM T. and YÜCEL H.. "Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete", *Materials and Structures*, vol. 44, No. 7, 2010, pp. 1193-1204

La escoria granulada de alto horno (Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS, por sus siglas en inglés); es un subproducto de la fabricación de hierro en un alto horno donde el mineral de hierro, la piedra caliza y el coque se calientan hasta 1500 °C y se originan dos productos: hierro fundido y escoria fundida <sup>10</sup>. El uso de esta escoria como material cementante y relleno fino se promueve cada vez más para la producción de concreto de alto rendimiento y concreto autocompactante <sup>11</sup>. Las cantidades anuales de producción mundial de GGBFS son de 530 millones de toneladas y alrededor de 60 millones de toneladas son generadas en China cada año <sup>12</sup>.

El Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander ha venido trabajando y realizando proyectos investigativos en materia de concretos autocompactantes, utilizando diferentes materiales como escoria metálica, ceniza volante, fibras de acero, nano-partículas de sílice, escoria de alto horno y residuo de arena de fundición. Estos materiales nuevos y diversos modifican las propiedades del concreto. Teniendo en cuenta que el CAC es un concreto poco usado el grupo INME investiga y realiza ensayos de acuerdo a las normas para caracterizar tanto el estado fresco como endurecido del mismo, y así conocer el efecto y las propiedades que se derivan del uso de los diversos materiales alternativos sobre el concreto autocompactante.

Con el objeto de complementar el ejercicio académico con la práctica en investigación (pasantía), sirviendo de apoyo al grupo INME, el presente trabajo se refiere específicamente al desarrollo de ensayos de laboratorio al concreto autocompactante modificado con las respectivas normativas y protocolos

---

<sup>10</sup> SIDDIQUE, R. Waste Materials and By-Products in Concrete. Germany: Springer, 2008

<sup>11</sup> DINAKARKALI P., SETHY K. and SAHOO U.. "Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag", Materials & Design, vol. 43, 2013, pp. 161-169

<sup>12</sup> ZHAO H., SUN W., WU X. and GAO B.. "The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures", Journal of Cleaner Production, vol. 95, 2015, pp. 66-74

establecidos por EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems), normas ASTM y NTC, realizando diferentes mezclas; utilizando esencialmente los siguientes materiales: residuo de arena de fundición, escoria de alto horno, agregado fino (arena de río), agregado grueso (grava) con tamaño máximo nominal de 3/8", agua, y como aditivo reductor de agua de alto rango (superplastificante) SIKA Viscocrete 2100; materiales que fueron seleccionados previamente y aprobados para su estudio en el grupo INME, en referencia a la investigación de nuevos materiales en las tecnologías del concreto autocompactante.

Adicionalmente se investigó y se desarrolló una base de datos de artículos de investigación relacionados a concretos autocompactantes, utilizando materiales alternativos no convencionales.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar actividades de apoyo en el grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción INME relativas al desarrollo de ensayos de laboratorio y búsqueda científica vinculada con la investigación en materiales alternativos como residuos de la industria metalúrgica en el concreto auto-compactante.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Componer una base de datos desde el año 1997 hasta 2018 sobre investigaciones nacionales e internacionales en el área del concreto autocompactante modificado con materiales alternativos como nano-partículas de sílice y residuos de la industria metalúrgica o metal-mecánica.

Participar como apoyo en el desarrollo de ensayos de laboratorio referentes al estado fresco del concreto auto-compactante tales como flujo de cono de asentamiento y T50, capacidad de paso por J-ring y L-box; y la viscosidad plástica y esfuerzo de fluencia por medio de ensayo en reómetro, y en estado endurecido ensayos tales como de compresión uniaxial, ensayo de conductividad eléctrica aparente y tracción indirecta.

Elaborar y presentar al director de la pasantía un informe mensual y uno final sobre el avance y cumplimiento de los objetivos de la pasantía.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 MATERIALES

La caracterización de los materiales utilizados se hizo para establecer el diseño de mezcla incluyendo los materiales de reemplazo, siguiendo los parámetros de la Norma Técnica Colombiana (NTC) y de (ASTM) *American Society for Testing and Materials*, donde se describe la realización de los ensayos con las siguientes normas: NTC 77, NTC 92, NTC 127, NTC 176, NTC 221, NTC 237, ASTM C70-13, ASTM C566-13, ASTM C1611, ASTM C1621, ASTM C39, ASTM C1760 y ASTM C496. A continuación, se describen las propiedades de cada una de las dos etapas de adquisición de materiales en las cuales actué en calidad de auxiliar de investigación:

PRIMERA ETAPA:

**2.1.1 Agregado grueso (AG):** El material tiene un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/8" (9.5 mm), con una gravedad específica (GS) de 2.62, un peso unitario saturado superficialmente seco (SSS) de 1501.34, un porcentaje de absorción del 1.62% y un contenido de humedad del 0.13%. Ver Tabla 1.

**Tabla 1. Granulometría agregado grueso**

Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
3/4"	19.1	1.60	98.40
1/2"	12.7	3.24	96.76
3/8"	9.52	9.87	90.13
Nº4	4.76	86.66	13.34
Fondo	0	99.62	0.38

**2.1.2 Agregado Fino (AF):** Este material presentó GS de 2.63, porcentaje de absorción del 1.77%, contenido de humedad del 2.37%, y módulo de finura (MF) de 2.93. (Ver Tabla 2).

**Tabla 2. Granulometría agregado fino:**

N.º Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
4	4.76	0.95	99.05
8	2.38	3.14	96.86
16	1.19	7.01	92.99
30	0.59	23.42	76.58
50	0.29	83.99	16.01
100	0.14	98.44	1.56
Fondo	0	99.88	0.12

**2.1.3 Cemento (CP):** El cemento provisto fue CEMEX de uso general (Tipo I), con una densidad de 2.96 ( $g/cm^3$ ) determinada mediante la NTC 221.

**2.1.4 Escoria de alto horno (GGBFS):** La escoria presentó una densidad de 2.79 ( $g/cm^3$ ), la cual se calculó mediante la NTC 221, debido a que la escoria también actúa como material cementante.

**2.1.5 Residuo de arena de fundición (WFS):** Presentó un módulo de finura de 1.74, gravedad específica de 2.46 y un porcentaje de absorción del 3.13%. Ver Tabla 3.

**Tabla 3. Granulometría del residuo de arena de fundición.**

N.º Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
#4	4.75	0	100
#10	2	0	100
#20	0.84	0.77	99.23

N.º Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
#40	0.42	17.19	82.81
#60	0.25	64.8	35.2
#100	0.15	92	8
#200	0.07	96.36	3.64
Fondo	0	99.82	0.18

**2.1.6 Superplastificante (SP):** El superplastificante utilizado fue SIKA Viscocrete 2100, con un contenido de sólidos de 57.56%.

SEGUNDA ETAPA:

**2.1.7 Agregado grueso (AG):** El material tiene un tamaño máximo nominal de 3/8" (9.5 mm), con GS de 2.62, un peso unitario SSS de 1493.98, un porcentaje de absorción del 2.24% y un contenido de humedad del 0.12%. Ver Tabla 4.

**Tabla 4. Granulometría agregado grueso.**

N.º Tamiz (in)	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
#1/2	12.70	0.31	99.69
#3/8	9.52	8.19	91.81
#4	4.76	95.98	4.02
#10	2.00	99.23	0.77
#20	0.84	99.26	0.74
#40	0.42	99.29	0.71
#60	0.25	99.34	0.66
#100	0.15	99.40	0.60
#200	0.08	99.72	0.28
Fondo	0.00	99.80	0.20

**2.1.8 Agregado Fino (AF):** Este material presentó una gravedad específica de 2.60, porcentaje de absorción del 1.85%, contenido de humedad del 2.58%, y módulo de finura de 2.01. Ver Tabla 5.

**Tabla 5. Granulometría agregado fino:**

<b>N.º Tamiz (in)</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>%Retenido Acumulado</b>	<b>%Pasa</b>
#1/2	12.70	0.00	100.00
#3/8	9.52	0.20	99.80
#4	4.76	1.08	98.92
#10	2.00	2.29	97.71
#20	0.84	6.02	93.98
#40	0.42	27.58	72.42
#60	0.25	73.37	26.63
#100	0.15	90.49	9.51
#200	0.08	97.70	2.30
Fondo	0.00	99.78	0.22

**2.1.9 Cemento (CP):** El cemento CEMEX de uso general (Tipo I), con una densidad de 2.99 (g/cm<sup>3</sup>) determinada mediante la NTC 221.

**2.1.10 Superplastificante (SP):** El superplastificante utilizado fue SIKA Viscocrete 2100, con un contenido de sólidos de 50.50%.

## **2.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta fase se elaboró una base de datos que consta de 80 artículos listados en Microsoft Excel con: título, autor, fecha, revista, palabras clave, *abstract*, *doi*, el material que se usó como reemplazo parcial o total en las mezclas convencionales de CAC y conclusión principal. Se definió un protocolo de búsqueda utilizando los buscadores académicos disponibles como: Google scholar, Science Direct, Scopus, Springer, Scielo, así como otras fuentes de información como la librería digital con la que cuenta la Universidad Industrial de Santander. Adicionalmente, se realizó un análisis a dichos artículos de los resultados obtenidos; considerando algunos ensayos realizados en laboratorio, resistencias a compresión y tracción, aspectos

relevantes encontrados, y los porcentajes óptimos de reemplazo de algunos materiales alternativos recomendados por el autor. También, se estudiaron las normativas y protocolos de los ensayos a realizar a los CAC <sup>13</sup>.

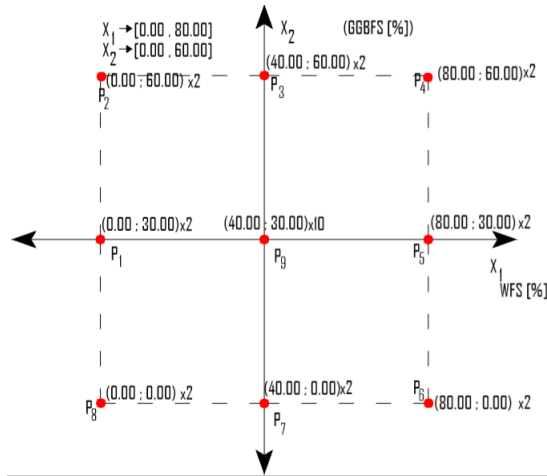
### **2.3 PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO**

La segunda fase se comenzó con el proceso de compras del material requerido por el grupo INME para las investigaciones basadas en CAC tales como: grava, arena, cemento, superplastificante y moldes para elaborar las probetas, luego se realizó el diseño estadístico y el diseño de mezcla, el cual fue elaborado por un integrante del grupo INME, mediante el Software Minitab V.17, utilizando la metodología estadística de diseño de experimentos, con un diseño central compuesto con puntos axiales considerando distintas variables tales como: porcentaje de escoria de alto horno y porcentajes de residuo de arena de fundición. Dichas variables se introducen en el software y se obtienen varios puntos con los porcentajes de reemplazo, arrojando 26 puntos; el central con 9 réplicas y los otros con una réplica como se muestra en la Figura 1.

---

<sup>13</sup> EFNARC, Op. Cit.

**Figura 1. Malla estadística experimental.**



Fuente: Tesis de maestría en redacción del Ing. Sergio Ruiz.

Finalmente, el grupo INME suministró las cantidades de los diseños de mezclas para realizar los ensayos en estado fresco y de esta manera encontrar la dosificación de superplastificante requerida cumpliendo con los parámetros establecidos por EFNARC y por el grupo de investigación para un CAC, los cuales fueron suministrados para dar apoyo en la realización de los ensayos. También, se presentaron informes de las actividades realizadas con registros fotográficos, resultados y anotaciones (Anexo A).

Al tratarse de un concreto autocompactante que utiliza materiales alternativos se hizo uso de aditivo superplastificante con base a la cantidad de material cementante.

A continuación, en la Tabla 6, se muestran las cantidades por  $m^3$  calculadas para cada punto:

**Tabla 6. Cantidades de diseño de mezclas iniciales.**

<b>MEZCLA</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>GGBFS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>AG (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>AF (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>AGUA (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>WFS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>SP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
GGBFS20 % WFS0%	480.0	120.0	668.4	869.1	182.1	0.0	3.1
GGBFS60 % WFS0%	240.0	360.0	655.1	851.7	179.0	0.0	10.4
GGBFS20 % WFS0%	420.0	180.0	657.0	683.5	180.0	170.8	10.4
GGBFS30 % WFS50%	420.0	180.0	653.2	425.1	181.5	425.1	10.4
GGBFS30 % WFS80%	420.0	180.0	650.2	169.1	183.0	676.3	10.4
GGBFS30 % WFS100%	420.0	180.0	648.7	0.0	185.0	842.5	10.4

Fuente: Tesis de maestría en redacción del Ing. Sergio Ruiz.

Las adiciones de SP dadas fueron del 1% de la masa del material cementante, luego se reportaron los comportamientos presentados para definir los límites de reemplazos. Finalmente se calculó en Minitab ® los puntos que indican los porcentajes de reemplazo, basados en los límites obtenidos anteriormente.

Posteriormente se suministraron los nuevos diseños de mezcla, los cuales se realizaron para poder estabilizar, definir las cantidades exactas de superplastificante y reportar si el porcentaje de reemplazo del material alternativo cumple con los requisitos de un CAC establecidos por EFNARC y por el grupo de investigación. Ver Tabla 7.

**Tabla 7. Diseños de mezclas finales**

<b>MEZCLA</b>	<b>CP (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>GGBFS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>AG (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>AF (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>AGUA (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>WFS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>SP (kg/m<sup>3</sup>)</b>
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP1%	514.4	0.0	732.2	895.6	0.0	164.4	10.2
GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	600.0	0.0	545.6	908.9	0.0	186.7	9.5
GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1%	600.0	0.0	545.6	545.6	347.8	201.1	11.9
GGBFS0%WFS50% w/c=0.35 SP1.5%	600.0	0.0	545.6	454.4	186.7	454.4	17.8
GGBFS0%WFS80% w/c=0.35 SP=1.5%	600.0	0.0	545.6	182.2	695.6	211.1	17.8
GGBFS60%WFS40% w/c=0.35 SP1%	240.0	360.0	545.6	545.6	347.8	201.1	11.9
GGBFS30%WFS40% w/c=0.35 SP1%	420.0	180.0	545.6	545.6	347.8	201.1	11.9
GGBFS60%WFS80% w/c=0.3 SP1.5%	240.0	360.0	545.6	182.2	695.6	211.1	17.8
GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	420.0	180.0	545.6	182.2	695.6	211.1	17.8
GGBFS30%WFS0% w/c=0.3 SP0.8%	420.0	180.0	545.6	908.9	0.0	192.2	9.5
GGBFS60%WFS0% w/c=0.3 SP0.8%	240.0	360.0	545.6	908.9	0.0	192.2	9.5

Fuente: Tesis de maestría en redacción del Ing. Sergio Ruiz.

**2.3.1 Proceso De Mezclado** Se empleó una mezcladora con capacidad superior a 300 litros y se mantuvo antes de comenzar cada mezcla en condiciones de humedad superficial constante.

Para las proporciones de mezcla se pesaron las cantidades requeridas de materiales. El proceso de mezclado realizado uniformemente para todas las mezclas fue el siguiente: inicialmente se ligaron en estado seco el agregado grueso, agregado fino y/o residuo de arena de fundición por dos minutos, a continuación, se

agregó el cemento y la escoria de alto horno durante dos minutos, posteriormente se incorporaron los líquidos en dos fases sin detener la mezcladora; una tercera parte conformada por únicamente agua se incorpora durante dos minutos, finalmente se añadieron las dos terceras partes del agua diluidas con la dosis de superplastificante durante cinco minutos, para un tiempo total de mezclado de 11 minutos. Se realizaron los ensayos respectivos en estado fresco, luego se fundieron 4 probetas por mezcla en moldes de 4"x8", se desencofraron a los dos días y posteriormente se curaron en agua hasta el día de la prueba requerida para realizar los ensayos en estado endurecido.

## **2.4. ENSAYOS**

**2.4.1. Ensayos en estado fresco.** Una vez finalizado el proceso de mezclado, inmediatamente se procedió a evaluar la capacidad de llenado del concreto según EFNARC, realizando los ensayos de: slump-flow, T50, J-Ring, L-Box y reómetro; estos ensayos permitieron establecer la fluidez de la mezcla, la viscosidad y la capacidad de fluir a través de las barras de refuerzo que tiene un CAC.

**2.4.1.1. Slump Flow y T50:** Para comenzar, se humedeció el interior del cono y la placa base, esta se colocó en un suelo plano y nivelado, el cono de asentamiento se ubicó de manera central en la placa base y se llenó de concreto y se eliminaron los excesos. Después, el cono se levantó verticalmente para que el concreto fluyera libremente en todas las direcciones. Se midió el diámetro del concreto en dos direcciones perpendiculares un minuto después y se calculó el promedio según ASTM C1611, de manera simultánea se utilizó un cronómetro para saber el tiempo necesario que le tomó al concreto alcanzar 500 mm de diámetro de esparcimiento. Al tener un valor más alto de flujo de asentamiento, mayor será su capacidad de dispersarse bajo su propio peso. Ver Figura 2.

**Figura 2. Ensayo Slump Flow**



**2.4.1.2. J-Ring:** En este ensayo se analizó el comportamiento del CAC en presencia de refuerzos simulados según ASTM C1621. La capacidad de paso y de fluidez, depende del contenido de agregado grueso y la viscosidad de la mezcla. Para realizar este ensayo se usó un cono de asentamiento colocado dentro de un anillo de acero que está conformado por barras verticales de refuerzo. El cono de asentamiento se llenó de concreto y se levantó de manera que permita el paso libre del flujo por el anillo. Se tomó registro de las alturas perpendiculares del anillo dentro y fuera a de él. La diferencia entre la altura promedio del interior y del exterior indica el paso de bloqueo. Los límites aceptables van de 0 a 10 mm establecidos por EFNARC <sup>14</sup>. Ver Figura 3.

**Figura 3. Ensayo J-Ring**



---

<sup>14</sup> Ibíd.

**2.4.1.3. L-Box:** Esta prueba se realizó de acuerdo a los estándares EFNARC, permitiendo que el CAC fluyera a través de unas barras de refuerzo, al abrir una puerta que comunica la sección vertical con la horizontal (formando una L), donde se comparó la altura del concreto al final de la sección horizontal (H1) con la altura del concreto que se mantuvo en la sección vertical (H2), si esta relación (H1/H2) es inferior a 0.8 significa que la viscosidad de la mezcla es demasiado alta causando bloqueos alrededor del refuerzo. En este ensayo se llenó la sección vertical con concreto y se levantó la puerta que no permitía el paso del concreto. Al detenerse el concreto se registraron los valores de las alturas. Ver Figura 4.

**Figura 4. Ensayo L-Box**



**2.4.1.4. Ensayo de reología:** Este ensayo se realizó con el reómetro ICAR RHM-3000 (Centro Internacional de Investigación de Investigación de Agregados), propiedad del grupo INME. Se encontró con este dispositivo el esfuerzo de fluencia estático y la viscosidad plástica de la mezcla de concreto mediante la medición del torque y la velocidad rotacional, que caracterizan las propiedades fundamentales del flujo, ajustándose en el modelo reológico de Bingham. Esta prueba se realizó a las siguientes 3 mezclas para 19 y 21 litros (Tabla 8). Lo primero que se hizo fue llenar el contenedor con concreto y se colocó una hélice en el centro de la mezcla en estado fresco, los parámetros de entrada fueron: la velocidad inicial y final y el

número de puntos, que se ingresaron en el software para poder obtener las gráficas. Ver Figura 5.

**Figura 5. Reómetro ICAR.**



**Tabla 8. Diseño de mezcla para reómetro, J-Ring y L-Box.**

MEZCLA	CP (kg/m <sup>3</sup> )	GGBFS (kg/m <sup>3</sup> )	AG (kg/m <sup>3</sup> )	AF (kg/m <sup>3</sup> )	AGUA (kg/m <sup>3</sup> )	WFS (kg/m <sup>3</sup> )	SP (kg/m <sup>3</sup> )
GGBFS0% WFS0% w/c=0.3 SP0.6%	600.0	0.0	545.3	908.4	0.0	186.3	9.5
GGBFS0% WFS40% w/c=0.3 SP1.1%	600.0	0.0	545.2	545.2	348.1	201.4	13.1
GGBFS30% WFS80% w/c=0.3 SP1.2%	420.0	180.0	545.3	181.6	695.8	211.1	14.3

Fuente: Tesis de maestría en redacción del Ing. Sergio Ruiz.

**2.4.2. Ensayos en estado endurecido:** Las probetas cilíndricas utilizadas para estos ensayos fueron de 4" x 8" (101.6 mm de diámetro y 203.2 mm de altura). Se fundieron 4 probetas por mezcla, con el objetivo de ahorrar material, ya que este se encontraba cuantificado para realizar la estabilización de las mezclas. Las muestras

fueron desencofradas 48 horas después de fundidas y en seguida se sometieron al proceso de curado en agua. Al cumplir las edades de curado establecidas se ejecutaron ensayos como: compresión uniaxial (2 probetas a los 7 y 14 días), tracción indirecta (1 probeta a los 7 días) y conductividad eléctrica aparente (1 probeta).

**2.4.2.1. Compresión Uniaxial:** Con este ensayo se determinó la resistencia a la compresión según ASTM C39, de los especímenes cilíndricos de concreto a los 7 y 14 días y como se esperaba la resistencia a la compresión de todos los concretos autocompactantes aumentó con la edad de curado. Ver Figura 6.

**Figura 6. Compresión uniaxial**



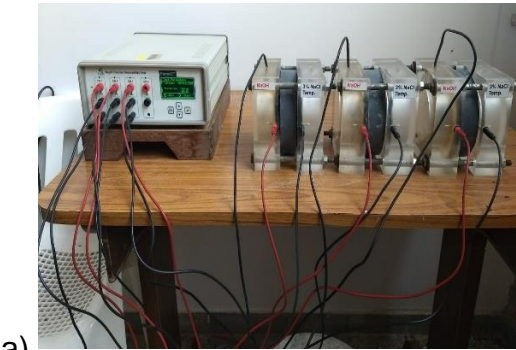
**2.4.2.2. Tracción indirecta:** Este ensayo consistió en someter a compresión las probetas de manera horizontal, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de la sección transversal y longitudinal que se encuentran opuestas hasta alcanzar la carga máxima, la cual fue registrada según ASTM C1760. Ver Figura 7.

**Figura 7. Tracción indirecta.**



**2.4.2.3. Conductividad eléctrica aparente:** Esta prueba indicó la resistencia a la penetración de iones de cloruro por difusión y otros iones según ASTM C1760, midiendo la corriente que pasa a través de la sección de prueba durante un minuto. El ensayo se realizó a los 14 días de curado en agua a las muestras realizadas de 100 mm x 200 mm y se cortaron en 4 secciones de 100mm x 30mm, se desecharon los extremos conservando la parte central. La diferencia de potencial mantenida fue de 60 V, las superficies se sometieron en contacto con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3%, preparada en el laboratorio y se midió la conductividad eléctrica durante un minuto. Ver Figura 8.

**Figura 8. (a) Conductividad eléctrica aparente (b) Secciones de 100 mm x 30 mm.**



a)



b)

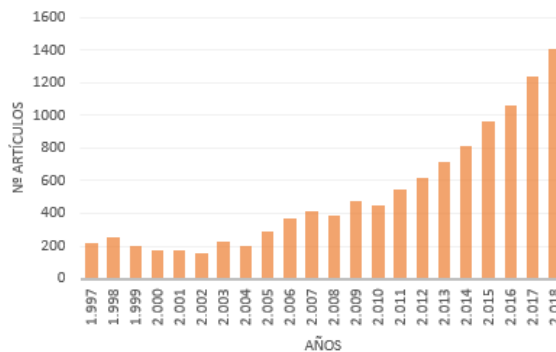
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 BASE DE DATOS

Esta etapa dio utilidad en las investigaciones realizadas por el grupo INME, ya que con esta base de datos se lograron predecir algunos comportamientos tales como resistencias a compresión y tracción de las mezclas, para así encontrar los límites de los reemplazos del residuo de arena de fundición y escoria de alto horno.

El concreto autocompactante con reemplazos de materiales alternativos, en las últimas décadas ha tenido un aumento de manera exponencial en las investigaciones (Ver Figura 9), debido a los materiales inusuales que lo componen. La mayoría de los investigadores se han dedicado a encontrar los porcentajes óptimos de reemplazo y el comportamiento que presentan las mezclas con estos materiales. La base de datos se realizó con el propósito de dar posibles ideas de lo que se puede esperar de un CAC modificado.

**Figura 9. Publicaciones de artículos de investigación en CAC.**



Fuente: SCIENCE DIRECT.

En la Figura 9 se observa el crecimiento exponencial que ha tenido la publicación de artículos de investigación relacionados con CAC con el avance del tiempo.

En la base de datos se encuentran algunos materiales de reemplazos que se han implementado en mezclas binarias, ternarias y cuaternarias. (Anexo B). Se observó que las cenizas volantes como reemplazo parcial del cemento es uno de los materiales más utilizado, seguido de las escorias. En esta búsqueda, la información fue nula respecto al uso conjunto de escoria de alto horno y residuo de arena de fundición como reemplazos. Esto indica que las investigaciones realizadas por el grupo INME relacionadas con estos materiales de reemplazo generarán un impacto a futuros investigadores.

En los artículos que componen la base de datos se encontró lo siguiente:

- La cantidad de superplastificante adicionado a las mezclas estuvo entre 0.24% y 3.50% de la masa del material cementante, relación w/c entre 0.30 y 0.47 y los tiempos de mezclado fueron de 5 a 11 minutos.
- Las cenizas volantes han tenido un reemplazo entre el 20% al 50% de la masa del cemento, el humo de sílice se reemplazó de un 10 al 15% de la masa del cemento, el residuo de arena de fundición del 10% al 60% de la masa de la arena natural y la escoria de alto horno ha sido reemplazada entre un 15% al 60% de la masa del cemento.
- Las resistencias a compresión en CAC más altas presentadas a los 28 días fueron con los siguientes reemplazos del material cementante: nano-partículas de sílice y micro sílice alcanzaron 82.2 MPa con 3.50% <sup>15</sup>11], 94 MPa con 10%

---

<sup>15</sup> SÁNCHEZ E., BERNAL J., LEÓN N. and MORAGUES A.. "Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice", Revista ALCONPAT, vol. 6, No 1, 2016, pp. 1-14

de cenizas volantes <sup>16</sup> y 94.6 MPa con 20% de escoria granulada de alto horno <sup>17</sup> y a tracción las nano-partículas de sílice y micro sílice arrojaron 6.70 MPa con 3.50% de reemplazo.

- Adiciones tales como: material volcánico de Tolima, vidrio reciclado y residuos de demolición han sido investigados para ser utilizados como reemplazo parcial del cemento en la producción de CAC, sin embargo, recomiendan realizar ensayos a largo plazo (mayores a 28 días), ya que este tipo de materiales no siempre presenta las mismas propiedades y típicamente muestran una ganancia de fuerza lenta <sup>18 19</sup>.
- Los CAC que poseen reemplazos de alto volumen hechos con mezclas ternarias y cuaternarias que reemplazan el cemento pueden tener una penetrabilidad de iones de cloruro más baja que los que poseen únicamente CP <sup>20</sup>.
- Las cenizas volantes mejoran las propiedades reológicas y reducen el potencial de agrietamiento, debido a que reducen el calor de hidratación del cemento <sup>21</sup>.
- La resistencia a la compresión a los 28 días de la sustitución del 100% del cemento por escoria de alto horno fue de 7 MPa comparada con la mezcla de

---

<sup>16</sup> HAQUE M. and KAYALI O., "Properties of high-strength concrete using a fine fly ash", Cement and Concrete Research, vol. 28, No. 10, pp. 1445-1452

<sup>17</sup> DINAKAR P., SETHY K. and SAHOO U.. "Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag", Materials & Design, vol. 43, 2013, pp. 161-169

<sup>18</sup> URREGO S., ROBAYO Y., MATTEY R., CENTENO P. y DELVASTO S., "Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición", Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, vol. 35, No. 1, 2015, pp. 86-94

<sup>19</sup> KOU S. and POON C.. "Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate", Cement and Concrete Composites, vol. 31, No. (2), 2009, pp. 107-113

<sup>20</sup> NEHDI M., PARDHAN M. and KOSHOWSKI S.. "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements", Cement and Concrete Research, vol. 34 No. 11, 2004, pp. 2103-2112

<sup>21</sup> SIDDIQUE R.. "Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash", Materials & Design, vol. 32, No. 3, 2011, pp. 1501-1507

control (0% de escoria de alto horno), la cual presentó 80 MPa a los 28 días, lo que indica que es necesario que exista algo de cemento en el aglutinante <sup>22</sup>.

- En la revisión de los artículos que componen la base de datos, los investigadores encontraron una buena trabajabilidad en mezclas con reemplazos por separado de:
  1. Hasta el 80% de arena de río por residuo de arena de fundición.
  2. Hasta el 60% de cemento Portland por escoria de alto horno.

A continuación, se muestran los ensayos realizados a las muestras del grupo INME en estado fresco y endurecido:

### 3.2 ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

**3.2.1 Slump y T50:** En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos para las mezclas iniciales con relación w/c de 0.3, en las cuales se establecieron los límites con la clasificación según los parámetros establecidos por EFNARC (Anexo C). Ver Tabla 9.

**Tabla 9. Resultados Slump y T50 para mezclas iniciales.**

MEZCLA	Diámetro(cm)	T50(s)	Clasificación
GGBFS20%WFS0%	73.33	4	SF2
GGBFS60%WFS0%	69.33	9	SF2
GGBFS20%WFS0%	78.5	8	SF3
GGBFS30%WFS50%	65.33	-	Poca capacidad para fluir

<sup>22</sup> HANNESSON G., KUDER K., SHOGREN R, and LEHMAN D.. “The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete”, Construction and Building Materials, vol. 30, 2012, pp. 161-168

<b>MEZCLA</b>	<b>Diámetro(cm)</b>	<b>T50(s)</b>	<b>Clasificación</b>
GGBFS30%WFS80%	75.83	-	Poca capacidad para fluir
GGBFS30%WFS100%	62	-	Poca capacidad para fluir

Se analizaron los resultados y comportamientos obtenidos de los diseños de mezcla de la Tabla 9 para definir los máximos y mínimos de porcentajes de reemplazo del residuo de arena de fundición y escoria de alto horno.

Se observó que al aumentar el porcentaje de residuo de arena de fundición las mezclas perdieron trabajabilidad y presentaron viscosidad alta <sup>23</sup>18]. Se realizaron repeticiones de las mezclas con dosificaciones extra de SP y más tiempo en el proceso de mezclado mejorando su fluidez, pero saliendo de las recomendaciones del proveedor agregando hasta 2.2% de la masa del material cementante. Finalmente, el grupo INME optó por aumentar la relación w/c a 0.35 para lograr la trabajabilidad necesaria sin exceder los límites de SP. Con este aumento se presentaron mejoras en aspectos como trabajabilidad y fluidez de las mezclas.

A continuación, se presentan los resultados para las mezclas finales (mezclas ya estabilizadas), las cuales se realizaron variando la cantidad de SP hasta encontrar el porcentaje óptimo mostrado en la Tabla 10, donde se evidencia que todas las mezclas presentan muy buena fluidez. Se observó que al aumentar la relación w/c el flujo de asentamiento aumentó y disminuyó el tiempo en alcanzar 50 cm de esparcimiento y se garantizó que cumpliera con los límites propuestos por EFNARC y por el grupo de investigación, demostrando que las mezclas se comportan como un concreto autocompactante.

---

<sup>23</sup> Ibíd.

**Tabla 10. Resultados Ensayos Slump y T50 para mezclas finales estabilizadas.**

MEZCLA	Diámetro (cm)	T50 (s)	Clasificación
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP1%	67.83	4	SF2
GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	79.80	3	SF3
GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1%	72.70	7	SF2
GGBFS0%WFS50% w/c=0.35 SP1.5%	65.00	2	SF1
GGBFS0%WFS80% w/c=0.35 SP=1.5%	64.00	7	SF1
GGBFS60%WFS40% w/c=0.35 SP1%	81.80	2	SF3
GGBFS30%WFS40% w/c=0.35 SP1%	84.20	2	SF3
GGBFS60%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	83.00	2	SF3
GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	84.10	7	SF3
GGBFS30%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	70.30	7	SF2
GGBFS60%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	75.20	7	SF2

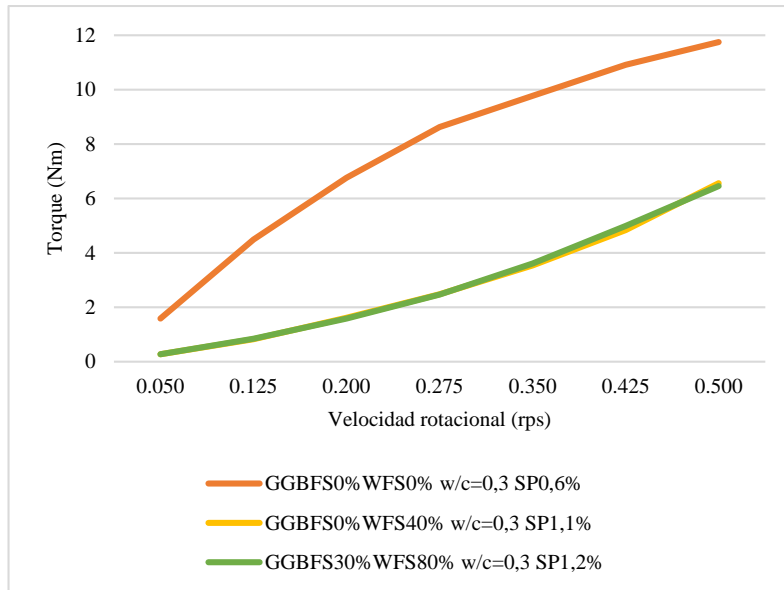
**3.2.2 J-Ring y L-Box:** En la Tabla 11 se muestran los resultados de los 3 ensayos realizados, en J-Ring se midieron las diferencias de las alturas del concreto al interior de las barras y al exterior de las mismas, donde se observa que la capacidad de paso aumentó con adición simultánea de escoria de alto horno y el residuo de arena de fundición y con la adición de únicamente residuo de arena de fundición.

**Tabla 11. Resultados Ensayos J-Ring y L-Box**

MEZCLA	J-Ring (mm)	L-Box
GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.6%	1.3	0.82
GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1.1%	1.5	0.96
GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.2%	3.5	0.98

**3.2.3 Reología:** A continuación, se presentan los resultados en la Tabla 12, de los 3 ensayos obtenidos mediante el reómetro ICAR (Figura 4), observando las diferencias de comportamiento con la incorporación de GGBFS y WFS. Ver Figura 10.

**Figura 10. Curva de flujo**



Los datos obtenidos del reómetro indicaron que la utilización de residuo de arena de fundición y escoria disminuyó los valores de torque cuando las velocidades de rotación eran iguales para cada mezcla.

En la Tabla 12 están relacionados los parámetros relativos arrojados con el ajuste del modelo de Bingham.

**Tabla 12. Resultados parámetros relativos.**

MEZCLA	Valor de fluencia (Nm)	Valor de viscosidad (Nm-s)	R <sup>2</sup>
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP0.6%	1.63	22.08	0.95
GGBFS0%WFS40% w/c=0.3 SP1.1%	-0.89	13.72	0.97
GGBFS30%WFS80% w/c=0.3 SP1.2%	-0.89	13.74	0.97

En la Tabla 13 se muestran los parámetros fundamentales calculados en función del modelo de Bingham.

**Tabla 13. Resultados parámetros fundamentales.**

<b>MEZCLA</b>	<b>Esfuerzo de fluencia dinámico (Pa)</b>	<b>Viscosidad plástica (Pa-s)</b>
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP0.6%	428.1	379.4
GGBFS0%WFS40% w/c=0.3 SP1.1%	0.1	228.3
GGBFS30%WFS80% w/c=0.3 SP1.2%	0.1	228.8

En la Tabla 13 y 14 se puede observar que al implementar en las mezclas GGBFS y WFS de forma simultánea y WFS únicamente en diferentes porcentajes de reemplazo disminuye el esfuerzo de fluencia dinámico y la viscosidad plástica.

Cabe señalar que el valor mínimo del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) obtenido en la determinación de los parámetros reológicos según el modelo de Bingham es muy próximo a 1 (Ver Tabla 12), por lo tanto, se puede afirmar que el comportamiento reológico de las mezclas con GGBFS y WFS se ajusta adecuadamente al modelo de Bingham.

### **3.3 ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO**

Estos ensayos se realizaron con el único objetivo de observar un comportamiento de manera anticipada de WFS y GGBFS para posteriormente efectuarlo a gran escala en las investigaciones del grupo INME.

**3.3.1 Resistencia a la compresión uniaxial** En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la compresión a los 7 y 14 días. Se observó que al disminuir la relación w/c la resistencia disminuyó considerablemente, y que al aumentar únicamente el porcentaje de GGBFS las resistencias superaron las de la mezcla sin reemplazo alguno, el mejor comportamiento lo tuvo la mezcla GGBFS60%WFS0% alcanzando 33.14 MPa a los 7 días y 45 MPa a los 14 días, las

mezclas que contenían únicamente GGBFS entre 30% y 60% presentaron las mejores resistencias, estos resultados están de acuerdo con lo encontrado en la revisión de la literatura <sup>24</sup>, donde se evidencia que la adición de escoria de alto horno proporciona mayores o similares resistencias a las de un concreto convencional.

Al aumentar únicamente el porcentaje de WFS las resistencias disminuyeron significativamente a los 7 y 14 días arrojando los valores menores de resistencia como lo es la mezcla GGBFS0%WFS80% con 12.68 MPa a los 7 días y 17.08 MPa a los 14 días.

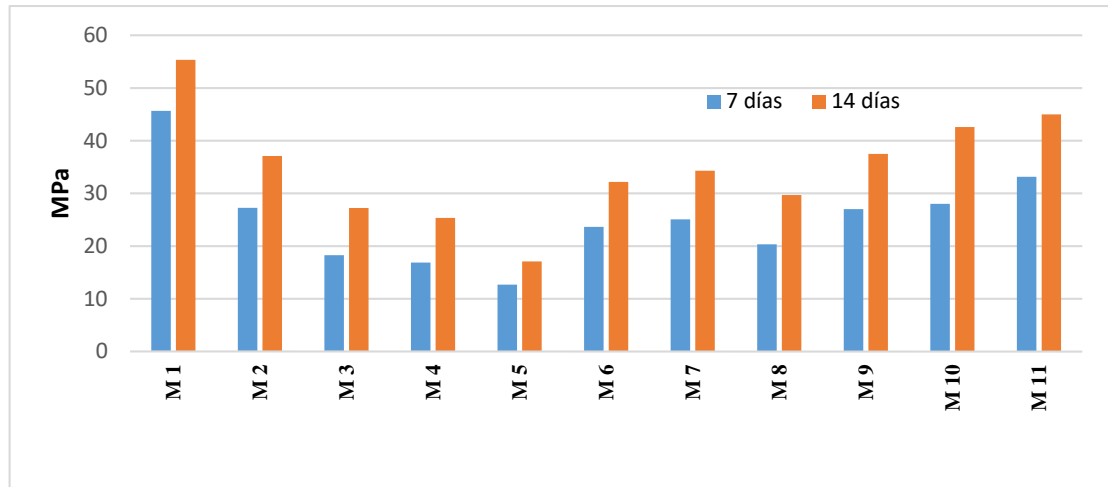
Para los resultados de compresión uniaxial (Figura 11) y tracción indirecta (Figura 12) se usará la siguiente nomenclatura:

- M1: GGBFS0%WFS0% w/c=0.30 SP1.00%.
- M2: GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.80%.
- M3: GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1.00%.
- M4: GGBFS0%WFS50% w/c=0.35 SP1.50%.
- M5: GGBFS0%WFS80% w/c=0.35 SP=1.50%.
- M6: GGBFS60%WFS40% w/c=0.35 SP1.00%.
- M7: GGBFS30%WFS40% w/c=0.35 SP1.00%.
- M8: GGBFS60%WFS80% w/c=0.35 SP1.50%.
- M9: GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.50%.
- M10: GGBFS30%WFS0% w/c=0.35 SP0.80%.
- M11: GGBFS60%WFS0% w/c=0.35 SP0.80%.

---

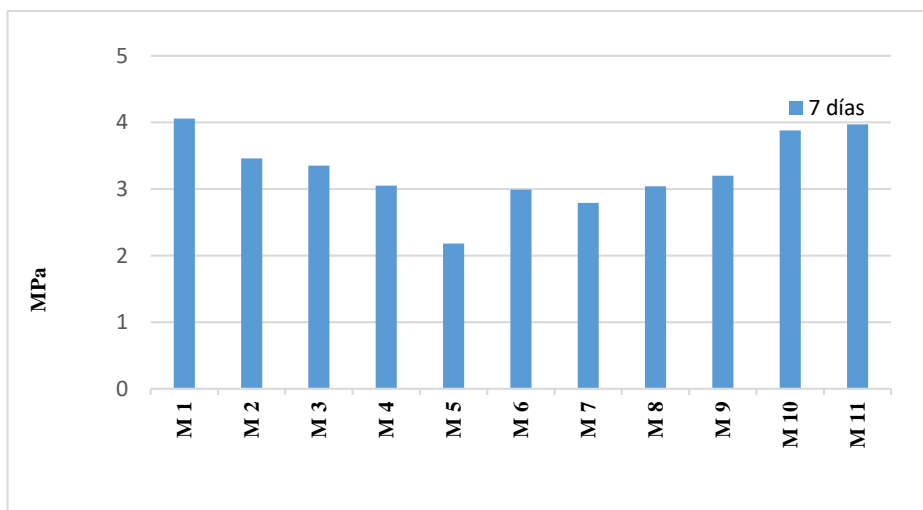
<sup>24</sup> Ibíd.

**Figura 11. Resistencias a la compresión uniaxial.**



**3.3.2 Tracción indirecta** La resistencia a tracción indirecta está en concordancia con la resistencia a compresión. Mediante este ensayo se comprobó que al tener una relación w/c mayor, la resistencia a tracción fue inferior. El mejor comportamiento presentado fue el de la mezcla GGBFS60%WFS0% 3.9 MPa a los 7 días (Ver Figura 12).

**Figura 12. Resistencia a la tracción indirecta.**



Al momento de realizar este ensayo se observó que algunas mezclas presentaron una distribución no uniforme de sus agregados con una capa de aproximadamente 3.5 cm donde no se tiene presencia de agregado grueso y una capa de aproximadamente 3 mm de superplastificante, lo que indica segregación y sangrado del CAC.

Con base a esta observación el grupo INME tomó unas decisiones para eliminar este problema que se encuentran plasmadas en las conclusiones.

**Figura 13. Muestra sometida a tracción indirecta.**



**3.3.3 Conductividad eléctrica** En la Tabla 14 se presentan los resultados del ensayo de conductividad eléctrica a los 14 días para todas las muestras. A mayor porcentaje de WFS la conductividad eléctrica aumentó. La mezcla que posee menos conductividad eléctrica fue GGBFS0%WFS80% con 14.71 mS/m.

**Tabla 14. Conductividad eléctrica.**

MEZCLA	Conductividad eléctrica mS/m
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP1%	Over current
GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	Over current
GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1%	Over current

<b>MEZCLA</b>	<b>Conductividad eléctrica mS/m</b>
GGBFS0%WFS50% w/c=0.35 SP1.5%	15.14
GGBFS0%WFS80% w/c=0.35 SP=1.5%	14.71
GGBFS60%WFS40% w/c=0.35 SP1%	14.93
GGBFS30%WFS40% w/c=0.35 SP1%	Over current
GGBFS60%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	19.19
GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	Over current
GGBFS30%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	Over current
GGBFS60%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	Over current

Es probable que algunas muestras arrojaran “Over current” debido a que a la edad a la que se realizó el ensayo (7 días), los productos de hidratación aún no se habían desarrollado y la muestra contenía agua libre.

## 4. CONCLUSIONES

Conclusiones respecto a ensayos realizados en estado fresco y endurecido a las muestras del grupo INME:

- Los imprevistos presentados durante las actividades relacionadas con ensayos de laboratorio y elaboración de muestras, favorecieron el desarrollo de habilidades en la resolución de problemas y toma de decisiones, para una mejor planificación y coordinación en las demás investigaciones.
- Se logró definir las cantidades exactas para la estabilización de las mezclas cumpliendo con EFNARC, con una relación w/c de 0.35, para así facilitar y programar con precisión la realización de las investigaciones del grupo INME en los ensayos propuestos y sus respectivos tiempos de realización.
- Las mezclas presentaron valores entre 640 mm y 842 mm para flujo de asentamiento, y entre 2 s y 7 s para T50, indicando que se ajustan para ser aplicadas en estructuras altamente reforzadas según EFNARC.
- Por medio de los ensayos preliminares realizados, se determinó que al aumentar la relación w/c disminuye la resistencia a compresión y a la tracción, pero el flujo de asentamiento, T50, capacidad de paso y reología aumentan significativamente, mejorando sus propiedades de trabajabilidad.
- Al reemplazar la arena natural de río por residuo de arena de fundición en su totalidad (100%), se observó que la mezcla perdió fluidez y no cumplió con los parámetros establecidos por EFNARC y se encontró que el reemplazo máximo trabajable en esta investigación fue del 80% de la masa del material cementicio.

- La mezcla que presentó mayor resistencia a la compresión y a la tracción fue GGBFS60%WFS0% w/c=0.35 SP0.0% con valores de compresión de 33.1 MPa a los 7 días, 45 MPa a los 14 días respectivamente y 3.9 MPa a tracción a los 7 días. Estos resultados se usaron en el grupo INME con el único fin de observar el comportamiento de manera preliminar de las mezclas en estado fresco y endurecido.
- Se observó que la capacidad de paso aumentó con la incorporación de escoria de alto horno y el residuo de arena de fundición en distintos porcentajes, así como el esfuerzo de fluencia dinámico y la viscosidad plástica disminuyeron con el aumento de los mismos.
- Se comprobó que sí es posible la realización de CAC con materiales alternativos de reemplazo como residuo de arena de fundición y escoria de alto horno, comprobando que se elimina la necesidad de compactación al colocar el concreto fresco, cumpliendo con los parámetros establecidos por EFNARC, siendo una solución necesaria para reducir el impacto ambiental que genera la explotación de los recursos naturales utilizados en las mezclas convencionales, y que el uso del superplastificante es necesario para producir una mezcla de concreto altamente fluido.
- Debido a que la segregación y el sangrado observado no se presentaron en los ensayos en estado fresco sino en los ensayos en estado endurecido de tracción indirecta, el grupo INME decidió aumentar la relación w/c de 0.35 a 0.40 y disminuir la cantidad de superplastificante. Por esta razón el grupo INME se encuentra actualmente trabajando en dar una solución definitiva a estos problemas.

Conclusiones respecto a la base de datos realizada:

- De acuerdo a los resultados obtenidos de los artículos que componen la base de datos, los concretos que poseen reemplazos con escoria granulada de alto horno presentan resistencias más altas que los reemplazos realizados con cenizas volantes.
- La incorporación de escoria (entre 30 y 60% de reemplazo del cemento Portland) en los CAC ayudó a que las mezclas presentaran mayor fluidez.
- Los artículos que utilizaron como reemplazos nanopartículas de sílice presentaron aumentos significativos en la resistencia a compresión, pero una disminución en su módulo de elasticidad, lo que conlleva a mezclas con menor ductilidad, así como al aumentar su porcentaje de reemplazo, disminuye su capacidad de paso por obstáculos.
- Adiciones tales como: material volcánico de Tolima, vidrio reciclado y residuos de demolición han sido investigados para ser utilizados como reemplazo parcial del cemento en la producción de CAC, sin embargo, recomiendan realizar ensayos a largo plazo, ya que este tipo de materiales no siempre presenta las mismas propiedades y típicamente muestran una ganancia de fuerza lenta <sup>25</sup> <sup>26</sup>.
- Los CAC que poseen reemplazos de alto volumen hechos con mezclas ternarias y cuaternarias que reemplazan el cemento pueden tener una penetrabilidad de iones de cloruro más baja que los que poseen únicamente cemento <sup>27</sup>.

---

<sup>25</sup> URREGO S., ROBAYO Y., MATTEY R., CENTENO P. y DELVASTO S., Op. Cit.

<sup>26</sup> KOU S. and POON C.. Op. Cit.

<sup>27</sup> NEHDI M., PARDHAN M. and KOSHOWSKI S. Op. Cit.

## BIBLIOGRAFÍA

BURÓN M., FERNÁNDEZ J. y GARRIDO L., “Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización”, IECA instituto español del cemento y sus aplicaciones, vol. 887, 2006, pp. 52-64.

DINAKAR P., BABU K., and SANTHANAM M. “Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes”, Cement and concrete composites, vol. 30, No. 10, 2008, pp. 880-886.

DINAKAR P., SETHY K. and SAHOO U.. “Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag”, Materials & Design, vol. 43, 2013, pp. 161-169.

EFNARC, “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete,” 2002 y 2005.

HANNESSON G., KUDER K.. SHOGREN R, and LEHMAN D.. “The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete”, Construction and Building Materials, vol. 30, 2012, pp. 161-168.

HAQUE M. and KAYALI O., “Properties of high-strength concrete using a fine fly ash”, Cement and Concrete Research, vol. 28. No. 10, pp. 1445-1452.

KOU S. and POON C.. “Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate”, Cement and Concrete Composites, vol. 31, No. (2), 2009, pp. 107-113.

NEHDI M., PARDHAN M. and KOSHOWSKI S.. “Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements”, *Cement and Concrete Research*, vol. 34 No. 11, 2004, pp. 2103-2112.

NIETO D. Estudio de hormigón autocompactante con árido reciclado (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, 2015.

RAMANATHAN P., BASKAR I., MUTHUPRIYA P., and VENKATASUBRAMANI R.. “Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures”. *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 17, No. 2, 2013, pp. 465-472.

ŞAHMARAN M., LACHEMI M., ERDEM T. and YÜCEL H.. “Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete”, *Materials and Structures*, vol. 44, No. 7, 2010, pp. 1193-1204.

SÁNCHEZ E., BERNAL J., LEÓN N. and MORAGUES A.. “Propiedades reológicas y mecánicas de un hormigón autocompactante con adición de nano-sílice y micro-sílice”, *Revista ALCONPAT*, vol. 6, No 1, 2016, pp. 1-14.

SIDDIQUE R.. “Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash”, *Materials & Design*, vol. 32, No. 3, 2011, pp. 1501-1507.

SIDDIQUE, R. *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Germany: Springer, 2008.

URREGO S., ROBAYO Y., MATTEY R., CENTENO P. y DELVASTO S., “Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición”, *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 35, No. 1, 2015, pp. 86-94.

WRAY P.. "Straight talk with Karen Scrivener on cements, CO2 and sustainable development". American Ceramic Society bulletin, vol. 91, No 5, 2012, pp. 47-50.

ZHAO H., SUN W., WU X. and GAO B.. "The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures", Journal of Cleaner Production, vol. 95, 2015, pp. 66-74.

## ANEXOS

### Anexo A. Informes

- PRIMER INFORME

A continuación, se presentan las caracterizaciones realizadas a los materiales de acuerdo con la normativa para elaborar el diseño de mezcla.

Tablas de densidades del cemento Portland y escoria de alto horno:

Densidad cemento		
Lectura inicial	0.2	ml
Lectura final	21.8	ml
Muestra	64	g
Densidad	2.96	$g/cm^3$

Densidad escoria de alto horno		
Lectura inicial	0.6	ml
Lectura final	23.5	ml
Muestra	64	g
Densidad	2.79	$g/cm^3$

Tablas de peso unitario. porcentaje de absorción y vacíos:

Grava (Agregado grueso)		
Peso muestra SSS en el aire	5000	g
Peso canasta sumergida en agua	1810	g
Peso canasta + muestra SSS sumergida en agua	4900	g
Peso muestra en agua	3090	g
Peso de la muestra secada en el horno	4920.1	g
Gravedad específica real	2.68	

<b>Grava (Agregado grueso)</b>		
Gravedad especifica aparente	2.57	
Gravedad especifica aparente SSS	2.61	*
Peso unitario		
Peso del medidor + vidrio	3042	kg
Peso del medidor + vidrio + agua	5862	kg
Volumen del medidor	2.82	dcm <sup>3</sup>
Peso del medidor vacío	2555	g
Peso del medidor + material SSS compactado	6788.8	g
Peso del medidor + material SSS suelto	6424.8	g
Peso unitario del agregado SSS compactado	1501.34	kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario del agregado SSS suelto	1372.26	kg/m <sup>3</sup>
% de absorción	1.62	%
% de vacíos	42.64	%

<b>Arena (Agregado fino)</b>		
Peso del frasco + agua hasta la marca en aire	653.3	g
Peso de la muestra SSS en aire	500	g
Peso muestra en frasco y agua hasta la marca	963.5	g
Peso muestra secada al horno	491.3	g
Gravedad especifica real	2.71	
Gravedad especifica aparente	2.58	
Gravedad especifica aparente SSS	2.63	*
Peso unitario		
Peso del medidor + vidrio	3042	kg
Peso del medidor + vidrio + agua	5862	kg
Volumen del medidor	2.82	dcm <sup>3</sup>
Peso del medidor vacío	2555	g
Peso del medidor + material SSS compactado	6803	g
Peso del medidor + material SSS suelto	6299	g
Peso unitario del agregado SSS compactado	1506.38	kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario del agregado SSS suelto	1327.65	kg/m <sup>3</sup>
% de absorción	1.77	%
% de vacíos	42.81	%

Residuo de arena de fundición		
Peso del frasco + agua hasta la marca en aire	652.9	g
Peso de la muestra SSS en aire	250	g
Peso muestra en frasco y agua hasta la marca	801.4	g
Peso muestra secada al horno	242.4	g
Gravedad especifica real	2.58	
Gravedad especifica aparente	2.38	
Gravedad especifica aparente SSS	2.46	*E
Peso unitario		
Peso del medidor + vidrio	3042	kg
Peso del medidor + vidrio + agua	5863	kg
Volumen del medidor	2.821	dcm <sup>3</sup>
Peso del medidor vacío	2555	g
Peso del medidor + material SSS compactado	6115.2	g
Peso del medidor + material SSS suelto	5707.8	g
Peso unitario del agregado SSS compactado	1262.03	kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario del agregado SSS suelto	1117.61	kg/m <sup>3</sup>
% de absorción	3.13	%
% de vacíos	48.76	%

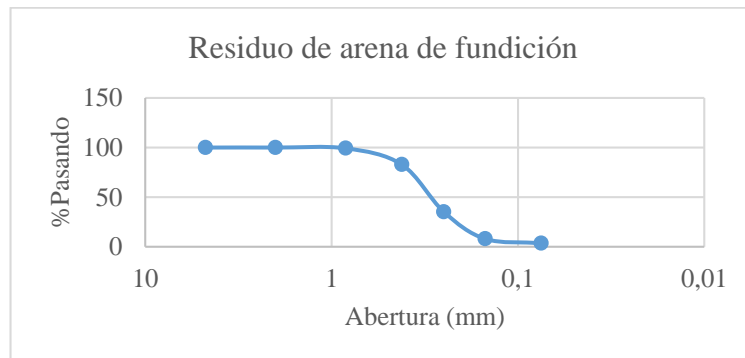
Tablas de granulometrías

Residuo de arena de fundición			
Tamiz	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
#4	4.75	0	100
#10	2	0	100
#20	0.84	0.77	99.23
#40	0.42	17.19	82.81
#60	0.25	64.8	35.2
#100	0.15	92	8
#200	0.075	96.36	3.64
Fondo	0	99.82	0.18

Grava			
Tamiz	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
3/4"	19.1	1.60	98.40
1/2"	12.7	3.24	96.76
3/8"	9.52	9.87	90.13
Nº4	4.76	86.66	13.34
Fondo	0	99.62	0.38

Arena			
Tamiz	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
#4	4.76	0.95	99.05
#8	2.38	3.14	96.86
#16	1.19	7.01	92.99
#30	0.595	23.42	76.58
#50	0.297	83.99	16.01
#100	0.149	98.44	1.56
Fondo	0	99.88	0.12

Gráficas de granulometrías:



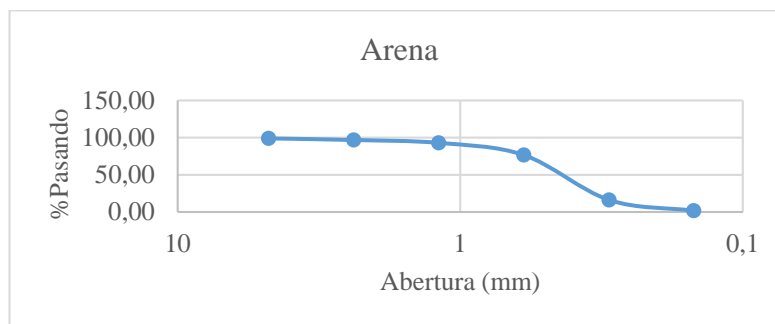
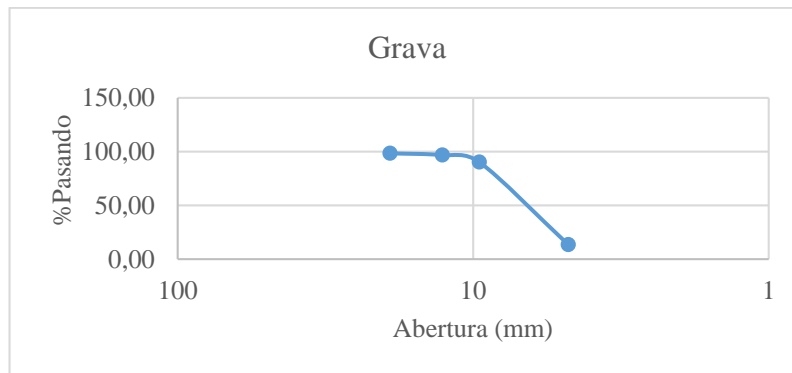


Tabla de humedad superficial de la grava:

Grava		
Peso inicial	1500	g
Peso seco	1495	g
% de absorción	1.62	%
Humedad superficial	0.33	%

Tabla de contenido de sólidos del superplastificante:

Sika Viscocrete 2100		
Peso de recipiente	109.8	g
Peso de recipiente + muestra	184.5	g
Peso de la muestra	74.7	g
Peso recipiente + muestra seca	141.5	g
Peso muestra seca	31.7	g
Contenido de sólidos %	57.56	%

- **SEGUNDO INFORME**

En una presentación en PowerPoint se anexaron los videos de las mezclas realizadas para calcular el tiempo que tarda en alcanzar los 50 cm de esparcimiento. A continuación, se muestran las tablas con los comentarios observados de las mezclas para establecer los límites de los porcentajes de GGBFS y WFS.

<b>MEZCLA</b>	<b>Diámetro(cm)</b>	<b>T50(s)</b>	<b>Comentarios</b>
GGBFS20%WFS0%	73.33	4	Cumplió con los parámetros establecidos por EFNARC
GGBFS60%WFS0%	69.33	9	Presentó viscosidad alta
GGBFS20%WFS0%	78.5	8	Tuvo tiempo extra de mezclado y viscosidad alta
GGBFS30%WFS50%	65.33	-	Tuvo tiempo extra de mezclado y viscosidad alta
GGBFS30%WFS80%	75.83	-	Tiempo extra de mezclado y 1,27% más de SP
GGBFS30%WFS100%	62	-	No tuvo capacidad de fluir

También, se realizó el proceso de la compra del material requerido por el grupo INME para investigaciones realizadas acerca de concretos autocompactantes con todos los requerimientos exigidos por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión para la elección del proveedor.

- **TERCER INFORME**

A continuación, se presentan las caracterizaciones realizadas a los nuevos materiales siguiendo las respectivas normas para elaborar el nuevo diseño de mezcla.

Tablas de densidades del cemento Portland y escoria de alto horno:

Densidad cemento		
Lectura inicial	0,5	ml
Lectura final	21.9	ml
Muestra	64	g
Densidad	2.99	$g/cm^3$

Densidad escoria de alto horno		
Lectura inicial	0,4	ml
Lectura final	23.4	ml
Muestra	64	g
Densidad	2.78	$g/cm^3$

Tablas de peso unitario, porcentaje de absorción y vacíos:

Grava (Agregado grueso)		
Peso muestra SSS en el aire	4283	g
Peso canasta sumergida en agua	1810	g
Peso canasta + muestra SSS sumergida en agua	4460	g
Peso muestra en agua	2650	g
Peso de la muestra secada en el horno	4189	g
Gravedad especifica real	2.72	
Gravedad especifica aparente	2.56	
Gravedad especifica aparente SSS	2.62	*
Peso unitario		
Peso del medidor + vidrio	3042	kg
Peso del medidor + vidrio + agua	5862	kg
Volumen del medidor	2.82	$dcm^3$
Peso del medidor vacío	2555	g
Peso del medidor + material SSS compactado	6768.03	g
Peso unitario del agregado SSS compactado	1493.98	$kg/m^3$
% de absorción	1.62	%
% de vacíos	42.64	%

<b>Arena (Agregado fino)</b>		
Peso del frasco + agua hasta la marca en aire	623.1	g
Peso de la muestra SSS en aire	500	g
Peso muestra en frasco y agua hasta la marca	930.6	g
Peso muestra secada al horno	490.9	g
Gravedad especifica real	2.67	
Gravedad especifica aparente	2.55	
Gravedad especifica aparente SSS	2.59	*
<b>Peso unitario</b>		
Peso del medidor + vidrio	3042	kg
Peso del medidor + vidrio + agua	5862	kg
Volumen del medidor	2.82	dcm <sup>3</sup>
Peso del medidor vacío	2555	g
Peso del medidor + material SSS compactado	6623.86	g
Peso del medidor + material SSS suelto	6364.50	g
Peso unitario del agregado SSS compactado	1442.86	kg/m <sup>3</sup>
Peso unitario del agregado SSS suelto	1350.88	kg/m <sup>3</sup>
% de absorción	1.85	%
% de vacíos	44.44	%

Tablas de granulometrías:

<b>Grava</b>			
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>%Retenido Acumulado</b>	<b>%Pasa</b>
#1/2	12.7	0.31	99.69
#3/8	9.52	8.19	91.81
#4	4.76	95.98	4.02
#10	2	99.23	0.77
#20	0.84	99.26	0.74
#40	0.42	99.29	0.71
#60	0.25	99.34	0.66
#100	0.15	99.40	0.60
#200	0.075	99.72	0.28
Fondo	0	99.80	0.20

Arena			
Tamiz	Abertura (mm)	%Retenido Acumulado	%Pasa
#1/2	12.70	0.00	100.00
#3/8	9.52	0.20	99.80
#4	4.76	1.08	98.92
#10	2.00	2.29	97.71
#20	0.84	6.02	93.98
#40	0.42	27.58	72.42
#60	0.25	73.37	26.63
#100	0.15	90.49	9.51
#200	0.08	97.70	2.30
Fondo	0.00	99.78	0.22

Gráficas de granulometrías:

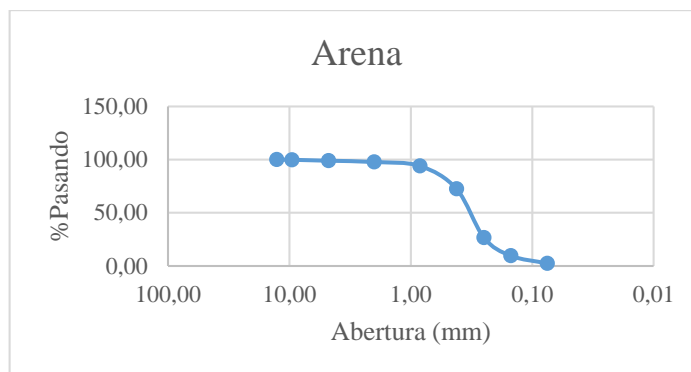
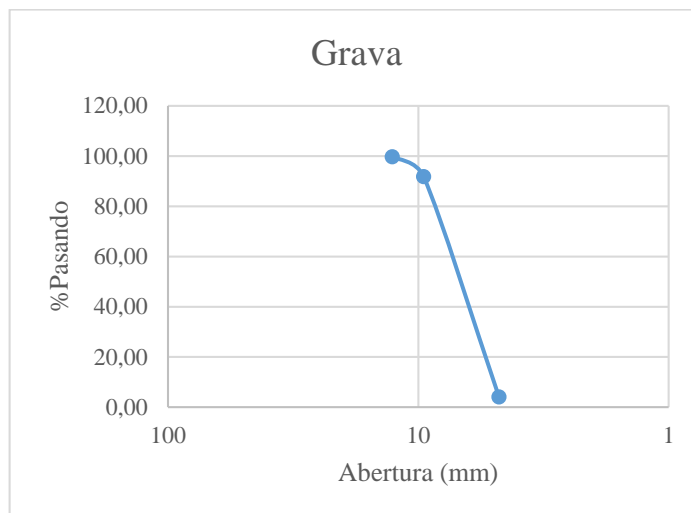


Tabla de humedad superficial de la grava:

Grava		
Peso inicial	1800	g
Peso seco	1797.6	g
% de absorción	1.62	%
Humedad superficial	0,13	%

Tabla de mezclas con las cantidades óptimas de superplastificante:

MEZCLA
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP1%
GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%
GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1%
GGBFS0%WFS50% w/c=0.35 SP1.5%
GGBFS0%WFS80% w/c=0.35 SP=1.5%
GGBFS60%WFS40% w/c=0.35 SP1%
GGBFS30%WFS40% w/c=0,35 SP1%
GGBFS60%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%
GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%
GGBFS30%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%
GGBFS60%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%

- Luego de experimentar distintas cantidades de SP se encontraron las cantidades requeridas para que las mezclas no presentaran sangrado ni segregación y cumplieran con los parámetros establecidos por EFNARC.

Tabla de resultados de ensayo Slump-Flow, T50 y conductividad eléctrica:

MEZCLA	Diámetro (cm)	T50 (s)	Conductividad eléctrica mS/m
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP1%	67.83	4	Over current
GGBFS0%WFS0% w/c=0.35 SP0.8%	79.80	3	Over current
GGBFS0%WFS40% w/c=0.35 SP1%	72.70	7	Over current
GGBFS0%WFS50% w/c=0.35 SP1.5%	65.00	2	15.14
GGBFS0%WFS80% w/c=0.35 SP=1.5%	64.00	7	14.71
GGBFS60%WFS40% w/c=0.35 SP1%	81.80	2	14.93

MEZCLA	Diámetro (cm)	T50 (s)	Conductividad eléctrica mS/m
GGBFS30%WFS40% w/c=0.35 SP1%	84.20	2	Over current
GGBFS60%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	83.00	2	19.19
GGBFS30%WFS80% w/c=0.35 SP1.5%	84.10	7	Over current
GGBFS30%WFS0% w/c=0.3 SP0.8%	70.30	7	Over current
GGBFS60%WFS0% w/c=0.3 SP0.8%	75.20	7	Over current

Tabla de resultados de ensayos J-Ring y L-Box:

MEZCLA	J-Ring (mm)	L-Box
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP0.6%	1.5	0.825
GGBFS0%WFS40% w/c=0.3 SP1.1%	1.5	0.96
GGBFS30%WFS80% w/c=0.3 SP1.2%	3.5	0.975

Tabla de resultados reómetro:

Revoluciones por segundo / MEZCLA	GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP0.6%	GGBFS0%WFS40% w/c=0.3 SP1.1%	GGBFS30%WFS80% w/c=0.3 SP1.2%
0.050	1.582	0.275	0.275
0.125	4.490	0.828	0.846
0.200	6.760	1.612	1.587
0.275	8.626	2.478	2.470
0.350	9.773	3.54	3.608
0.425	10.914	4.838	4.989
0.500	11.752	6.564	6.458

MEZCLA	Esfuerzo de fluencia estático (Pa)	Valor de fluencia (Nm)	Valor de viscosidad (Nm-s)	Viscosidad plástica (Pa-s)	R <sup>2</sup>	Torque máximo (Nm)
GGBFS0%WFS0% w/c=0.3 SP0.6%	428.1	1.63	22.08	379.4	0.95	6.15

MEZCLA	Esfuerzo de fluencia estático (Pa)	Valor de fluencia (Nm)	Valor de viscosidad (Nm-s)	Viscosidad plástica (Pa-s)	R <sup>2</sup>	Torque máximo (Nm)
GGBFS0%WFS40 % w/c=0.3 SP1.1%	0.1	-0.89	13.72	228.3	0.97	0.57
GGBFS30%WFS80 % w/c=0.3 SP1.2%	0.1	-0.89	13.74	228.8	0.97	0.63

Se observó que, al realizar el ensayo de compresión uniaxial a las muestras de concreto, la gran mayoría presentó la siguiente falla:



**Anexo B. Materiales que se han implementado en mezclas binarias, ternarias y cuaternarias utilizados en la base de datos.**

Cemento + Cal hidráulica
Cemento + Cal hidráulica + Cenizas volantes
Cemento + Ceniza de casca de arroz
Cemento + Ceniza volante + Escoria de alto horno
Cemento + Ceniza volante + Escoria de alto horno + Humo de sílice
Cemento + Ceniza volante + Escoria de alto horno + Metacaolín
Cemento + Ceniza volante + Humo de sílice
Cemento + Ceniza volante + Nanopartículas de sílice
Cemento + Ceniza volante + Nanopartículas de TiO <sub>2</sub>
Cemento + Ceniza volante y Arena de río + Arena de fundición
Cemento + Ceniza volante y Arena de río + Vidrio
Cemento + Cenizas volantes
Cemento + Escoria de alto horno
Cemento + Escoria de alto horno + Metacaolín
Cemento + Escoria de alto horno + Nanopartículas de CuO
Cemento + Escoria de alto horno + Nanopartículas de sílice
Cemento + Escoria de alto horno + Nanopartículas de TiO <sub>2</sub>
Cemento + Escoria de carbón
Cemento + Escoria de cobre
Cemento + Escoria de hierro
Cemento + Humo de sílice
Cemento + Material volcánico de Tolima (MVT)
Cemento + Metacaolín
Cemento + Nano sílice y Humo de sílice
Cemento + Nanopartículas de dióxido de Zinc
Cemento + Nanopartículas de ZrO <sub>2</sub>
Cemento + Polvo de mármol
Cemento + Residuos de demolición
Cemento + Zeolita natural
Cemento y Arena + Ceniza de fondo
Cemento y Arena + Escoria de acero

Cemento y Arena + Escoria de alto horno
Cemento y Arena + Escoria de cobre
Cemento y Arena + Escoria de hierro
Cemento+ Nanopartículas de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Cemento+ Nanopartículas de sílice
Cemento+ Nanopartículas de TiO <sub>2</sub>

**Anexo C. Criterios de conformidad para las propiedades en estado fresco de los CAC según EFNARC.**

<b>Clase de asentamiento</b>	<b>Criterio (mm)</b>	<b>Aplicaciones estructurales</b>
SF1	Entre 550 y 650	Estructuras ligeramente reforzadas
SF2	Entre 660 y 750	Estructuras medianamente reforzadas
SF3	Entre 760 y 850	Estructuras altamente reforzadas

Fuente: EFNARC, 2005

<b>Ensayo</b>	<b>Límite</b>
T50	2 s a 7 s
J-Ring	0 mm a 10 mm
L-Box	$\geq 0.75 < 1$

Fuente: EFNARC, 2002

## **Anexo D: Base de datos**

CD con archivo en Excel titulado: "Base de datos concreto autocompactante".