WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Influencia de residuo de arena de fundición, escoria de alto horno y nano partículas de sílice en el comportamiento físico-mecánico y de durabilidad de concretos auto-compactantes

Sergio Ruiz Martínez

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil

Director
Luis Eduardo Zapata Orduz
Doctor en ingeniería civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
2020

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Contenido

Introducción 11

1. Objetivos 14

2.1. Objetivo general 14

2.2. Objetivos específicos 14

2. Marco teórico 16

2.1. Escoria de alto horno 16

2.2. Residuo de arena de fundición 17

2.3. Nano partículas de sílice 19

2.4. Concreto auto-compactante 21

2.5. Reología del concreto auto-compactante 22

2.6. Optimización estadística de múltiples respuestas 25

3. Desarrollo experimental 27

3.1. Caracterización de materiales 27

3.2. Diseño estadístico del experimento 32

3.3. Proporciones de las mezclas del diseño estadístico 34

3.4. Ensayos en estado fresco 35

3.5. Ensayos en estado endurecido 39

4. Resultados y discusión 44

4.1. Resultados de ensayos en estado fresco 44

4.2. Ensayos en estado endurecido 61

4.3. Resultados de la optimización 85

4.4. Efecto de la incorporación de nano partículas de sílice 92

4.5. Microestructura de concretos auto-compactantes con residuo de arena de fundición, escoria de alto horno y nano partículas de sílice 96

5. Conclusiones 106

6. Recomendaciones 109

Referencias bibliográficas 110

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades físicas de la escoria de alto horno.....16

Tabla 2. Composición química de la escoria de alto horno. 17

Tabla 3. Propiedades físicas del residuo de arena de fundición. 19

Tabla 4. Composición química del residuo de arena de fundición. 19

Tabla 5. Granulometría de la arena de río y del residuo de arena de fundición. 28

Tabla 6. Cantidades de materiales de las mezclas del diseño estadístico. 35

Tabla 7. Resultados de ensayos de trabajabilidad.....45

Tabla 8. Resumen ANOVA para ensayos de trabajabilidad.....47

Tabla 9. Valores de torque de las mezclas.....51

Tabla 10. Parámetros reológicos del modelo lineal de Bingham.....54

Tabla 11. Parámetros reológicos del modelo modificado de Bingham. 57

Tabla 12. Resumen ANOVA para ensayos de reología.....58

Tabla 13. Resumen ANOVA para resistencia a la compresión a los 7 días de curado. 65

Tabla 14. Resumen ANOVA para resistencia a la compresión a los 28 días de curado. 65

Tabla 15. Resumen ANOVA para resistencia a la tracción indirecta a los 7 días de curado.73

Tabla 16. Resumen ANOVA para resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de curado.73

Tabla 17. Designación de la calidad del concreto con base en valores de UPV.....77

Tabla 18. Resumen ANOVA para valores de UPV a los 7 días de curado. 80

Tabla 19. Resumen ANOVA para valores de UPV a los 28 días de curado. 80

Tabla 20. Equivalencia de carga que pasa y BEC para clasificación de penetración de ion cloruro. 83

Tabla 21. Clasificación de la penetración del ion cloruro de las mezclas de SCC. 83

Tabla 22. Resumen ANOVA para conductividad eléctrica aparente a 28 días de curado....84

Tabla 23. Modelos de regresión depurados para optimización.....87

Tabla 24. Parámetros de entrada al proceso de optimización múltiple.....90

Tabla 25. Resultados del proceso de optimización múltiple.....90

Tabla 26. Comparativo entre valores predichos y valores obtenidos experimentalmente....91

Tabla 27. Resultados de ensayos de estado fresco de la mezcla óptima.....91

Tabla 28. Resultados de ensayos de estado endurecido de la mezcla óptima.....92

Tabla 29. Proporciones de la mezcla óptima y de mezclas con nS.....93

Tabla 30. Resultados de ensayos de estado fresco de mezclas con nS. 94

Tabla 31. Resultados de ensayos en estado endurecido de mezclas con nS. 95

Lista de figuras

Figura 1. Imagen TEM de nano partículas de sílice. 20

Figura 2. Curva de flujo para el modelo lineal de Bingham. 23

Figura 3. Concreto convencional vs. Concreto auto-compactante (SCC). 24

Figura 4. Residuo de arena de fundición utilizado. 28

Figura 5. Imágenes SEM del residuo de arena de fundición. 29

Figura 6. Imagen SEM del cemento utilizado. 30

Figura 7. Imagen SEM de la escoria de alto horno utilizada. 30

Figura 8. Fotografía de la escoria de alto horno utilizada. 31

Figura 9. Nano partículas de sílice utilizadas. 32

Figura 10. Esquema del diseño estadístico del experimento. 33

Figura 11. Ensayo de flujo de asentamiento y T_{500}. 36

Figura 12. Concreto después de realizado el ensayo de J-ring. 37

Figura 13. Ejecución de ensayo de L-box. 38

Figura 14. Equipo y montaje utilizado en el ensayo de reómetro. 39

Figura 15. Ejecución de ensayo de resistencia a la compresión. 40

Figura 16. Probeta de concreto después del ensayo resistencia a la tracción. 41

Figura 17.Montaje para el desarrollo de ensayo de conductividad eléctrica aparente. 42

Figura 18. Montaje del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico. 43

Figura 19. Relación entre torque y velocidad rotacional (GGBFS0-WFS0). 52

Figura 20. Relación entre torque y velocidad rotacional - Orden superior (GGBFS60-WFS60). 55

Figura 21. Esfuerzo de fluencia dinámico de las mezclas del diseño estadístico. 58

Figura 22. Viscosidad plástica de las mezclas del diseño estadístico. 60

Figura 23. Resistencia a la compresión de las mezclas del diseño estadístico. 62

Figura 24. Desarrollo porcentual de la resistencia a la compresión a los 7 días de curado. .63

Figura 25. Desarrollo porcentual de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.64

Figura 26. Interacción entre GGBFS y WFS. 70

Figura 27. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas del diseño estadístico. 71

Figura 28. Desarrollo porcentual de la resistencia a la tracción. 72

Figura 29. Velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas del diseño estadístico. 77

Figura 30. Desarrollo porcentual de la velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días de curado.

.....78

Figura 31. Desarrollo porcentual de la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado.

.....79

Figura 32. Conductividad eléctrica aparente de las mezclas del diseño estadístico. 82

Figura 33. Superficie de respuesta de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.87

Figura 34. Superficie de contorno de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.88

Figura 35. Velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado. 89

Figura 36. Imagen SEM de la mezcla control.....97

Figura 37. Imagen SEM de la mezcla óptima. 98

Figura 38. Análisis EDS de la mezcla control. 99

Figura 39. Análisis EDS de la mezcla óptima. 100

Figura 40. Gel C-S-H secundario en mezcla óptima. 101

Figura 41. Imagen SEM de mezcla óptima con 1% de nS.....102

Figura 42. Imagen SEM de mezcla óptima con 2% de nS.....103

Figura 43. Análisis EDS de la mezcla óptima con 1% de nS. 104

Figura 44. Análisis EDS de la mezcla óptima con 2% de nS. 105

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Resumen

Título: Influencia de residuo de arena de fundición, escoria de alto horno y nano partículas de sílice en el comportamiento físico-mecánico y de durabilidad de concretos auto-compactantes*

Autor: Sergio Ruiz Martínez**

Palabras clave: Escoria de alto horno, Residuo de arena de fundición, Nano partículas de sílice, Concreto auto-compactante, ANOVA.

Descripción:

Se presenta un estudio de la influencia de la escoria de alto horno y del residuo de arena de fundición (GGBFS y WFS, por sus siglas en inglés, respectivamente) como reemplazo parcial hasta un 60% en masa del cemento y del agregado fino, respectivamente, y de la incorporación de nano partículas de sílice (nano SiO_2) en mezclas de concreto auto-compactante. La primera parte del estudio se basó en la evaluación de la trabajabilidad y de reología, en el estado fresco, y de resistencia y durabilidad, en el estado endurecido, con base en un diseño factorial del tipo 3^k, usando GGBFS y WFS como variables independientes, seguido de un análisis de la varianza (ANOVA) y de optimización múltiple por medio de funciones de deseabilidad. A la mezcla resultante de la optimización múltiple se le realizó la adición de nano SiO_2 de 0 a 2%. Entre los resultados más importantes se encontró que la GGBFS y el WFS disminuyen el esfuerzo de fluencia en el estado fresco del concreto. En el estado endurecido, el efecto individual del WFS no es estadísticamente significativo sobre las propiedades del concreto a los 28 días de curado. Adicionalmente, la GGBFS contribuye a mejorar las propiedades de resistencia y de durabilidad a las dos edades de curado evaluadas. Además, las nano SiO_2 llevaron a detrimentos en la resistencia y durabilidad del concreto. Con base en la información presentada, ambos materiales resultan reemplazos parciales adecuados de la arena de río y del cemento, respectivamente, en las mezclas de concreto auto-compactante.

---

*Trabajo de Grado de Maestría

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Doctor en Ingeniería Civil.

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Abstract

Title: Influence of waste foundry sand, ground granulated blast furnace slag and nano-silica particles in the physical-mechanical and durability behavior of self-compacting concrete*

Author: Sergio Ruiz Martínez

Keywords: Ground granulated blast furnace slag, Waste foundry sand, Nano silica particles, Self-compacting concrete, ANOVA.

Description:

This document presents a study of the influence of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and waste foundry sand (WFS) as partial replacement of up to 60% by mass of cement and fine aggregate, respectively, and of the incorporation of nano silica particles (nano SiO_2) in self-compacting concrete mixtures. The first part of the study was based on the evaluation of the workability and rheology properties, in the fresh state, and of strength and durability, in the hardened state, based on a 3^k factorial design, using the GGBFS and WFS as independent variables, followed by an ANOVA analysis of variance and multiple optimization by means of desirability functions. Nano SiO_2 was added to the mixture resulting from multiple optimization from 0 to 2%. Among the most important results, the GGBFS and WFS decrease the yield stress of concrete mixtures. In the hardened state, the individual effect of WFS is not statistically significant on concrete properties at 28 days of curing. Additionally, GGBFS contributes to improve the strength and durability properties at the two curing ages evaluated. Furthermore, nano SiO2 led to detriments in the strength and durability of concrete. Based on the information presented, both materials are suitable partial replacements for river sand and cement in self-compacting concrete mixes.

---

*MSc Thesis

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Doctor en Ingeniería Civil.

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Introducción

La agenda de las Naciones Unidas tiene actualmente entre sus objetivos garantizar la disponibilidad y acceso a recursos como el agua y la energía, adoptar medidas para combatir el cambio climático, garantizar modalidades sostenibles de consumo y producción y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres (Naciones Unidas/CEPAL, 2016). Con esto presente, la industria de los materiales de construcción debe enfocarse en la búsqueda de materiales alternativos que, al ser utilizados, permitan mitigar o ayudar a disminuir el daño al medio ambiente pero, sin comprometer la calidad y comportamiento de las construcciones.

La demanda del concreto, como material de gran uso en el sector de la construcción, con una producción anual de aproximadamente 10^{10} toneladas (Wray, 2012) y que está creciendo junto con las necesidades de la población, genera grandes requisitos de recursos naturales y de arena de río como principal agregado fino para la producción de hormigón. Por esto, la minería indiscriminada de este recurso genera impactos adversos en los subcomponentes ambientales de los ecosistemas de ríos como la morfología del lecho, medio sedimentario, cantidad y calidad del agua, flora y fauna, y condiciones socio-económicas de las poblaciones moradoras a lo largo de los ríos (Padmalal & Maya, 2014). Adicionalmente, y abordando otra problemática que afecta al medio ambiente, la manera como se dispone de los desechos de actividades industriales como la siderurgia, que usualmente se realiza mediante vertederos a cielo abierto, genera problemas ambientales en forma de lixiviados o polvos (Sarkar & Mazumder, 2015). Uno de estos desechos, resultante de la fundición de piezas de hierro y otros metales en moldes, es el residuo de arena de fundición y su uso como material alternativo en la producción de concreto convencional y auto-compactante, puede llevar a ventajas económicas y ambientales. Aunque ha habido poca investigación sobre el uso de este material en el concreto, el mismo puede permitir potenciar el

desarrollo de mayor resistencia a la compresión, flexión, tracción, y de una mejor durabilidad (Bhardwaj & Kumar, 2017; Ganesh Prabhu et al., 2014; Siddique, 2007; Siddique & Sandhu, 2013a; G. Singh & Siddique, 2011). Pese a las ventajas técnicas y ambientales mencionadas, existen varios interrogantes por resolver referentes a las posibles cantidades de reemplazo del agregado fino por residuo de arena de fundición. En este sentido, se ha encontrado que el reemplazo de agregado fino por residuo de arena de fundición disminuye la trabajabilidad debido al incremento en la cantidad de partículas finas, lo que, por absorción de agua, genera una mayor demanda de la misma, así como posiblemente de aditivos fluidificantes (Bhardwaj & Kumar, 2017; Ganesh Prabhu et al., 2014; Guney et al., 2010; Siddique et al., 2015).

La pérdida de trabajabilidad en las mezclas de concreto auto-compactante afecta la colocación y calidad del mismo, sin embargo, los beneficios ambientales, mecánicos y de durabilidad que se podrían obtener con presencias de residuo de arena de fundición, en conjunto con ajustes en las proporciones de los demás materiales que componen una mezcla de concreto auto-compactante motivan al empleo de este subproducto en el mismo. En este aspecto, se encuentra que es posible obtener mejoras en la trabajabilidad de mezclas de concreto auto-compactante con el uso de materiales cementantes suplementarios como la escoria de alto horno (Vivek & Dhinakaran, 2017b; Zhao et al., 2015). El uso de esta escoria, residuo del proceso de producción de hierro en altos hornos, para la producción de concretos auto-compactantes disminuye la cantidad de cemento necesaria en la mezcla, generando así beneficios ambientales, y adicionalmente ofrece mejoras en otras propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto así formado (Gesoğlu et al., 2009; Hannesson et al., 2012; Kuder et al., 2012; Ramanathan et al., 2013; Vivek & Dhinakaran, 2017a).

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Se encuentra en la literatura (Chithra et al., 2016; Jalal et al., 2012; Nazari & Riahi, 2010, 2011a; Quercia et al., 2014; Zhang et al., 2017) que la presencia de nano partículas de sílice en el estado endurecido del concreto auto-compactante genera mejoras en parámetros del comportamiento mecánico como la resistencia a la compresión, la resistencia a flexión y la resistencia a tracción, así como parámetros de durabilidad como la resistencia a la penetración de cloruros, ataque de sulfatos y absorción de agua, debido a la promoción de la formación de más productos de hidratación, por lo que el uso de este material puede traer efectos positivos sobre las propiedades de los concretos modificados con residuo de arena de fundición y escoria de alto horno.

En la literatura no consta evidencia del uso conjunto de residuo de arena de fundición como reemplazo de agregado fino y de escoria de alto horno como reemplazo de cemento en la producción del concreto auto-compactante, lo que motiva a investigar sobre el efecto simultáneo de estos materiales en dicho concreto. Más aún, no se encuentran límites y proporciones claros para el uso experimental de estos materiales, lo que adicionalmente motiva al uso de la herramienta estadística de diseño de experimentos para emitir un análisis objetivo sobre el uso y límites de proporciones de estos materiales.

Considerando lo anteriormente expuesto, se plantea, entonces, investigar sobre los efectos de la dosificación conjunta de residuo de arena de fundición y de escoria de alto horno como reemplazo de agregado fino y cemento, respectivamente, mediante un diseño y análisis estadístico de experimentos, evaluando las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de las mezclas de concreto auto-compactante a edades de 7 y 28 días de curado, y el efecto de pequeñas dosificaciones de nano partículas de sílice sobre estos concretos modificados.

1. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia en el comportamiento de un concreto auto-compactante de la presencia de residuo de arena de fundición, de escoria de alto horno y de nano partículas de sílice mediante el estudio de su desempeño físico-mecánico y de durabilidad con apoyo en herramientas estadísticas avanzadas.

2.2. Objetivos específicos

- Estimar las proporciones de residuo de arena de fundición y de escoria de alto horno en el concreto auto-compactante que permiten optimizar la resistencia mecánica, caracterizada por el ensayo de compresión uniaxial (ASTM C39), y la durabilidad, caracterizada por el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597) con base en metodologías estadísticas de superficie de respuesta.
- Caracterizar el estado fresco del concreto auto-compactante a través de los ensayos de flujo de cono de asentamiento (ASTM C1611), T_{50} (EFNARC, 2005), capacidad de paso por J-ring (ASTM C1621, EFNARC, 2005) y L-box (EFNARC, 2005); y la viscosidad plástica y esfuerzo de fluencia por medio de ensayo en reómetro.
- Determinar características de durabilidad de concretos auto-compactantes por medio de ensayos de conductividad eléctrica aparente (ASTM C1760) y velocidad de pulso ultrasónico (ASTM C597).
- Describir la micro-estructura de concretos auto-compactantes modificados por medio de microscopia de barrido electrónico (SEM) y fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (EDS)

para el desarrollo de una correspondencia entre los resultados del comportamiento mecánico, de durabilidad y de micro-estructura.

2. Marco teórico

2.1. Escoria de alto horno

La escoria de alto horno (GGBFS, por sus siglas en inglés) es un residuo resultante de la producción de hierro en altos hornos en los que el mineral de hierro, caliza y coque son calentados a temperaturas cercanas a 1500 °C. Cuando estos materiales se mezclan en el alto horno, se generan dos productos: hierro fundido y escoria fundida. Esta escoria fundida se compone principalmente de silicatos y aluminatos provenientes del mineral de hierro. A continuación, y para poder granular la escoria, la misma se enfría a través de chorros de agua de alta presión, lo que rápidamente enfría la escoria y produce partículas de tamaños no mayores a 5 [mm], conformadas en un 95% de aluminosilicatos de calcio. Esta escoria es entonces molida hasta lograr un polvo muy fino usando un molino de bolas giratorias (Siddique, 2007).

2.1.1. *Propiedades físicas*

La escoria de alto horno es un material de características vidriosas, usualmente de color blanco (dependiendo de la calidad de la molienda y de la composición química). Su densidad es menor que la del cemento, pero a diferencia de este último, tiene mayor cantidad de finos en su distribución. Las propiedades físicas de la escoria de alto horno, reportadas por varios autores, se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1

Propiedades físicas de la escoria de alto horno.

	(Duan et al., 2013b)	**(Gesoğlu et al., 2009)**	**(Shariq et al., 2010)**	**(Boukendakdji et al., 2012)**
Gravedad específica	3.10	2.79	2.86	2.95
SSA (m^2/kg)	369.60	418.00	340.00	350.00

2.1.2. *Propiedades químicas*

GGBFS posee una composición basada en fases vidriosas y cristalinas, que consisten principalmente en silicatos y aluminosilicatos de calcio. Esta escoria se compone principalmente de CaO, SiO_2, Al_2O_3 y MgO. Esto indica que su composición química es similar a la del cemento Portland, pero en diferentes proporciones. En la Tabla 2 se puede observar diferentes composiciones químicas reportadas en la literatura. Es, por lo tanto, un material con propiedades cementicias parecidas a las del cemento. Es un polvo de color casi blanco y le ofrece al concreto mejoras en propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos auto-compactantes (Hannesson et al., 2012; Kuder et al., 2012).

Tabla 2

Composición química de la escoria de alto horno.

Composición	(Chidiac & Panesar, 2008)	(Cheah et al., 2019)	(Duan et al., 2013b)	(Gesoğlu et al., 2009)
SiO_2	34.00	32.84	34.26	36.41
Al_2O_3	11.10	13.27	17.11	10.39
Fe_2O_3	0.50	0.28	0.75	0.69
CaO	36.60	40.80	35.17	34.12
MgO	11.60	6.08	6.41	10.26
SO_3	3.30	--	1.72	--
LOI* (%)	--	--	1.79	1.64

*Pérdida por ignición.

2.2. Residuo de arena de fundición

El residuo de arena de fundición (WFS, por sus siglas en inglés) es un derivado de los procesos de fundición de piezas y accesorios de hierro y otros metales en talleres de mecanizados industriales. En este proceso, y para hacer los moldes y núcleos en los que se funden los metales en caliente, se mezcla arena de sílice virgen y agentes aglutinantes (Tittarelli, 2018), cuyo resultado final de mezclado sirve como material de moldeo de las piezas. Esta mezcla es usada y reutilizada varias veces como material de moldeo de las piezas que se funden y es finalmente descartado

cuando pierde las propiedades moldantes, es decir, pierde su limpieza y uniformidad (Tittarelli, 2018). Es, por lo tanto, un residuo final y su manejo usualmente se realiza disponiéndolo en vertederos a cielo abierto (Bhardwaj & Kumar, 2017; Siddique, 2007; Tittarelli, 2018).

La composición química y los tipos de residuo de arena de fundición varían dependiendo del tipo de aglutinante utilizado, típicamente entre "*green sand*" y "*chemically-bonded sand*". La primera es también la más utilizada (cerca de un 90% de la arena usada para moldeo) y también de la que más se obtiene reciclaje beneficioso. Está compuesta por arena de sílice de alta calidad (85-85%), arcilla de bentonita (4-10%) como aglutinante, aditivo carbonoso (2-10%) y agua (2-5%). Por otro lado, la arena unida químicamente consiste también en arena de sílice y aglutinante químico activado por catálisis. Son utilizadas típicamente cuando se requiere soportar mayores calores del metal fundido. Adicionalmente, la arena unida químicamente se compone de arena de sílice (93-99%) y aglutinante químico (1-3%). Entre los aglutinantes químicos se encuentran orgánicos como resinas fenólicas, resinas epóxicas y alcohol furfurílico, e inorgánicos como silicatos de sodio.

2.2.1. *Propiedades físicas*

La forma del residuo de arena de fundición es típicamente de sub-angular a redondeado. Las arenas verdes son de color negro, debido a la presencia de carbón, mientras que las arenas unidas químicamente son de color tostado o blanquecino. Adicionalmente, se ha encontrado que la gradación del residuo de arena de fundición es demasiado fino para varios requisitos normativos para el agregado fino (ASTM International, 2010). Las principales propiedades físicas del WFS se pueden observar en la Tabla 3, reportadas por varios autores.

Tabla 3

Propiedades físicas del residuo de arena de fundición.

	(Ganesh Prabhu et al., 2014)	(G. Singh & Siddique, 2011)	(Coppio et al., 2019)	(Manoharan et al., 2018)
Gravedad específica	2.24	2.18	2.18	2.36
Densidad (kg/m^3)	1576.00	--	1870.00	1811.00
Módulo de finura	--	1.89	2.06	2.37
Absorción de agua (%)	1.13	0.42	1.61	0.90
Partículas < 75 µm (%)	8.00	8.00	6.35	--

2.2.2. *Propiedades químicas*

Las propiedades químicas del WFS se relacionan directamente con el tipo de metal que se funde en el molde o núcleo y del tipo de aglutinante utilizado. Es decir, la composición química varía entre cada fundidora, pero las propiedades de la arena de una sola fundidora es usualmente constante en el tiempo. La composición química de varios WFS, reportada por algunos autores, se presenta en la Tabla 4. Como se ha comentado, la composición del residuo de arena de fundición usualmente es arena de sílice recubierto de una capa delgada de carbón quemado, residuo de aglutinante y polvo.

Tabla 4

Composición química del residuo de arena de fundición.

Componente	(G. Singh & Siddique, 2011)	(Basar & Deveci Aksoy, 2012)	(Y. Aggarwal & Siddique, 2014)	(Guney et al., 2010)
SiO_2	83.80	81.85	78.81	98.00
Al_2O_3	0.81	10.41	6.32	0.8
Fe_2O_3	5.39	1.82	4.83	0.25
CaO	1.42	1.21	1.88	0.04
MgO	0.86	1.97	1.95	0.02
SO_3	0.21	0.84	0.05	0.01
TiO_2	0.22	--	--	--
K_2O	1.14	0.49	--	0.04
Na_2O	0.87	0.76	--	0.04
LOI* (%)	--	6.93	2.15	--

*Pérdida por ignición.

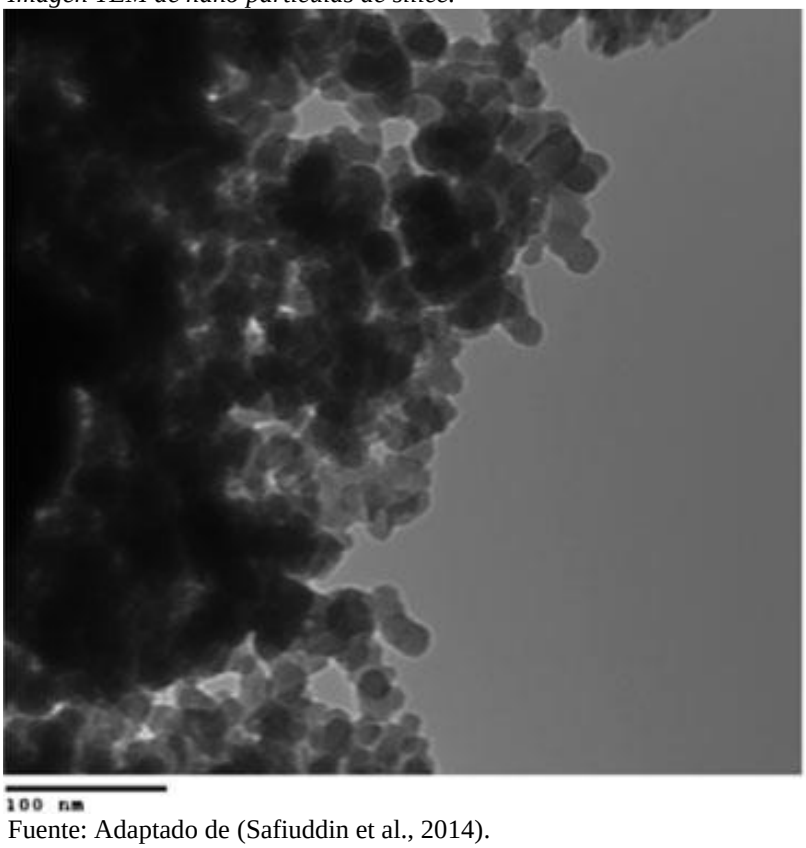
2.3. Nano partículas de sílice

El uso de nano materiales, definidos como partículas con tamaño inferior a 100 nm de

diámetro (Rashad, 2014), en el concreto está aún en su infancia. Es una tecnología bastante novedosa que se aprovecha del pequeño tamaño de las partículas y de la gran área superficial de las mismas para proveer impactos significativos sobre el concreto (Safiuddin et al., 2014). Por su alta relación de superficie específica, los nano materiales con diámetro de 4 nm tienen en su superficie incluso más del 50% de sus átomos, lo que los hace altamente reactivos (P. Aggarwal et al., 2015). En particular, las nano partículas de sílice, típicamente conocidas como nano-SiO_2, son el nano material de mayor popularidad y uso en el concreto. La Figura 1 muestra una imagen de microscopia de transmisión electrónica (TEM, por sus siglas en inglés) de nano-SiO_2 disponible comercialmente.

Figura 1

Imagen TEM de nano partículas de sílice.



Fuente: Adaptado de (Safiuddin et al., 2014).

La efectividad de este novedoso material depende completamente de su fabricación, que básicamente consiste en un proceso complejo de síntesis química, que ejecutado apropiadamente, permite obtener partículas esféricas con tamaños entre 1-100 nm (Sobolev et al., 2006). Su composición química es básicamente dióxido de silicio SiO_2 y se presenta comúnmente en forma cristalina y amorfa. Es un material que, por su tamaño tan pequeño, se prefiere utilizar en presentación de compuesto acuoso para evitar su ingesta y consecuentes problemas de salud.

El éxito de este nano material se debe a que, por su tamaño y área específica, promueve la actividad puzolánica en el concreto y acelera la disolución del silicato tricálcico, generando gel de silicatos de calcio hidratados (C-S-H, por sus siglas en inglés) (Zhang et al., 2017), volviéndose entonces las nano partículas de sílice una fuente de nucleación para el gel C-S-H (Jo et al., 2007). Entre las ventajas del uso de nano partículas de sílice se encuentra la densificación y refinado de los micro vacíos en el concreto (Norhasri et al., 2017), consecuente aumentos de resistencia en edades tempranas y tardías, por efecto *filler* y posterior puzolánico (Jalal et al., 2012; Nazari & Riahi, 2011a), y mejoras en la durabilidad al presentar una microestructura más refinada (Safiuddin et al., 2014; Zhang et al., 2017).

2.4. Concreto auto-compactante

El concreto auto-compactante (SCC, por sus siglas en inglés) es un concreto novedoso que es capaz de fluir bajo su propio peso, de rellenar las formaletas sin necesidad de vibración y de pasar a través de refuerzo congestionado sin segregar ni sangrar en su colocación (C. Shi et al., 2015) (Wu & An, 2014). Es un material compuesto que surgió en 1988 con el objetivo de producir estructuras durables de concreto (Okamura & Ouchi, 2003). La base de este concreto es casi la misma que la de uno convencional pero algunas modificaciones se realizan para conseguir las

características ya planteadas en el estado fresco. Para mantener la cohesión y la resistencia a la segregación, en las mezclas de SCC se hace uso de materiales cementantes suplementarios o adiciones minerales entre las que comúnmente se encuentran la ceniza volante, la escoria de alto horno, el humo de sílice, el metacaolín y la caliza (Khayat & Schutter, 2014). También, para obtener las propiedades auto-compactantes en estado fresco, son utilizados aditivos químicos, como los reductores de agua de alto rango (típicamente conocidos como superplastificantes) y los modificadores de viscosidad, productos que otorgan a la mezcla una mejor estabilidad, cohesión y fluidez en estado fresco (EFNARC, 2005).

Las propiedades del SCC en estado endurecido son, generalmente, las mismas que las del concreto convencional, salvo que las mezclas de SCC pueden exhibir un mayor potencial de durabilidad producida por el incremento en el contenido de finos, ya que estos refinan la microestructura y la red de poros del concreto (Kanellopoulos et al., 2012).

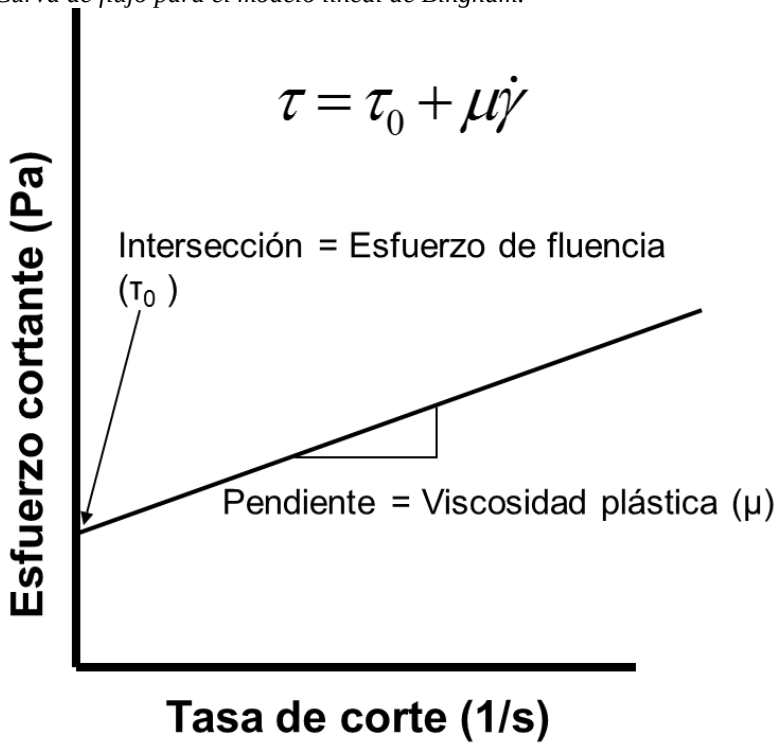
2.5. Reología del concreto auto-compactante

El concreto en su estado fresco, por su comportamiento que le permite ser colocado y compactado, puede ser considerado como un fluido (Banfill, 2006; Roy & Asaga, 1980; Struble & Chen, 2005). La reología, considerada como la ciencia que estudia los materiales que son capaces de fluir (Guzmán et al., 2018), permite obtener una caracterización de las propiedades y características que controlan el movimiento del concreto en el estado fresco, típicamente por medio del esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica. El modelo más común con el que se estudia la reología del concreto es el modelo lineal de Bingham (Ferraris, 1999), que es una función del esfuerzo de fluencia y de la viscosidad plástica. El esfuerzo de fluencia se puede definir como el mínimo esfuerzo necesario para iniciar el flujo (movimiento) del concreto, y es relacionado con el

asentamiento del concreto. La viscosidad plástica es la resistencia del material a fluir, una vez el esfuerzo de fluencia ha sido superado, y se relaciona a la cohesividad de la mezcla de concreto. En la Figura 2 se muestra la curva de flujo para el modelo lineal de Bingham.

Figura 2

Curva de flujo para el modelo lineal de Bingham.



donde,

τ = Esfuerzo cortante [Pa]

τ_0 = Esfuerzo de fluencia [Pa]

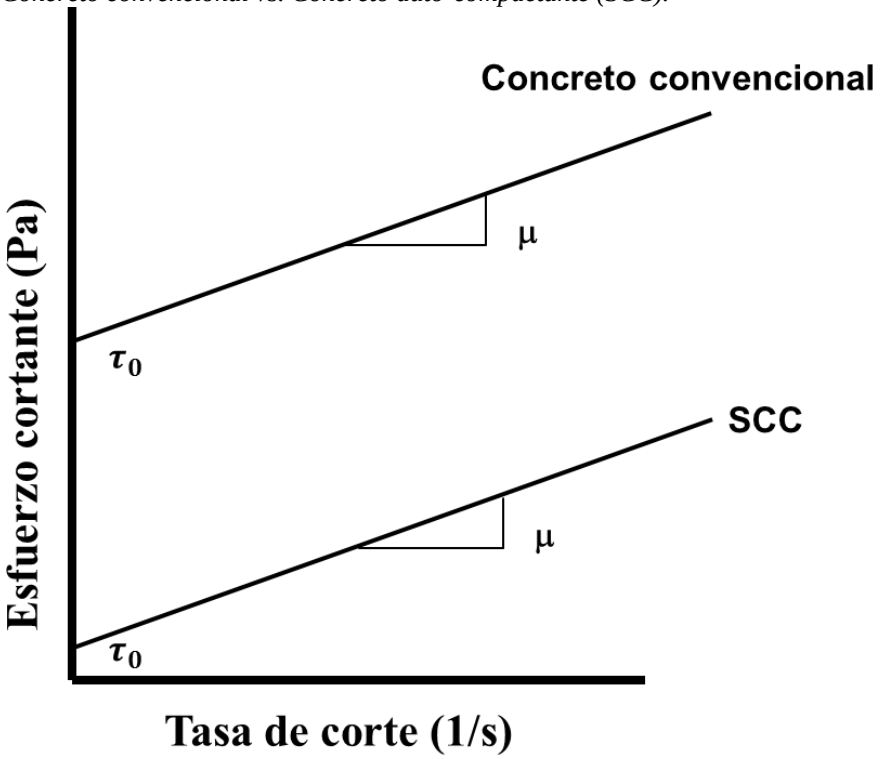
μ = Viscosidad plástica [Pa·s]

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de corte [1/s]

Las pruebas tradicionales de caracterización del concreto sólo se miden en función de la *trabajabilidad* por medio del cono de Abrams, mediciones que pueden resultar subjetivas al operario, además, se obtienen medidas empíricas (Jiao et al., 2017). A diferencia de las mediciones de trabajabilidad, la reología permite caracterizar el material en unidades físicas fundamentales, lo que permite una fácil comparación y correlación (Faleschini et al., 2014). La Figura 3 muestra la comparación entre la curva de flujo del concreto convencional y del concreto auto-compactante.

Figura 3

Concreto convencional vs. Concreto auto-compactante (SCC).



A diferencia del concreto convencional, el concreto auto-compactante tiene típicamente un esfuerzo de fluencia bastante bajo, cercano a cero, lo que le permite su característica sobresaliente de ser capaz de fluir bajo su propio peso. Con respecto a la viscosidad plástica, el concreto auto-compactante presenta valores similares a los del convencional, lo que garantiza la adecuada

resistencia a la segregación. Para este tipo de concreto, la viscosidad no debe ser muy alta debido a que genera que el concreto se vuelva pegajoso y presente dificultades en su bombeo y colocación, sin embargo, tampoco puede ser muy baja porque el mismo sería susceptible a segregación.

2.6. Optimización estadística de múltiples respuestas

En el estudio de los efectos que puede tener una o más variables sobre alguna propiedad o característica de uno o más procesos en las que dichas variables tienen influencia, puede ser necesario encontrar las condiciones de esas variables que permitan, simultáneamente, mejorar características diferentes del mismo proceso, debido a que todas pueden ser importantes al mismo tiempo.

Para lograr tal objetivo, se hace la suposición de que cada una de las *n* respuestas o variables dependientes que se quiera optimizar se encuentra apropiadamente modelada por un modelo de segundo orden en términos de los mismos factores de control (Gutiérrez & de la Vara, 2008). Se necesita, adicionalmente, garantizar que los modelos cumplen con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia de residuos (Gutiérrez & de la Vara, 2008; D. C. Montgomery, 2017; D. Montgomery & Runger, 2003).

Por medio del método de las funciones de deseabilidad (d_j), que se definen para cada respuesta, por ejemplo, resistencia a la compresión, se pueden utilizar para simultáneamente por medio del establecimiento de una función de deseabilidad compuesta (D), que será la media geométrica de las *m* funciones de deseabilidad individuales. Por lo tanto, D se maximiza sobre una región factible de las variables de diseño, como se muestra en la Ec. 1 (Derringer & Suich, 1980).

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \cdots \times d_n)^{\frac{1}{n}} \qquad Ec.(1)$$

donde *n* es el número de respuestas que se incluyen en la optimización.

En el caso de maximizar las respuestas individuales, la deseabilidad estará definida por la fórmula presentada en le Ec. 2 (Derringer & Suich, 1980; Gutiérrez & de la Vara, 2008).

$$\begin{Bmatrix} 0 & Y_j \leq minf_j \\ \left[\frac{Y_j - minf_j}{maxf_j - minf_j}\right]^{wt_j} & minf_j < Y_j < maxf_j \\ 1 & Y_j \geq maxf_j \end{Bmatrix} \qquad Ec.(2)$$

Donde Y_j, $min\ f_j$ y $max\ f_j$ son los valores ajustados, mínimos y máximos valores (experimentales) de la j$_{ésima}$ respuesta incluida en la optimización. Finalmente, wt_j será el valor de poder que controla el peso e importancia de la j$_{ésima}$ respuesta que se incluye en la optimización (Bayramov et al., 2004). Este proceso de optimización múltiple de respuestas es realizado apropiadamente y de manera sencilla por medio del uso de un software estadístico de uso comercial.

3. Desarrollo experimental

3.1. Caracterización de materiales

La caracterización de los materiales utilizados en la investigación se realizó bajo los parámetros establecidos por la *American Society of Testing Materials* (ASTM) y se registran a continuación:

3.1.1. Agregado grueso (AG)

Se utilizó grava triturada que presentó tamaño máximo nominal (TMN) de 3/8", gravedad específica (GS) de 2.6 y porcentaje de absorción (%A) de 2.2%. Las propiedades del agregado se determinaron según ASTM C136 (ASTM International, 2007), ASTM C127 (ASTM International, 2004), respectivamente.

3.1.2. Agregado fino (AF)

Se utilizó arena fina lavada de río con un módulo de finura (MF) de 2.2, GS de 2.49 y %A de 1.62%. Las propiedades del agregado se determinaron según ASTM C136 (ASTM International, 2007), ASTM C128 (ASTM International, 2012b), respectivamente. La Tabla 5 muestra la granulometría del agregado fino.

3.1.3. Residuo de arena de fundición (WFS)

El WFS presentó MF de 1.74, GS de 2.46 y %A de 3.13%. Las propiedades del agregado se determinaron según ASTM C136 (ASTM International, 2007), ASTM C128 (ASTM International, 2012b), respectivamente. La Figura 4 muestra el residuo de arena de fundición utilizado. La Tabla 5 muestra la granulometría del residuo de arena de fundición.

Figura 4

Residuo de arena de fundición utilizado.



Tabla 5

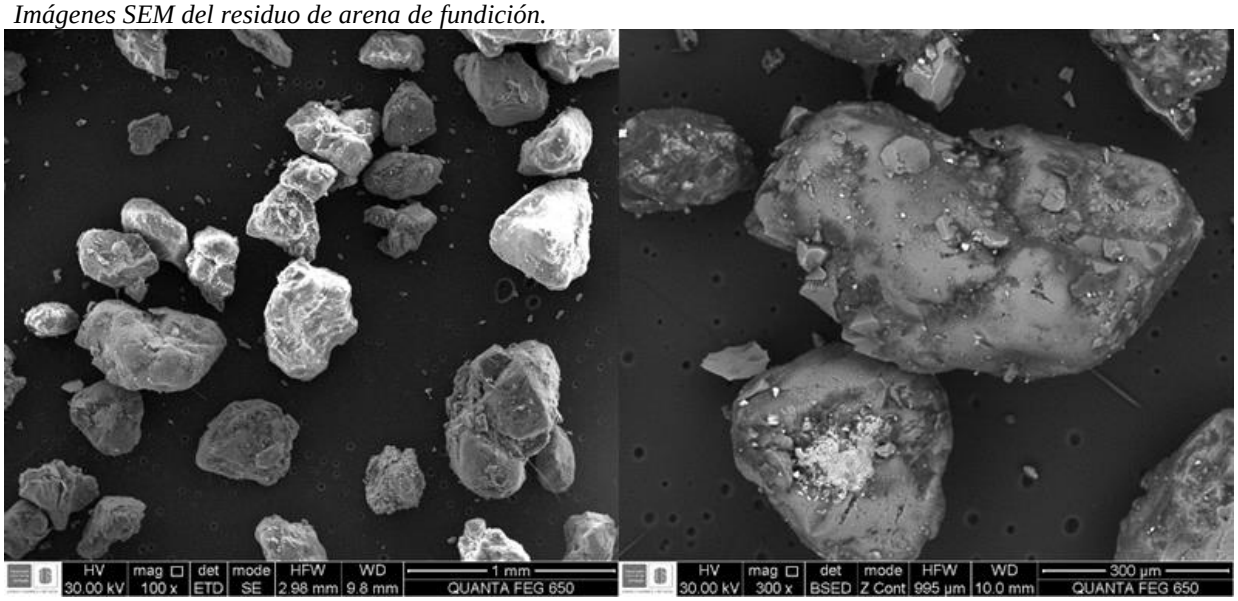
Granulometría de la arena de río y del residuo de arena de fundición.

Arena de río		Residuo de arena de fundición	
Tamaño del tamiz	% Pasa	Tamaño del tamiz	% Pasa
4.75 mm	96.78	4.75 mm	100.00
2.36 mm	95.30	2.36 mm	99.23
1.18 mm	92.13	1.18 mm	82.81
600 μm	78.95	600 μm	35.20
300 μm	25.86	300 μm	8.00
150 μm	3.11	150 μm	3.64
75 μm	0.13	75 μm	0.18

La Figura 5 revela la morfología, diferentes composiciones y tamaños de este material por medio de microscopia de barrido electrónica (SEM). De las imágenes es posible observar que el WFS está conformado por un amplio rango de tamaño de partículas, estando algunas más pequeñas unidas a otras más grandes; la forma de las partículas es de características angulares, principalmente, posible resultado de la reutilización de este material en los moldes de fundición. Adicionalmente, el análisis semi-cuantitativo reveló la presencia de carbono, oxígeno, aluminio, silicio, hierro, manganeso y platino.

Figura 5

Imágenes SEM del residuo de arena de fundición.



3.1.4. Cemento y escoria de alto horno (GGBFS)

El cemento utilizado fue Portland Tipo I con GS de 2.99, y la GGBFS tuvo GS de 2.78, ambas determinadas según ASTM C188 (ASTM International, 2009). Las Figuras 6 y 7 revelan la morfología y tamaños del cemento y de la GGBFS por medio de SEM, respectivamente. En las imágenes es posible observar que la morfología y distribución de tamaño de partículas de los dos materiales cementicios es similar. La morfología es de planos superficiales lisos y de forma angular, debido al proceso de molienda en el que se intenta que el GGBFS tenga la misma o menor finura que el cemento.

Figura 6

Imagen SEM del cemento utilizado.

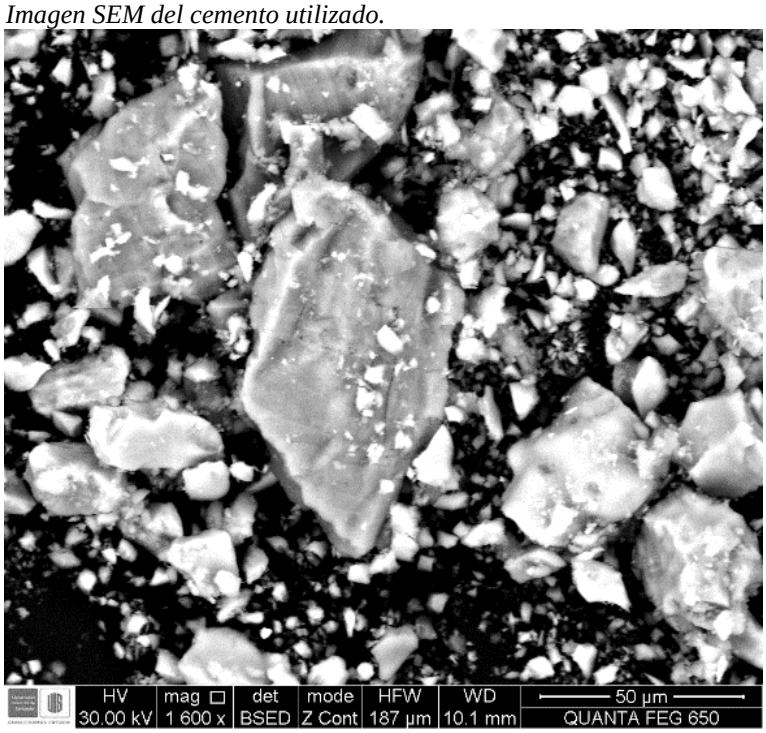
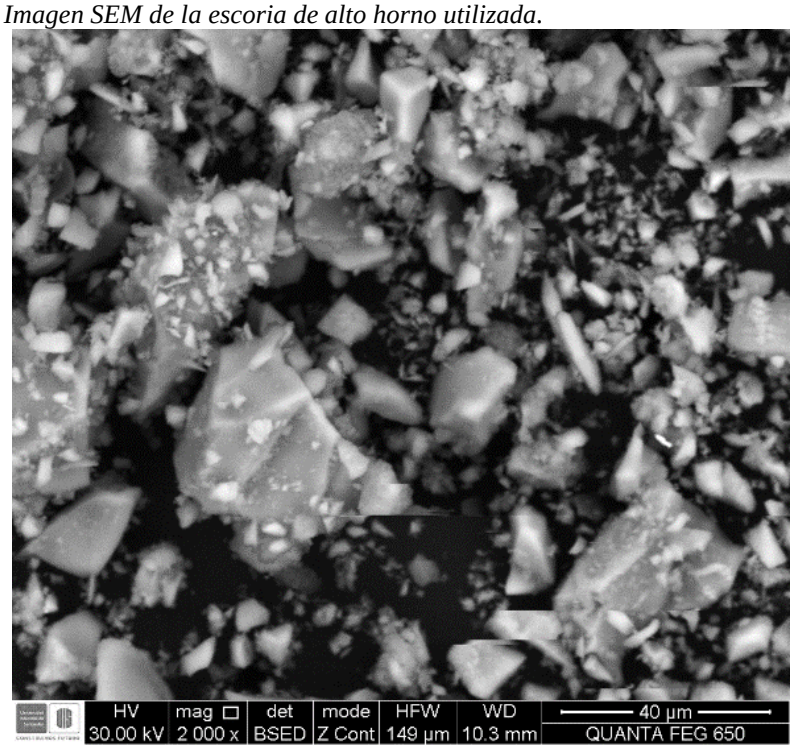


Figura 7

Imagen SEM de la escoria de alto horno utilizada.



De la información semi-cuantitativa del SEM se determinó que el cemento presenta los elementos básicos de su composición: carbono, magnesio, oxígeno, aluminio, silicio, azufre, calcio y hierro. Por otro lado, la GGBFS presentó los mismos elementos en su composición básica, pero en diferente proporción: 68.76% menos carbono, 10.15% más de oxígeno, 18.39% más magnesio, 135.31% más aluminio, 68.04% más de silicio, 37.11% menos de azufre y 53.30% menos hierro. La Figura 8 muestra la escoria de alto horno utilizada, de color blanquecino.

Figura 8

Fotografía de la escoria de alto horno utilizada.



3.1.5. Aditivo superplastificante (SP)

El aditivo reductor de agua de alto rango utilizado fue Sika Viscocrete 2100 basado en policarboxilatos de tercera generación con un contenido de sólidos de 43% y GS de 1.08.

3.1.6. Nano partículas de sílice (nS)

Las nano partículas de sílice utilizadas se trabajaron en una suspensión acuosa. Presentaron GS de 1.70, un contenido de sólidos de 31.54% y tamaño de partículas de hasta 30 nm. La Figura 9 muestra las nano partículas utilizadas en estado seco.

Figura 9

Nano partículas de sílice utilizadas.



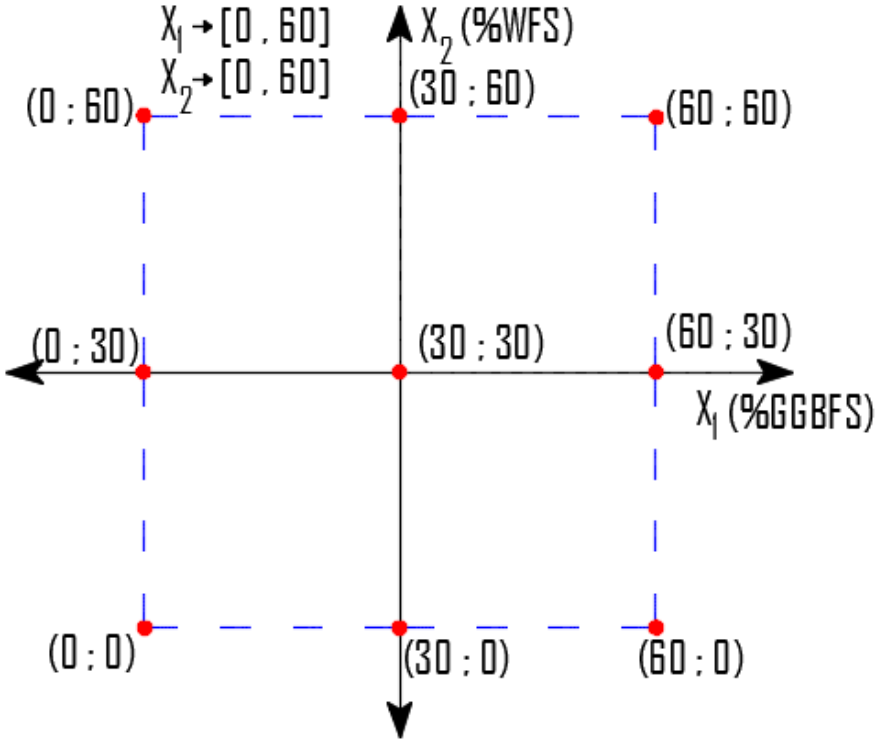
3.2. Diseño estadístico del experimento

El proceso experimental de la investigación realizada se basó en un diseño estadístico del tipo factorial con dos factores, tres niveles y un punto central. Los factores fueron el porcentaje de GGBFS como reemplazo en masa del cemento y el porcentaje de WFS como reemplazo también en masa del agregado fino. Los niveles de los factores fueron 0%, 30% y 60% para cada uno, habiendo escogido estos límites experimentales con base en ensayos previos de trabajabilidad. Porcentajes superiores de los dos materiales no permitieron cumplir con criterios mínimos de

trabajabilidad para el concreto auto-compactante, según recomendaciones de *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, (EFNARC, 2005). La Figura 10 muestra un esquema del diseño 3^k generado para el experimento.

Figura 10

Esquema del diseño estadístico del experimento.



En la Figura 10, los puntos rojos (9 puntos en total) representan las combinaciones de GGBFS y WFS que se ejecutaron en las mezclas. El nivel de significancia (α) para los análisis de varianza ANOVA se mantuvo en α=0.05. El valor del significancia fue escogido con base en investigaciones previas en este campo (Abouhussien & Hassan, 2015; Bayramov et al., 2004; Gesoğlu et al., 2009; Pereira et al., 2017; Rezaifar et al., 2016) y es un valor comúnmente aceptado. Al punto central se le realizaron 5 réplicas, mientras que los puntos externos se replicaron dos veces, generando un total de 13 mezclas.

3.3. Proporciones de las mezclas del diseño estadístico

Las proporciones de los materiales de la mezcla base (control) fueron seleccionadas con base en las recomendaciones para el diseño de mezclas de concreto auto-compactante (SCC) de Okamura & Ouchi, 1998 (Okamura H, 1998):

a) Fijar el volumen de AG en 50% del volumen de sólidos.

b) Fijar el volumen de AF en 40% del volumen de mortero.

c) Mantener relación agua/material cementante (A/C) entre 0.9-1.0, en volumen.

Para la mezcla control (GGBFS = 0 y WFS = 0, denominada GGBFS0-WFS0) las proporciones de los materiales se mantuvieron lo más cercanas posibles a las relaciones propuestas por Okamura y Ouchi (Okamura & Ouchi, 2003; Okamura H, 1998), considerando las características de los materiales locales disponibles, y realizando ajustes con base en ensayos en estado fresco para fijar adicionalmente la cantidad del aditivo superplastificante y cumpliendo con los criterios de auto-compactibilidad por flujo de asentamiento propuestos en el (EFNARC, 2005).

Todas las mezclas realizadas mantuvieron constante las cantidades de AG y SP, el último fijo como 0.4% de la masa del material cementante. Los porcentajes de GGBFS y WFS de cada mezcla se calcularon con base en la masa del cemento y de la arena fina, respectivamente. En la Tabla 6 se muestran las cantidades de cada uno de los materiales utilizados en cada una de las mezclas, por m^3 de concreto.

Tabla 6

Cantidades de materiales de las mezclas del diseño estadístico.

Mezcla	Cemento [kg/m³]	GGBFS [kg/m³]	AF [kg/m³]	WFS [kg/m³]	AG [kg/m³]	SP [kg/m³]	Agua [kg/m³]
GGBFS0-WFS0	536.11	0.00	662.49	0.00	884.78	4.24	187.64
GGBFS0-WFS30	536.11	0.00	463.75	198.75	884.78	4.24	187.64
GGBFS0-WFS60	536.11	0.00	265.00	397.50	884.78	4.24	187.64
GGBFS30-WFS0	375.28	160.83	662.49	0.00	884.78	4.24	187.64
GGBFS30-WFS30	375.28	160.83	463.75	198.75	884.78	4.24	187.64
GGBFS30-WFS60	375.28	160.83	265.00	397.50	884.78	4.24	187.64
GGBFS60-WFS0	214.44	321.67	662.49	0.00	884.78	4.24	187.64
GGBFS60-WFS30	214.44	321.67	463.75	198.75	884.78	4.24	187.64
GGBFS60-WFS60	214.44	321.67	265.00	397.50	884.78	4.24	187.64

3.4. Ensayos en estado fresco

3.4.1. Ensayo de flujo de asentamiento y T_{500}

El ensayo de flujo de asentamiento consistió en llenar de concreto el cono de asentamiento sobre una placa base. A continuación, se levantó el cono y se midió el diámetro final del concreto al terminar de fluir. Este ensayo se realizó con base en la ASTM C1611 (ASTM International, 2014a). La medida del flujo de asentamiento se determinó entonces como el promedio de dos medidas de diámetro, perpendiculares entre ellas. El ensayo de T_{500} consistió en cuantificar el tiempo que demoró el concreto en alcanzar un diámetro de 500 milímetros después de haber levantado el cono de asentamiento, según ASTM C1611 (ASTM International, 2014a). La Figura 11 muestra la ejecución de estos ensayos.

Figura 11

Ensayo de flujo de asentamiento y T_{500}: a) Diámetro de 500 mm – b) SCC en flujo.



a) b)

3.4.2. Ensayo de J-Ring

El ensayo de J-ring consistió en ubicar el "J-ring" por fuera del cono del flujo de asentamiento, llenar el cono y levantar el mismo para hacer pasar el concreto a través de las barras en las que se apoya el anillo. Después de que el concreto terminó de fluir, se determinó el promedio de la diferencia de alturas, entre el concreto dentro y el concreto fuera del anillo, en cuatro puntos de la circunferencia por dentro y este resultado se tomó como el valor característico de la habilidad de paso del concreto. Este ensayo se realizó con base en la ASTM C1621 (ASTM International, 2014b) y (EFNARC, 2002). La Figura 12 muestra una mezcla después de realizado el ensayo de J-ring.

Figura 12

Concreto después de realizado el ensayo de J-ring.



3.4.3. Ensayo de L-box

En el ensayo de L-box se utilizó una caja en forma de L que constaba de una puerta que se puede levantar verticalmente y dar paso al concreto, a través de barras que simulan el refuerzo, desde la sección vertical a la horizontal de la misma. El ensayo consistió en llenar la sección vertical de la L, se dejó reposar el concreto durante 1 minuto y a continuación se levantó la puerta para dar paso al concreto. Al final del movimiento se determinó un cociente (*h2/h1*) entre el promedio de alturas del concreto en la sección horizontal de la L (*h2*) y el promedio de alturas del concreto en la sección vertical de la L (*h1*). La caja en forma de L se puede ver en la Figura 13. El ensayo se realizó con base en las recomendaciones de (EFNARC, 2005).

Figura 13

Ejecución de ensayo de L-box: a) Medición de h2 – b) Medición de h1.



a) b)

3.4.4. Ensayos de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica

Haciendo uso del reómetro ICAR RHM-3000 del Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR) se determinaron los parámetros de esfuerzo de fluencia y de viscosidad plástica. En primer lugar se procedió a llenar el recipiente de concreto y luego introducir el reómetro en el recipiente lleno de concreto fresco. Luego, se accionó el reómetro manteniendo una velocidad de 0.500 rev/s durante 20 s. Luego, se redujo la velocidad gradualmente, manteniendo cada una de ellas durante 5 segundos. Las velocidades utilizadas fueron: 0.500, 0.425, 0.350, 0.275, 0.200, 0.125 y 0.050 rev/s. Esta metodología se seleccionó con base en lo planteado por (Ahari et al., 2015). Para cada velocidad se registró los valores de torque correspondientes. La Figura 14 muestra el equipo y montaje utilizado en el ensayo.

Figura 14

Equipo y montaje utilizado en el ensayo de reómetro: a) Ensayo en curso – b) Superior: Reómetro. Inferior: Recipiente para el concreto.



a)…… b)

3.5. Ensayos en estado endurecido

3.5.1. Ensayos de resistencia mecánica

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó a probetas a 7 y 28 días de curado. Por edad y por mezcla se fallaron 4 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura. El ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM C39 (ASTM International, 2017). La Figura 15 muestra el típico ensayo de resistencia a la compresión realizado.

Figura 15

Ejecución de ensayo de resistencia a la compresión.



Por otro lado, el ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ensayo brasileño) se realizó también en probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura a 7 y 28 días de curado. Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM C496 (ASTM International, 2011). La Figura 16 muestra una probeta cilíndrica de concreto después de fallar por el ensayo de resistencia a la tracción indirecta.

Figura 16

Probeta de concreto después del ensayo resistencia a la tracción.



3.5.2. Ensayos de durabilidad

El ensayo de conductividad eléctrica aparente se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM C1760 (ASTM International, 2012c). El ensayo consistió en determinar la corriente eléctrica a través de un espécimen de concreto sometido a una diferencia de potencial de 60 V. Las dimensiones de los especímenes fueron de 100 mm de diámetro y 30 mm de altura. Este ensayo se realizó a 28 días de curado. Los especímenes se sometían a una solución de cloruro de sodio al 3.0% en masa, medio a través del que se transmite la corriente eléctrica. La corriente eléctrica se midió 1 minuto después de que el voltaje fue aplicado. El ensayo se realizó a 4 probetas por cada mezcla. La Figura 17 muestra el montaje del ensayo mencionado.

Figura 17

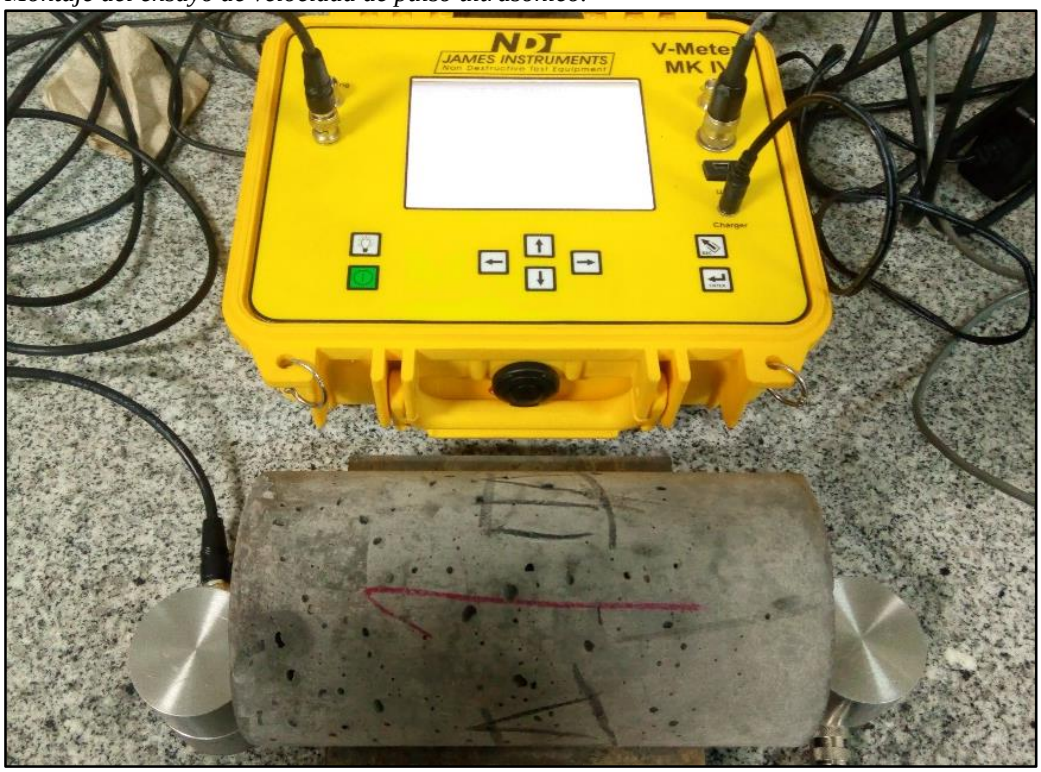
Montaje para el desarrollo de ensayo de conductividad eléctrica aparente.



El ensayo de velocidad de pulso ultrasónico, como abordaje a la durabilidad del concreto, se realizó con base en la ASTM C597 (ASTM International, 2016). El ensayo consistió en pasar una onda a través de la longitud de las probetas de concreto, por las caras de las mismas. Se utilizaron 4 probetas de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura por cada edad de curado (7 y 28 días) y por cada mezcla. La velocidad de la onda se determinó como el cociente entre la altura de la probeta y el tiempo que demora en pasar la onda a través de la misma. Como agente de acoplamiento se utilizó gel de ultrasonido. La Figura 18 muestra el montaje del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.

Figura 18

Montaje del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.



3.5.3. Ensayo de microscopia de barrido electrónica y de espectroscopia de energía dispersiva

La microestructura de las mezclas de concreto se abordó por medio del ensayo de microscopia de barrido electrónico (SEM, por sus siglas en inglés) y el ensayo de espectroscopia de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés). El ensayo consistió en el disparo y posterior captura de electrones, saliendo del microscopio, hacia la superficie del concreto a los 28 días de curado. Como preparación a la superficie se hizo un recubrimiento con carbono. Los ensayos se realizaron con un voltaje de aceleración de 30 kV; electrones secundarios para observar la morfología y electrones retro-dispersados para las variaciones en la composición.

4. Resultados y discusión

Para todos los puntos del diseño estadístico del experimento se realizaron los respectivos ensayos en estado fresco y endurecido. Se realizaron análisis de la varianza ANOVA en las propiedades de las mezclas de concreto (estado fresco y estado endurecido) abordadas por medio de resultados cuantitativos considerando las variables experimentales de las que se pretendía encontrar significancia estadística: efectos lineales de las variables (GGBFS y WFS), sus efectos cuadráticos ($GGBFS^2$ y WFS^2) y su efecto de interacción (GGBFS*WFS). Se garantizó que los datos experimentales cumplían con los supuestos de ANOVA de normalidad, independencia e igualdad de varianzas (Gutiérrez & de la Vara, 2008; D. C. Montgomery, 2017; D. Montgomery & Runger, 2003), lo que validó matemáticamente el experimento. El análisis estadístico de todas la propiedades de los concretos auto-compactantes se realizó por medio del software estadístico Minitab ® v19.

4.1. Resultados de ensayos en estado fresco

Después de realizadas las pruebas en estado fresco de las diferentes mezclas se recopiló la información y se realizó el respectivo análisis estadístico de los resultados.

4.1.1. Ensayos de trabajabilidad (Flujo de asentamiento, T_{500}, J-ring, L-box)

Los ensayos de flujo de asentamiento y de T_{500} permiten abordar de manera indirecta y empírica la fluidez y la viscosidad, respectivamente, de las mezclas de concreto auto-compactante. (EFNARC, 2005), clasifica la fluidez de las mezclas de concreto con base en los valores de flujo de asentamiento en tres niveles: 550 mm < SF1 < 650 mm; 650 mm < SF2 < 750 mm; 750 mm < SF3 < 850 mm. Por otro lado, la viscosidad la clasifica según los valores de tiempo del ensayo de

T_{500} en VS1 ≤ 2 s; VS2 > 2 s. Asimismo, los ensayos de J-ring y L-box permiten caracterizar el comportamiento de las mezclas de concreto auto-compactante cuando las mismas deben pasar a través de barras que simulan el refuerzo de acero de las estructuras, permitiendo entonces conocer la capacidad de paso de las mismas (ASTM International, 2014b; EFNARC, 2005). La Tabla 7 muestra los resultados de los ensayos de flujo de asentamiento, T_{500}, L-box y J-ring para cada una de las muestras de concreto auto-compactante desarrolladas, así como los límites recomendados por (EFNARC, 2002) y (EFNARC, 2005).

Tabla 7

Resultados de ensayos de trabajabilidad.

Código mezcla	SF* (mm)	T_{500} (s)	L-box (h2/h1)	J-ring (mm)	Clasificación EFNARC
GGBFS0-WFS0	720.00	2.50	0.85	2.50	SF2 – VS2
GGBFS0-WFS30	595.00	2.50	0.62	24.5	SF1 – VS2
GGBFS0-WFS60	760.00	2.70	1.05	5.00	SF3 – VS2
GGBFS30-WFS0	690.00	3.20	0.85	12.00	SF2 – VS2
GGBFS30-WFS30	753.00	2.74	0.88	9.60	SF3 – VS2
GGBFS30-WFS60	765.00	4.50	1.09	4.00	SF3 – VS2
GGBFS60-WFS0	715.00	3.00	0.40	15.30	SF2 – VS2
GGBFS60-WFS30	835.00	2.30	1.03	5.00	SF3 – VS2
GGBFS60-WFS60	790.00	2.70	0.77	4.50	SF3 – VS2
Recomendaciones EFNARC	550-850	2-5	0.8-1.0	0-10	

*Flujo de asentamiento.

De la Tabla 7 es posible observar que los valores de flujo de asentamiento se encuentran en el rango de 595 mm hasta 835 mm, obteniendo estos valores las mezclas GGBFS0-WFS30 y GGBFS60-WFS30, respectivamente. También se observa que todas las mezclas presentaron valores de flujo de asentamiento dentro del rango recomendado por (EFNARC, 2005) (550 mm a 850 mm). De la mezclas, sólo GGBFS0-WFS30 cae en el grupo de SF1. La mezcla control, así como las mezclas GGBFS30-WFS0 y GGBFS60-WFS0 clasifican como SF2, y las restantes como SF3.

Con respecto al tiempo de flujo, abordado por el ensayo de T_{500}, se puede indicar que todos los valores obtenidos caen en la clasificación de VS2, al ser todos superiores a 2 s. También, se observa que el menor valor de T_{500} lo presentó la mezcla GGBFS60-WFS30 y el mayor lo generó la mezcla GGBFS30-WFS60.

Ahora, con respecto a la capacidad de paso de las mezclas de los concreto auto-compactantes, los valores obtenidos en el ensayo de L-box se encuentran comprendidos entre 0.4 y 1.0, correspondientes a las mezclas GGBFS60-WFS0 y a las mezclas GGBFS0-WFS60, GGBFS30-WFS60 y GGBFS60-WFS30. De las mezclas evaluadas, sólo 3 presentaron valores por fuera de los límites recomendados por (EFNARC, 2005), siendo la mezcla GGBFS60-WFS0 la de mayor problema de capacidad de paso. Por otro lado, los valores de J-ring estuvieron comprendidos entre 2.5 mm y 24.5 mm, para las mezcla control (GGBFS0-WFS0) y la mezcla GGBFS0-WFS30, respectivamente. En este ensayo, también 3 mezclas estuvieron por fuera de los límites recomendados por (EFNARC, 2002): GGBFS0-WFS30, GGBFS30-WFS0 y GGBFS60-WFS0. A continuación, la Tabla 8 presenta los resultados del análisis de la varianza ANOVA para el flujo de asentamiento, T_{500}, L-box y J-ring.

Los resultados del análisis de la varianza ANOVA, presentados en la Tabla 8, revelan que, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, ninguno de los efectos de las variables independientes (GGBFS y WFS) es estadísticamente significativo sobre los cambios y el comportamiento de las propiedades estudiadas por medio de los ensayos de flujo de asentamiento, T_{500}, L-box y J-ring. Esto, en otras palabras, indica que no se puede asegurar que los cambios observados en las variables dependientes hayan sido generados por las variaciones en los tratamientos (cada una de las mezclas), es decir, no se puede asegurar que los cambios hayan sido ocasionados por las variaciones en las cantidades de GGBFS y de WFS. Este hallazgo del análisis estadístico es

apreciable al estudiar los cambios en los valores de los ensayos de trabajabilidad entre las diferentes mezclas.

Tabla 8

Resumen ANOVA para ensayos de trabajabilidad.

Flujo de asentamiento					
Fuente	**GDL***	**Suma de cuadrados**	**Cuadrado medio**	**Valor F**	**Valor-P**
GGBFS	1	11704.2	11704.2	1.86	0.215
WFS	1	6016.7	6016.7	0.95	0.361
$GGBFS^2$	1	310.5	310.5	0.05	0.831
WFS^2	1	9.9	9.9	0	0.969
GGBFS*WFS	1	306.3	306.3	0.05	0.832
Lack-of-Fit	3	19575.2	6525.1	1.06	0.458
Error Puro	4	24580	6145		
Total	12	62507.7			
T_{500}					
Fuente	**GDL***	**Suma de cuadrados**	**Cuadrado medio**	**Valor F**	**Valor-P**
GGBFS	1	0.015	0.015	0.01	0.928
WFS	1	0.24	0.24	0.14	0.721
$GGBFS^2$	1	1.4277	1.42766	0.82	0.394
WFS^2	1	1.476	1.47599	0.85	0.387
GGBFS*WFS	1	0.0625	0.0625	0.04	0.855
Lack-of-Fit	3	1.1	0.36666	0.13	0.935
Error Puro	4	11.032	2.758		
Total	12	14.5523			
L-box					
Fuente	**GDL***	**Suma de cuadrados**	**Cuadrado medio**	**Valor F**	**Valor-P**
GGBFS	1	0.017281	0.017281	0.37	0.564
WFS	1	0.107736	0.107736	2.28	0.174
$GGBFS^2$	1	0.04491	0.04491	0.95	0.362
WFS^2	1	0.000662	0.000662	0.01	0.909
GGBFS*WFS	1	0.007225	0.007225	0.15	0.707
Lack-of-Fit	3	0.218524	0.072841	2.61	0.188
Error Puro	4	0.111673	0.027918		
Total	12	0.510888			
J-ring					
Fuente	**GDL***	**Suma de cuadrados**	**Cuadrado medio**	**Valor F**	**Valor-P**
GGBFS	1	8.760	8.760	0.17	0.694
WFS	1	44.010	44.010	0.85	0.388
$GGBFS^2$	1	12.371	12.371	0.24	0.641
WFS^2	1	59.299	59.299	1.14	0.321
GGBFS*WFS	1	43.891	43.891	0.84	0.389
Lack-of-Fit	3	252.023	84.008	3.00	0.158
Error Puro	4	111.925	27.981		
Total	12	520.308			

*Grados de libertad.

Al observar las series constantes de GGBFS, es posible indicar que incrementos en la cantidad de WFS no parece generar una tendencia clara sobre el flujo de asentamiento. Por ejemplo, en la serie GGBFS0 un 30% de WFS baja la fluidez de la mezcla, pero un 60% la vuelve superior al de la mezcla control. Adicionalmente, para la serie GGBFS60 un incremento de 30% en WFS genera mayor fluidez, mientras que 60% de presencia de WFS vuelve a disminuir la fluidez de la mezcla, aunque sea superior a la mezcla GGBFS60-WFS0. También, para las series constantes de WFS, la presencia e incremento de la GGBFS tampoco parece tener un claro efecto sobre el flujo de asentamiento. En el caso de la serie constante de WFS0 incrementos de GGBFS causa una caída con 30% y un posterior incremento al 60% de reemplazo de cemento por escoria de alto horno. Ahora, para la serie de WFS30, incrementos en la cantidad de GGBFS generan aumentos en el flujo de asentamiento para los dos porcentajes de reemplazo. Y, para WFS60, incrementos en la cantidad de GGBFS llevó a incrementos aparentes en la fluidez, sin embargo, los mismos fueron marginales, de apenas 0.65% y 3.80%, respectivamente.

Así como para el flujo de asentamiento, tampoco se observa un efecto claro de los dos materiales sobre los valores del T_{500}. Para la serie constante de GGBFS0, incrementos en la cantidad de residuo de arena de fundición produjeron valores iguales y un poco superiores a los de mezcla control. Sin embargo, para las series GGBFS30 y GGBFS60, generaron caídas en los valores de T_{500} al 30% de WFS y posteriores incrementos al 60%. Por otro lado, para todas las series constantes de WFS, incrementos en la cantidad de GGBFS generaron aumentos en los valores de T_{500} al 30% de escoria de alto horno, pero 60% del mismo material generaba disminuciones en el tiempo de flujo, siendo entonces, tampoco conciso, el efecto de estos dos materiales sobre el tiempo de flujo.

Adicionalmente, el comportamiento de los valores de L-box tampoco parece ser afectado por los cambios en las variables independientes. Para la serie constante de GGBFS0, incrementos en la cantidad de WFS llevaron a disminución y posterior aumento en los valores de L-box. Para la serie GGBFS30, cambios en WFS muestra aumentos en los valores de L-box, pero para GGBFS60 el comportamiento es de aumento y posterior disminución con 60% de WFS. Con respecto a cambios en GGBFS en las series constantes de WFS, en ausencia de WFS, aumentos en la GGBFS generaron caídas únicamente al 60% del mismo. A 30% de WFS, aumentos en GGBFS representaron aumentos en los valores de L-box, pero al 60% de WFS, incrementos en GGBFS indicaron disminuciones en los valores de L-box pero solamente al 60% de GGBFS.

Considerando ahora los valores de J-ring, observados en la Tabla 7 es posible señalar que, para las series constantes de GGBFS, aumentos en la cantidad de WFS no generan un comportamiento de tendencia sobre el efecto de la incorporación de este material. Para la serie constante GGBFS0 el aumento en cantidad de WFS genera incremento y posterior disminución en los valores de J-ring. Para la serie GGBFS30, incrementos en WFS produjeron disminuciones en los valores de J–ring y, finalmente, en la serie de GGBFS el comportamiento fue de disminución, pero con una diferencia marginal entre los valores de 30% y 60% de WFS, de apenas 0.5 mm. Por otro lado, para el caso de las series constantes de WFS, el efecto de la presencia y aumento en cantidad de GGBFS tampoco es claro. Para la serie WFS0, incrementos de GGBFS produjeron incrementos en los valores de J-ring. Pero, para la serie WFS30, aumentos en la cantidad de GGBFS condicionó disminuciones en los valores de J-ring. Finalmente, para la serie WFS60, el aumento en la cantidad de GGFBS generó disminuciones y posterior incremento en los valores de J-ring. Por lo tanto, ninguno de los dos materiales tiene un efecto marcado sobre los valores de J-

ring. De esta manera, la capacidad de paso tampoco parece verse afectada de manera precisa por los cambios en las cantidades incorporadas de GGBFS y WFS.

A pesar de los hallazgos encontrados, vale la pena anotar que por fluidez (flujo de asentamiento) y por tiempo de flujo (T_{500}) todas las mezclas modificadas desarrolladas cumplen con los criterios de auto-compactibilidad sugeridos por (EFNARC, 2005). Sin embargo, la capacidad de paso de algunas mezclas se vio comprometida y no cumple con los criterios de (EFNARC, 2002, 2005), no obstante, visualmente no se observó ningún tipo de bloqueo ni segregación, posiblemente debido a falta de cohesión, como reportó (Gesoğlu et al., 2009). Investigaciones previas han abordado estas características del concreto auto-compactante ante el uso de estos dos materiales, aunque no de manera conjunta. Estas investigaciones mostraron que es posible desarrollar SCC con GGBFS (Dadsetan & Bai, 2017; Zhao et al., 2015) y con WFS (Parashar et al., 2020; Sandhu & Siddique, 2019; Siddique & Sandhu, 2013a; Sua-iam et al., 2019) cumpliendo con los criterios de (EFNARC, 2005) y usar hasta 100% de GGBFS como reemplazo de cemento (Vivek & Dhinakaran, 2017b) y 100% de WFS como reemplazo de agregado fino (Şahmaran et al., 2011), sin mayor perjuicio en las características de trabajabilidad de las mezclas de SCC.

Con base en los resultados obtenidos en el estado fresco de las mezclas de concreto auto-compactantes desarrolladas y en comparación con la información adicional presentada, se puede decir que tanto la GGBFS y el WFS puede ser utilizados como reemplazos parciales (hasta 60%) del cemento y agregado fino, respectivamente y de manera conjunta en la producción de mezclas de SCC. Adicionalmente, posibles problemas de trabajabilidad podrían ser abordados mediante el uso de mayor cantidad de aditivo superplastificante y por la incorporación de aditivos modificadores de la viscosidad.

4.1.2. Ensayos de reología (Esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica)

Haciendo uso de un reómetro (viscosímetro rotacional) se abordaron las características físicas de flujo de las mezclas de concreto auto-compactante desarrolladas. El ensayo de reología permitió directamente conocer los valores de torque y velocidad rotacional de cada una de las mezclas. A continuación, la Tabla 9 presenta los resultados de torque para cada una de las mezclas, con respecto a cada velocidad utilizada en el ensayo. Adicionalmente, la relación gráfica entre el torque y la velocidad rotacional para la mezcla control (GGBFS0-WFS0) se puede observar en la Figura 19.

Tabla 9

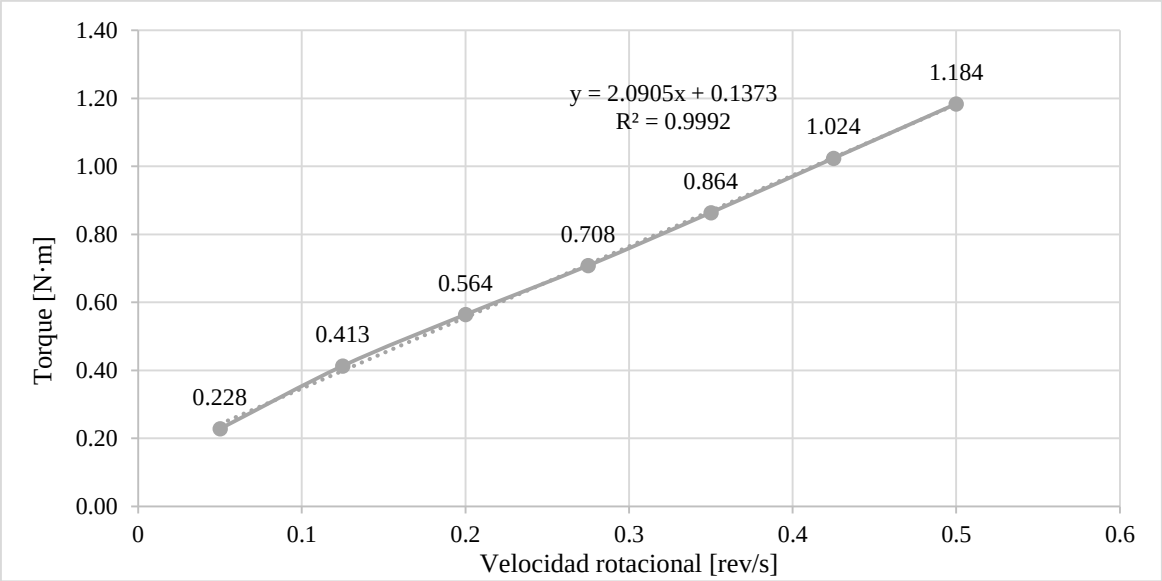
Valores de torque de las mezclas.

	Torque (N·m)						
Velocidad rotacional (rev/s)	**0.500**	**0.425**	**0.350**	**0.275**	**0.200**	**0.125**	**0.050**
GGBFS0-WFS0	1.184	1.024	0.864	0.708	0.564	0.413	0.228
GGBFS0-WFS30	1.460	1.200	0.981	0.783	0.591	0.408	0.212
GGBFS0-WFS60	1.709	1.406	1.118	0.900	0.658	0.426	0.179
GGBFS30-WFS0	1.235	1.024	0.838	0.689	0.493	0.357	0.159
GGBFS30-WFS30	1.218	1.016	0.830	0.671	0.501	0.346	0.166
GGBFS30-WFS60	4.043	3.132	2.358	1.735	1.160	0.664	0.242
GGBFS60-WFS0	1.281	1.002	0.871	0.708	0.534	0.372	0.180
GGBFS60-WFS30	2.619	2.091	1.637	1.213	0.850	0.516	0.214
GGBFS60-WFS60	2.634	2.107	1.660	1.239	0.844	0.501	0.213

Así como se observa en la Figura 19, los valores de torque y la velocidad de rotación de las mezclas presentaron en su mayoría una relación de comportamiento lineal (Ferraris, 1999). Para todas las mezclas, el ajuste lineal de los valores de torque y de velocidad de rotación generó coeficientes de correlación (R^2) superiores a 0.98.

Figura 19

Relación entre torque y velocidad rotacional (GGBFS0-WFS0).



La relación lineal entre el torque y la velocidad de rotación es análoga a la dependencia lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, cuya pendiente es la viscosidad plástica, después de superar el esfuerzo de fluencia, comportamiento característico de un fluido Bingham (Ferraris, 1999), se muestra a continuación en la Ec. 3:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \qquad Ec.3$$

donde,

τ = Esfuerzo cortante [Pa]

τ_0 = Esfuerzo de fluencia [Pa]

μ = Viscosidad plástica [Pa·s]

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de corte [1/s]

Teniendo en cuenta esta relación, el ajuste de los datos de torque y velocidad de rotación, obtenidos de los ensayos, hacia el modelo reológico lineal de Bingham se realizó por medio de las ecuaciones de transformación de Reiner-Riwlin (Feys et al., 2008; R. B. Singh & Singh, 2018), presentadas en las Ec. 4, 5 y 6. Los resultados del ajuste al modelo reológico lineal de Bingham se puede observar en la Tabla 10.

$$T = G + HN \qquad Ec.4$$

$$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h}\left(\frac{1}{{R_1}^2} - \frac{1}{{R_2}^2}\right)\frac{1}{Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \qquad Ec.5$$

$$\mu = \frac{H}{8\pi^2 h}\left(\frac{1}{{R_1}^2} - \frac{1}{{R_2}^2}\right) \qquad Ec.6$$

Donde,

$T =$ Torque [N·m]

$G =$ Intercepto de la linealización de los resultados con el eje Y [N·m]

$H =$ Pendiente de la linealización de los resultados [N·m·s]

$N =$ Velocidad de rotación [rev/s]

$R_1 =$ Radio paleta del reómetro [mm]

$R_2 =$ Radio del contenedor cilíndrico [mm]

$h =$ Altura de la paleta [mm]

Sin embargo, al observar los valores de esfuerzo de fluencia, presentados en la Tabla 10, se encuentra que algunos son negativos, siendo un indicativo de una desviación de la relación lineal entre el (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) para algunas mezclas.

Tabla 10

Parámetros reológicos del modelo lineal de Bingham.

	τ_0 [Pa]	μ [Pa·s]
GGBFS0-WFS0	21.10	41.51
GGBFS0-WFS30	8.64	54.06
GGBFS0-WFS60	-0.66	66.28
GGBFS30-WFS0	6.52	46.40
GGBFS30-WFS30	2.88	41.03
GGBFS30-WFS60	-60.19	165.81
GGBFS60-WFS0	10.02	46.33
GGBFS60-WFS30	-23.77	105.44
GGBFS60-WFS60	-25.29	106.76

Los valores negativos de esfuerzo de fluencia pueden aparecer cuando se presenta el fenómeno de engrosamiento de la viscosidad debido al aumento en la velocidad de corte, fenómeno llamado también de "s*hear thickening*". No obstante, estos valores negativos de esfuerzo de fluencia no tienen validez ni explicación física alguna, e indican que el ajuste matemático realizado no es el apropiado para abordar los resultados obtenidos de los ensayos en el reómetro (Barnes, 1989; Feys et al., 2008; Feys, Heirman, et al., 2007).

Para poder ajustar los valores de torque y de velocidad de rotación se decidió ampliar el orden del modelo de ajuste de los datos a uno superior, que permitiera luego, por medio de transformaciones apropiadas, aplicar el modelo de Bingham modificado, que es el modelo de Bingham, pero ajustado y ampliado a un polinomio de Taylor de segundo orden, que tiene en cuenta la no-linealidad entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte (Feys et al., 2008). El comportamiento de este modelo modificado de Bingham viene expresado por la Ec. 7

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 \qquad Ec.7$$

donde,

$\tau =$ Esfuerzo cortante [Pa]

$\tau_0 =$ Esfuerzo de fluencia [Pa]

$\mu =$ Viscosidad plástica [Pa·s]

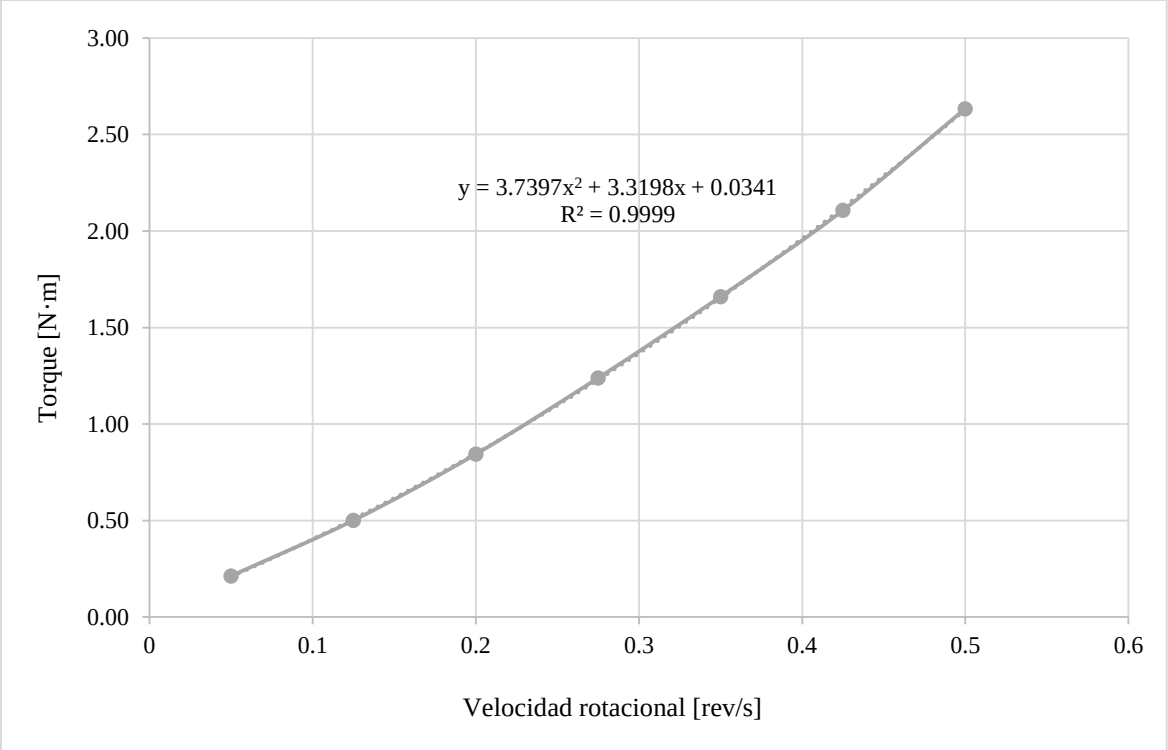
$\dot{\gamma} =$ Velocidad de corte [1/s]

$c =$ Parámetro de segundo orden [Pa·s^2]

Ahora, con el ajuste de los datos a un modelo de orden superior, los mismos se pudieron representar gráficamente y presentaron valores de coeficiente de correlación (R^2) superiores a 0.99, como se muestra en la Figura 20 para la mezcla GGBFS60-WFS60.

Figura 20

Relación entre torque y velocidad rotacional - Orden superior (GGBFS60-WFS60).



Similar a lo desarrollado con el modelo lineal de Bingham, con los valores obtenidos del ajuste de orden superior del torque y velocidad de rotación de los ensayos, se desarrollaron las

apropiadas transformaciones que permitieran obtener los parámetros del modelo de Bingham modificado para todas las mezclas de concreto, por medio de la Ec. 5, 6, 8 y 9.

$$T = G + HN + CN^2 \qquad Ec.8$$

$$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h}\left(\frac{1}{{R_1}^2} - \frac{1}{{R_2}^2}\right)\frac{1}{Ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \qquad Ec.5$$

$$\mu = \frac{H}{8\pi^2 h}\left(\frac{1}{{R_1}^2} - \frac{1}{{R_2}^2}\right) \qquad Ec.6$$

$$c = \frac{C}{8\pi^2 h}\left(\frac{1}{{R_1}^2} - \frac{1}{{R_2}^2}\right)\left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1}\right) \qquad Ec.9$$

donde,

T = Torque [N·m]

N = Velocidad de rotación [rev/s]

R_1 = Radio paleta del Reómetro [mm]

R_2 = Radio del contenedor cilíndrico [mm]

h = Altura de la paleta [mm]

C, H = Parámetros obtenidos del ajuste al polinomio de segundo orden.

Después de realizadas todas las transformaciones para cada una de las mezclas, los resultados generados de los parámetros del modelo de Bingham modificado se pueden apreciar en la Tabla 11.

Tabla 11

Parámetros reológicos del modelo modificado de Bingham.

	τ_0 [Pa]	μ [Pa.s]	c [Pa.s^2]	c/μ
GGBFS0-WFS0	20.13	42.80	-0.29	-0.007
GGBFS0-WFS30	17.49	42.23	2.64	0.030
GGBFS0-WFS60	8.19	54.44	2.64	0.050
GGBFS30-WFS0	10.34	41.29	1.14	0.060
GGBFS30-WFS30	9.82	38.18	2.41	0.060
GGBFS30-WFS60	7.73	74.96	20.24	0.270
GGBFS60-WFS0	14.48	40.37	1.33	0.030
GGBFS60-WFS30	8.24	62.64	9.54	0.150
GGBFS60-WFS60	5.24	65.92	9.10	0.140

De los resultados observados en la Tabla 11 es posible apreciar que de los nuevos valores de esfuerzo de fluencia, ninguno es negativo. El comportamiento no-lineal se puede abordar por medio de la relación c/μ: el engrosamiento de la viscosidad, "*shear thickening"* por cortante ocurre si c/μ>0, el adelgazamiento de la viscosidad o *"shear thinning"* por cortante si c/μ<0 y finalmente c/μ=0 indica un comportamiento lineal como el del modelo de Bingham lineal (Feys, Verhoeven, et al., 2007). La Tabla 12 muestra los resultados del análisis de la varianza ANOVA desarrollado sobre los valores de esfuerzo de fluencia dinámico y viscosidad plástica de las mezclas de concreto.

Del análisis de la varianza ANOVA presentado en la Tabla 12, es posible indicar que, con un nivel de significancia α=0.05, los efectos lineales de la escoria de alto horno y el residuo de arena de fundición fueron estadísticamente significativos sobre el esfuerzo de fluencia dinámico y que únicamente el efecto lineal del residuo de arena de fundición fue estadísticamente significativo sobre la viscosidad plástica de las mezclas de concreto evaluadas. La Figura 21 presenta los valores de esfuerzo de fluencia dinámico de todas las mezclas de concreto.

Tabla 12

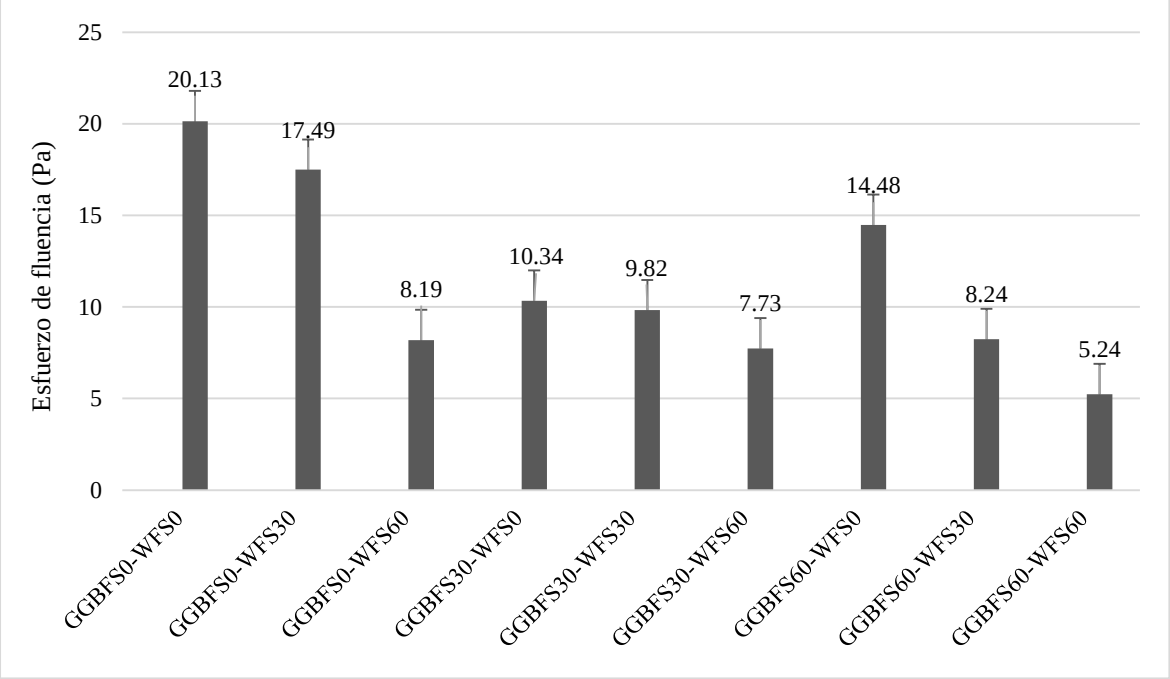
Resumen ANOVA para ensayos de reología.

Esfuerzo de fluencia dinámico					
Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	53.142	53.142	7.45	0.030
WFS	1	94.313	94.313	22.93	0
$GGBFS^2$	1	24.959	24.959	0.60	0.463
WFS^2	1	1.859	1.859	0.04	0.838
GGBFS*WFS	1	1.828	1.828	0.04	0.839
Lack-of-Fit	3	29.369	9.790	0.15	0.924
Error Puro	4	260.108	65.027		
Total	12	464.06			
Viscosidad plástica					
Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	144.47	144.47	0.95	0.362
WFS	1	836.91	836.91	6.94	0.030
$GGBFS^2$	1	41.49	41.49	0.27	0.617
WFS^2	1	252.65	252.65	1.67	0.238
GGBFS*WFS	1	48.35	48.35	0.32	0.590
Lack-of-Fit	3	478.42	159.47	1.09	0.448
Error Puro	4	583.37	145.84		
Total	12	2526.84			

*Grados de libertad.

Figura 21

Esfuerzo de fluencia dinámico de las mezclas del diseño estadístico.



Los valores de esfuerzo de fluencia dinámico estuvieron comprendidos entre 20.13 Pa y 5.24 Pa, correspondientes a las mezclas GGBFS0-WFS0 y GGBFS60-WFS60, respectivamente. Al observar la Figura 21 y con base en los resultados de los análisis de la varianza presentados en la Tabla 12, se puede afirmar que para todas las series constantes de GGBFS, incrementos en la cantidad de WFS incorporado conduce a disminuciones en los valores de esfuerzo de fluencia dinámico. Por otro lado, abordando el efecto estadísticamente significativo de la GGBFS, se puede decir que para las series constantes con presencia de WFS en 30% y 60%, incrementos en la cantidad de GGBFS llevó a disminuciones en los valores de esfuerzo de fluencia dinámico. En la serie de WFS0, 30% de GGBFS llevó a una disminución de 48.63%, mientras que un 60% llevó a una disminución del 28.0%, con respecto a la mezcla control. Esto indica que incrementos en las cantidades de los dos reemplazos utilizados (GGBFS y WFS) contribuye a disminuir el esfuerzo de fluencia dinámico de las mezclas. Más aún, el uso conjunto y máximo de GGBFS y WFS llevó a la mezcla con menor esfuerzo de fluencia dinámico.

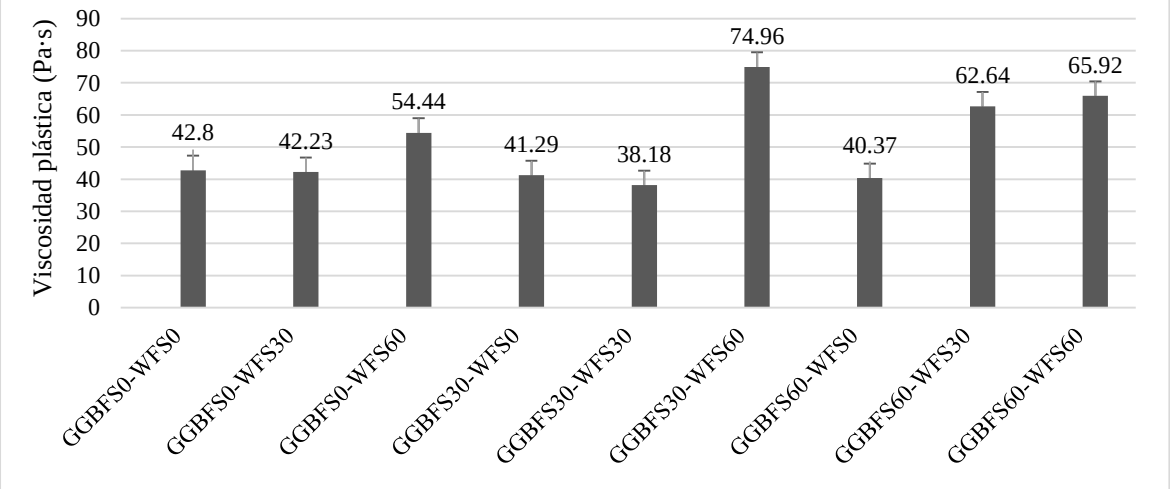
Valores bajos de esfuerzo de fluencia dinámico son beneficiosos para las mezclas de concreto auto-compactante ya que en teoría es un indicativo de aumentos en la trabajabilidad de las mezclas y también es una muestra del equilibrio que debe existir entre la fluidez y la resistencia la segregación (EFNARC, 2005). Por otro lado, tener una medida cuantitativa y no empírica de la trabajabilidad contribuye a un mejor control de calidad de las mezclas, ayudando a evitar dificultadas en la colocación del concreto, fallas prematuras, y disminuir la posible generación de desperdicios (Chidiac & Mahmoodzadeh, 2009).

La disminución en el esfuerzo de fluencia por causa de la incorporación y aumento de la GGBFS posiblemente se debe a su morfología, observada en la Figura 7, que presenta una superficie lisa y densa, lo que induce la aparición de planos de deslizamiento lisos (Yuksel, 2018).

Shi et al., 2004 (Y. X. Shi et al., 2004) demostraron que el esfuerzo de fluencia disminuye con el incremento en la cantidad de GGBFS, también mostrando que esta propiedad puede disminuir al reemplazar parcialmente cemento por polvos vidriosos (semi-cristralinos). Por lo tanto, incorporaciones de GGBFS pueden aumentar la fluidez y trabajabilidad de las mezclas de concreto (Feys et al., 2008; Yuksel, 2018), lo cual es análogo a las diminuciones en el esfuerzo de fluencia dinámico. Similarmente, Boukendakdji et al., (2012) encontraron disminuciones en el esfuerzo de fluencia de las mezclas de SCC para las dos series de superplastificantes que probaron con el aumento en la cantidad de GGBFS. Jau & Yang, (2010) encontraron que el menor torque de fluencia fue producido por la mezcla de SCC con 60% de GGBFS y que una mayor cantidad de GGBFS contribuía a disminuir el torque de fluencia en todos los tipos de concretos analizados. Finalmente, la mezcla con menor esfuerzo de fluencia encontrada por Ghoddousi et al., (2014) en su estudio sobre concretos auto-compactantes fue la mezcla con reemplazo del 50% de cemento por GGBFS. La Figura 22 muestra los valores de viscosidad plástica de todas las mezclas de concreto desarrolladas.

Figura 22

Viscosidad plástica de las mezclas del diseño estadístico.



La viscosidad plástica, en su relación lineal representa la correspondencia directa entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte y es un indicativo de la oposición a fluir de un material (Chidiac & Mahmoodzadeh, 2009; Ferraris, 1999). Los valores de viscosidad plástica de las mezclas estuvieron comprendidos entre 74.96 Pa·s y 38.18 Pa·s, correspondientes a las mezclas GGBFS30-WFS60 y GGBFS30-WFS30, respectivamente. Considerando los resultados del análisis de la varianza para la viscosidad plástica que arrojó que el efecto lineal del WFS era el único estadísticamente significativo sobre dicha propiedad, y observando la Figura 22 se puede decir que incrementos en la cantidad de WFS contribuyen a mayores valores de viscosidad plástica, aunque este efecto no sea de tendencia en las series con 0% y 30% de GGBFS. Adicionalmente, para todas las series constantes de GGBFS, los mayores valores de viscosidad plástica se produjeron ante la presencia de 60% de WFS.

Además de representar la resistencia a fluir de las mezclas, la viscosidad plástica es un indicador del llenado apropiado de las formaletas y de la tendencia a la segregación del concreto (Cyr et al., 2000). La presencia y aumento de WFS, material más fino que la arena de río, contribuye a que la mezcla tenga mayor cantidad de finos, lo que consecuentemente aumenta la demanda de agua y, de esta manera, los valores de viscosidad plástica y posibles disminuciones en la trabajabilidad (Feys et al., 2008; Tittarelli, 2018). Esto, por lo tanto, puede ser favorable para las mezclas de SCC debido que en mayores valores de viscosidad plástica pueden evitar entonces la segregación al construirse una estructura interna con mayor cohesión y capacidad de soportar su propio peso (Cyr et al., 2000). Similarmente, Şahmaran et al., (2011) encontraron que la viscosidad relativa de las mezclas de SCC aumentaba típicamente con WFS por encima al 50%.

4.2. Ensayos en estado endurecido

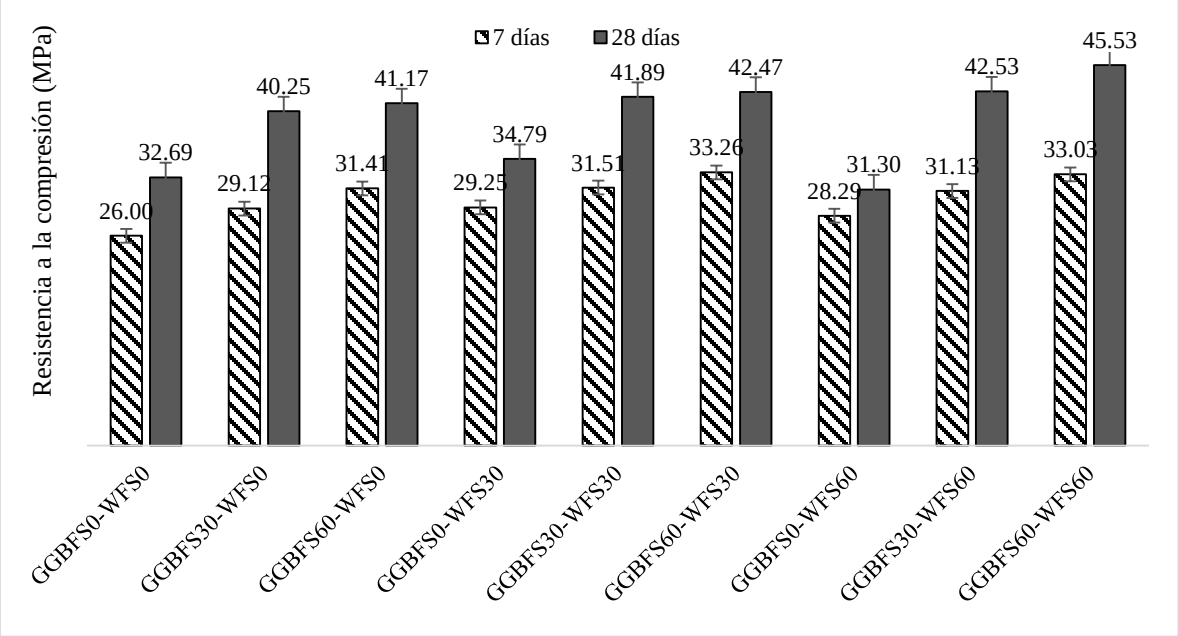
Después de esperar el respectivo tiempo de curado de las probetas (7 y 28 días) se realizaron los ensayos en estado endurecido de resistencia mecánica y de durabilidad. Una vez recopilados los resultados de cada uno de los ensayos se procedió a realizar los respectivos análisis estadísticos. A continuación se presentan los resultados, su análisis y su discusión:

4.2.1. Resistencia a la compresión uniaxial

En la Figura 23 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión uniaxial de todas las mezclas del diseño estadístico del experimento a 7 y 28 días de curado.

Figura 23

Resistencia a la compresión de las mezclas del diseño estadístico.



En general, la resistencia a la compresión estuvo comprendida desde 26.00 hasta 33.26 MPa y desde 31.30 hasta 45.53 MPa a 7 y 28 días de curado, respectivamente. Todas las mezclas de concreto a los 7 días de curado presentaron valores de resistencias a la compresión superiores a los requisitos de resistencia para concreto de uso estructural en Colombia, según NSR-10

(COMISIÓN ASESORA PERMENENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES SISMO RESISTENTES, 2010) y de la misma manera a los 28 días de curado. También, en las Figuras 24 y 25 se presenta el desarrollo porcentual de resistencia a los 7 y 28 días de curado, respectivamente, con base en la resistencia de la mezcla control.

Del comportamiento porcentual de la resistencia a la compresión es posible observar que a los 7 días de curado todas las mezclas de SCC modificadas presentaron resistencias superiores a la de la mezcla control (ver Figura 24). También es posible notar que las mayores resistencias a los 7 días de curado las alcanzan a desarrollar las mezclas con 60% de GGBFS con 30% y 60% de WFS. Otro comportamiento apreciable es que incrementos paulatinos en la cantidad de GGBFS, para todas las series constantes de WFS producen incrementos en la resistencia a la compresión.

Figura 24

Desarrollo porcentual de la resistencia a la compresión a los 7 días de curado.

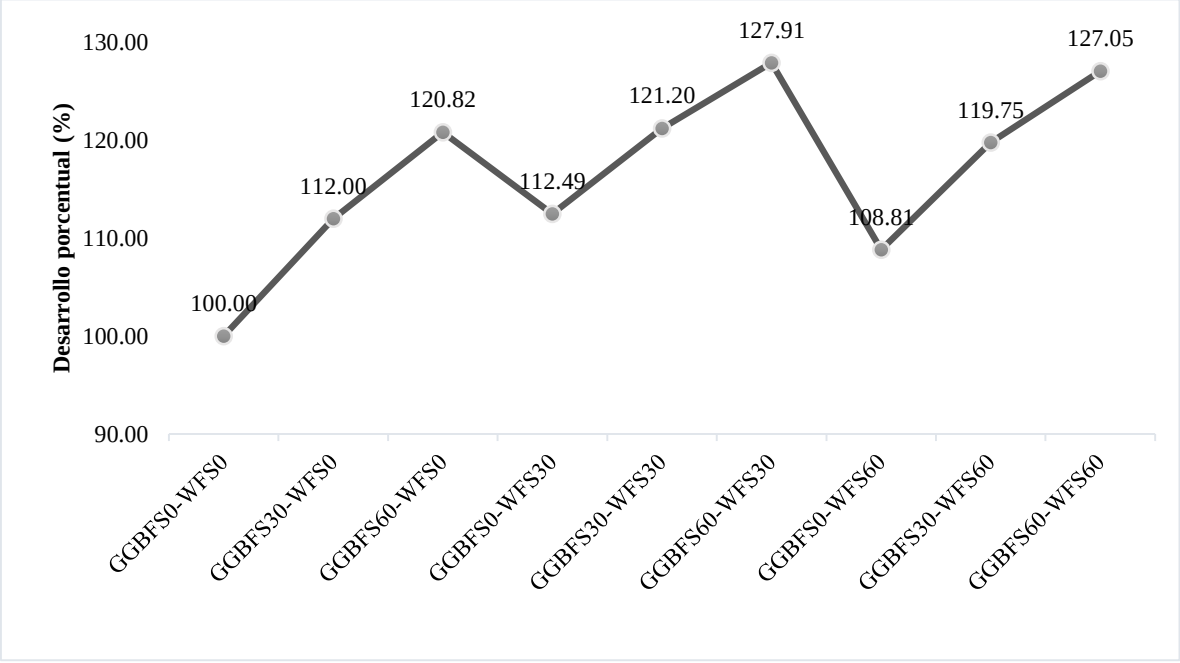
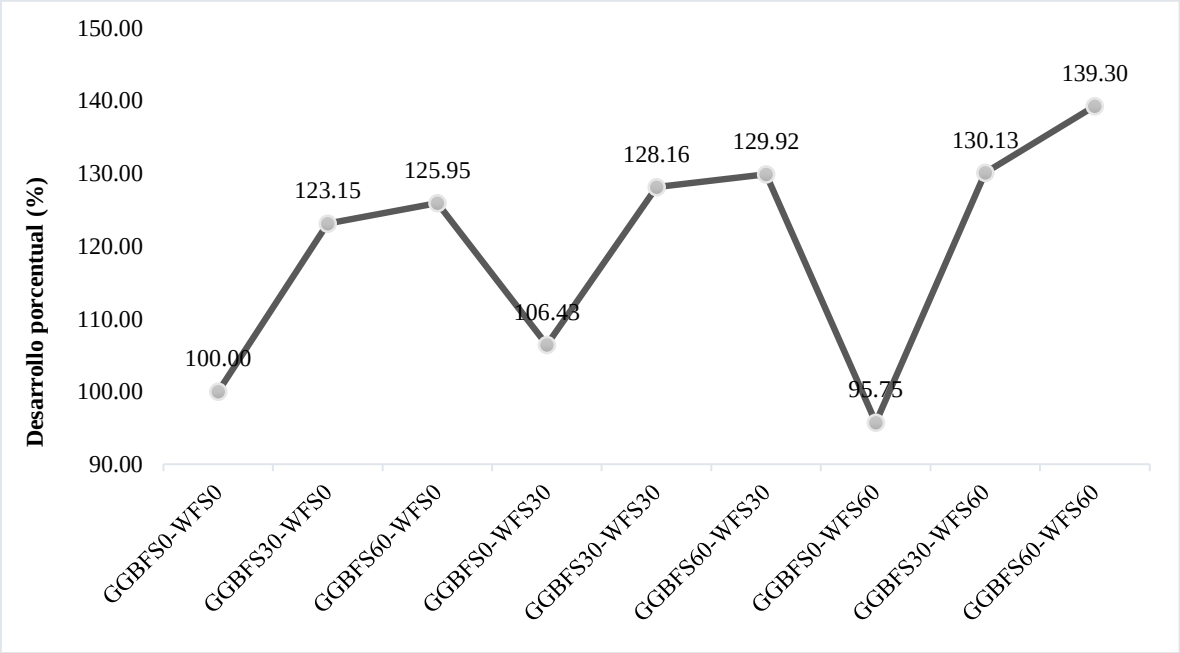


Figura 25

Desarrollo porcentual de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.



De la Figura 25 sobre el comportamiento porcentual de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado es posible ver que el mayor incremento en la resistencia se obtuvo para la mezcla con 60% de GGBFS y de WFS. También, es apreciable que la menor resistencia se obtuvo para la mezcla GGBFS0-WFS60, mostrando la manera en que la GGBFS contribuye al desarrollo de mayores resistencias en el concreto. Finalmente, es notable que incrementos en la cantidad de GGBFS para todas las series constantes de WFS aporta paulatinamente a mayores resistencias a la compresión. Los mayores desarrollos de resistencia en edades tempranas (7 días de curado) fueron observados en la mezcla sin modificaciones (79.55%) y en las mezclas GGBFS0-WFS30 y GGBFS0-WFS60, aumentando el desarrollo de resistencia conformé aumentó la cantidad de WFS: 84.07% para GGBFS0-WFS30 y 90.40% para GGBFS0-WFS60. Este comportamiento de las mezclas indica el efecto ralentizador de la GGBFS en el desarrollo de la resistencia, por sus características de latente hidráulico. Sin embargo, esto no compromete la resistencia a edades

tempranas del concreto al ser todas superiores a 29 MPa a los 7 días de curado (para las mezclas con GGBFS), y puede llegar a representar ganancias significativas de resistencia a edades superiores de curado (> 28 días).

En las Tablas 13 y 14 se presentan el resumen del análisis estadístico ANOVA para los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de curado, respectivamente.

Tabla 13

Resumen ANOVA para resistencia a la compresión a los 7 días de curado.

Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	100.300	100.300	36.78	0.000
WFS	1	17.553	17.553	6.44	0.016
$GGBFS^2$	1	1.003	1.003	0.37	0.548
WFS^2	1	17.978	17.978	6.59	0.015
GGBFS*WFS	1	0.340	0.340	0.12	0.726
Lack-of-Fit	3	1.212	0.404	0.14	0.937
Error puro	43	88.786	2.960		
Total	51	234.176			

*Grados de libertad.

Tabla 14

Resumen ANOVA para resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	615.86	615.863	100.67	0.000
WFS	1	18.42	18.421	3.01	0.089
$GGBFS^2$	1	134.08	134.080	21.92	0.000
WFS^2	1	5.71	5.711	0.93	0.339
GGBFS*WFS	1	33.09	33.091	5.41	0.024
Lack-of-Fit	3	19.49	6.496	1.07	0.373
Error Puro	43	261.93	6.091		
Total	51	1136.98			

*Grados de libertad.

Con base en los resultados del análisis ANOVA de la resistencia a la compresión se encontró que el efecto lineal (WFS) y cuadrático (WFS^2) del residuo de arena de fundición junto con el efecto lineal (GGBFS) de la escoria de alto horno fueron estadísticamente significativos

(valor-P < α) para los 7 días de curado. Además, a los 28 días de curado el efecto lineal (GGBFS) y cuadrático ($GGBFS^2$) de la escoria de alto horno, y la interacción entre las dos variables (GGBFS*WFS) fueron estadísticamente significativas.

A los 7 días de curado, para todos los valores constantes de GGBFS, aumentos de WFS representaron un incremento en la resistencia a la compresión hasta 30% de reemplazo de la arena de río, mientras que para 60% la resistencia volvió a disminuir (ver Figura 24). Sin embargo, todas las mezclas de concreto desarrolladas con 60% de WFS presentaron resistencias a la compresión a los 7 días superiores a la mezcla control. El aumento en la resistencia a la compresión con 30% de WFS se pudo deber al hecho de que WFS es más fino en comparación con la arena tradicional, lo que pudo contribuir al desarrollo de una microestructura más refinada. Sua-iam et al., (2019) encontraron, en su estudio de concreto auto-compactante con ceniza de cáscara de arroz (RHA, por sus siglas en inglés) y arena de fundición usada, que la presencia de WFS en 30% y 50% contribuía a mayores resistencias a la compresión para todas las cantidades de RHA, debiéndose este efecto al relleno y estructura interna más densa en la zona de transición interfacial entre la arena de río y el cemento. Por otra parte, Thiruvenkitam et al., (2020) encontraron al desarrollar un concreto grado M30 con WFS de 5-25% que la resistencia a la compresión presentaba aumentos marginales hasta 20% con respecto a la mezcla control pero disminuía levemente con mayores presencias de WFS a todas las edades de curado. Siddique et al., (2011) reportaron aumentos en la resistencia a la compresión de mezclas de concreto convencional con inclusión de arena de fundición usada hasta un 30%, con disminuciones en la misma para valores superiores de reemplazo (40-60%). Finalmente, Parashar et al., (2020) desarrollaron un estudio de concreto auto-compactante con WFS de 0% a 40%, encontrando que 10% de reemplazo de la arena convencional generaba aumentos en la resistencia a la compresión, pero que valores superiores a 10% empezaron

a mostrar disminuciones en esta propiedad, sospechando que el aglutinante presente en el WFS podría debilitar la zona de transición interfacial.

Disminuciones en la resistencia a la compresión en concretos desarrollados con WFS han sido reportadas previamente, explicadas por una adherencia inadecuada entre las partículas y la matriz cementante (Basar & Deveci Aksoy, 2012; Bhardwaj & Kumar, 2017). Sandhu & Siddique, (2019) al evaluar concretos auto-compactantes con hasta 30% WFS por volumen, encontraron disminuciones progresivas en la resistencia a la compresión conforme aumentó la cantidad de WFS incorporada en todas las edades de curado, acuñando este fenómeno a una hidratación inadecuada de las partículas de cemento y a la unión insuficiente entre las partículas inertes de WFS. En otro estudio realizado por Şahmaran et al., (2011) encontraron que la resistencia a la compresión de concretos auto-compactantes desarrollados con WFS hasta 100% en masa en conjunto con ceniza volante (hasta 70% de reemplazo de cemento) disminuía conforme aumentaba la cantidad de WFS adicionada. En otro estudio desarrollado por Coppio et al., (2019) usando el WFS como reemplazo de la arena para el desarrollo de concreto convencional se encontró que la presencia de WFS contribuía a disminuir la resistencia a la compresión de los concretos por ser un material más fino que la arena convencional por la posible presencia de metales, que podría afectar la adherencia entre el cemento hidratado y este agregado.

A los 7 y 28 días de curado, y para todos los valores constantes de WFS, incrementos de la GGBFS desde 0 a 60% constituyeron aumentos en la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto. Es decir, de acuerdo a los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de los concretos, la GGBFS contribuye a aumentar la resistencia a la compresión en las dos edades de curado estudiadas. Este fenómeno, de incrementos en la resistencia a la compresión del concreto por causa de la GGBFS, posiblemente se debe al efecto de micro-relleno que tiene este material,

al ser típicamente más fino que el cemento, como ha sido reportado previamente (Rasoul Abdar Esfahani et al., 2021). Además, la hidratación de la GGBFS sería la causante de una mayor formación de gel C-S-H, el cual aporta a la resistencia de las mezclas de materiales basados en cemento (Paris et al., 2016). También, es posible que sea generado por el refinamiento del espacio de poros y a una zona de transición interfacial más densa (Vivek & Dhinakaran, 2017b). En un experimento, desarrollado por Nazari & Riahi, (2011b), sobre el efecto de nanopartículas de sílice y escoria de alto horno en las propiedades del concreto auto-compactante, se encontró que la resistencia a la compresión de los concretos aumentó con incrementos de GGBFS desde 0 hasta 60% a los 28 y 90 días de curado con respecto a la mezcla control. En otra investigación realizada por Dadsetan & Bai, (2017) se reveló un comportamiento similar al encontrar incrementos en la resistencia a la compresión en mezclas de concreto auto-compactante con aumentos desde 10-30% de GGBFS a los 28 y 56 días de curado para una relación agua/material cementante de 0.45. Sin embargo, también ha sido previamente encontrado un efecto de disminución en la resistencia a la compresión, típicamente a edades tempranas, debido al reemplazo de cemento por GGBFS. Shariq et al., (2010) reportaron disminuciones en la resistencia debido a que ante altos reemplazos de cemento por GGBFS, la cantidad de cemento necesaria para la reacción de hidratación y consecuente liberación de hidróxido de calcio era menor (insuficiente), mostrando también cantidades excesivas de partículas finas de GGBFS deshidratadas. Boukendakdji et al., (2012), encontraron un efecto similar en mezclas de concreto auto-compactante con bajo contenido de GGBFS (hasta 15% de reemplazo de cemento), siendo que a las edades tempranas (7 y 28 días de curado) la resistencia fue menor que la mezcla control pero a edades tardías (56 y 90 días de curado) la resistencia fue menor, aunque comparable con la mezcla control. Finalmente, en un estudio desarrollado por Hannesson et al., (2012) se encontró que todas las mezclas de concreto auto-

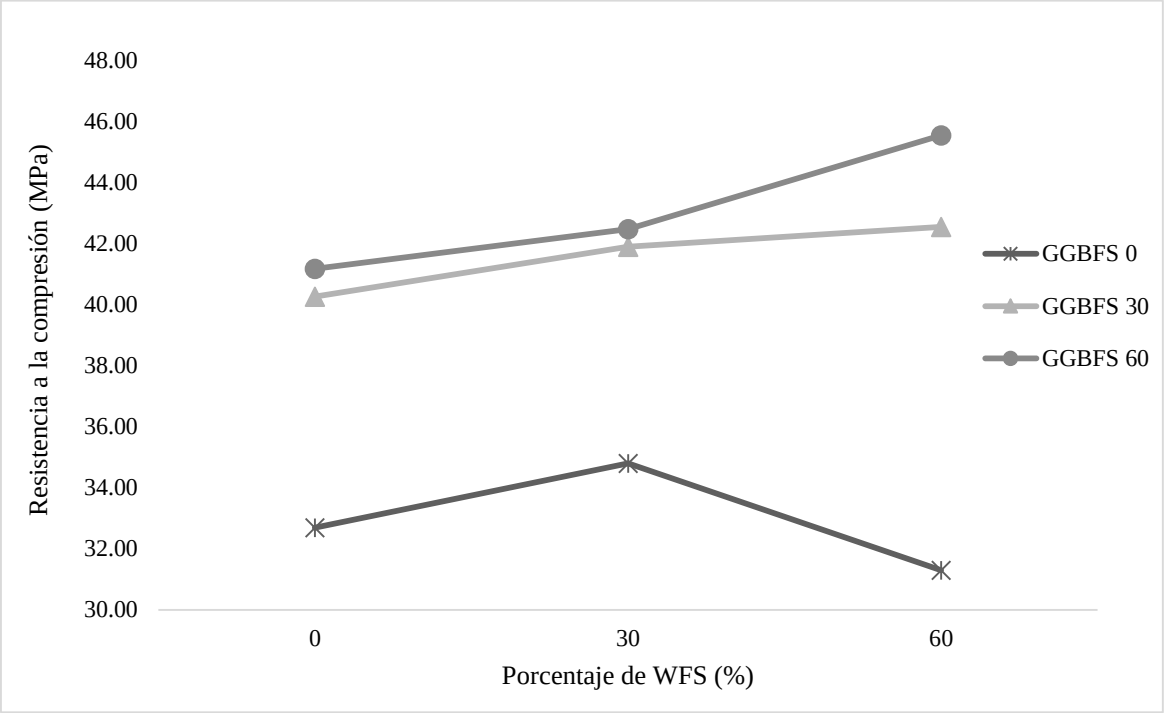
compactante a edades tempranas de curado (≤ 14 días) y con GGBFS hasta 100% presentaron resistencias menores a la mezcla control, explicado por la típica demora en la formación de gel C-S-H a medida que aumenta la cantidad de GGBFS. Estas diferencias sobre el efecto de la GGBFS sobre la resistencia a la compresión de los concretos se pueden explicar por el proceso de hidratación de la GGBFS y los productos generados por el mismo. Debido a su composición, la GGBFS necesita de un activador para lograr producir gel C-S-H, por lo que en mezclas con cemento Portland el $Ca(OH)_2$ (resultante de la hidratación del cemento Portland) suele cumplir con esta tarea (Kurdowski, 2014; Paris et al., 2016). También, debido al efecto de disminución de la porosidad total por la hidratación de la GGBFS, la hidratación del cemento Portland se ve reducida, posiblemente debido a la falta de espacio para los hidratos de cemento, como reporta Berodier & Scrivener, (2015). Adicionalmente, si la GGBFS es mezclada únicamente con agua, la misma se logra disolver pero sólo hasta una pequeña porción debido a una película protectora de sílice y alúmina que inhibe su progresiva reacción (Taylor, 1997), por lo que activar la GGBFS mediante la mezcla con cemento Portland sólo es posible para una proporción limitada de escoria (Bellmann & Stark, 2009).

El efecto estadísticamente significativo de la interacción de las variables se puede apreciar de tal manera que la ausencia de GGBFS en conjunto con reemplazos de arena por WFS después de 30% genera disminuciones en la resistencia a la compresión. Al contrario, en presencia de GGBFS, la resistencia a la compresión aumenta al incrementar WFS de 30 a 60%. Este comportamiento de interacción, apreciable en la Figura 26, indica que es necesaria la presencia simultánea de GGBFS y WFS para potenciar y no disminuir la resistencia a la compresión de los concretos cuando se utilice WFS. Este comportamiento puede ser explicado por el hecho que tanto WFS y la GGBFS tienden a ser más finos que la arena tradicional y el cemento, respectivamente,

por lo que en conjunto pueden llegar a refinar la microestructura y consecuentemente aumentar la resistencia a la compresión de los SCC, como se observó en esta investigación.

Figura 26

Interacción entre GGBFS y WFS.



Rasoul Abdar Esfahani et al. (2021), encontraron un efecto de interacción estadísticamente significativo entre la GGBFS y la escoria de cobre al usarlos en concretos sometidos a diferentes fuentes de radiación, sin embargo, no detallaron en las posibles razones de esta interacción. No obstante, beneficios del uso conjunto de diferentes materiales alternativos en el concreto ha sido reportado, aunque sin un abordaje estadístico: Sua-iam et al. (2019), encontraron que justamente para un porcentaje de 10% de reemplazo de cemento por ceniza de RHA, algunas partículas más finas de WFS pueden rellenar y crear una estructura más densa de SCC; Sharma & Khan (2017), reportaron que la incorporación de humo de sílice a las mezclas binarias de concreto presentan una mejoría para las diferentes cantidades de escoria de cobre utilizada, y finalmente, Makul (2019),

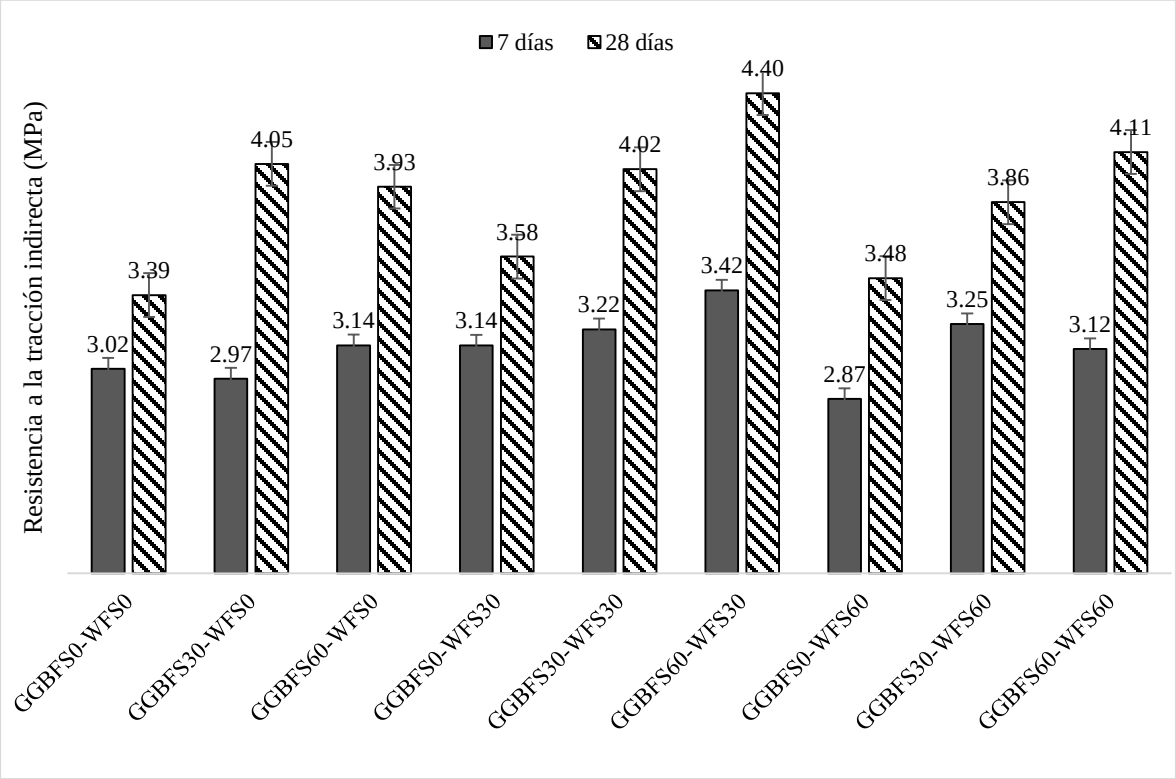
reportó que la mayor resistencia a la compresión de los SCC de alto desempeño analizados se presentó para el uso conjunto de RHA y WFS.

4.2.2. Resistencia a la tracción indirecta

En la Figura 27 se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la tracción indirecta realizados a los concretos a los 7 y 28 días de curado. De la Figura 27 es posible observar que la resistencia a la tracción indirecta de todos los concretos aumenta conforme pasa la edad de curado de 7 a 28 días. Por otro lado, el comportamiento de la resistencia a la tracción fue similar al observado para la resistencia a la compresión de los concretos estudiados.

Figura 27

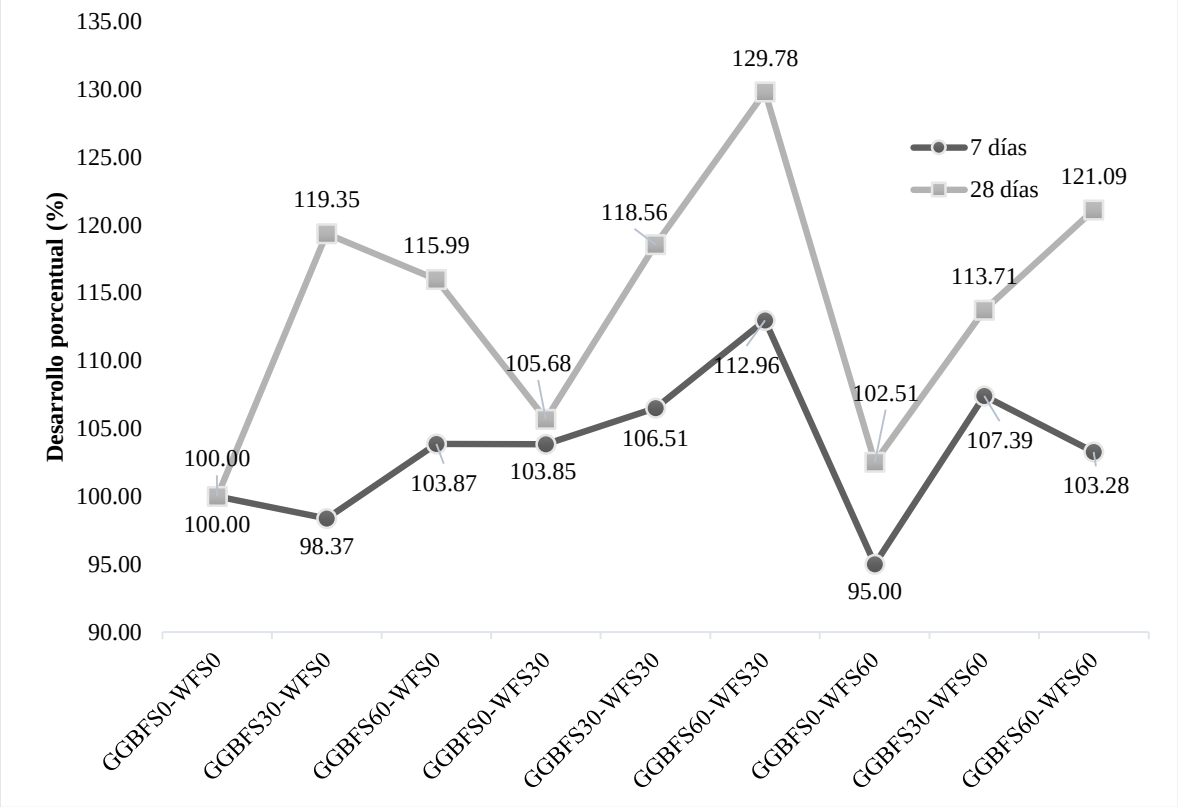
Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas del diseño estadístico.



La resistencia a la tracción indirecta estuvo comprendida desde 2.87 hasta 3.22 MPa y desde 3.39 hasta 4.40 MPa a 7 y 28 días de curado, respectivamente. De la Figura 27 es posible apreciar que la mayor resistencia a los 7 y 28 días de curado la obtuvo la mezcla de GGBFS60-WFS30, mientras que la menor resistencia a los 7 días de curado fue encontrada para la mezcla GGBFS0-WFS60 y a los 28 días para la mezcla control (GGBFS0-WFS0). Este comportamiento indica que a los 28 días de curado cualquier mezcla de concreto modificada por GGBFS o WFS presentaría mejor resistencia a la tracción en comparación con la mezcla control. En la Figura 28 se muestra el cambio porcentual de la resistencia a la tracción indirecta, para las dos edades de curado evaluadas, considerando la resistencia de la mezcla control como patrón.

Figura 28

Desarrollo porcentual de la resistencia a la tracción.



De la Figura 28 se distingue que tanto a los 7 y a los 28 días de curado el mayor desarrollo de resistencia a la tracción lo obtuvo la mezcla GGBFS60-WFS30, mientras que el menor lo presentó la mezcla GGBFS0-WFS60, es decir, la mezcla con la máxima cantidad de WFS y ausencia de GGBFS, siendo a los 7 días de curado inferior a la resistencia de la mezcla control.

En las Tablas 15 y 16 se presentan los resultados del análisis estadístico ANOVA para los valores de la resistencia a la tracción indirecta a los 7 y 28 días de curado, respectivamente.

Tabla 15

Resumen ANOVA para resistencia a la tracción indirecta a los 7 días de curado.

Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	0.20672	0.206725	4.58	0.04
WFS	1	0.00541	0.005408	0.12	0.731
$GGBFS^2$	1	0.00019	0.000186	0	0.949
WFS^2	1	0.24391	0.243914	5.4	0.026
GGBFS*WFS	1	0.0132	0.0132	0.29	0.592
Lack-of-Fit	3	0.17058	0.05686	1.29	0.295
Error Puro	43	1.31887	0.043962		
Total	51	2.00633			

*Grados de libertad.

Tabla 16

Resumen ANOVA para resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de curado.

Fuente	GDL	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	1.98071	1.98071	27.88	0
WFS	1	0.00224	0.00224	0.03	0.86
$GGBFS^2$	1	0.12555	0.12555	1.77	0.193
WFS^2	1	0.22221	0.22221	3.13	0.086
GGBFS*WFS	1	0.00585	0.00585	0.08	0.776
Lack-of-Fit	3	0.23618	0.07873	1.12	0.356
Error Puro	43	2.10804	0.07027		
Total	51	4.88869			

*Grados de libertad.

De los resultados del ANOVA de la resistencia a la tracción indirecta se apreció que el efecto lineal (GGBFS) de la escoria de alto horno junto con el efecto cuadrático (WFS^2) del residuo de arena de fundición fueron estadísticamente significativos (valor-P < α) para los 7 días de curado. Además, a los 28 días de curado el efecto lineal (GGBFS) de la escoria de alto horno fue el único estadísticamente significativo.

A los 7 días de curado, para las mezclas de SCC con 0% y 60% de GGBFS, un reemplazo de 30% de WFS representó mejoras en la resistencia con respecto a 0% de WFS, pero el uso de 60% de WFS disminuyó la resistencia con respecto a la obtenida para 30% de reemplazo. Por otro lado, para las mezclas de SCC con 30% de GGBFS, reemplazos de 30% y 60% de arena por WFS mostraron incrementos en la resistencia, aunque la diferencia entre los dos fue marginal, de apenas un 0.9%. Como se expresó para la resistencia a la compresión, y de la misma manera, los incrementos en la resistencia a la tracción por efecto de WFS a los 7 días de curado se originan porque el WFS es más fino en comparación con la arena tradicional, lo que contribuye al desarrollo de una microestructura más refinada. Parashar et al. (2020) encontraron resultados similares con incrementos en la resistencia la tracción indirecta de mezclas de SCC a los 7 y 28 días de curado con aumentos del 10% al 30% en reemplazos de arena por WFS. En otro estudio de SCC con incorporación de WFS desarrollado por Siddique & Sandhu (2013b), se encontró que la presencia de hasta 20% de WFS otorgaba resistencias a la tracción indirecta superiores a la mezcla control, con un valor máximo al 15% de WFS, a los 7 y 28 días de curado. Finalmente, Siddique et al. (2011) encontraron un comportamiento muy similar al del presente estudio: en los concretos desarrollados, hubo un máximo desarrollo de resistencia a la tracción indirecta con 30% de WFS, mientras que con 60% de reemplazo la resistencia cayó en comparación con la mezcla control.

Por otro lado, disminuciones en la resistencia a la tracción también han sido reportadas previamente, similarmente a lo encontrado para la resistencia a la compresión. El concreto, por ser débil ante tensiones y por su misma naturaleza frágil tiende a producir fisuras cuando es sometido a esfuerzos de tracción (Bhardwaj & Kumar, 2017). Sandhu & Siddique (2019) encontraron que la resistencia a la tracción indirecta de SCC con WFS disminuía a medida que aumentaba la cantidad de WFS agregada. También, Ganesh Prabhu et al. (2014) hallaron que aumentos de hasta 50% de WFS en el concreto incurría en disminuciones de la resistencia a la tracción de los mismos. Basar & Deveci Aksoy (2012) similarmente encontraron disminuciones en la resistencia la tracción indirecta en mezclas de concreto con el aumento en cantidad de WFS hasta 40%.

A los 7 y 28 días de curado el efecto lineal de la GGBFS fue estadísticamente significativo. A los 7 días de curado, únicamente la serie de SCC con 30% de WFS muestra un incremento en resistencia proporcional al aumento en la cantidad de GGBFS incorporada (ver Figura 28). Por otro lado, a los 7 días de curado, la serie de 0% de WFS presentó un decrecimiento (marginal) al 30% de GGBFS y posterior crecimiento en resistencia al 60%. En contraste, la serie con 60% de WFS mostró aumentos en resistencia con 30% de GGBFS y disminución con 60% siendo la resistencia, sin embargo, superior a la mezcla sin GGBFS. A los 28 días de curado, para todas las series constantes de WFS, la presencia de GGBFS generó valores de resistencia superiores a las mezclas sin GGBFS. Las series con 30% y 60% de WFS presentaron un crecimiento en la resistencia a la tracción indirecta con el aumento en la cantidad de GGBFS incorporada (ver Figura 28). Sin embargo, la serie sin presencia de WFS (0%) mostró una caída marginal de 2.96% en la resistencia cuando se aumentó de 30% a 60% la cantidad de GGBFS incorporada. Como ya fue mencionado, el comportamiento de resistencia a la tracción fue muy similar al observado para la resistencia a la compresión, y el efecto de la GGBFS sobre la resistencia a la tracción fue el ya

explicado. Resultados similares del efecto de GGBFS sobre la resistencia a la tracción de mezclas de SCC fueron reportados por Nazari & Riahi (2011b) al encontrar que a los 28 y 90 días de curado todas las mezclas con GGBFS hasta 60% de reemplazo de cemento Portland tuvieron incrementos con respecto a la mezcla control. Rasoul Abdar Esfahani et al. (2021) encontraron mejoras en la resistencia a la tracción de SCC con respecto a la mezcla control, con hasta 60% de GGBFS, sin embargo, ante la presencia de escoria de cobre los el efecto de GGBFS no fue concluyente. Finalmente, Ramanathan et al. (2013) mostraron que incrementos en la cantidad de GGBFS desde 30% a 50% en mezclas de SCC generaban aumentos en la resistencia a la tracción de los mismos.

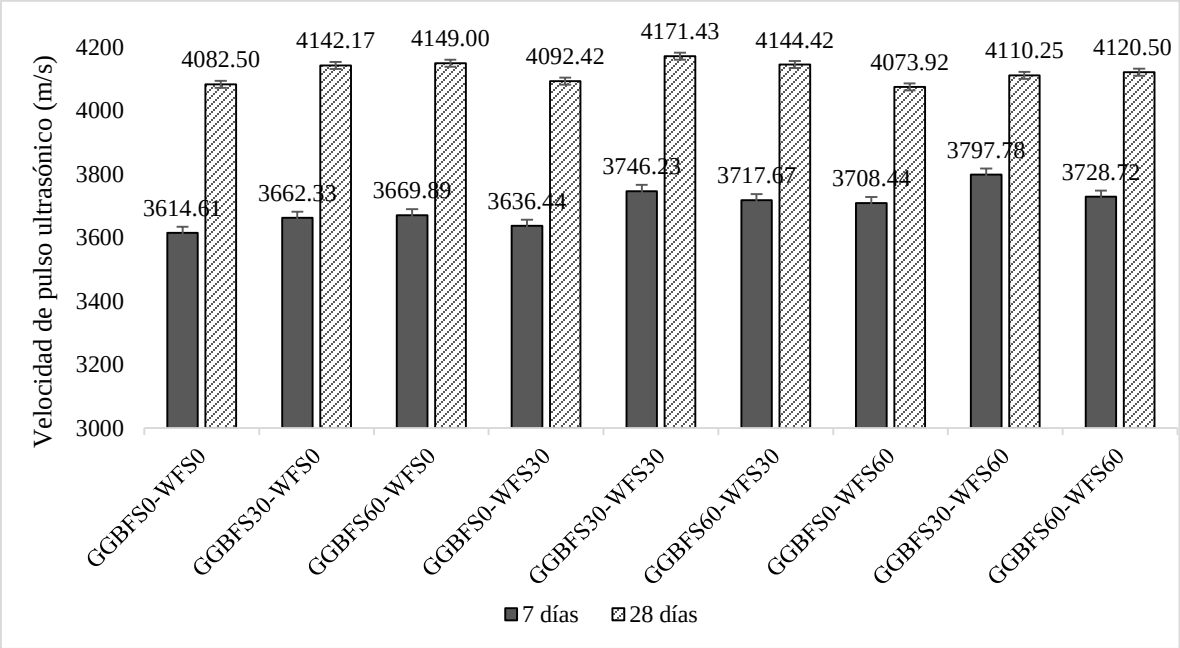
4.2.3. Velocidad de pulso ultrasónico

La Figura 29 ofrece los valores obtenidos en los ensayos de velocidad de pulso ultrasónico a los 7 y 28 días de curado realizados a las mezclas de SCC. Se considera que concretos con mayores velocidades de pulso ultrasónico contiene menos defectos e imperfecciones en su microestructura (Sharma & Khan, 2018).

De la Figura 29 es posible apreciar el incremento en los valores de UPV conformé aumentó la edad de curado, para todas las mezclas evaluadas. A los 7 días de curado los valores de velocidad de pulso ultrasónico están comprendidos desde 3614 m/s hasta 3798 m/s. Por otro lado, a los 28 días de curado, los valores de UPV se encuentran entre 4073 m/s y 4172 m/s.

Figura 29

Velocidad de pulso ultrasónico de las mezclas del diseño estadístico.



Con base en los valores de velocidad de pulso ultrasónico, Feldman (1977) y Saint-Pierre et al. (2016) plantean clasificar la calidad del concreto como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17

Designación de la calidad del concreto con base en valores de UPV.

Clasificación	Valores de UPV (m/s)
Muy pobre	UPV < 2100
Pobre	2100 < UPV < 3000
Cuestionable	3000 < UPV 3600
Buena	3600 < UPV < 4500
Excelente	UPV > 4500

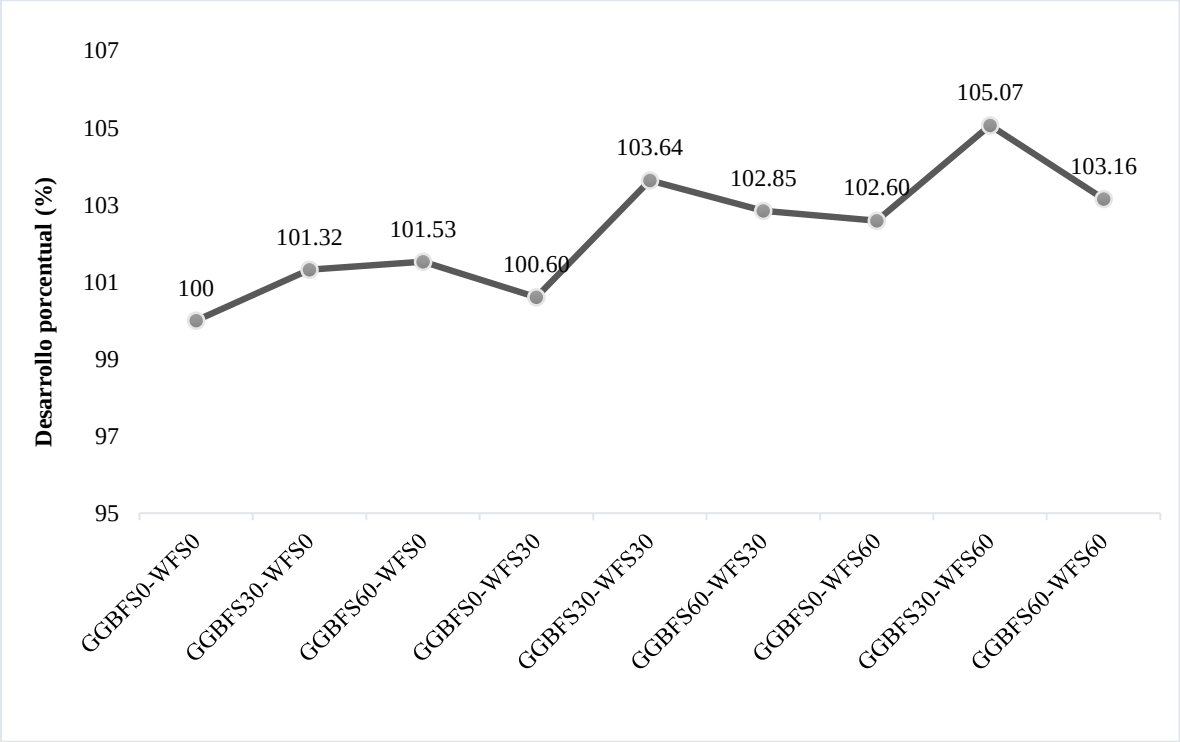
Nota: Adaptado de (Feldman, 1977) y (Saint-Pierre et al., 2016).

Entonces, con base en la clasificación planteada en la Tabla 17, se puede decir que los concretos desarrollados tienen calidad buena en las dos edades de curado evaluados. También, se puede observar que todas las mezclas modificadas de SCC presentaron valores de UPV superiores a la mezcla control en las dos edades de curado, con excepción de la mezcla GGBFS0-WFS60, es

decir, la mezcla con ausencia de escoria de alto horno y máxima presencia de residuo de arena de fundición. A continuación, la Figura 30 muestra el cambio porcentual de los valores de UPV con respecto a la mezcla control (GGBFS0-WFS0), a los 7 días de curado.

Figura 30

Desarrollo porcentual de la velocidad de pulso ultrasónico a los 7 días de curado.

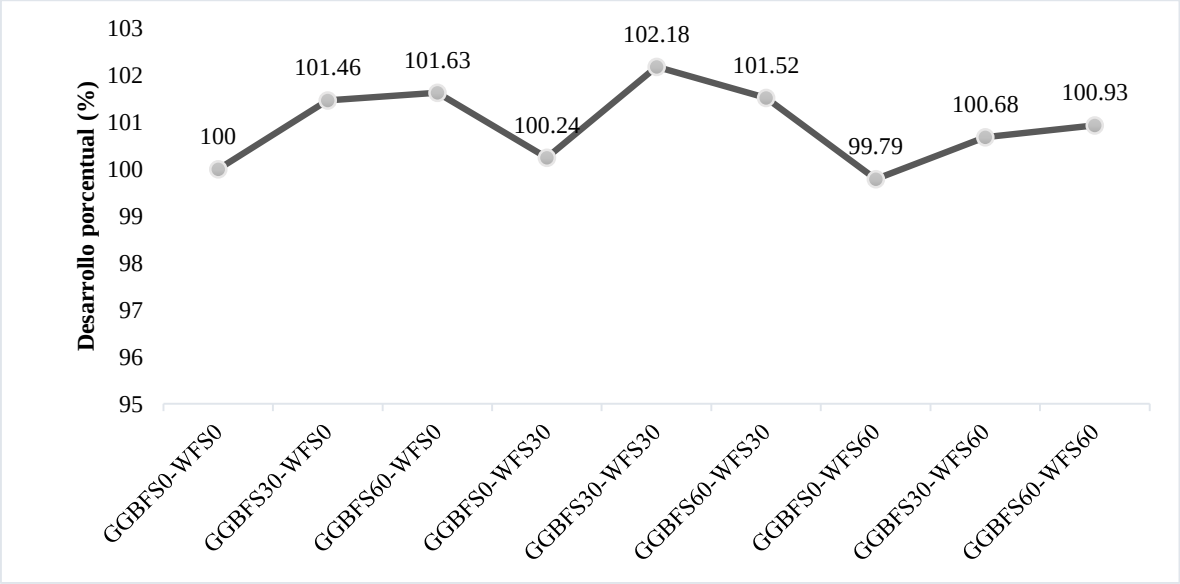


A los 7 días de curado, considerando el desarrollo porcentual de los valores de UPV con base en la mezcla control, se puede observar que el máximo desarrollo de UPV lo presentó la mezcla GGBFS30-WFS60. Sin embargo, todas las mezclas modificadas presentaron desarrollos superiores a los de la mezcla control. Además, es observable que, sólo para la serie con ausencia de WFS incrementos en la cantidad de GGBFS llevó a aumentos paulatinos en los valores de UPV, aunque los mismos hayan sido marginales. Por otro lado, también se puede apreciar, para todas las series constantes de GGBFS, que incrementos en la cantidad de WFS llevó a mejores desarrollos

de valores de UPV aunque el máximo incremento obtenido haya sido apenas de aproximadamente el 5% en la mezcla GGBFS30-WFS60. La Figura 31 muestra el cambio porcentual en los valores de UPV para los 28 días de curado.

Figura 31

Desarrollo porcentual de la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado.



De la Figura 31 es apreciable que a los 28 días de curado los cambios en los valores de UPV de las mezclas con respecto a la mezcla control son marginales y no superiores al 3%. El desarrollo más bajo lo presentó la mezcla GGBFS0-WFS60, pero, con respecto a la mezcla control, la disminución fue apenas de un 0.2%. En este caso, para las series constantes de WFS de 0% y 60%, incrementos en la cantidad de GGBFS llevó a incrementos paulatinos, aunque escasos, en el desarrollo de UPV, sin embargo, para WFS de 30%, la presencia de GGBFS generó valores mayores que la ausencia de la misma (GGBFS=0%). Ahora bien, para las series constantes de GGBFS, incrementos en la cantidad de WFS no parecen generar una tendencia marcada de crecimiento o disminución en el desarrollo de UPV.

En las Tablas 18 y 19 se presentan los resultados del análisis de la varianza ANOVA para los valores de UPV obtenidos a los 7 y 28 días de curado, respectivamente.

Tabla 18

Resumen ANOVA para valores de UPV a los 7 días de curado.

Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	12290	12290	1.5	0.229
WFS	1	41504	41503.6	5.07	0.031
$GGBFS^2$	1	29576	29576.1	3.61	0.066
WFS^2	1	377	377	0.05	0.831
GGBFS*WFS	1	919	918.7	0.11	0.74
Lack-of-Fit	3	6172	2057.2	0.23	0.872
Error Puro	43	263873	8795.8		
Total	51	362771			

*Grados de libertad.

Tabla 19

Resumen ANOVA para valores de UPV a los 28 días de curado.

Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	14041	14040.8	4.27	0.044
WFS	1	2301	2301	0.7	0.407
$GGBFS^2$	1	15193	15193	4.62	0.037
WFS^2	1	11956	11955.5	3.64	0.063
GGBFS*WFS	1	193	192.5	0.06	0.81
Lack-of-Fit	3	2127	708.9	0.2	0.893
Error Puro	43	149052	3466.3		
Total	51	211483			

*Grados de libertad.

Con base en los resultados del análisis de la varianza ANOVA es posible decir que a los 7 días de curado el efecto lineal (WFS) del residuo de arena de fundición fue estadísticamente significativo (Valor-P<α), mientras que a los 28 días de curado el efecto lineal (GGBFS) y cuadrático ($GGBFS^2$) de la escoria de alto horno fueron estadísticamente significativo sobre los valores de UPV. El efecto estadísticamente significativo del WFS sobre los valores de UPV a los

7 días de curado fue apreciado de tal manera que incrementos en la cantidad de WFS incorporado a las mezclas de SCC contribuye a mayores velocidades de pulso ultrasónico. Este comportamiento indica que mayores cantidades de WFS (hasta 60%) contribuirían a aumentar la densidad de las mezclas de SCC en edades tempranas y disminuir las fallas e imperfecciones en las mismas, lo cual se puede deber a la mayor finura de este material y consecuente efecto de micro-relleno del mismo (Sua-iam et al., 2019), en una microestructura que aún se encuentra en desarrollo. Similarmente, G. Singh & Siddique (2011), en su estudio sobre el efecto de WFS sobre las propiedades del concreto encontraron que la presencia de WFS hasta 20% de reemplazo de arena genera mayores valores de UPV que la mezcla control en las dos edades de curado evaluadas, generando concretos con valores de UPV entre 4231 m/s a 4284 m/s. Comparablemente, Siddique et al. (2015), observaron que la inclusión de WFS hasta el 20% en dos tipos de concretos (M20 y M30) generaba incrementos (superiores a la mezcla control) en las velocidades de pulso ultrasónico en todas las edades de curado evaluadas. En otro estudio, sobre el uso del WFS como reemplazo parcial para producir concreto verde, desarrollado por Thiruvenkitam et al. (2020), se reportó que los valores de UPV fueron superiores a la mezcla control en todos los concretos con inclusión de WFS en las dos edades de curado. También, Manoharan et al. (2018), hallaron mayores valores de UPV en mezclas de concreto modificadas con respecto a la mezcla control con la inclusión de WFS hasta un 25%.

Por otro lado, el efecto estadísticamente significativo de la GGBFS a los 28 días de curado sobre los valores de UPV posiblemente fue causado por las mejoras en la microestructura al ser más densa y refinada (Glasser, 1996), y por su retrasado proceso de hidratación (Shariq et al., 2013). El comportamiento de incrementos en la velocidad de pulso ultrasónico por efecto de la incorporación de GGBFS ha sido previamente reportado, mostrando desarrollos de SCC con

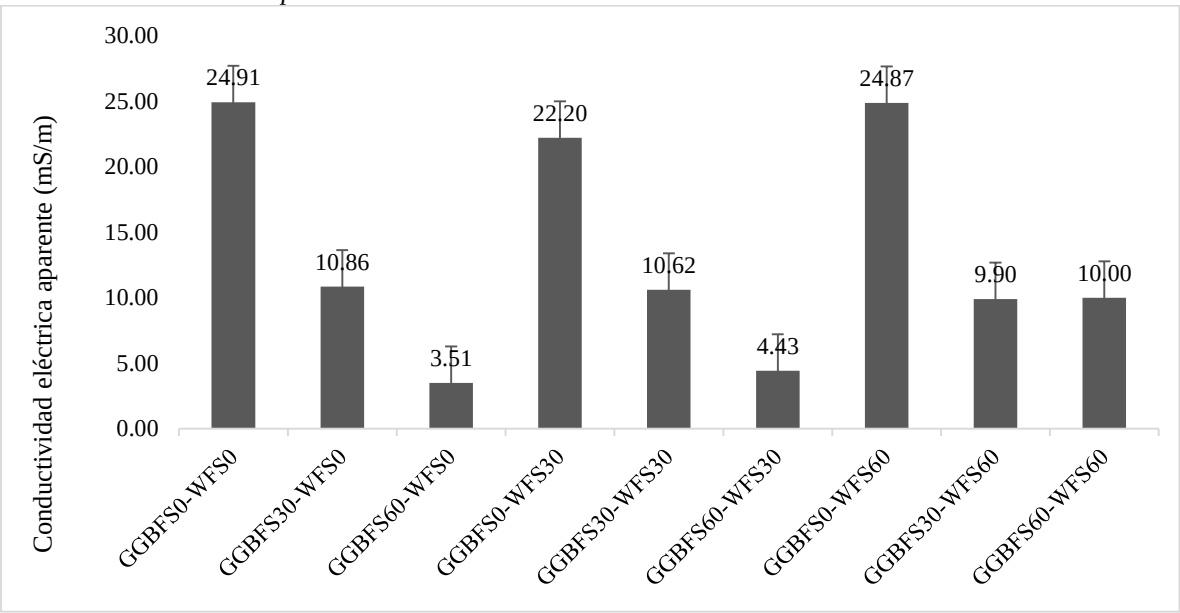
GGBFS hasta un 72%, permitiendo obtener concretos similarmente con buena calidad (Cheah et al., 2019), e incluso de calidad excelente (Gesoğlu et al., 2009), que correspondían a incrementos en la densidad de las mezclas con GGBFS (Chidiac & Panesar, 2008).

4.2.4. Conductividad eléctrica aparente

El ensayo de conductividad eléctrica aparente (BEC, por sus siglas en inglés) consiste en determinar el comportamiento de una corriente eléctrica que pasa a través de una muestra de concreto sumergida en una solución salina. La conductividad eléctrica aparente tiene una relación teórica con el coeficiente de difusión del ion cloruro u otros iones en el concreto (ASTM International, 2012c), por lo que menores valores de BEC indican mejor resistencia a la penetración y difusión del ion cloruro. La Figura 32 muestra los resultados del ensayo BEC a los 28 días de curado de todas las mezclas de concreto.

Figura 32

Conductividad eléctrica aparente de las mezclas del diseño estadístico.



En general, los valores BEC oscilaron en un rango de 3.51 mS/m hasta 24.91 mS/m, siendo el máximo fue obtenido por la mezcla control (GGBFS0-WFS0) y el mínimo por la mezcla GGBFS60-WFS0. La Tabla 20 muestra la equivalencia entre la carga que pasa (coulombs) y la equivalente conductividad eléctrica aparente para la penetración del ion cloruro, adaptada para este estudio con base en ASTM C1760 (ASTM International, 2012c) y ASTM C1202 (ASTM International, 2012a), y la Tabla 21 la clasificación de las mezclas desarrolladas.

Tabla 20

Equivalencia de carga que pasa y BEC para clasificación de penetración de ion cloruro.

Carga pasa (coulombs)	BEC (mS/m)	Penetración ion clocuro
>4000	>20.0	Alta
2000-4000	10.3-20.0	Moderada
1000-2000	5.4-10.3	Baja
100-1000	1.0-5.4	Muy baja
<100	<1.0	Despreciable

Nota: Adaptado de ASTM C1760 (ASTM International, 2012c) y ASTM C1202 (ASTM International, 2012a).

Tabla 21

Clasificación de la penetración del ion cloruro de las mezclas de SCC.

Mezcla	BEC (mS/m)	Clasificación de la penetración del ion cloruro
GGBFS0-WFS0	24.91	Alta
GGBFS30-WFS0	10.86	Moderada
GGBFS60-WFS0	3.51	Muy baja
GGBFS0-WFS30	22.20	Alta
GGBFS30-WFS30	10.62	Moderada
GGBFS60-WFS30	4.43	Muy baja
GGBFS0-WFS60	24.87	Alta
GGBFS30-WFS60	9.90	Baja
GGBFS60-WFS60	10.00	Baja

Con base en la clasificación planteada en las Tablas 20 y 21 se puede afirmar que la mezcla control y las mezclas sin GGBFS y 60% de WFS clasifican como concretos con alta penetración de ion cloruro. Por otro lado, las mezclas GGBFS30-WFS0 y GGBFS30-WFS30 clasifican como penetración moderada, las mezclas GGBFS30-WFS60 y GGBFS60-WFS60 como penetración baja y por último, las mezclas GGBFS60-WFS0 y GGBFS60-WFS30 clasifican como penetración

muy baja. De esto, se puede afirmar que la presencia de GGBFS contribuye a desarrollar concretos con baja y muy baja penetración del ion cloruro.

De la Figura 32 es posible observar que todas las mezclas de concreto modificadas presentan menores valores de BEC en comparación con la mezcla control. Así mismo, para las series WFS0 y WFS30, incrementos en la cantidad de GGBFS representó disminuciones paulatinas de los valores de BEC. Por otro lado, para la serie WFS60, la presencia de GGBFS generó valores inferiores de BEC, en comparación con GGBFS0-WFS60, aunque en este caso, el cambio de 30% a 60% de la cantidad de GGBFS no parece contribuir a disminuciones en dichos valores. Para las series constantes de WFS, incrementos de 30% y 60%, produjeron disminuciones porcentuales, con respecto a las mezclas sin GGBFS, de 56.41% y 85.92% para WFS0, 52.17% y 80.04% para WFS30, y 60.20% y 59.79% para WFS60, respectivamente.

La Tabla 22 presenta los resultados del análisis de la varianza ANOVA para los valores BEC a los 28 días de curado.

Tabla 22

Resumen ANOVA para conductividad eléctrica aparente a 28 días de curado.

Fuente	GDL*	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Valor-P
GGBFS	1	486.756	486.756	212.25	0
WFS	1	5.007	5.007	2.18	0.183
$GGBFS^2$	1	44.7	44.7	19.49	0.003
WFS^2	1	3.254	3.254	1.42	0.272
GGBFS*WFS	1	10.683	10.683	4.66	0.068
Lack-of-Fit	3	11.083	3.694	2.97	0.16
Error Puro	43	4.97	1.242		
Total	51	585.344			

*Grados de libertad.

De los resultados del análisis de la varianza ANOVA para los valores BEC a los 28 días de curado se observa que el efecto lineal (GGBFS) y cuadrático ($GGBFS^2$) de la escoria de alto horno

son estadísticamente significativos sobre la conductividad eléctrica aparente de las mezclas de SCC. Este hallazgo es fácilmente observable en la Figura 32. Las mejoras en los valores de conductividad eléctrica aparente por efecto de la presencia y aumento en cantidad de GGBFS se pueden deber a una disminución en el tamaño de poros capilares (Panesar & Chidiac, 2009) y por una microestructura más densa con mayores cantidades de gel C-S-H (Baroghel-Bouny et al., 2011). En un estudio desarrollado por Gesoğlu et al. (2009) se encontró que la permeabilidad a los cloruros de los concretos auto-compactantes disminuía con la inclusión de 20% a 60% de GGBFS en las mezclas, clasificando la permeabilidad de los mismos como baja y muy baja. En otra investigación realizada por Cheng et al. (2017) sobre el efecto de algunos materiales cementicios suplementarios en las propiedades de durabilidad del concreto con arena de coral se encontró que un 15% de GGBFS contribuía a disminuir en un 50% el coeficiente de difusión de cloruros. Finalmente, Zhao et al. (2015) encontraron en que la presencia de 20%, 30% y 40% de GGBFS disminuía paulatinamente el coeficiente de difusión del ion cloruro en comparación con la mezcla control de concretos auto-compactantes. Con base en la información presentada y en el estudio desarrollado, se puede afirmar que la presencia de GGBFS contribuye a disminuir la conductividad eléctrica aparente de las mezclas y a, equivalentemente, aumentar la resistencia a la penetración del ion cloruro.

4.3. Resultados de la optimización

Después de realizados los ensayos en estado endurecido de las mezclas de concreto desarrolladas y del análisis de la varianza ANOVA para cada una las propiedades en estado endurecido, a los respectivos días de curado, se realizó la optimización matemática de la resistencia a la compresión uniaxial, como medida de resistencia mecánica y de la velocidad de pulso

ultrasónico, como medida de la durabilidad. La optimización se realizó de manera simultánea para las dos variables, es decir, se procedió a encontrar las cantidades de escoria de alto horno y de residuo de arena de fundición que permitieran maximizar la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico, simultáneamente, a los 28 días de curado.

Del análisis de la varianza ANOVA, que se basa en regresión a modelos de segundo orden por medio de regresión de mínimos cuadrados, realizado a los resultados de la resistencia a la compresión y de la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado se obtuvieron los modelos de regresión de dichas variables dependientes. Los modelos de regresión originales obtenidos se presentan a continuación, en las Ec. 10 y Ec.11. La resistencia a la compresión a los 28 días se denomina como CS28 y la velocidad de pulso ultrasónico se denomina como UPV28.

$$CS28\ [MPa] = 33.25 + 0.3532(GGBFS) + 0.0292(WFS) - 0.003871(GGBFS)^2 - 0.000799(WFS)^2 + 0.001598(GGBFS * WFS) \qquad Ec.10$$

$$UPV28\ [{}^{m}/_{S}] = 4096.0 + 3.39(GGBFS) + 1.98(WFS) - 0.0412(GGBFS)^2 - 0.0366(WFS)^2 - 0.0039(GGBFS * WFS) \qquad Ec.11$$

Sin embargo, los modelos fueron depurados con base en el análisis de la varianza ANOVA, para dejar únicamente los términos estadísticamente significativos, considerando el nivel de significancia utilizado de 0.05, para evitar el sobreajuste del modelo al mantener términos inactivos, como recomienda Smucker et al. (2020). A continuación, la Tabla 23 presenta los modelos de regresión depurados.

Tabla 23

Modelos de regresión depurados para optimización.

Modelos de regresión ajustados	**R^2/R^2adj**
CS28 [MPa] = 33.49+0.3714 * GGBFS-0.0187 * WFS-0.004175 * $GGBFS^2$+0.001598 * GGBFS*WFS	0.726/0.694
UPV28 [m/s] = 4100.6+4.11 * GGBFS-0.0551 * $GGBFS^2$	0.185/0.106

De la Tabla 23 es observable que el modelo de regresión de la resistencia a la compresión a los 28 días daría como resultado una superficie de respuesta, mientras que el modelo de regresión de la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días daría como resultado una línea cuadrática, esto, debido a la depuración de los términos no estadísticamente significativos. La Figura 33 muestra la superficie de respuesta de la resistencia a la compresión a los 28 días, utilizando el modelo de regresión depurado. La Figura 34 muestra la superficie de contorno de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

Figura 33

Superficie de respuesta de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

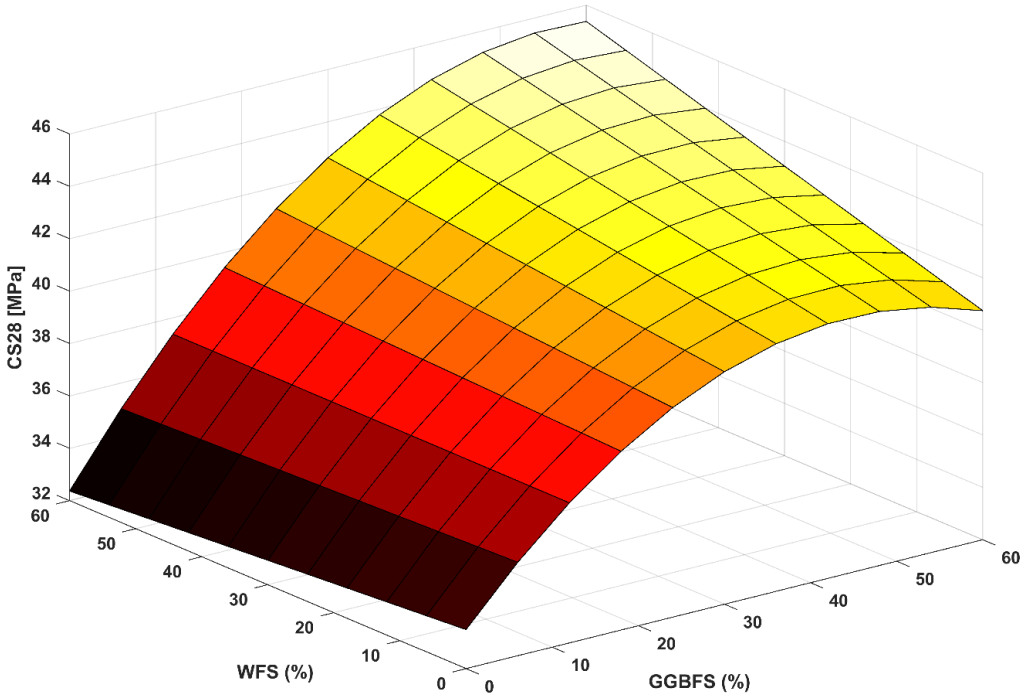
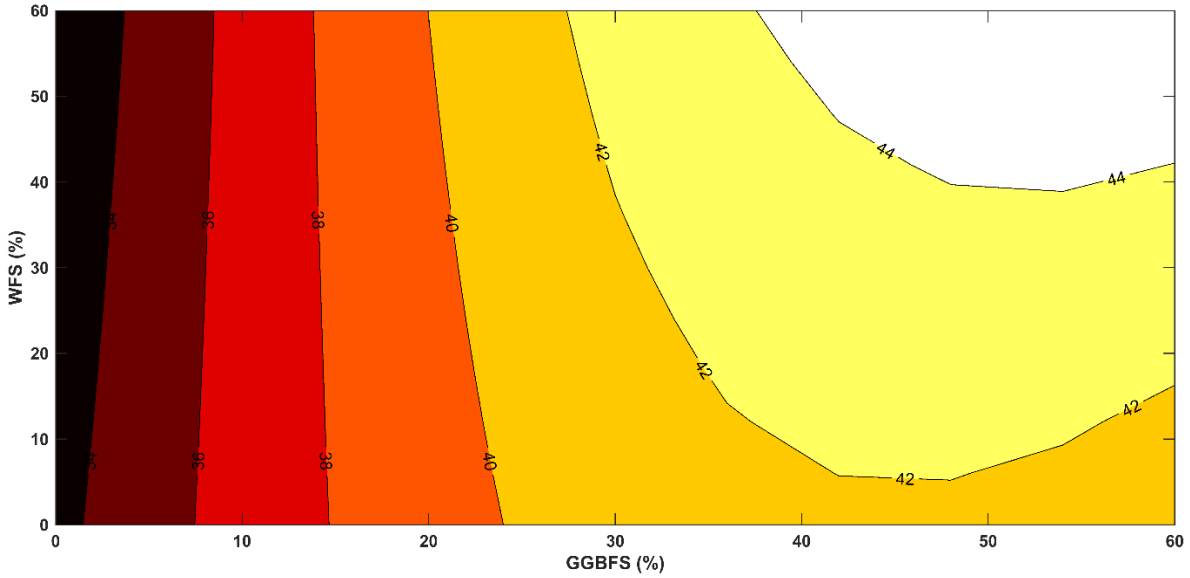


Figura 34

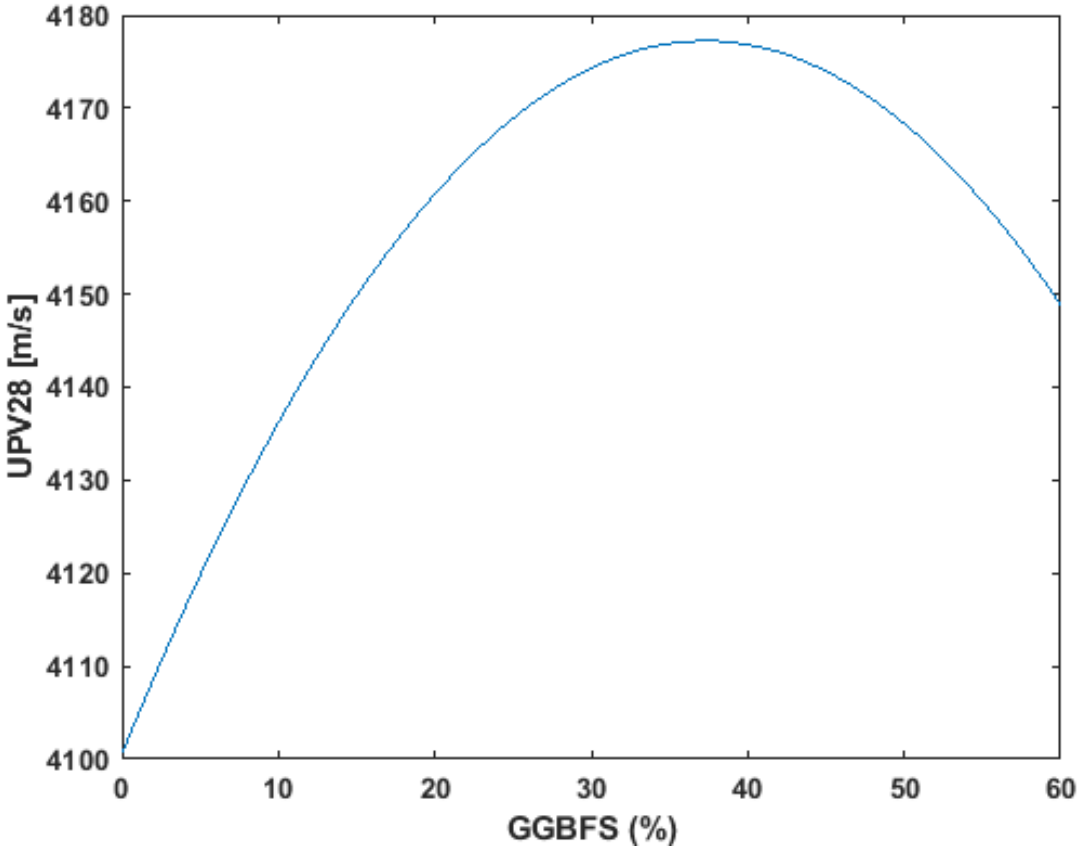
Superficie de contorno de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado.



De las superficies presentadas es posible observar como la resistencia a la compresión a los 28 días de curado tiende a aumentar conforme incrementan los valores de GGBFS. La superficie de contorno, adicionalmente, permite fácilmente observar cómo después de aproximadamente 20% de reemplazo de incorporación de GGBFS, la presencia de WFS empieza a contribuir a aumentar los valores de resistencia a la compresión, mostrando el claro efecto de interacción entre las dos variables, que ya fue abordado. A continuación, la Figura 35 presenta la curva del modelo de regresión depurado para la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado.

Figura 35

Velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado.



De la Figura 35 es apreciable que la velocidad de pulso ultrasónico incrementa conforme aumenta la cantidad de GGBFS incorporado, sin embargo, encuentra un valor máximo al 37.31% de GGBFS, y después de esa cantidad, los valores de velocidad de pulso ultrasónico comienzan a descender.

Utilizando el método de funciones de deseabilidad y los modelos de regresión depurados para las dos respuestas de interés, y por medio del software Minitab ® v19, se realizó la optimización simultánea de las mismas. La Tabla 24 presenta los parámetros de ingreso en el proceso de optimización múltiple.

Tabla 24

Parámetros de entrada al proceso de optimización múltiple.

Respuesta	Objetivo	Mínimo	Objetivo	Peso	Importancia
CS28 [MPa]	Máximo	28.18	48.04	1	1
UPV28 [m/s]	Máximo	3968	4278	1	1

A las dos variables dependientes se les consideró el mismo peso o importancia, y la optimización estuvo restringida al dominio de valores experimentales encontrados, con el interés de maximizar ambas respuestas. Con base en estas restricciones, la deseabilidad individual de la resistencia a la compresión a los 28 días fue de 0.84838 y la de la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días fue de 0.66180, para una deseabilidad compuesta de 0.7493. Con esta deseabilidad compuesta, se desarrolló la predicción múltiple, que aparece como resultado en la Tabla 25.

Tabla 25

Resultados del proceso de optimización múltiple.

Respuesta	Valor predicho	SE ajustado	95% IC	95% IP
CS28 [MPa]	45.027	0.754	(43.510, 46.545)	(39.829, 50.226)
UPV28 [m/s]	4173.2	10.6	(4151.8, 4194.6)	(4054.4, 4291.9)

La Tabla 25 presenta los valores predichos para la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado, respectivamente. También, ofrece los errores estándar de los ajustes (SE ajustado), los intervalos de confianza al 95% y los intervalos de predicción al 95%. De la optimización múltiple se obtuvo también que los porcentajes de GGBFS y WFS que permiten maximizar los valores de resistencia a la compresión y de velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días son 46.06% y 60%, respectivamente. Considerando que los modelos utilizados presentaron bajo R^2 y R^2adj se decidió comprobar experimentalmente lo obtenido del proceso de optimización, es decir, realizar en el laboratorio la mezcla de concreto con 46.06% de GGBFS y 60% de WFS para validar por medio de resultados empíricamente lo predicho por los modelos y por la optimización múltiple desarrollada. De la ejecución de la mezcla con dichas

proporciones y de los resultados correspondientes a los ensayos experimentales posteriores, se presenta la Tabla 26.

Tabla 26

Comparativo entre valores predichos y valores obtenidos experimentalmente.

	CS28 [MPa]	UPV28 [m/s]
Resultado experimental	45.124	4222.375
Valor predicho	45.027	4173.200
Inferior IP (95%)	39.829	4054.400
Superior IP (95%)	50.226	4291.900
Diferencia porcentual (%)	0.215	1.165

La Tabla 26 ofrece los valores predichos y los resultados experimentales de los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días, de la mezcla resultante de la optimización. Adicionalmente, se vuelve a presentar el intervalo de predicción al 95%, y la diferencia porcentual entre los valores predichos y los resultados experimentales. De lo presentado en la Tabla 23 se puede concluir que los modelos de regresión y la optimización simultánea pueden satisfactoriamente predecir los resultados al tener unas diferencias porcentuales de 0.215% y 1.165% para la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado, respectivamente.

Adicionalmente, se realizaron todos los otros ensayos de estado fresco, reología y estado endurecido para caracterizar completamente a la mezcla de concreto resultante de la optimización. A continuación, la Tabla 27 muestra los resultados de los ensayos en estado fresco. SF representa flujo de asentamiento, DYS representa esfuerzo de fluencia dinámico y PV la viscosidad plástica.

Tabla 27

Resultados de ensayos de estado fresco de la mezcla óptima.

	SF [mm]	T_{500} [s]	L-box [h2/h1]	J-ring [mm]	DYS [Pa]	PV [Pa·s]
GGBFS46-WFS60	772.5	1.5	0.90	3.0	26.26	43.1
Límites EFNARC	550-850	2-5	0.8-1.0	0-10	--	--

Considerando los resultados presentados, la mezcla óptima cumple adecuadamente los requisitos de EFNARC (2002, 2005) para todo menos para el tiempo de flujo, que fue inferior a los 2 s. Sin embargo, la mezcla no presentó sangrado ni segregación y los valores caen dentro de las áreas de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica para SCC recomendadas por Wallevik & Wallevik (2011). La Tabla 28 muestra los valores obtenidos en los ensayos de estado endurecido para la mezcla óptima. STS representa resistencia a la tracción indirecta y BEC representa la conductividad eléctrica aparente.

Tabla 28

Resultados de ensayos de estado endurecido de la mezcla óptima.

	CS7 [MPa]	UPV7 [m/s]	STS7 [MPa]	CS28 [MPa]	UPV28 [m/s]	STS28 [MPa]	BEC28 [mS/m]
GGBFS46-WFS60	37.20	4093.17	3.51	45.12	4222.37	3.88	4.61

De lo presentado en la Tabla 28 se puede observar que aunque la optimización haya sido realizada únicamente para la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de curado, las cantidades obtenidas matemáticamente permitieron favorecer la edad temprana del concreto, al resultar en valores superiores a los de las mezclas del diseño estadístico a los 7 días de curado. Sin embargo, la resistencia a la tracción indirecta y la conductividad eléctrica aparente a los 28 días de curado no se vio potenciada, siendo inferior que algunos valores de las mezclas del diseño estadístico, lo que sugiere que en futuras investigaciones se podrían incluir como criterios en la optimización múltiple.

4.4. Efecto de la incorporación de nano partículas de sílice

Para evaluar el efecto que pueden tener pequeñas incorporaciones de nano partículas de sílice sobre las propiedades de concretos auto-compactantes, a la mezcla resultante del proceso de

optimización, se añadieron pequeñas dosificaciones de estas en porcentajes del 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2% de la masa el material cementante, como reemplazo de cemento. En esta etapa, ante la presencia de las nano-partículas de sílice, la cantidad de aditivo superplastificante se ajustó para que cada mezcla cumpliera con los criterios de flujo de asentamiento de EFNARC (2005). En la Tabla 29 se presentan las cantidades, en kg/m^3, de los materiales para cada una de las mezclas, incluyendo la mezcla óptima sin nano partículas de sílice.

Tabla 29

Proporciones de la mezcla óptima y de mezclas con nS.

	GGBFS46-WFS60	GGBFS46-WFS60-nS0.5	GGBFS46-WFS60-nS1.0	GGBFS46-WFS60-nS1.5	GGBFS46-WFS60-nS2.0
Cemento	289.18	287.73	286.29	284.84	283.39
GGBFS	246.93	246.93	246.93	246.93	246.93
AF	265.00	265.00	265.00	265.00	265.00
WFS	397.49	397.49	397.49	397.49	397.49
AG	884.78	884.78	884.78	884.78	884.78
Agua	187.64	187.64	187.64	187.64	187.64
SP	4.24	6.36	8.48	12.72	16.96
nS	----	1.45	2.89	4.34	5.78

La cantidad de SP se aumentó paulatinamente conforme aumentaba la cantidad de nS en las mezclas de concreto. Con estas proporciones de las mezclas, se procedió a desarrollarlas en el laboratorio y se realizaron los respectivos ensayos, en estado fresco y en estado endurecido a las dos edades de curado que se han trabajado. A continuación, la Tabla 30 muestra los resultados de los ensayos en estado fresco de las mezclas con nano partículas de sílice. Vale la pena aclarar que los parámetros reológicos de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica se obtuvieron haciendo el ajuste al modelo de Bingham modificado, para evitar la aparición de esfuerzos de fluencia negativos, como fue explicado anteriormente.

Tabla 30

Resultados de ensayos de estado fresco de mezclas con nS.

	SF [mm]	T_{500} [s]	L-box [h2/h1]	J-ring [mm]	DYS [Pa]	PV [Pa·s]
GGBFS46-WFS60	772.50	1.50	0.90	3.00	26.26	43.10
GGBFS46-WFS60-nS0.5	652.50	3.75	0.46	3.80	56.69	88.69
GGBFS46-WFS60-nS1.0	682.50	3.75	0.63	11.30	30.46	78.83
GGBFS46-WFS60-nS1.5	680.00	3.75	0.49	13.30	61.16	123.51
GGBFS46-WFS60-nS2.0	765.00	1.75	0.70	3.30	23.22	39.74
Límites EFNARC	550-850	2-5	0.8-1.0	0-10	--	--

Con respecto al comportamiento en estado fresco de las mezclas de SCC con nano partículas de sílice es posible afirmar que todas alcanzaron los requisitos de EFNARC (2005) para flujo de asentamiento. Adicionalmente, la mezcla con mejor comportamiento auto-compactante, en general, fue la mezcla con 2.0% de nS, que se debe a la mayor cantidad de SP incorporada a la mezcla, de 1.2%. Sin embargo, la capacidad de paso, abordada por el ensayo de L-box se vio negativamente afectada por la presencia de nS, siendo que ninguna mezcla cumplió con los límites de EFNARC (2005). Para el ensayo de J-ring, las mezclas con 1.0% y 1.5% de nS también estuvieron fuera de los límites de EFNARC (2005). Aunque la cantidad de aditivo superplastificante se ajustó para garantizar el cumplimiento del diámetro de asentamiento, esto no consiguió asegurar una adecuada capacidad de paso. No obstante las observaciones visuales de las mezclas permitieron descartar posible sangrado y segregación de las mismas, y todas las mezclas llenaron adecuadamente los moldes sin necesidad de vibrado adicional. La presencia de nano partículas de sílice, en el estado fresco del concreto, debido a la alta área superficial de las mismas, genera una mayor atracción y absorción de partículas de agua (Hosseini et al., 2010), y por lo tanto, la trabajabilidad de las mezclas termina reduciéndose, por lo que se genera una necesidad de incrementar la cantidad de aditivo superplastificante incorporado (Güneyisi et al., 2016). Sobolev et al. (2006) encontraron que era necesario incrementar la cantidad de aditivo superplastificante en 0.21% por cada 1% de nano partículas de sílice incorporadas a una mezcla de concreto

convencional. Con respecto a la reología, incrementos en los parámetros estudiados de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica fueron encontrados con la presencia de nano partículas de sílice. Sin embargo, la mezcla con 2% de nS presentó valores inferiores a los de la mezcla óptima (GGBFS45-WFS60, sin nS). Disminuciones en la cantidad de agua libre por efecto de las nano partículas de sílice resulta en incrementos en la viscosidad de la mezcla (Quercia et al., 2014; Senff et al., 2009). García-Taengua et al. (2015) encontraron que un 2% de nS maximiza la viscosidad de las mezclas, por lo que el uso de este material se debería limitar a este valor para garantizar apropiada trabajabilidad. Diversos autores, adicionalmente, reportan que incrementos en el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica de mezclas cementicias se deben a incrementos en la fricción entre las partículas y al empaquetamiento denso de las partículas de nS (Khaloo et al., 2016; Qing et al., 2007). Sin embargo, las propiedades de flujo de las mezclas se podrían mejorar con el uso apropiado de polímeros y haciendo uso de aditivos modificadores de viscosidad (Nazar et al., 2020).

A continuación, la Tabla 31 muestra los resultados de los ensayos en estado endurecido, a 7 y 28 días de curado, así como BEC sólo a 28 días de curado, de la mezcla óptima y la misma con nano partículas de sílice.

Tabla 31

Resultados de ensayos en estado endurecido de mezclas con nS.

	CS7 [MPa]	**UPV7 [m/s]**	**STS7 [MPa]**	**CS28 [MPa]**	**UPV28 [m/s]**	**STS28 [MPa]**	**BEC28 [mS/m]**
GGBFS46-WFS60	37.20	4093.17	3.51	45.12	4222.37	3.88	4.61
GGBFS46-WFS60-nS0.5	27.96	3778.50	3.31	36.22	3979.38	3.88	4.79
GGBFS46-WFS60-nS1.0	28.70	3791.33	3.20	36.08	3938.12	3.58	4.97
GGBFS46-WFS60-nS1.5	28.89	3806.17	3.24	36.48	3945.50	3.83	4.01
GGBFS46-WFS60-nS2.0	33.79	3961.83	3.69	42.52	4067.00	4.12	4.27

Los resultados obtenidos en el estado endurecido, a los 7 y 28 días de curado, y para todas las propiedades abordadas, muestran un efecto perjudicial de la incorporación de las nano partículas de sílice, que va en contradicción con la literatura estudiada (ver sección 2.3). En todos los ensayos se muestra que la incorporación de las nS no contribuyó a mejorar la resistencia y durabilidad de la mezcla óptima. Este efecto inesperado puede ser explicado por el protocolo usado para incorporación de las nano partículas en el proceso de mezclado: A 1/3 del agua de mezclado se le incorporó el total de nano partículas de sílice y el total del aditivo superplastificante, y esta parte de componentes fue mezclada manualmente para obtener una dispersión de las nano partículas antes de incorporarlas en la mezcla. Sin embargo, fue reportado que el contacto directo entre las nano partículas de sílice y el aditivo superplastificante parece ser inapropiado, debido a que la interacción entre estos dos reduce la reactividad de las nano partículas, como fue demostrado por Berra et al. (2012). Los autores del estudio sugieren una adición tardía del aditivo superplastificante en conjunto con el uso de una mezcladora apropiada para el rompimiento de los geles formados por la desestabilización de la solución de nano partículas (Berra et al., 2012).

4.5. Microestructura de concretos auto-compactantes con residuo de arena de fundición, escoria de alto horno y nano partículas de sílice

Para tener una correspondencia entre los resultados de los ensayos en estado endurecido y el desarrollo de la estructura interna de las mezclas de concreto, se realizaron ensayos de microscopia de barrido electrónica (SEM) y de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) a la mezcla control (GGBSF0-WF0), la mezcla óptima (GGBFS46-WFS60) y a las mezclas con 1% y 2% de nano partículas de sílice. La Figura 36 muestra la estructura interna de la mezcla control y la Figura 37 la correspondiente estructura de la mezcla óptima.

Figura 36

Imagen SEM de la mezcla control.

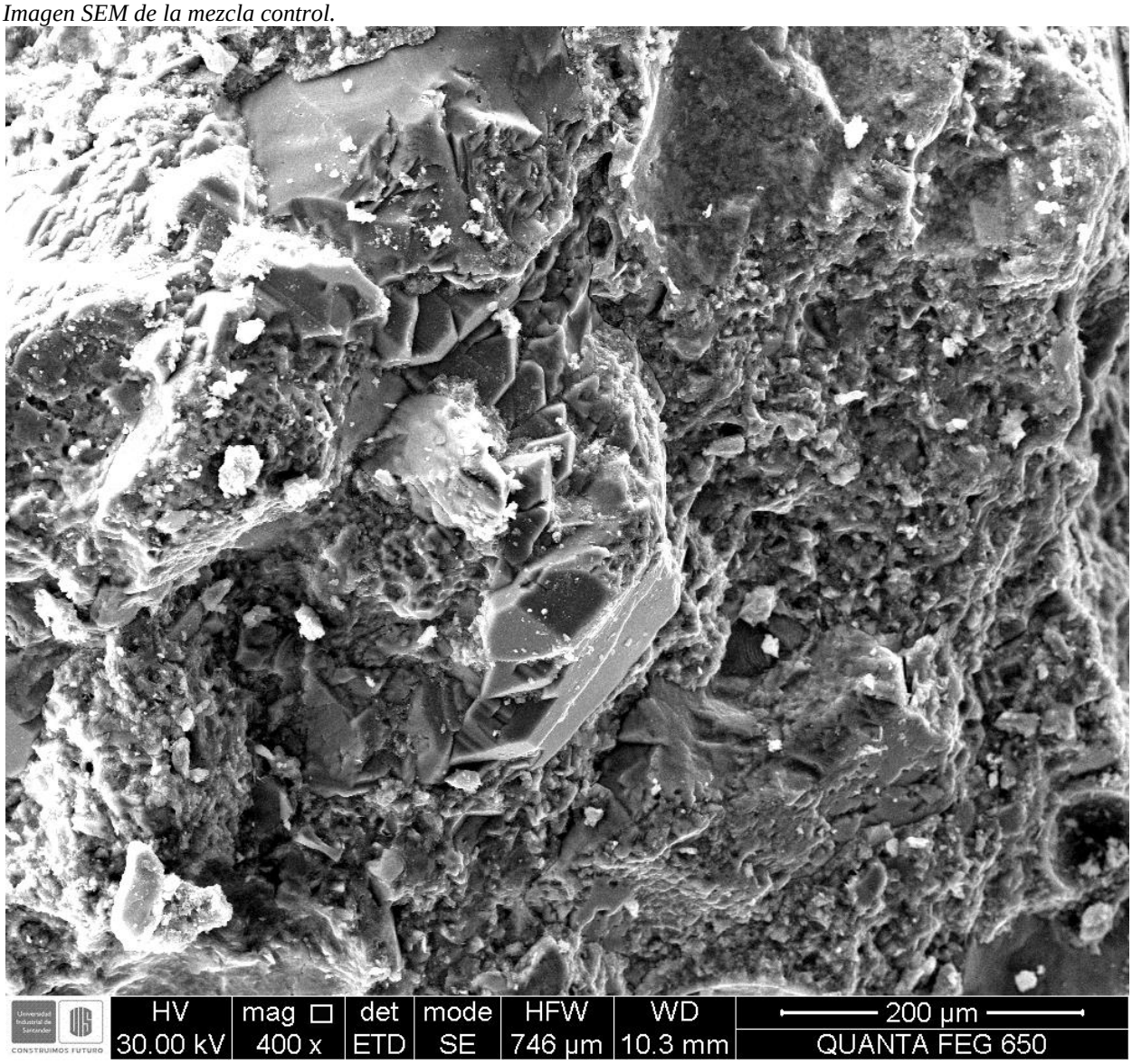
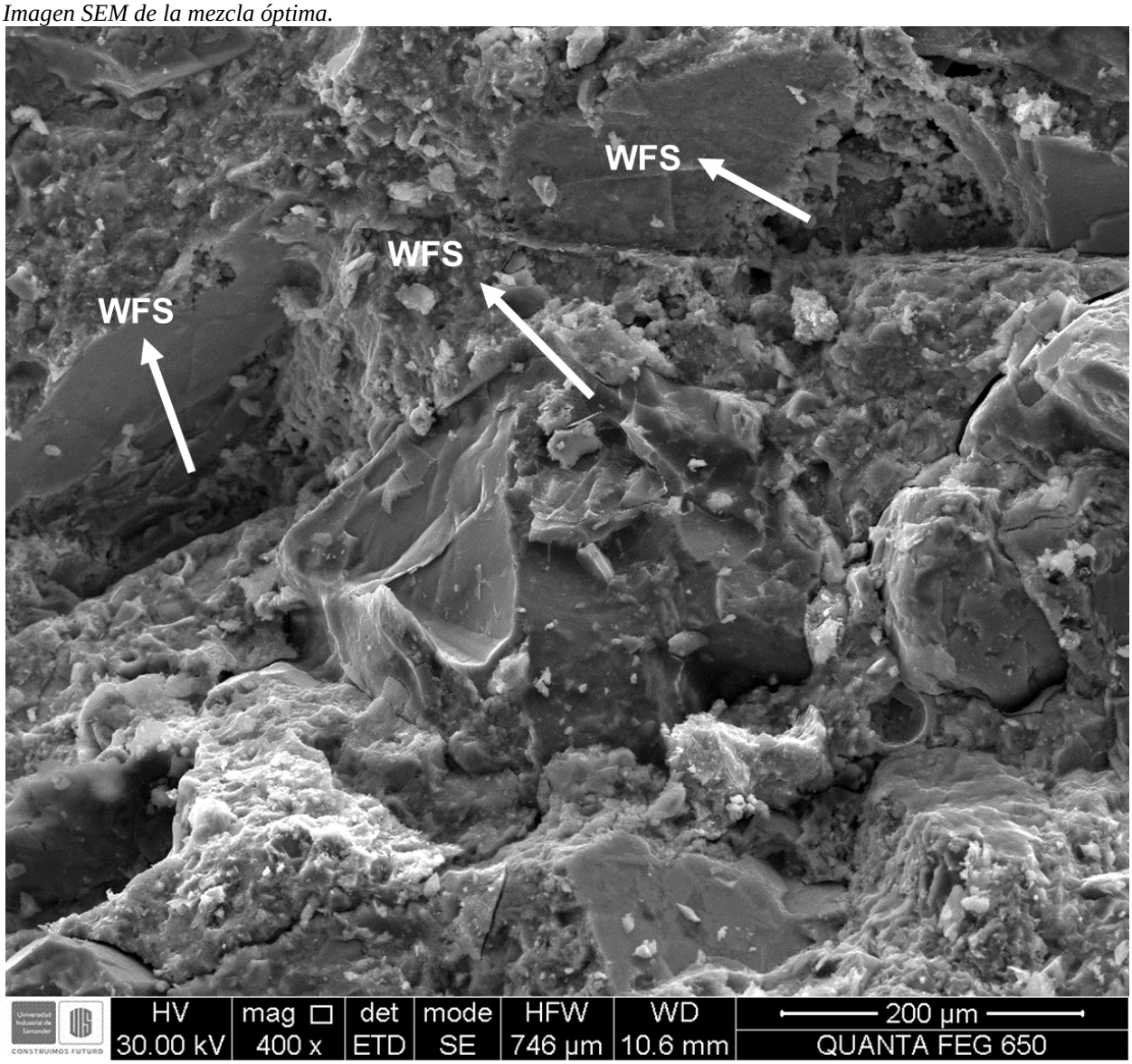


Figura 37

Imagen SEM de la mezcla óptima.



Al observar ambas imágenes es posible anotar que las dos mezclas de concreto presentan una adecuada estructura de cemento hidratado muy marcada, de morfología fibrosa y sin poros de gran tamaño. También, es posible apreciar que la pasta de cemento hidratada recubre adecuadamente a las partículas de agregado, mostrando una muy buena adherencia. Aunque se ha reportado una no muy buena adherencia entre las partículas de WFS y el gel C-S-H (Manoharan

et al., 2018), en la Figura 37 es posible ver que la mezcla hidratada de cemento Portland + GGBFS logra recubrir apropiadamente las partículas de WFS, que se diferencian de la arena convencional por su color más oscuro y opaco (Y. Aggarwal & Siddique, 2014). Esta adherencia se debe al efecto de la GGBFS, que potencia la producción de mayor cantidad de productos de hidratación y refina la microestructura del concreto, particularmente la zona de transición interfacial (ITZ, por sus siglas en inglés) (Cheng et al., 2017; Duan et al., 2013b, 2013a), refinada por la segunda hidratación de los silicatos de calcio (Cheah et al., 2019). Esto iría en concordancia con los resultados encontrados de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, y con el efecto estadísticamente significativo de la interacción entre la GGBFS y WFS en la resistencia a la compresión a los 28 días de curado. Los resultados del análisis de EDS, para la mezcla control y la mezcla óptima se presentan en las Figuras 38 y 39, respectivamente.

Figura 38

Análisis EDS de la mezcla control.

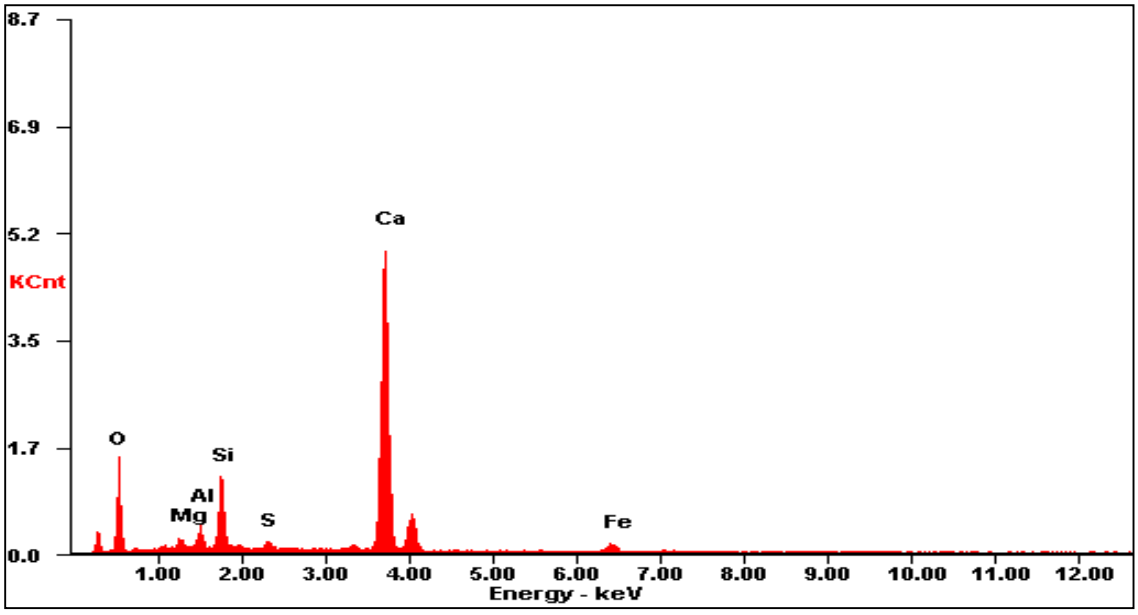
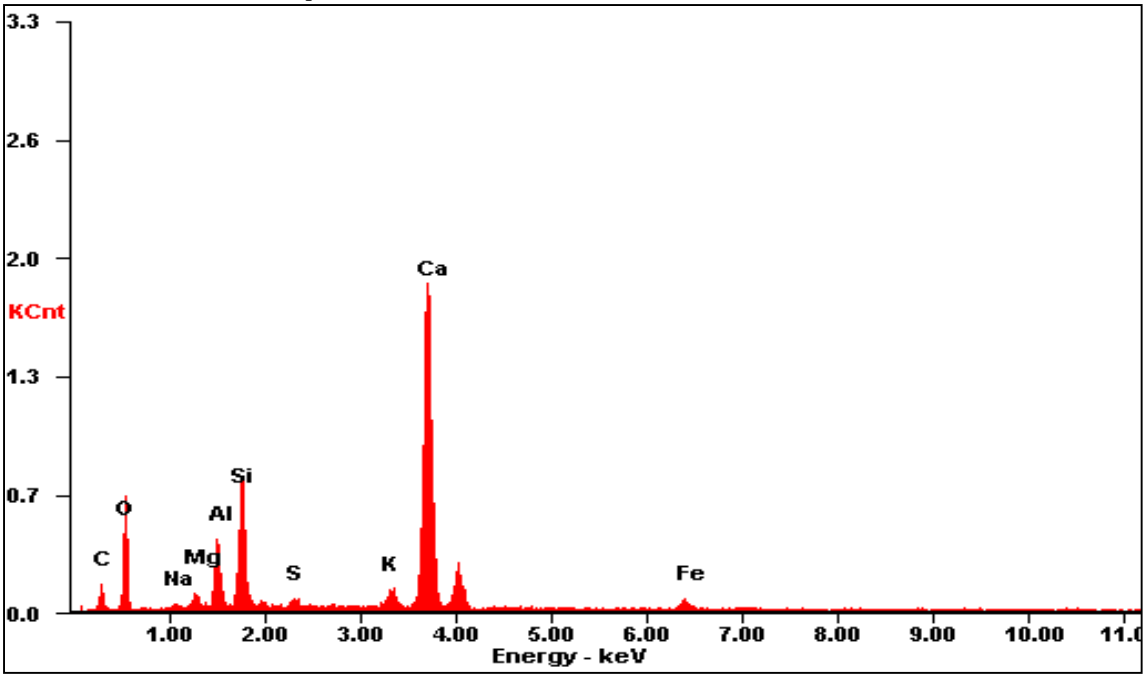


Figura 39

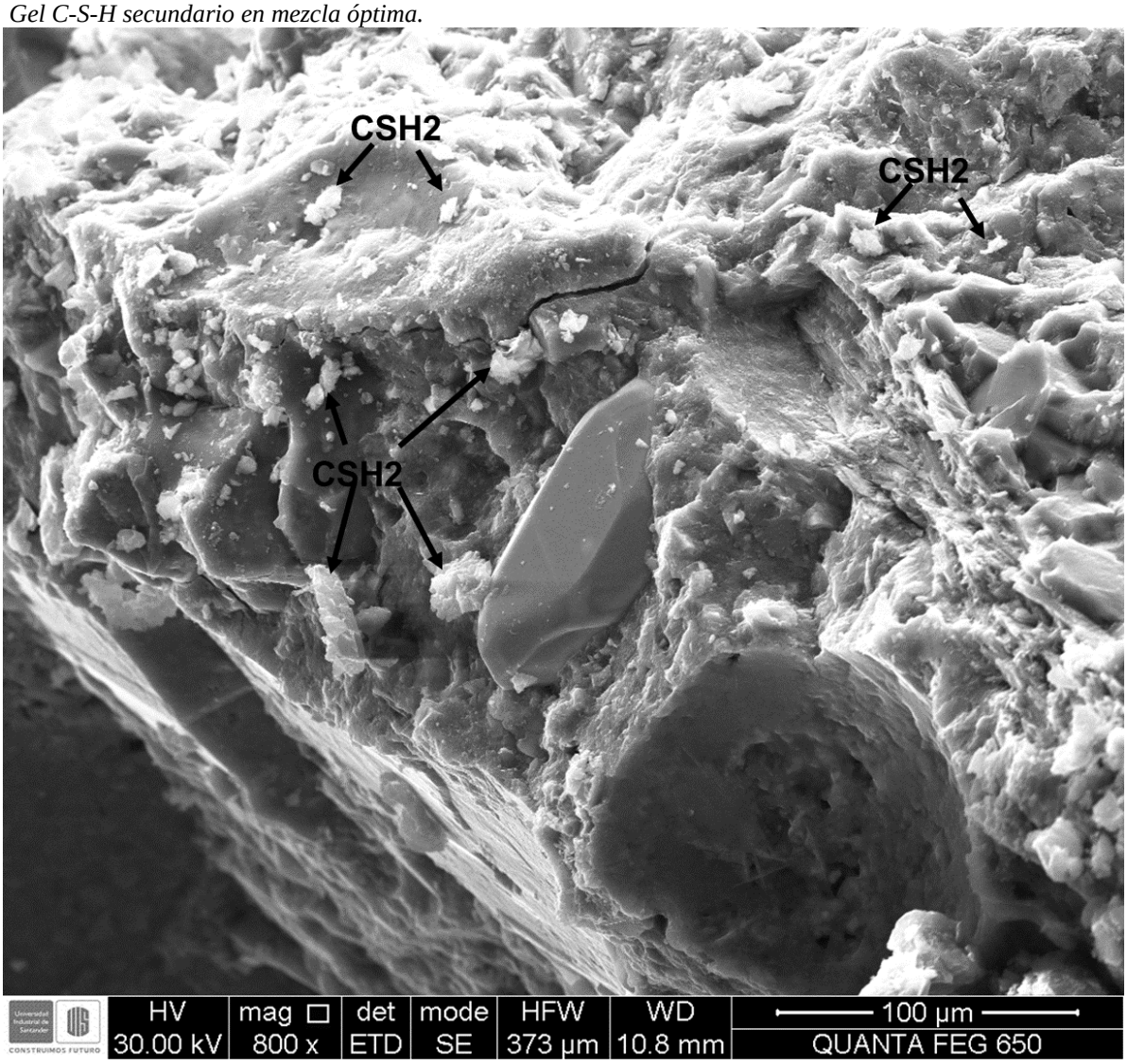
Análisis EDS de la mezcla óptima.



Lo encontrado por el análisis de EDS está en correspondencia con lo expresado anteriormente debido a que la mezcla control obtuvo una relación Ca/Si de 3.57, mientras que la mezcla óptima, por efecto de la incorporación de GGBFS, la relación Ca/Si disminuyó a 2.11. Esto indica que hidróxido de calcio ($Ca(OH_2)$) fue consumido en la formación secundaria y tardía de gel C-S-H, lo que llevó a una microestructura final más densa (Cheng et al., 2017; Duan et al., 2013b, 2013a). La morfología de forma de algodón del gel C-S-H secundario (catalogado en este trabajo como CSH2) se puede observar en la Figura 40. Menores valores de relación Ca/Si llevan, por lo tanto, a mejoras en la resistencia a la compresión y microestructura más densa (Dadsetan & Bai, 2017; Nazari & Riahi, 2011b), lo que va de acuerdo a los resultados encontrados de resistencia y velocidad de pulso ultrasónico (ver secciones 4.2.1 y 4.2.3).

Figura 40

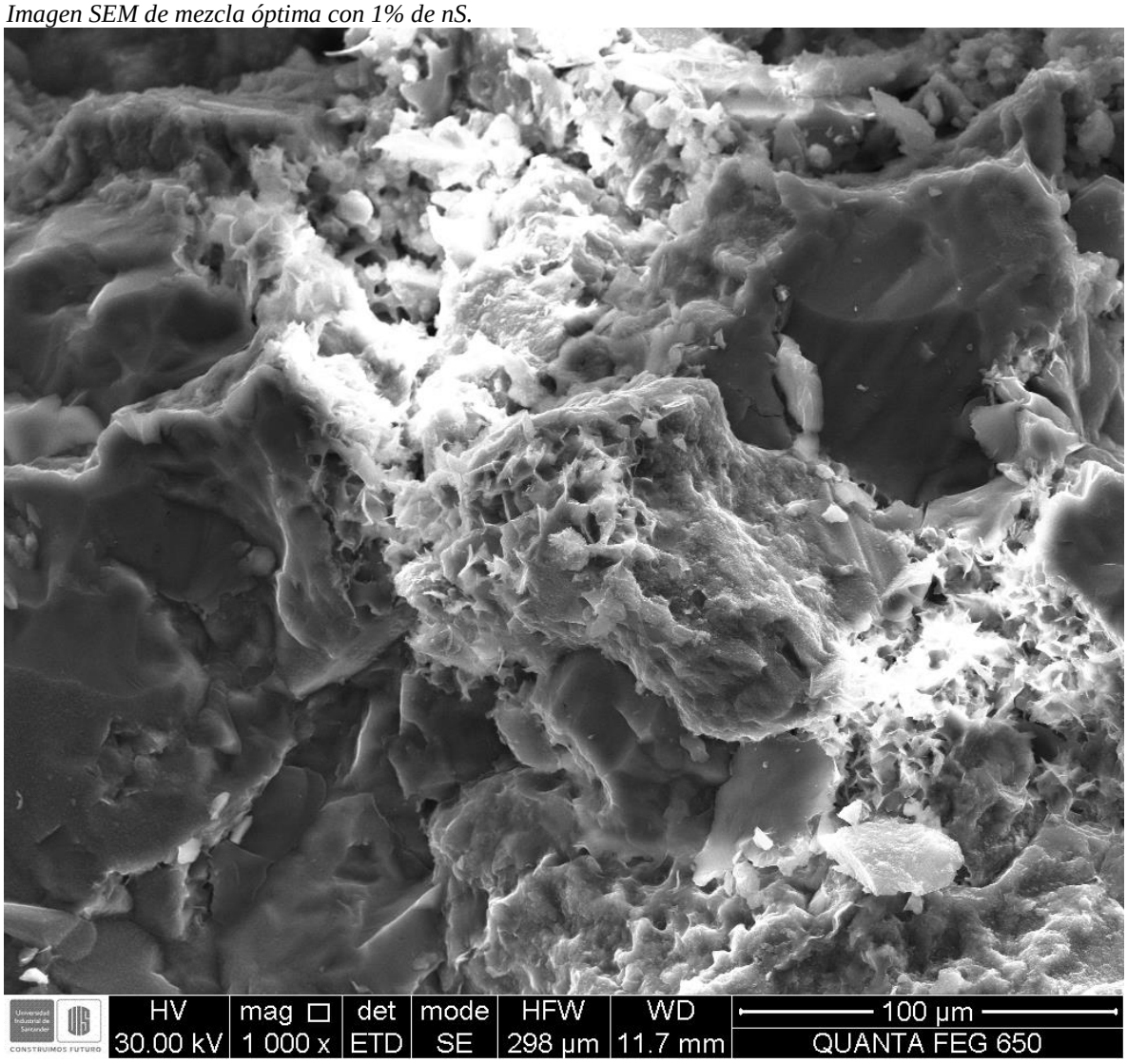
Gel C-S-H secundario en mezcla óptima.



Ahora, con respecto a la microestructura de las mezclas con incorporación de nano partículas de sílice, las Figuras 41 y 42 muestran las imágenes SEM de las mezclas óptima con 1% y 2% de nS, respectivamente.

Figura 41

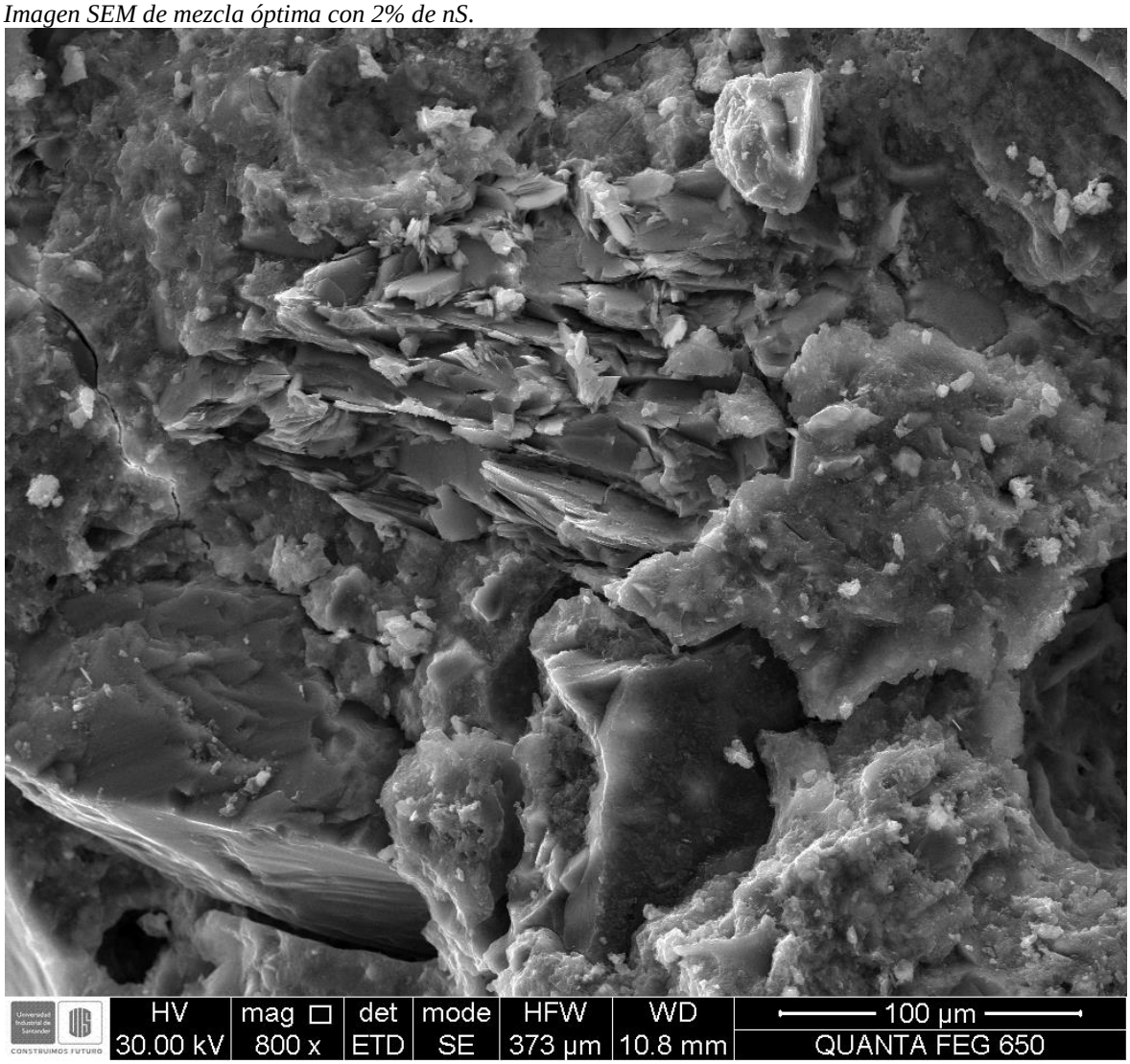
Imagen SEM de mezcla óptima con 1% de nS.



De las imágenes SEM de las mezclas con 1% y 2% de nS es posible indicar que presentan una mayor formación de poros y vacíos, en contraste con las mezclas sin nS y en contraste con lo que reporta la literatura sobre el efecto de las nS en la microestructura del concreto (Chithra et al., 2016; Hosseini et al., 2010; Khaloo et al., 2016; Nazari & Riahi, 2010, 2011a).

Figura 42

Imagen SEM de mezcla óptima con 2% de nS.

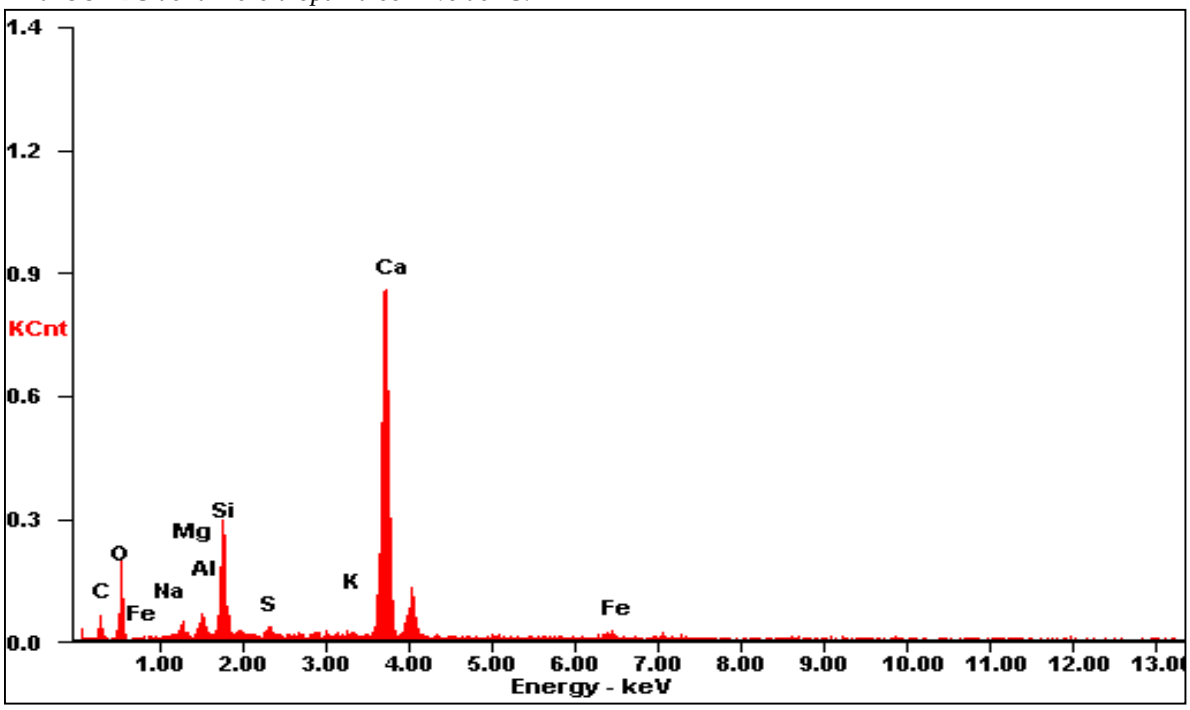


La mayor cantidad de poros, presentes en las Figuras 41 y 42 así como el espacio entre el agregado y la pasta cementicia hidratada, va en correspondencia con los hallazgos de resistencia y durabilidad de las mezclas con nS y sustentan la hipótesis que una incorporación inadecuada de estas en conjunto con el aditivo superplastificante comprometieron la reactividad y dispersión de las mismas (Berra et al., 2012; Rao et al., 2015). Se sospecha que, por la alta área superficial de las nano partículas de sílice, las mismas atrajeron agua libre y esto limita la hidratación del cemento y consecuentemente de la GGBFS, resultante en los poros y vacíos observados. A continuación,

se presentan los resultados del ensayo de EDS en las mezclas con nS. La Figura 43 muestra los resultados de la mezcla con 1% y la Figura 44 los de la mezcla con 2% de nS.

Figura 43

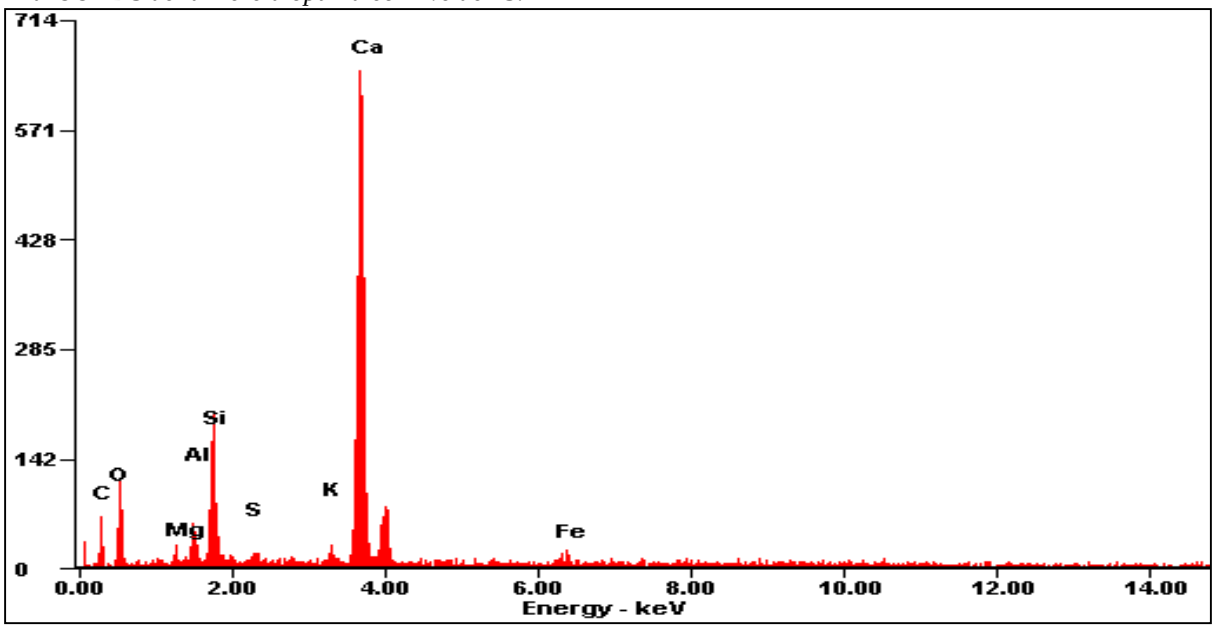
Análisis EDS de la mezcla óptima con 1% de nS.



Los resultados del ensayo de EDS confirman lo previamente supuesto al mostrar que la relación Ca/Si de las mezcla con 1% y 2% de nS fue de 3.00 y 3.54, respectivamente. Esto indica que, por efecto de la inadecuada incorporación de las nano partículas de sílice en las mezclas, se comprometió el desarrollo de la hidratación, ya que se muestra que el hidróxido de calcio no fue consumido para la segunda formación de gel C-S-H, lo que termina corroborando también la menor resistencia y menores valores de durabilidad de estas mezclas con nS.

Figura 44

Análisis EDS de la mezcla óptima con 2% de nS.



5. Conclusiones

Este documento estudió la influencia de la escoria de alto horno, el residuo de arena de fundición y de las nano partículas de sílice sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de concretos auto-compactantes por medio de un diseño estadístico 3^k y del análisis de la varianza ANOVA y optimización simultánea de respuestas. Con base en lo planteado se puede concluir:

- Es posible desarrollar concretos con el uso individual y conjunto de escoria de alto horno y de residuo de arena de fundición que cumplen con los criterios de auto-compactibilidad de flujo de asentamiento y tiempo de flujo sugeridos por EFNARC. Posibles problemas de capacidad de paso pueden ser apropiadamente resueltos con superiores incorporaciones de aditivos reductores de agua y de aditivos modificadores de viscosidad.

- El comportamiento reológico de las mezclas de concreto fue adecuadamente estudiado por medio del modelo de Bingham modificado, considerando posibles no linealidades de la viscosidad. Por otra parte, la escoria de alto horno y el residuo de arena de fundición contribuyen a disminuir el esfuerzo de fluencia dinámico, mientras que el residuo de arena de fundición aumenta la viscosidad plástica. Este aumento en la viscosidad plástica indujo los problemas de capacidad de paso observados.

- La escoria de alto horno fue estadísticamente significativa sobre todas las propiedades en el estado endurecido de los concretos auto-compactantes a los 7 y 28 días de curado. Es claro el efecto de mejora en las propiedades de resistencia y de durabilidad del concreto, por el efecto de *filler* y por la posterior contribución a la producción de más gel C-S-H, lo que se confirmó por medio de las imágenes de microscopia de barrido electrónica.

- La incorporación del residuo de arena de fundición fue estadísticamente significativa únicamente sobre la resistencia a la tracción y compresión, y sobre la velocidad de pulso

ultrasónico a los 7 días de curado. Con respecto a la resistencia a los 7 días de curado, el residuo de arena de fundición mejora esta propiedad con incorporaciones de hasta 30%, sin embargo, a 60%, la resistencia vuelve a bajar. El aporte a los 7 días de curado del residuo de arena de fundición a los valores de UPV, aunque significativo estadísticamente al 0.05, fue marginal. No obstante, a los 28 días de curado, el efecto individual del residuo de arena de fundición no fue estadísticamente significativo sobre ninguna de las propiedades evaluadas, por lo que se podría incorporar sin problemas a las mezclas de concreto auto-compactante hasta en un 60%.

- El efecto de interacción de las dos variables a los 28 días de curado sobre la resistencia a la compresión fue confirmado por la superficie de respuesta que muestra como ante la presencia de 30% y 60% de escoria de alto horno, incrementos en la cantidad de residuo de arena de fundición potencian la resistencia a la compresión. Esta interacción se confirmó en la imagen de microscopia de la mezcla óptima, que mostró una adecuada adherencia entre las partículas de residuo de arena de fundición y el gel C-S-H, y también por el análisis de espectroscopia de energía dispersiva que otorgó una relación Ca/Si menor en comparación a la mezcla control.

- La combinación de escoria de alto horno y de residuo de arena de fundición que permite simultáneamente optimizar la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico simultáneamente es 46.06% y 60%, respectivamente. Aunque la cantidad de residuo de arena de fundición se encuentre en los límites experimentales de esta investigación, valores superiores de este material comprometían la trabajabilidad de las mezclas de concreto auto-compactante.

- El estado fresco de las mezclas óptimas con incorporación de nano partículas se sílice fue garantizado por una mayor cantidad de aditivo superplastificante, conforme aumentó la cantidad de nano partículas. Como fue esperado, las nano partículas dificultan la trabajabilidad, presentando problemas de capacidad de paso aunque los requisitos de flujo de asentamiento de EFNARC

fueron cumplidos. Adicionalmente, los valores de esfuerzo de fluencia y de viscosidad plástica aumentaron por la capacidad de atracción de agua de las nano partículas de sílice, correspondiente a su gran área superficial específica, lo que respalda los problemas de capacidad de paso encontrados.

- La incorporación de las nano partículas de sílice a la mezcla óptima comprometió las propiedades en estado endurecido al presentar menores valores de resistencia a la tracción y compresión, e inferiores características de durabilidad. Las imágenes de microscopia de barrido electrónica confirmaron este hallazgo al mostrar una microestructura altamente porosa en estas mezclas. Se cree que esto se originó por el protocolo de incorporación de las nano-partículas en conjunto con el aditivo superplastificante a las mezclas.

6. Recomendaciones

- Futuras investigaciones se deben realizar para evaluar si es posible llegar a reemplazos totales de la arena de río por residuo de arena de fundición mediante el uso de aditivos modificadores de viscosidad, buscando garantizar la cohesión y los criterios de auto-compactibilidad.
- Para futuras investigaciones se recomienda un especial cuidado con la selección del protocolo de mezclado y de incorporación de nano partículas de sílice en mezclas de concreto, de tal manera que permita aprovechar las características de las mismas en las propiedades de los concretos.

Referencias bibliográficas

Abouhussien, A. A., & Hassan, A. A. A. (2015). Optimizing the durability and service life of self-consolidating concrete containing metakaolin using statistical analysis. *Construction and Building Materials*, *76*, 297–306. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.010

Aggarwal, P., Singh, R. P., & Aggarwal, Y. (2015). Use of nano-silica in cement based materials—A review. *Cogent Engineering*, *2*(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1078018

Aggarwal, Y., & Siddique, R. (2014). Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, *54*, 210–223. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051

Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. (2015). Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, *59*, 26–37. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.009

ASTM International. (2004). ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C0127-15.2

ASTM International. (2007). *ASTM C136/C136M Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0136

ASTM International. (2009). ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. In *ASTM International* (Issue C). https://doi.org/10.1520/C0188-15.2

ASTM International. (2010). *ASTM C33 Stardad Specification for Concrete Aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0033

ASTM International. (2011). ASTM C496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of

Cylindrical Concrete Specimens. In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C0496

ASTM International. (2012a). ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C1202-12.2

ASTM International. (2012b). ASTM C128, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. In *ASTM International: Vol. i*. https://doi.org/10.1520/C0128-15.2

ASTM International. (2012c). ASTM C1760 - 12 Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete. In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C1760-12.2

ASTM International. (2014a). ASTM C1611/C1611M-14 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C1611

ASTM International. (2014b). ASTM C1621 Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring. In *Annual Book of ASTM Standard*. https://doi.org/10.1520/C1621

ASTM International. (2016). ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. In *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/C0597-16.2

ASTM International. (2017). ASTM C39/C39M-17a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. In *American Society for Testing and Materials*. https://doi.org/10.1520/C0039

Banfill, P. F. G. (2006). Rheology of Fresh Cement and Concrete. In *Rheology Reviews 2006* (pp. 61–130). British Society of Rheology. https://doi.org/10.4324/9780203473290

Barnes, H. A. (1989). Shear-Thickening ("Dilatancy") in Suspensions of Nonaggregating Solid

Particles Dispersed in Newtonian Liquids. *Journal of Rheology*, *33*(2), 329–366. https://doi.org/10.1122/1.550017

Baroghel-Bouny, V., Kinomura, K., Thiery, M., & Moscardelli, S. (2011). Easy assessment of durability indicators for service life prediction or quality control of concretes with high volumes of supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, *33*(8), 832–847. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.007

Basar, H. M., & Deveci Aksoy, N. (2012). The effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the mechanical, leaching and micro-structural characteristics of ready-mixed concrete. *Construction and Building Materials*, *35*, 508–515. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.078

Bayramov, F., Taşdemir, C., & Taşdemir, M. A. (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. *Cement and Concrete Composites*, *26*(6), 665–675. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00161-6

Bellmann, F., & Stark, J. (2009). Activation of blast furnace slag by a new method. *Cement and Concrete Research*, *39*(8), 644–650. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.012

Berodier, E., & Scrivener, K. (2015). Evolution of pore structure in blended systems. *Cement and Concrete Research*, *73*, 25–35. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.025

Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., & Sebastiani, M. (2012). Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, *35*, 666–675. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132

Bhardwaj, B., & Kumar, P. (2017). Waste foundry sand in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *156*, 661–674. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.010

Boukendakdji, O., Kadri, E. H., & Kenai, S. (2012). Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, *34*(4), 583–590. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013

Cheah, C. B., Tiong, L. L., Ng, E. P., & Oo, C. W. (2019). The engineering performance of concrete containing high volume of ground granulated blast furnace slag and pulverized fly ash with polycarboxylate-based superplasticizer. *Construction and Building Materials*, *202*, 909–921. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.075

Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G., & Ding, S. (2017). Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. *Applied Clay Science*, *141*, 111–117. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.026

Chidiac, S. E., & Mahmoodzadeh, F. (2009). Plastic viscosity of fresh concrete - A critical review of predictions methods. *Cement and Concrete Composites*, *31*(8), 535–544. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.004

Chidiac, S. E., & Panesar, D. K. (2008). Evolution of mechanical properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days. *Cement and Concrete Composites*, *30*(2), 63–71. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.003

Chithra, S., Kumar, S. R. R. S., & Chinnaraju, K. (2016). The effect of Colloidal Nano-silica on workability , mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate. *Construction and Building Materials*, *113*, 794–804. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.119

COMISIÓN ASESORA PERMENENTE PARA EL RÉGIMEN DE CONSTRUCCIONES

SISMO RESISTENTES. (2010). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10*.

Coppio, G. J. L., de Lima, M. G., Lencioni, J. W., Cividanes, L. S., Dyer, P. P. O. L., & Silva, S. A. (2019). Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. *Construction and Building Materials*, *212*, 514–521. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.297

Cyr, M., Legrand, C., & Mouret, M. (2000). Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. *Cement and Concrete Research*, *30*(9), 1477–1483. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00330-6

Dadsetan, S., & Bai, J. (2017). Mechanical and microstructural properties of self-compacting concrete blended with metakaolin, ground granulated blast-furnace slag and fly ash. *Construction and Building Materials*, *146*, 658–667. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.158

Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, *12*(4), 214–219. https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968

Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013a). Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, *44*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.075

Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013b). Efficiency of mineral admixtures in concrete: Microstructure, compressive strength and stability of hydrate phases. *Applied Clay Science*, *83–84*, 115–121. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.08.021

EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. In *EFNARC*. https://doi.org/0 9539733 4 4

EFNARC. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. In *EFNARC* (pp. 1–68). http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf

Faleschini, F., Jiménez, C., Barra, M., Aponte, D., Vázquez, E., & Pellegrino, C. (2014). Rheology of fresh concretes with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, *73*, 407–416. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.068

Feldman, R. F. (1977). Non-destructive testing of concrete. *Canadian Building Digest*.

Ferraris, C. F. (1999). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, *104*(5), 18.

Feys, D., Heirman, G., Schutter, G. De, Verhoeven, R., Vandewalle, L., & Gemert, D. Van. (2007). Comparison of two concrete rheometers for shear thickening behaviour of SCC. *5th Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete (SCC2007)*.

Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2008). Fresh self compacting concrete, a shear thickening material. *Cement and Concrete Research*, *38*(7), 920–929. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.008

Feys, D., Verhoeven, R., & Schutter, G. De. (2007). *Evaluation of Time Independent Rheological Models Applicable to Fresh Self-Compacting Concrete*. *17*(5), 1–10.

Ganesh Prabhu, G., Hyun, J. H., & Kim, Y. Y. (2014). Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production. *Construction and Building Materials*, *70*, 514–521. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.070

García-Taengua, E., Sonebi, M., Hossain, K. M. A., Lachemi, M., & Khatib, J. (2015). Effects of

the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars. *Composites Part B: Engineering*, *81*, 120–129. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.07.009

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., & Özbay, E. (2009). Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. *Construction and Building Materials*, *23*(5), 1847–1854. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.015

Ghoddousi, P., Shirzadi Javid, A. A., & Sobhani, J. (2014). Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, *53*, 102–109. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.076

Glasser, F. P. (1996). Properties of cement waste composites. *Waste Management*, *16*(1), 159–168. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0956-053X(96)00059-1

Guney, Y., Sari, Y. D., Yalcin, M., Tuncan, A., & Donmez, S. (2010). Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. *Waste Management*, *30*(8–9), 1705–1713. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.018

Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O. A., & Öz, H. Ö. (2016). Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, *115*, 371–380. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.055

Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda ed). McGraw – Hill.

Guzmán, E., Tajuelo, J., Pastor, J. M., Rubio, M. Á., Ortega, F., & Rubio, R. G. (2018). Shear

rheology of fluid interfaces: Closing the gap between macro- and micro-rheology. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, *37*, 33–48. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2018.05.004

Hannesson, G., Kuder, K., Shogren, R., & Lehman, D. (2012). The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, *30*, 161–168. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.046

Hosseini, P., Booshehrian, A., & Farshchi, S. (2010). Influence of nano-SiO2 addition on microstructure and mechanical properties of cement mortars for ferrocement. *Transportation Research Record*, *2141*, 15–20. https://doi.org/10.3141/2141-04

Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., & Reza, A. (2012). Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO2 micro and nanoparticles. *Materials and Design*, *34*, 389–400. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037

Jau, W. C., & Yang, C. T. (2010). Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes. *Cement and Concrete Composites*, *32*(6), 450–460. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.001

Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., An, X., Liu, Y., & Li, H. (2017). Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review. *Cement and Concrete Composites*, *83*. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

Jo, B. W., Kim, C. H., & Lim, J. H. (2007). Investigations on the development of powder concrete with nano-SiO2 particles. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *11*(1), 37–42. https://doi.org/10.1007/bf02823370

Kanellopoulos, A., Petrou, M. F., & Ioannou, I. (2012). Durability performance of self-compacting

concrete. *Construction and Building Materials*, *37*, 320–325. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.049

Khaloo, A., Mobini, M. H., & Hosseini, P. (2016). Influence of different types of nano-SiO2 particles on properties of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, *113*, 188–201. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041

Khayat, K. H., & Schutter, G. De (Eds.). (2014). *Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03245-0

Kuder, K., Lehman, D., Berman, J., Hannesson, G., & Shogren, R. (2012). Mechanical properties of self consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag. *Construction and Building Materials*, *34*, 285–295. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.034

Kurdowski, W. (2014). Cement and Concrete Chemistry. In *Cement and Concrete Chemistry* (1st ed., Vol. 9789400779). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7

Makul, N. (2019). Combined use of untreated-waste rice husk ash and foundry sand waste in high-performance self-consolidating concrete. *Results in Materials*, *1*(August), 100014. https://doi.org/10.1016/j.rinma.2019.100014

Manoharan, T., Laksmanan, D., Mylsamy, K., Sivakumar, P., & Sircar, A. (2018). Engineering properties of concrete with partial utilization of used foundry sand. *Waste Management*, *71*, 454–460. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.022

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.

Montgomery, D., & Runger, G. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (Fith Editi). John Wiley & Sons, Inc.

Naciones Unidas/CEPAL. (2016). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. In *Naciones Unidas: Vol. Mayo*.

https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Nazar, S., Yang, J., Thomas, B. S., Azim, I., & Ur Rehman, S. K. (2020). Rheological properties of cementitious composites with and without nano-materials: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *272*, 122701. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122701

Nazari, A., & Riahi, S. (2010). Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO2 nanoparticles. *Materials Science and Engineering A*, *527*(29–30), 7663–7672. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.095

Nazari, A., & Riahi, S. (2011a). The effects of SiO2 nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites: Part B*, *42*(3), 570–578. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.09.025

Nazari, A., & Riahi, S. (2011b). The role of SiO2 nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete. *Materials Science and Engineering A*, *528*(4–5), 2149–2157. https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.064

Norhasri, M. S. M., Hamidah, M. S., & Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *133*, 91–97. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005

Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *1*(1), 5–15. https://doi.org/10.1680/stco.2000.1.1.3

Okamura H, O. M. (1998). *Self-compacting high performance concrete*. 378–383.

Padmalal, D., & Maya, K. (2014). Impacts of river sand mining. In *Sand Mining. Environmental Impacts and Selected Case Studies* (pp. 31–56). https://doi.org/10.1007/978-94-017-9144-1_4

Panesar, D. K., & Chidiac, S. E. (2009). Capillary suction model for characterizing salt scaling resistance of concrete containing GGBFS. *Cement and Concrete Composites*, *31*(8), 570–576. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.01.004

Parashar, A., Aggarwal, P., Saini, B., Aggarwal, Y., & Bishnoi, S. (2020). Study on performance enhancement of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, *251*, 118875. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118875

Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., Deford, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, *121*, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013

Pereira, E. L., de Oliveira Junior, A. L., & Fineza, A. G. (2017). Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. *Construction and Building Materials*, *149*, 837–848. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.148

Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K., & Rongshen, C. (2007). Influence of nano-SiO2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, *21*(3), 539–545. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.09.001

Quercia, G., Spiesz, P., Hüsken, G., & Brouwers, H. J. H. (2014). SCC modification by use of amorphous nano-silica. *Cement & Concrete Composites*, *45*, 69–81. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.001

Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., & Venkatasubramani, R. (2013). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *17*(2), 465–472. https://doi.org/10.1007/s12205-013-1882-8

Rao, S., Silva, P., & De Brito, J. (2015). Experimental study of the mechanical properties and

durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO2 and TiO2). *Construction and Building Materials, 96*, 508–517. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.049

Rashad, A. M. (2014). A comprehensive overview about the effect of nano-SiO2 on some properties of traditional cementitious materials and alkali-activated fly ash. *Construction and Building Materials, 52*, 437–464. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.101

Rasoul Abdar Esfahani, S. M., Zareei, S. A., Madhkhan, M., Ameri, F., Rashidiani, J., & Taheri, R. A. (2021). Mechanical and gamma-ray shielding properties and environmental benefits of concrete incorporating GGBFS and copper slag. *Journal of Building Engineering*, *33*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101615

Rezaifar, O., Hasanzadeh, M., & Gholhaki, M. (2016). Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method. *Construction and Building Materials, 123*, 59–68. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.047

Roy, D. M., & Asaga, K. (1980). Rheological Properties of Cement Mixes: V. The Effects of Time on Viscometric Properties of Mixes Containing Superplasticizers; Conclusions. *Cement and Concrete Research*, *10*(3), 387–394.

Safiuddin, M., Gonzalez, M., Cao, J., & Tighe, S. L. (2014). State-of-the-art report on use of nano-materials in concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, *15*(10), 940–949. https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893327

Şahmaran, M., Lachemi, M., Erdem, T. K., & Yücel, H. E. (2011). Use of spent foundry sand and fly ash for the development of green self-consolidating concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *44*(7), 1193–1204. https://doi.org/10.1617/s11527-010-9692-7

Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete Quality Designation based

on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, *125*, 1022–1027. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158

Sandhu, R. K., & Siddique, R. (2019). Strength properties and microstructural analysis of self-compacting concrete incorporating waste foundry sand. *Construction and Building Materials*, *225*, 371–383. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.216

Sarkar, S., & Mazumder, D. (2015). Solid Waste Management in Steel Industry-Challenges and Opportunities. *International Journal of Social, Behavioral, Educational. Economic, Business and Industrial Engineering*, *9*(3), 978–981. http://www.waset.org/publications/10001005

Senff, L., Labrincha, J. A., Ferreira, V. M., Hotza, D., & Repette, W. L. (2009). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, *23*(7), 2487–2491. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005

Shariq, M., Prasad, J., & Masood, A. (2010). Effect of GGBFS on time dependent compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, *24*(8), 1469–1478. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.007

Shariq, M., Prasad, J., & Masood, A. (2013). Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, *40*, 944–950. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.070

Sharma, R., & Khan, R. A. (2017). Sustainable Use of Copper Slag in Self Compacting Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. *Sustainable Use of Copper Slag in Self Compacting Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.031

Sharma, R., & Khan, R. A. (2018). Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, *171*, 1171–1186.

https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.029

Shi, C., Wu, Z., Lv, K., & Wu, L. (2015). A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *84*, 387–398. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.079

Shi, Y. X., Matsui, I., & Guo, Y. J. (2004). A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, *34*(8), 1381–1387. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.031

Siddique, R. (2007). *Waste Materials and By-Products in Concrete*. Springer.

Siddique, R., Aggarwal, Y., Aggarwal, P., Kadri, E. H., & Bennacer, R. (2011). Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS). *Construction and Building Materials*, *25*(4), 1916–1925. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.065

Siddique, R., & Sandhu, R. K. (2013a). Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Waste Foundry. *Leonardo Journal of Sciences*, *23*(July), 105–124. http://ljs.academicdirect.org/ 105

Siddique, R., & Sandhu, R. K. (2013b). Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Waste Foundry. *Leonardo Journal of Sciences*, *23*, 105–124.

Siddique, R., Singh, G., Belarbi, R., Ait-Mokhtar, K., & Kunal. (2015). Comparative investigation on the influence of spent foundry sand as partial replacement of fine aggregates on the properties of two grades of concrete. *Construction and Building Materials*, *83*, 216–222. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.011

Singh, G., & Siddique, R. (2011). Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. *Construction and*

Building Materials, *26*(1), 7. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.041

Singh, R. B., & Singh, B. (2018). Rheological behaviour of different grades of self-compacting concrete containing recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, *161*, 354–364. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.118

Smucker, B. J., Edwards, D. J., & Weese, M. L. (2020). Response surface models: To reduce or not to reduce? *Journal of Quality Technology*, *0*(0), 1–20. https://doi.org/10.1080/00224065.2019.1705208

Sobolev, K., Flores, I., & Hermosillo, R. (2006). Nanomaterials and nanotechnology for high-performance cement composites. *Proceedings of ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*, 91–118.

Struble, L. J., & Chen, C.-T. (2005). Effect of Continuous Agitation on Concrete Rheology. *Journal of ASTM International*, *2*(9), 1–19. https://doi.org/10.1520/JAI13035

Sua-iam, G., Makul, N., Cheng, S., & Sokrai, P. (2019). Workability and compressive strength development of self-consolidating concrete incorporating rice husk ash and foundry sand waste – A preliminary experimental study. *Construction and Building Materials*, *228*, 116813. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116813

Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford Publishing. https://doi.org/doi:10.1680/cc.25929

Thiruvenkitam, M., Pandian, S., Santra, M., & Subramanian, D. (2020). Use of waste foundry sand as a partial replacement to produce green concrete: Mechanical properties, durability attributes and its economical assessment. *Environmental Technology and Innovation*, *19*, 101022. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101022

Tittarelli, F. (2018). Waste foundry sand. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in*

Concrete (pp. 121–147). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00004-3

Vivek, S. S., & Dhinakaran, G. (2017a). Durability characteristics of binary blend high strength SCC. *Construction and Building Materials*, *146*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.063

Vivek, S. S., & Dhinakaran, G. (2017b). Fresh and hardened properties of binary blend high strength self compacting concrete. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *20*(3), 1173–1179. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.05.003

Wallevik, O. H., & Wallevik, J. E. (2011). Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, *41*(12), 1279–1288. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009

Wray, P. (2012). Straight talk with Karen Scrivener on cements, CO2 and sustainable development. *American Ceramic Society Bulletin*, *91*(5), 47–50.

Wu, Q., & An, X. (2014). Development of a mix design method for SCC based on the rheological characteristics of paste. *Construction and Building Materials*, *53*, 642–651. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.008

Yuksel, I. (2018). Blast-furnace slag. In *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2

Zhang, P., Wan, J., Wang, K., & Li, Q. (2017). Influence of nano-SiO2 on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, *148*, 648–658. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059

Zhao, H., Sun, W., Wu, X., & Gao, B. (2015). The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, *95*, 66–74. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.050

WFS, GGBFS Y NANO SIO_2 EN CONCRETO AUTOCOMPACTANTE