

**COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTO-COMPACTANTE  
EN ESTADO ENDURECIDO BAJO REEMPLAZO DE AGREGADO FINO POR  
ESCORIA METÁLICA**

**MARÍA FERNANDA MANTILLA DÍAZ  
JHON ALEJANDRO VILLAMIZAR PABÓN**

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

**2018**

**COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTO-COMPACTANTE  
EN ESTADO ENDURECIDO BAJO REEMPLAZO DE AGREGADO FINO POR  
ESCORIA METÁLICA**

**MARÍA FERNANDA MANTILLA DÍAZ  
JHON ALEJANDRO VILLAMIZAR PABÓN**

Trabajo de grado como requisito para optar por el título de  
Ingeniero Civil

Director:

**LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ**

Ingeniero Civil. Ph D

Codirector:

**SERGIO RUIZ MARTÍNEZ**

Ingeniero Civil

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

**2018**

## DEDICATORIA

*A Él por la fuerza.*

*A mamá por ser timón y ancla.*

*A mi familia por su amor y apoyo.*

*A Alejandro por luchar hasta el final.*

*A Sara y Wendy por hacer todo más llevadero.*

*A todos los que de una u otra forma hicieron parte del proceso, esto es por y para ustedes.*

*María Fernanda Mantilla Díaz*

## DEDICATORIA

*En primer lugar, agradezco a Dios por haberme guiado en este camino. A mi madre y padre por siempre estar pendiente del avance de mi proyecto y por siempre estar dispuestos a ayudarme en lo que fuera. A mi compañera de tesis por nunca rendirse en este proyecto que casi nos saca canas. A mis más cercanas amigas Andrea y Daniela por seguir mis avances desde la distancia y siempre estar ahí para escucharme luego de un día de trabajo en el laboratorio. A mis amigos por compartir mi felicidad en cada meta alcanzada durante la realización de este proyecto, gracias a todos ustedes, sin ustedes no hubiera sido posible esto.*

*Gracias.*

*Jhon Alejandro Villamizar Pabón*

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer de manera especial a nuestro director Luis Eduardo Zapata Orduz, por su valiosa ayuda y por brindarnos las herramientas necesarias para desarrollar el proyecto. A nuestro Co-director Sergio Ruiz Martínez, por acompañarnos durante todo este tiempo y orientarnos en cada paso. Agradecemos a los laboratoristas Jairo Hernández Salazar y Germán Hernández Ayala por su constante colaboración y orientación durante la elaboración de las pruebas experimentales (Gracias Mechu por los ensayos a compresión). Por último, le damos gracias a las entidades que nos suministraron el material requerido para realizar el proyecto HOLCIM y ULTRACEM.

MARÍA FERNANDA MANTILLA DÍAZ  
JHON ALEJANDRO VILLAMIZAR PABÓN

# CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1. OBJETIVOS .....	17
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1. MATERIALES .....	18
2.1.1. Agregado Grueso (AG).....	18
2.1.2. Agregado Fino (AF) .....	18
2.1.3. Cemento .....	19
2.1.4. Escoria de Alto Horno.....	19
2.1.5. Escoria Metálica .....	19
2.1.6. Super-plastificante .....	20
2.1.7. Nano-Sílice .....	20
2.2. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA.....	20
2.3. DISEÑO DE MEZCLA.....	22
2.4. PROCESO DE MEZCLADO .....	26
2.5. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	27
2.6. ENSAYO DE REOLOGÍA .....	29
2.7. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	29
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	31
3.1.1. Slump-Flow.....	32
3.1.2. T500.....	33

3.1.3.	J-Ring .....	33
3.1.4.	L-Box .....	34
3.2.	REOLOGÍA .....	35
3.2.1.	Esfuerzo de fluencia estático .....	36
3.2.2.	Viscosidad plástica .....	36
3.3.	ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL.....	37
3.4.	PUNTO ÓPTIMO .....	42
4.	CONCLUSIONES.....	43
	REFERENCIAS .....	46
	BIBLIOGRAFÍA.....	50
	ANEXOS.....	51

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría Agregado Grueso.....	18
Tabla 2. Granulometría Agregado Fino.....	19
Tabla 3. Granulometría Escoria Metálica.....	20
Tabla 4. Orden de Ejecución de los Baches.....	21
Tabla 5. Granulometrías Combinadas.....	23
Tabla 6. Cantidades de Diseño de Mezcla.....	26
Tabla 7. Análisis ANOVA Minitab V17 Variables significantes y factor predictivo sobre parámetros de interés.....	31
Tabla 8. Resultados Promedio Ensayos en Estado Fresco.....	31
Tabla 9. Resultados Promedio Reología.....	35
Tabla 10. Resultados Promedio Compresión Uniaxial.....	37
Tabla 11. Análisis ANOVA modelo original, sin depurar.....	38
Tabla 12. Análisis ANOVA modelo normalizado, sin depurar.....	38
Tabla 13. Análisis ANOVA modelo normalizado, depurado.....	39
Tabla 14. Ensayos realizados bajo reemplazo de nS.....	43

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de Diseño Estadístico. ....	22
Figura 2. Metodología de Fuller 0.45. ....	24
Figura 3. Metodología 8-18 AASHTO. ....	25
Figura 4. Factor de Grosor.....	25
Figura 5. Slump-Flow & T500. ....	27
Figura 6. J-Ring. ....	28
Figura 7. L-Box. ....	28
Figura 8. Compresión Uniaxial.....	30
Figura 9. Resultados Ensayo Slump-Flow. ....	32
Figura 10. Resultados Ensayo T500.....	33
Figura 11. Resultados Ensayo J-Ring.....	34
Figura 12. Resultados Ensayo L-Box.....	34
Figura 13. Resultados Ensayo de fluencia estático. ....	36
Figura 14. Resultados Viscosidad Plástica. ....	37
Figura 15. Superficie de respuesta Resistencia a 7 días de curado. ....	40
Figura 16. Efecto de la escoria metálica en la compresión uniaxial.....	40
Figura 17. Resultados Resistencia a compresión uniaxial.....	41

## RESUMEN

**TÍTULO: COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE CONCRETO AUTO-COMPACTANTE EN ESTADO ENDURECIDO BAJO REEMPLAZO DE AGREGADO FINO POR ESCORIA METÁLICA\***

**AUTORES: MARÍA FERNANDA MANTILLA DÍAZ  
JHON ALEJANDRO VILLAMIZAR PABÓN\*\***

**PALABRAS CLAVE:** Escoria metálica, Concreto auto-compactante, ANOVA, Reología, Superficie de respuesta.

En este documento se presenta un estudio del reemplazo de arena por escoria metálica del 0.0%-50.0% del peso total del agregado fino y variaciones en la relación agua/material cementante entre 0.3-0.5, en mezclas de concreto auto-compactante, en donde se realizaron pruebas de resistencia a la compresión uniaxial, así como la fluidez en estado fresco y las propiedades reológicas de las mezclas. El efecto de estas variaciones se determinó a partir de un análisis estadístico y un estudio de sensibilidad, con base en un diseño estadístico multi-variable del tipo central compuesto desde puntos axiales basado en un factorial  $2^k$  con puntos al centro, en conjunto con metodología de superficie de respuesta y análisis de varianza ANOVA, con un análisis enfocado a la resistencia a la compresión uniaxial a los 7 días, donde se obtuvo un punto óptimo que fue estudiado en presencia de nanopartículas de sílice con diferentes reemplazos. El resultado de las pruebas muestra un aumento en la resistencia a la compresión con la reducción de relación agua/material cementante y aumento del porcentaje de escoria metálica de reemplazo, llegando a obtener resistencias de hasta 77 [MPa] a los 28 días de curado.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: Sergio Ruiz Martínez

## ABSTRACT

**TITLE: BEHAVIOR OF SELF-COMPACTING CONCRETE MIXTURES IN HARDENED STATE UNDER REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE BY METALLIC SLAG\***

**AUTHORS: MARÍA FERNANDA MANTILLA DÍAZ  
JHON ALEJANDRO VILLAMIZAR PABÓN\*\***

**KEYWORDS:** Metallic slag, Self-compacting concrete, ANOVA, Rheology, Response surface.

In this document, a study of the replacement of sand by metallic slag of 0.0% -0.5% of the total weight of the fine aggregate and variations in the water/cementitious material ratio between 0.3-0.5, in self-compacting concrete mixtures is presented, in which tests of uniaxial compressive strength, as well as the fluidity in fresh state and the rheological properties of the mixtures were performed. The effect of these variations was determined from statistical and sensitivity analysis, based on a multi-variable statistical design of the central type composed of axial points based on a factorial 2k with points to the center, in conjunction with the methodology of response surface and analysis of variance ANOVA. An analysis focused on uniaxial compressive strength at 7 days, where an optimum point was obtained that was studied in the presence of silica nano-particles with replacements between 0.0 and 2.0 %. The result of the tests shows an increase in the compressive strength with the reduction of water/cementitious material ratio and increase in the percentage of replacement of metallic slag, reaching up to 77 [MPa] in compressive strength after 28 days of curing.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: Sergio Ruiz Martínez

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está posicionando de manera fuerte el uso del concreto auto-compactante (CAC), el cual parte de un concreto convencional con modificaciones, como el reemplazo de cemento por un filler, una mayor cantidad de agregado fino en comparación con el grueso y el uso de aditivo superplastificante. Este es un concreto innovador que no necesita vibración tanto interna como externa para su compactación, es capaz de consolidarse por sus propias capacidades de llenado [1]. El filler tiene como función hacer que la mezcla se abra paso con facilidad a través de su propia matriz mejorando sus propiedades de fluidez y además disminuyendo la cantidad de cemento usado por  $m^3$  de concreto [2].

La producción de cemento trae consigo un impacto ambiental negativo, esto se evidencia en las plantas cementeras donde para producir una tonelada de cemento se emiten entre 0.82 y 1.00 toneladas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a la atmosfera, lo que constituye entre el 5% y 8% del total de las emisiones de  $CO_2$  producto de las actividades humanas [3]. Por otro lado, elaborar concreto acarrea problemas como el agotamiento de recursos naturales entre estos los agregados, la segunda materia prima más consumida por el hombre en la construcción de obras civiles [4]. El consumo mundial anual de concreto asciende aproximadamente a 25 mil millones de toneladas, dentro de las cuales el agregado fino constituye un cuarto del volumen total de concreto, su alto consumo ha venido marcando una disminución en la disponibilidad de agregado fino de alta calidad, produciendo un agotamiento y dificultando la extracción de éste, lo cual ha obligado a ciertos países a imponer restricciones sobre su extracción [5]. Esto hace que se requieran materiales alternativos que puedan servir como sustitos parciales o completos del agregado sin llegar disminuir las propiedades de un concreto.

Teniendo en cuenta la literatura se ha encontrado que la escoria metálica (EM), material fundido formado por las reacciones químicas entre la materia prima de la producción de hierro, los materiales añadidos al horno y las impurezas oxidadas presentadas durante el oxidado del hierro [6], mejora la resistencia a la compresión del concreto, planteando así una solución al problema de agotamiento de recursos y mitigando el impacto ambiental junto con el agotamiento de materia prima [7] [8].

Como productos innovadores se ha encontrado el uso de nano-partículas de  $\text{SiO}_2$  (nS), las cuales actúan como núcleos heterogéneos en el cemento, acelerando la hidratación en el concreto debido a su alta reactividad y desarrollándose a medida que va madurando el concreto [9]. Investigaciones con este material en mezclas de CAC, como adicción de cemento, han demostrado que se obtienen concretos de alto desempeño, incrementando de esta forma la resistencia a la compresión hasta en un 26% a los 28 días de curado [10].

La reología estudia la deformación y flujo de la materia [11], donde según el modelo lineal de Bingham, el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica caracterizan el comportamiento en estado fresco de las mezclas [12].

Se propone entonces analizar las diferentes propiedades del CAC con reemplazo de EM (CACEM), mediante un diseño central compuesto basado en un factorial  $2^k$  y con la metodología de superficie de respuesta, esto para evaluar la incidencia en el reemplazo de arena por EM y la variación de la relación agua/material cementante (A/C), para esto se realizaron ensayos en estado fresco así como ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días, con el fin de obtener un punto óptimo de la resistencia a los 7 días, y estudiarlo en presencia de nano partículas de sílice con diferentes reemplazos.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Optimizar el comportamiento a compresión uniaxial (NTC 673 / ASTM C39) del concreto auto-compactante bajo un valor fijo de reemplazo de agregado fino por escoria metálica, y con variaciones simultáneas en las cantidades de partículas de nano-sílice y de la relación agua-material cementante.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar el efecto de la presencia de partículas de nano-sílice y de la variación de la relación agua/material cementante en el estado fresco de mezclas de concreto auto-compactante con reemplazo de escoria metálica, mediante los ensayos de J-Ring (ASTM C1621/EFNARC-05), L-Box (EFNARC-05), ensayo de flujo de asentamiento (ASTM C1611/EFNARC-05) y T500 (mm) desde el cono de Abrams (EFNARC-05), así como la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia, ambos datos tomados desde reómetro.

Determinar las cantidades óptimas de nano-sílice, agua y material cementante en las mezclas de concreto auto-compactante por medio de ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y análisis estadísticos mediante un diseño central compuesto modificando las cantidades de nano-sílice y la relación agua/material cementante en presencia de un reemplazo del agregado fino por un valor fijo de escoria metálica.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. MATERIALES

La caracterización de los materiales empleados se realizó siguiendo los parámetros de la American Society of Testing Materials (ASTM). Las cuales se registran a continuación.

**2.1.1. Agregado Grueso (AG)** El material tiene un tamaño máximo nominal (TMN) de 1/2" (12.7 mm), con una gravedad específica (GS) de 2.80, un peso unitario (SSS) de 1535.79 [kg/m<sup>3</sup>], un porcentaje de absorción del 1.58% y un contenido de humedad del 0.33%. Para la determinación de las anteriores propiedades se realizaron ensayos siguiendo los parámetros establecidos por las normas ASTM C128 [13] y ASTM C136 [14] respectivamente, ver granulometría del material Tabla 1.

Tabla 1. Granulometría Agregado Grueso.

Tamaño Tamiz (in)	Tamaño Tamiz (mm)	(% retenido)	(% pasado)
3/4"	19.1	0	100
1/2"	12.7	2.12	97.88
3/8"	9.5	39.76	58.12
N°4	4.76	52.4	5.72
Fondo	-	5.72	0

Fuente: Autores.

**2.1.2. Agregado Fino (AF)** Este material tuvo GS=2.73, un porcentaje de absorción del 1.42%, contenido de humedad del 0.81% y un módulo de finura (MF) de 2.60. Para ello, se llevaron a cabo ensayos según la normativa del ASTM C128 [13] y ASTM C136 [14] respectivamente, ver granulometría en Tabla 2.

Tabla 2. Granulometría Agregado Fino.

Tamaño Tamiz (in)	Tamaño Tamiz (mm)	(% Retenido)	(% Que pasa)
N°4	4.76	3.80	96.20
N°8	2.36	4.70	91.50
N°16	1.25	10.18	81.32
N°30	0.63	0.12	81.20
N°50	0.315	0.58	80.62
N°100	0.160	64.78	15.84
N°200	0.80	11.64	4.20
Fondo	-	4.20	0

Fuente: Autores.

**2.1.3. Cemento** Se dispuso de cemento ARI tipo III (altas resistencias iniciales), con  $GS=3.08$ , determinado mediante ensayo, según las especificaciones dadas en el ASTM C150 [15].

**2.1.4. Escoria de Alto Horno** Esta escoria presento un  $GS=2.85$ , para ello se empleó la normativa de la ASTM C150 [8], esto debido a que dicho material se comporta como reemplazo parcial del cemento, formando así el material cementante requerido para realizar CAC.

**2.1.5. Escoria Metálica** La escoria metálica utilizada contó con  $GS=5.21$  y un porcentaje de absorción de 1.13% [13] [14]. Debido a las condiciones iniciales de la escoria y con el fin de mejorar la trabajabilidad de la mezcla, se realizó un tratamiento que consistió en tratar la EM por la máquina de los ángeles durante 12 minutos, para reducir el tamaño de sus partículas, obteniendo de esta manera una granulometría más adecuada como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Granulometría Escoria Metálica.

Tamaño Tamiz (in)	Tamaño Tamiz (mm)	(% Retenido Sin Tratamiento)	(% Retenido Con Tratamiento)
N°4	4.76	3.20	0.00
N°8	2.36	4.98	0.00
N°16	1.25	59.42	34.75
N°30	0.63	25.63	46.74
N°50	0.32	1.26	10.29
N°100	0.16	3.11	2.82
N°200	0.80	1.54	2.93
Fondo	-	0.75	2.26

Fuente: Autores.

**2.1.6. Super-plastificante** El super-plastificante (SP) utilizado fue Sika Viscocrete M5, cuenta con un contenido de sólidos del 43%.

**2.1.7. Nano-Sílice** Se trabajó con una dispersión acuosa de Nano-Sílice que contaba con GS=1.70 y un contenido de sólidos de 31.54%, con un tamaño de partículas presente de hasta 30 [nm].

## 2.2. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

Se realizó un diseño estadístico experimental multi-variable del tipo central compuesto, junto con la metodología de superficie de respuesta y análisis de varianza ANOVA, con el fin de determinar la incidencia de los factores de análisis sobre los parámetros analizados en estado fresco, el modelo lineal de Bingham y la resistencia a la compresión uniaxial a 7, 14 y 28 días, mediante el software Minitab V.17®. Las variables consideradas para el diseño fueron la relación agua/Material cementante y escoria metálica, dichas relaciones varían entre 0.30-0.50 y 0.00-0.50 respectivamente (Figura 1), en donde se efectuaron reemplazos parciales, en peso de agregado fino por escoria metálica, esta información se introdujo en el software, para obtener como resultado la distribución de tratamientos (puntos) por realizar,

así como el orden de ejecución de estos (el cual el software realiza de forma aleatoria), denominados 'batches'. El diseño presenta 9 puntos, ver Figura 1, de los cuales 8 de estos presentan réplica doble, mientras que el punto central se replicó 10 veces para un total de 26 batches. En la Tabla 4, se presenta la información mencionada.

Tabla 4. Orden de Ejecución de los Batches.

<b>Bache N°</b>	<b>A/C</b>	<b>EM</b>
1	0,3293	0,4268
2	0,4707	0,0732
3	0,4000	0,2500
4	0,4000	0,2500
5	0,4000	0,0000
6	0,4000	0,0000
7	0,4000	0,2500
8	0,4000	0,2500
9	0,4000	0,5000
10	0,5000	0,2500
11	0,3293	0,0732
12	0,3000	0,2500
13	0,3000	0,2500
14	0,3293	0,4268
15	0,5000	0,2500
16	0,4707	0,0732
17	0,4707	0,4268
18	0,3293	0,0732
19	0,4000	0,5000
20	0,4000	0,2500
21	0,4000	0,2500
22	0,4000	0,2500
23	0,4000	0,2500
24	0,4000	0,2500
25	0,4707	0,4268
26	0,4000	0,2500

Fuente: Autores.

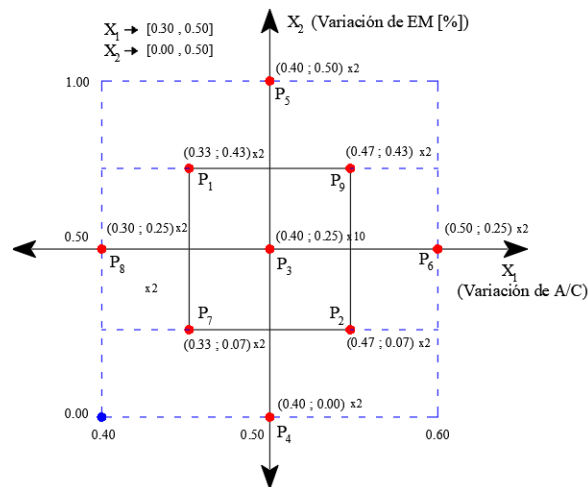


Figura 1. Esquema de Diseño Estadístico.  
Fuente: Autores.

Durante el diseño estadístico se garantizó el cumplimiento de los supuestos o hipótesis de los datos en los que se basa el análisis con el respectivo test estadístico ANOVA [10] que permite validar la información. Estos supuestos son:

- Los datos siguen una distribución normal (Test Kolmogorov- Smirnov) [16].
- Las varianzas de los diferentes tratamientos son iguales (Test de Barlett) [17].
- Existe independencia entre los datos (Test de Durbin – Watson) [18].

La revisión se llevó a cabo sobre los residuales del modelo, los cuales se calculan como la diferencia entre el dato obtenido experimentalmente y el dato calculado con la superficie de respuesta [19].

### 2.3. DISEÑO DE MEZCLA

Ya con los tratamientos planteados para realizar el proyecto se procedió a hacer los diseños de mezcla correspondientes para cada punto, partiendo de un diseño de concreto convencional según las recomendaciones propuestas por la American Concrete Institute (ACI) en el ACI 211.1-80 [20]. Para lograr un concreto auto-

compactante, se hicieron algunas modificaciones al diseño de mezcla original, en primer lugar, se realizó un reemplazo constante en la cantidad de material cementante por un 20% de filler (escoria de alto horno) según lo recomienda P. S. Ambily [7]. Posteriormente, se agregó superplastificante como aditivo, con base a la cantidad de material cementante presente en la mezcla, para ello se realizaron ensayos de Vicat (I.N.V. E-305) [21] con el fin de conocer la cantidad máxima de aditivo que podía emplearse, como resultado se obtuvo un rango de 0.25%-0.50%, según el comportamiento de cada mezcla realizada. Por último, se garantizó que el agregado fino fuera superior en un 30%, en peso, al agregado grueso en todas las mezclas, esto como resultado de las granulometrías combinadas realizadas que permitieron mejorar el comportamiento de los agregados en la mezcla CACEM ver Tabla 5. Las granulometrías combinadas estuvieron sometidas a pruebas de gradación optimizada: metodología de Fuller 0.45 [22], metodología 8-18 AASHTO y cuadro de porcentaje retenido (AASHTO) [23]. Estas dos últimas, propuestas en el American Association of State Highway And Transportation Officials (AASHTO) [24]. La relación escogida demostró un mejor comportamiento experimental a pesar de indicar un desempeño similar a las demás relaciones en las pruebas de gradación aplicadas. Las pruebas de gradación se presentan en las Figuras 2-4.

Tabla 5. Granulometrías Combinadas.

Tamaño Tamiz (in)	% Material pasado			
	AF 55 -AG 45	AF 45 - AG 55	AF 50 - AG 50	AF 70 - AG 30
3/4"	100	100	100	100
1/2"	85.09	94.31	94.82	96.23
3/8"	72.01	70.89	75.34	85.30
N°4	44.92	46.58	51.72	69.27
N°8	40.49	42.96	47.69	66.12
N°16	36.58	39.02	43.31	60.63
N°30	18.67	20.19	22.39	60.58
N°50	18.13	19.74	21.89	60.24
N°100	4.43	4.25	4.69	7.83
N°200	1.32	1.72	0.99	2.80
Fondo	0	0	0	0

Fuente: Autores.

El cuadro de potencia mostrado en la Figura 2 compara la gradación del agregado combinado con los límites de tamaño nominal, que en este caso es 1/2". Mientras más cercana sea el resultado de gradación a las líneas punteadas de la Figura 2, esta tendrá una densidad máxima. Cuando la granulometría se encuentra por encima del límite superior, el concreto se comporta de manera más rígida, lo que implica un mayor uso de SP, en el caso contrario el concreto presentará segregación [24].

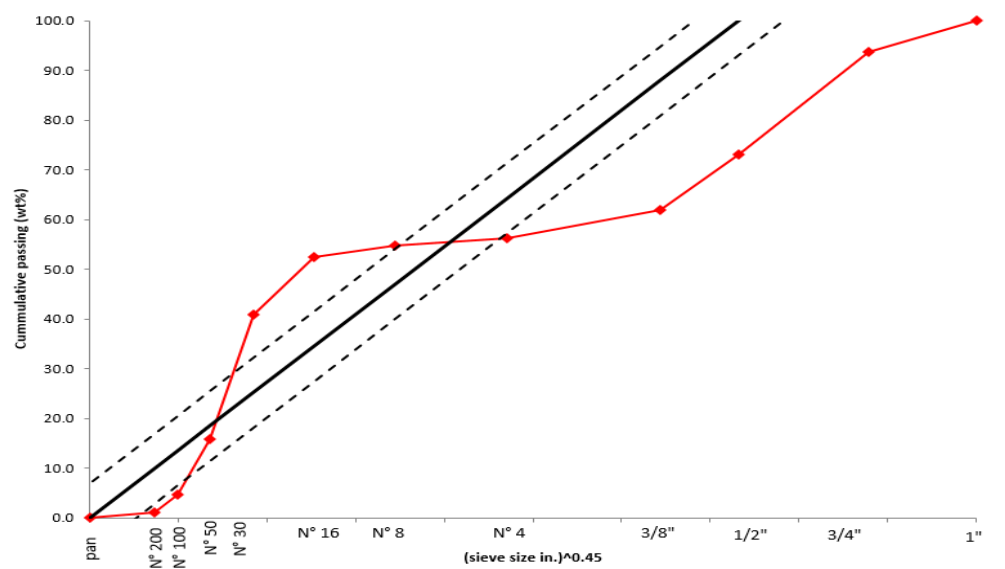


Figura 2. Metodología de Fuller 0.45.  
Fuente: Autores.

En la Figura 3 metodología 8-18 AASHTO se usa para denotar cuando una gradación presenta buena trabajabilidad y baja demanda de agua. Gradulometrías por fuera de estos límites, tienden a ser mezclas con segregación [24].

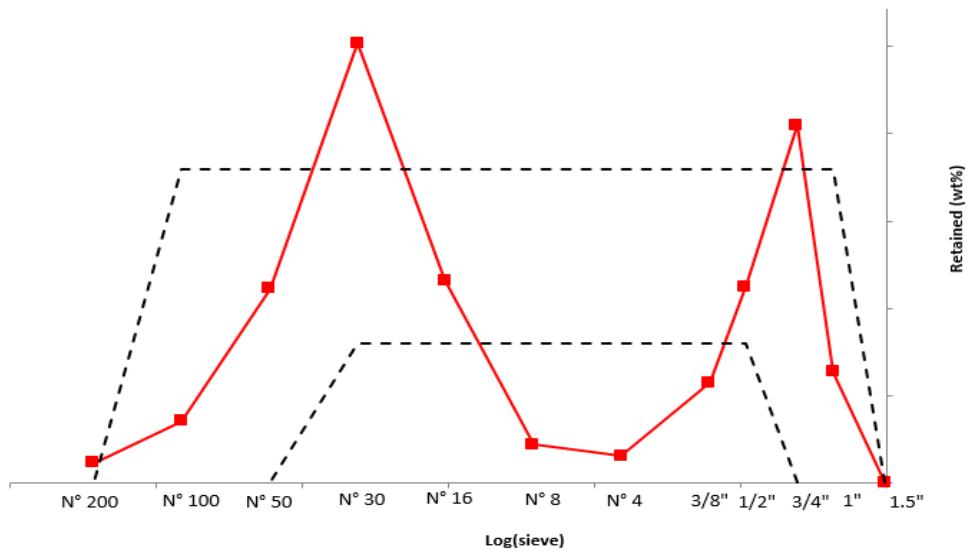


Figura 3. Metodología 8-18 AASHTO.  
Fuente: Autores.

En el cuadro de factor de grosor, Figura 4, este posiciona las granulometrías según su factor de trabajabilidad y su factor de grosor [24]. Entre más cerca se encuentre de los límites, tendrá una mejor trabajabilidad.

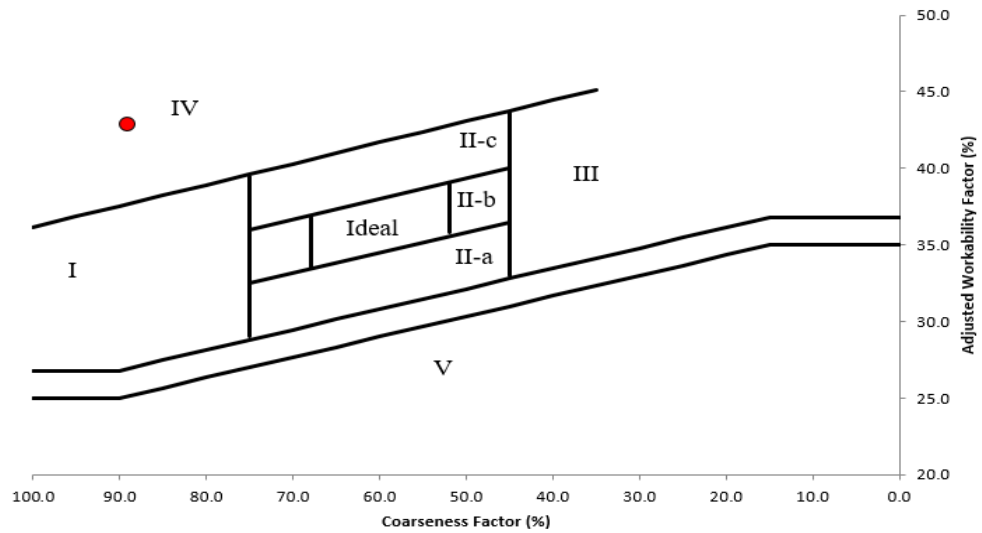


Figura 4. Factor de Grosor.  
Fuente: Autores.

En este caso se presentan los resultados de la granulometría AF55%-AG45%, la cual presentó unos mejores resultados, y junto con el proceso de experimentación se demostró que la gradación cumplió con lo solicitado.

A continuación, se muestra las cantidades por m<sup>3</sup> usadas por cada bache experimental obtenido en el diseño estadístico, ver Tabla 6.

Tabla 6. Cantidades de Diseño de Mezcla.

<b>Puntos A/C - %EM</b>	<b>Cemento [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>AG [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>AF [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Filler [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>EM [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Agua [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>SP [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>P1 (0.32-0.42)</b>	437.29	721.71	537.92	109.33	400.50	190.25	3.82
<b>P2 (0.47-0.07)</b>	305.92	791.25	953.75	76.50	75.00	194.17	2.67
<b>P3 (0.40-0.25)</b>	360.00	762.92	742.92	90.00	247.50	191.67	3.14
<b>P4 (0.40-0.00)</b>	360.00	765.37	995.33	90.00	0.00	194.00	3.14
<b>P5 (0.40-0.50)</b>	360.00	761.25	482.54	92.33	493.79	190.87	3.14
<b>P6 (0.50-0.25)</b>	288.00	798.58	779.17	72.00	258.33	191.67	1.67
<b>P7 (0.32-0.07)</b>	437.25	725.92	874.79	109.33	69.08	192.38	3.81
<b>P8 (0.30-0.25)</b>	480.00	702.62	684.92	120.00	228.29	190.71	4.18
<b>P9 (0.47-0.42)</b>	305.83	787.75	587.08	76.25	437.08	192.29	2.22

Fuente: Autores.

## 2.4. PROCESO DE MEZCLADO

Empleando una mezcladora con capacidad superior a 300 L, y con condiciones de humedad superficial constante de esta antes de cada mezcla, se procedió a hacer las debidas mezclas partiendo de un proceso, el cual inicia con un tiempo de mezclado de 2 minutos, en donde se ligan agregado grueso, agregado fino y escoria metálica (según requerimiento del bache), posteriormente se agregó el material cementante (cemento y escoria de alto horno) durante 2 minutos, a continuación, se incorporaron los elementos líquidos en 3 ciclos, dos terceras partes del agua, en 2 tiempos cada uno de 1.5 minutos. Por último, se adicionó el tercio restante de agua, diluido con el SP durante 3 minutos. El tiempo total de mezclado fue de 10 minutos para todos los baches.

## 2.5. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Al finalizar el proceso de mezclado, se procedió a evaluar la capacidad de llenado del concreto según las recomendaciones dadas por la European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, EFNARC, por sus siglas en inglés, realizando los ensayos de Slump-Flow, T500 (EFNARC-05 [14]) empleando para ello el cono de Abrams, posteriormente se ejecutaron los ensayos de J-Ring (ASTMC1621 [15]/EFNARC-05 [14]) y L-Box (EFNARC-05 [14]) con, en la Figura 5 se presentan los ensayos realizados de Slump-Flow y T500. La Figura 6 muestra el ensayo de J-Ring, por último, se evidencia el ensayo de L-Box en la Figura 7. En el Anexo A, se encuentra la información acerca de la utilización y utilidad de cada uno de los ensayos presentes.



Figura 5. Slump-Flow & T500.  
Fuente: Autores.



Figura 6. J-Ring.  
Fuente: Autores.



Figura 7. L-Box.  
Fuente: Autores.

## **2.6. ENSAYO DE REOLOGÍA**

Para el ensayo de reología, se hizo uso del reómetro ICAR RHM-3000 del Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR, por sus siglas en inglés). Este instrumento permite determinar el esfuerzo de fluencia estático y la viscosidad plástica del concreto, empleando el modelo lineal de Bingham.

La prueba de reómetro se llevó a cabo en cada una de las 26 mezclas resultantes del diseño de experimentos. La secuencia de realización de los ensayos seguida fue la determinada de forma aleatoria por el software estadístico. A partir del ensayo de reómetro se obtuvieron los parámetros del modelo lineal de Bingham que caracterizan las propiedades fundamentales del flujo para las mezclas de CACRFA estudiadas.

## **2.7. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO**

Se utilizaron 9 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, empleando 3 de ellas para fallar en cada una de las edades de curado (7, 14 y 28). Los cilindros fueron extraídos de sus moldes 24 horas después de fundidos y posteriormente depositados en una pila de agua a temperatura de  $21 \pm 2^\circ \text{C}$  [25], para realizar el respectivo proceso de curado. Al cumplir las edades de curado determinadas, se extrajo los cilindros del agua, se permitió que estos estuviesen superficialmente húmedos y finalmente se ejecutó la prueba a compresión simple, tal como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Compresión Uniaxial.  
Fuente: Autores.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de determinar el nivel de incidencia que tiene la relación agua/material cementante y el porcentaje de escoria metálica sobre cada uno de los parámetros estudiados, se analizaron los modelos generados a través de la metodología ANOVA.

El nivel de significancia  $\alpha$  establecido es de 0.10, la Tabla 7 evidencia las variables significantes para cada uno de los ensayos realizados, estas se representan de forma lineal, cuadrática y bilineal, así como el factor predictivo obtenido del modelo. Debido a que algunos términos del modelo general de superficie de respuesta no son estadísticamente significativos, se genera un modelo depurado, cuyos resultados se muestran en los Anexos B-J. Mediante un proceso iterativo se determinó que los datos cumplen los supuestos de ANOVA empleando el Test de

Kolmogorov-Smirnov, el Test de Barlett y el Test de Durbin-Watson. Aplicando para ello diferentes funciones, según requiriera la normalización.

Tabla 7. Análisis ANOVA Minitab V17 Variables significantes y factor predictivo sobre parámetros de interés.

Parámetro	Variabes significantes	Factor predictivo
Slump-Flow	A/C, %EM, A/C- A/C	51.10%
T500	A/C	0.00%
J-Ring	%EM-%EM	2.0%
L-Box	A/C, %EM	33.5%
Esf. Fluencia estático	A/C, %EM	2.7%
Viscosidad plástica	A/C, %EM-%EM	24.3%
Resistencia a 7 días	A/C, %EM, A/C- %EM	69.8%
Resistencia a 14 días	A/C, %EM	69.5%
Resistencia a 28 días	A/C, %EM	71.0%

Fuente: Autores.

### 3.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Los promedios de los resultados obtenidos en estado fresco se presentan en la Tabla 8, así como los rangos de aceptación sugeridos por el EFNARC para el comportamiento auto-compactante del concreto.

Tabla 8. Resultados Promedio Ensayos en Estado Fresco.

Puntos A/C - %EM	Slump-flow [mm]	T500 [seg]	J-Ring [mm]	L-Box [h2/h1]
<b>EFNARC</b>	650-800	2-5	0-1	0.8-1
P1 (0.32-0.43]	728.33	3.05	0.80	0.56
<b>P2 (0.47-0.07)</b>	<b>665.00</b>	<b>2.97</b>	<b>0.85</b>	<b>0.88</b>
P3 (0.40-0.25)	669.66	2.69	0.38	0.63
P4 (0.40-0.00)	661.66	3.66	1.24	0.78
P5 (0.40-0.50)	713.33	3.43	0.55	0.50
P6 (0.50-0.25)	660.00	4.02	0.34	0.39
P7 (0.33-0.07)	713.33	2.20	0.16	0.64
P8 (0.30-0.25)	748.33	2.96	0.14	1.23
P9 (0.47-0.43)	663.33	2.90	0.71	0.33

Fuente: Autores.

Se evidencia, según los resultados obtenidos en estado fresco, que el punto 2 con proporciones de 0.47 y 0.07 de relación agua/material cementante y reemplazo de escoria metálica, respectivamente, es el único punto que satisface todas las sugerencias dadas por el EFNARC.

**3.1.1. Slump-Flow** En la Figura 9, se observa que el valor obtenido de Slump-flow cumple con los límites establecidos por el EFNARC para todos los puntos analizados. A su vez, el diámetro de CACEM generado aumenta conforme disminuye la relación A/C, por último, en las mezclas con relación A/C de 0.33, 0.40 y 0.47 el flujo de asentamiento aumenta con respecto al porcentaje de escoria presente, esto evidencia que al adicionar escoria metálica a la mezcla se requiere más SP y como consecuencia su fluidez mejora.

En los resultados consignados en la Tabla 7, se encuentra que las variables significativas que afectan el modelo concuerdan con lo plasmado en la Figura 9.

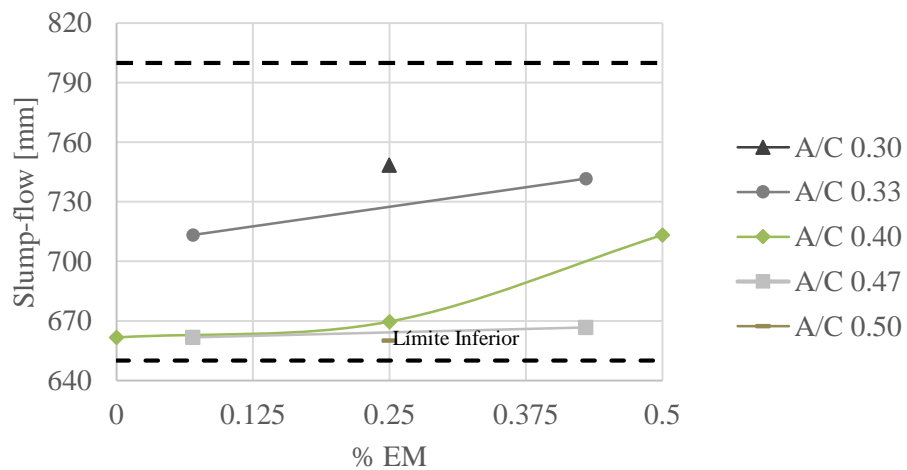


Figura 9. Resultados Ensayo Slump-Flow.  
Fuente: Autores.

**3.1.2. T500** Se garantizó que las mezclas realizadas estuviesen dentro de los límites propuestos por el EFNARC, demostrando así que las mezclas se comportan como un concreto auto-compactante. Sin embargo, los resultados no son concluyentes, esto se ve reflejado en el análisis de ANOVA al obtener un factor predictivo de 0.00%. Figura 10 refleja el comportamiento del ensayo para cada punto.

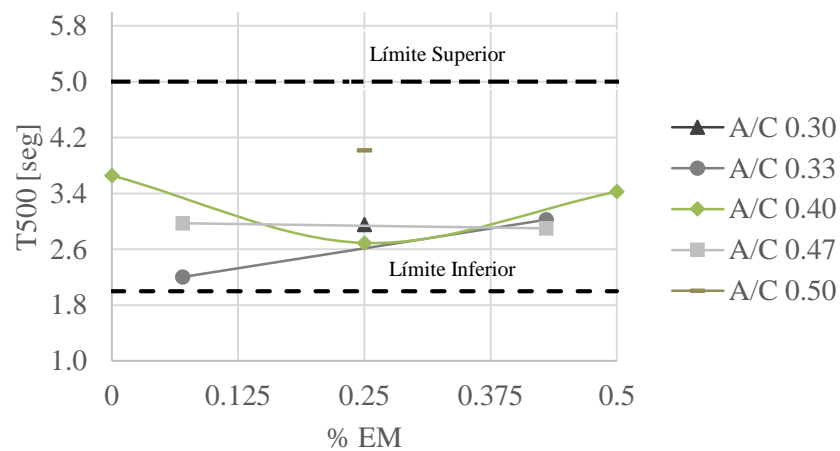


Figura 10. Resultados Ensayo T500.  
Fuente: Autores.

**3.1.3. J-Ring** A partir de los resultados presentados en Figura 11, se refleja que la capacidad de paso aumenta ante la presencia de escoria metálica. Además, solo un punto no satisface los criterios propuestos por el EFNARC. Según los resultados obtenidos en el análisis estadístico según la Tabla 7, esta se ve afectada únicamente por la cantidad de escoria metálica de forma cuadrática.

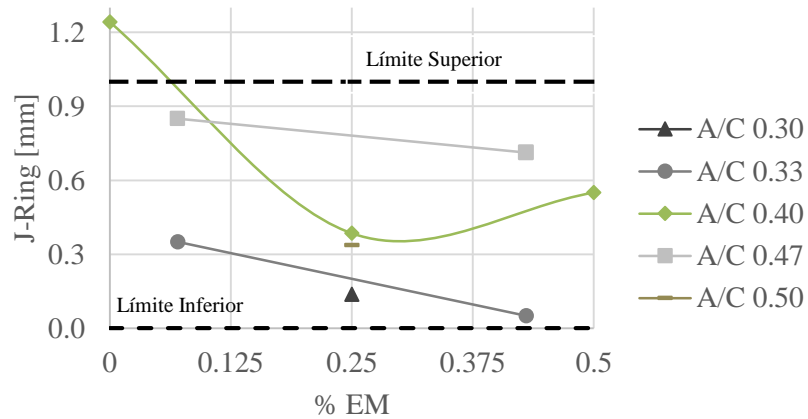


Figura 11. Resultados Ensayo J-Ring.  
Fuente: Autores.

**3.1.4. L-Box** Los resultados de la prueba de L-Box evidencian que, se considera que la mezcla posee resistencia a la segregación [26] puesto que en cada uno de los ensayos se evidenció una distribución uniforme del CACEM a lo largo de la superficie horizontal del instrumento (ver Anexo A, Figura 3). A pesar de ello, solo uno de los puntos evaluados se encuentra entre los límites sugeridos por el EFNARC. Las variables estadísticamente significativas para L-Box fueron la relación agua/material cementante y escoria metálica de manera lineal, según se presenta en la Figura 12, con un aumento en ambos casos.

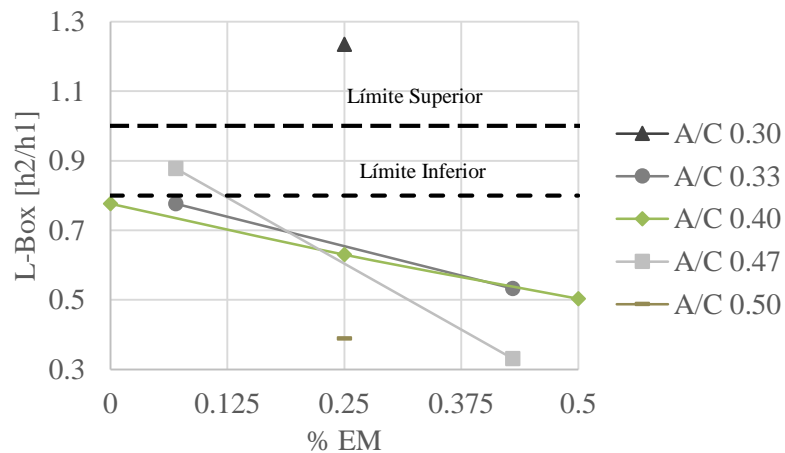


Figura 12. Resultados Ensayo L-Box.  
Fuente: Autores.

### 3.2. REOLOGÍA

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de reología, en estos se relacionan los valores de esfuerzo de fluencia estático, viscosidad plástica y el factor de correlación ajustado al modelo visco-plástico lineal de Bingham.

Tabla 9. Resultados Promedio Reología.

<b>Punto w/b - %EM</b>	<b>Esfuerzo de Fluencia Estático [Pa]</b>	<b>Viscosidad Plástica [Pa-s]</b>	<b>Factor de correlación [R<sup>2</sup>]</b>
<b>P1 (0.32-0.43)</b>	325.4	88.2	0.99
<b>P2 (0.47-0.07)</b>	305.5	30.6	0.99
<b>P3 (0.40-0.25)</b>	298.0	41.3	1.00
<b>P4 (0.40-0.00)</b>	328.4	65.7	1.00
<b>P5 (0.40-0.50)</b>	519.6	62.7	1.00
<b>P6 (0.50-0.25)</b>	420.0	30.5	0.97
<b>P7 (0.33-0.07)</b>	197.3	58.5	1.00
<b>P8 (0.30-0.25)</b>	152.0	64.4	0.99
<b>P9 (0.47-0.43)</b>	483.9	26.2	0.99

Fuente: Autores.

**3.2.1. Esfuerzo de fluencia estático** Según los resultados presentados en la Tabla 10, el modelo estadístico para el esfuerzo de fluencia estático presenta un factor predictivo de 2.7%. Sin embargo, las variables significativas que afectan el modelo son la relación agua/material cementante y escoria metálica de forma no lineal. Ver resultados ANOVA Anexo F Según evidencia la Figura 13, el esfuerzo de fluencia estático aumenta con respecto a la presencia de escoria metálica en las mezclas, este fenómeno es favorable, pues este es un indicio de que se puede disminuir la presión lateral en el encofrado y aumentar la resistencia a la segregación [27].

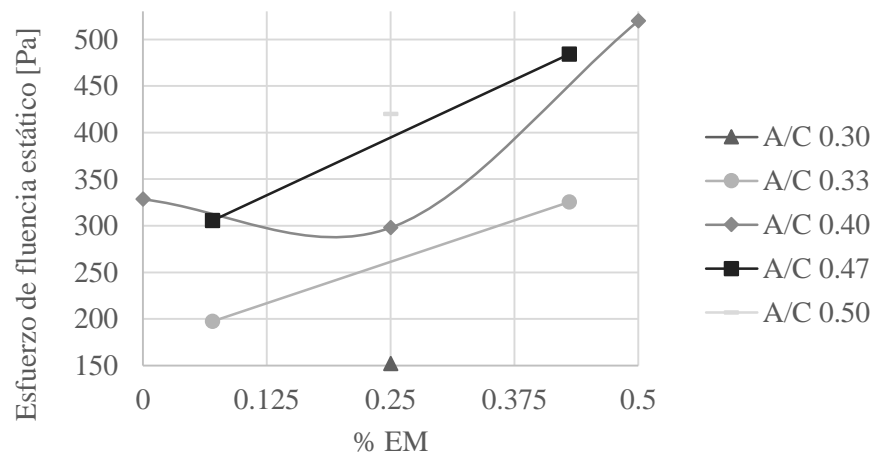


Figura 13. Resultados Ensayo de fluencia estático.  
Fuente: Autores.

**3.2.2. Viscosidad plástica** La Figura 14 muestra que a menor A/C, la viscosidad plástica aumenta, y para relaciones de A/C bajas, el aumento de %EM aumenta la viscosidad plástica. Las variables significantes para este ensayo fueron la relación agua/material cementante linealmente y porcentaje de escoria metálica de forma cuadrática (ver Anexo G).

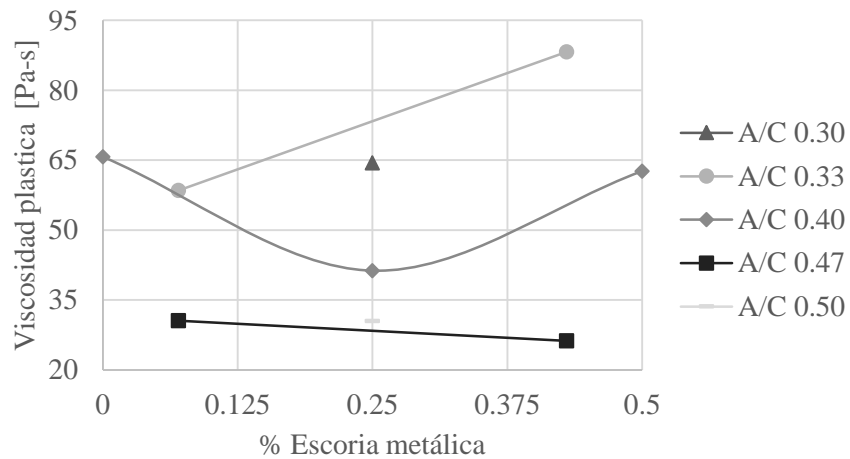


Figura 14. Resultados Viscosidad Plástica.  
Fuente: Autores.

### 3.3. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL

En la Tabla 10 se presentan los resultados promedio obtenidos de resistencia a compresión a 7, 14, 28 días. La desviación estándar de cada uno de los promedios de la resistencia, se encuentran en el Anexo K.

Tabla 10. Resultados Promedio Compresión Uniaxial.

Punto w/b - %EM	Resistencia a 7 días [MPa]	Resistencia a 14 días [MPa]	Resistencia a 28 días [MPa]
<b>P1 (0.32-0.43)</b>	55.7	64.5	76.1
<b>P2 (0.47-0.07)</b>	26.7	33.8	38.8
<b>P3 (0.40-0.25)</b>	36.8	47.6	53.9
<b>P4 (0.40-0.00)</b>	29.2	39.0	45.9
<b>P5 (0.40-0.50)</b>	39.6	52.8	61.3
<b>P6 (0.50-0.25)</b>	22.6	33.4	40.1
<b>P7 (0.33-0.07)</b>	36.8	57.7	65.8
<b>P8 (0.30-0.25)</b>	54.8	67.3	77.4
<b>P9 (0.47-0.43)</b>	27.1	35.1	42.2

Fuente: Autores.

Mediante un análisis estadístico ANOVA y la metodología de superficie de respuesta, se obtuvieron los valores que cumplían a satisfacción los supuestos de ANOVA, para ello fue necesario realizar un proceso iterativo que determinó que los datos se estabilizaban con una función cúbica para cada uno de los puntos estudiados. La Tablas 11 y 12 muestran los resultados del análisis ejecutado mediante el software Minitab V17®.

Tabla 11. Análisis ANOVA modelo original, sin depurar.

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Resistencia a 7 días</b>	Lineal	A/C	0.000	SI
		%EM	0.002	SI
	cuadrado	A/C-A/C	0.573	NO
		%EM-%EM	0.521	NO
	bilineal	A/C-%EM	0.022	SI
	factor predictivo			64.17%

Fuente: Autores.

Tabla 12. Análisis ANOVA modelo normalizado, sin depurar.

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Cúbico para resistencia a 7 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.001	SI
	cuadrado	A/C-A/C	0.275	NO
		%EM-%EM	0.95	NO
	bilineal	A/C-%EM	0.001	SI
	factor predictivo			63.36%

Fuente: Autores.

Debido a que se presentan variables estadísticamente no significativas, se realizó un modelo depurado de los factores que tuvieron significancia, los resultados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Análisis ANOVA modelo normalizado, depurado.

<b>MODELO DEPURADO</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>	<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Cúbico para resistencia a 7 días</b>		A/C	0
	Lineal	%EM	0.001
	bilineal	A/C-%EM	0
		factor predictivo	

Fuente: Autores.

Los términos estadísticamente significativos corresponden a la relación agua/material cementante, porcentaje de escoria metálica de forma lineal y de manera bilineal la combinación de estos.

Se requiere garantizar la autenticidad del modelo analizado, para ello se verificaron los supuestos de ANOVA para el modelo depurado de la resistencia a 7 días. El Anexo H presenta el análisis.

La gráfica de superficie de respuesta del modelo depurado de la resistencia a compresión uniaxial a 7 días se presenta en la Figura 15. En esta se presenta un pico de resistencia cuando la relación A/C=0.30 y %EM=0.50, lo cual concuerda con otros investigadores, quienes reportaron que los resultados presentan su resistencia máxima cuando la relación agua/material cementante disminuye y simultáneamente aumenta la cantidad de escoria metálica presente en la mezcla [28]. La Ecuación 1 presenta la función que lo define.

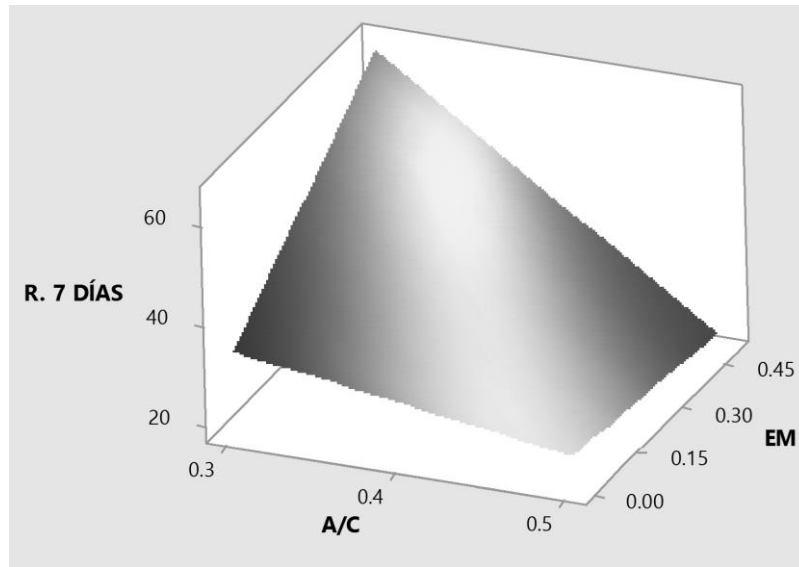


Figura 15. Superficie de respuesta Resistencia a 7 días de curado.  
Fuente: Autores.

$$f'_{cr 7} = 48.9 - 49.1 A/C + 168.3\%EM - 355 * A/C * \%EM \quad (1)$$

La Figura 16 muestra que el reemplazo de escoria metálica conduce a un aumento de la resistencia a la compresión en cualquier edad de curado.

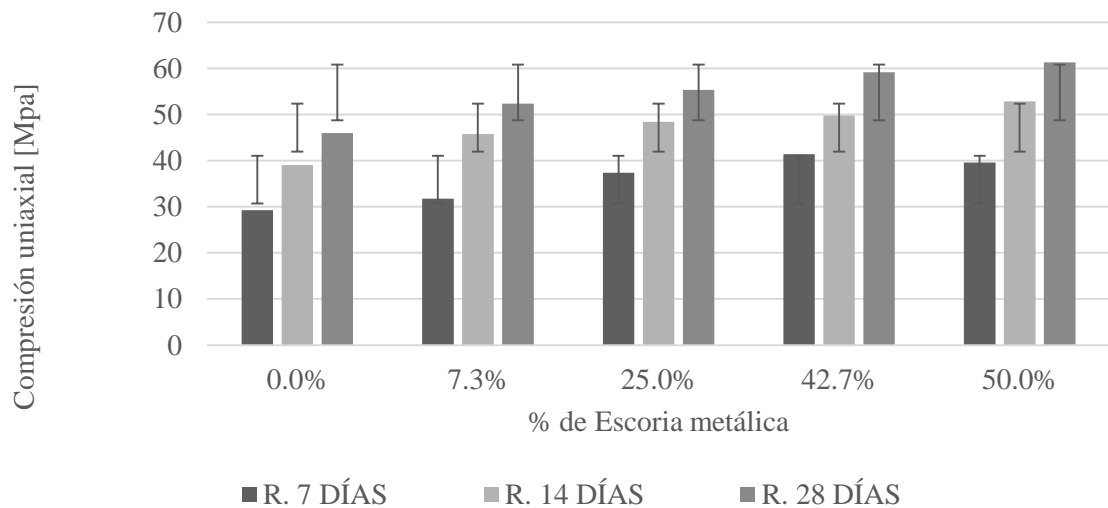


Figura 16. Efecto de la escoria metálica en la compresión uniaxial.  
Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión presentados en la Figura 17 concuerdan con los datos obtenidos según literatura [26], estos muestran que el patrón de desarrollo de la resistencia a la compresión uniaxial aumenta cuando la relación de A/C y aumenta la cantidad de EM. Se observó que la mezcla de CACEM con A/C=0.30 y %EM=0.25 se obtuvo la mayor resistencia a compresión a 14 y 28 días de curado. A 14 días la resistencia fue de 67.3 [MPa] esta mejoró un 57.9% en relación a la mezcla sin EM. A 28 días, se obtuvo una resistencia de 77.4 [MPa] la cual mejoró un 59.4% con respecto a la mezcla sin presencia de EM. A su vez, a 7 días, la mezcla que presentó mayor resistencia fue el punto con A/C=0.33 y %EM=0.43 con una resistencia de 55.68 [MPa], con una mejoría de 52.5% en comparación con la mezcla sin EM. La mezcla con A/C=0.50 y %EM=0.25 obtuvo los menores valores de resistencia para 7 y 14 días de curado siendo estos 22.66 y 33.36 [MPa] para cada caso, sin embargo, a 28 días, la resistencia mínima se encontró en la mezcla con relación A/C=0.47 y %EM=0.07 con 38.83 [MPa] de resistencia a compresión simple. La Figura 17 muestra que los resultados de resistencia a la compresión de esta investigación están de acuerdo a los reportados en estudios previos de concreto auto-compactante por Sideris et Al. y Rafat Siddique [29] [30], respectivamente.

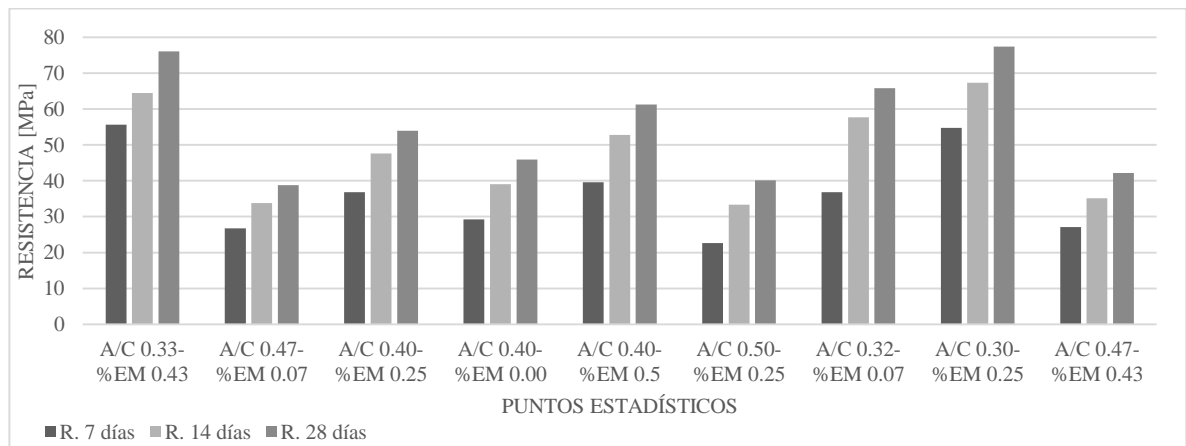


Figura 17. Resultados Resistencia a compresión uniaxial.  
Fuente: Autores.

### 3.4. PUNTO ÓPTIMO

Con el fin de establecer la incidencia de los factores analizados, relación agua/Material cementante y escoria metálica, así como determinar el punto óptimo generado, se realizó un análisis de superficie de respuesta a compresión uniaxial a 7 días de curado. Se decidió evaluar la combinación teórica óptima encontrada por el modelo. Este inciso plantea analizar la efectividad del reemplazo parcial de nS en un rango de 0.0%-2.0% por material cementante, a la mezcla de relación  $A/C=0.3$  y  $\%EM=0.5$ . Se realizaron cada uno de los ensayos planteados, sus resultados se evidencian en la Tabla 14, se garantizó que los resultados de los ensayos de Slump-Flow y T500 que estuviesen dentro de los parámetros sugeridos por el EFNARC (Ver Tabla 8), las mezclas producidas en este estudio tuvieron un diámetro de flujo de asentamiento variable entre 683 [mm] y 780 [mm], los resultados indicaron que la incorporación de nS disminuyó el diámetro de flujo de asentamiento en un 8.1% y 14.1% para las mezclas con 1% y 2% de reemplazo de nS con respecto a la mezcla de control. Los datos obtenidos indican que el aumento del contenido de nS en las mezclas de CACEM genera un aumento sistemático del tiempo de flujo oscilando entre 2.91 y 4.33 segundos. De lo anterior se puede incidir que la presencia de nS en el concreto mejora la resistencia a la segregación cuando la interacción entre los tiempos de flujo se considera, esto concuerda con la investigación que desarrolló G. C. J. G. M. P. Drewniok [27]. Los resultados obtenidos en el ensayo de J-Ring tienen aceptación para todos los puntos, teniendo una mejor capacidad de paso a menor cantidad de nS presente en la mezcla. Por otra parte, los resultados obtenidos en el ensayo de L-Box solo satisfacen los requerimientos del EFNARC para un reemplazo del 2% de nS. Por último, los datos obtenidos del reómetro indicaron que la utilización de nS aumentó el esfuerzo de fluencia estático, lo que es favorable pues aumenta la resistencia a la segregación de la mezcla [27], la viscosidad plástica aumentó en presencia de nS, esto sugiere que en presencia de nS el concreto tendrá difícil manejo y textura poco fluida. De lo obtenido es posible observar que los valores con mayor resistencia a la compresión

a 7 días, se dieron sin presencia de nS, en los reemplazos de 1.0% y 2.0%, los resultados son esperados según sugiere literatura debido a que el nS con su alta área superficial y efecto puzolánico sobre el concreto [9] obtiene altas resistencias, según aumenta la edad de curado [31].

Tabla 14. Ensayos realizados bajo reemplazo de nS.

<b>Ensayo realizado</b>	<b>0% nS</b>	<b>1% nS</b>	<b>2% nS</b>
<b>Slump-Flow [mm]</b>	780.00	716.66	683.33
<b>T500 [seg]</b>	2.91	3.11	4.33
<b>J-Ring [mm]</b>	0.35	0.55	0.76
<b>L-Box [h2/h1]</b>	0.46	0.51	0.88
<b>Esf. Fluencia estático [Pa]</b>	144.80	762.40	830.70
<b>Viscosidad plástica [Pa.s]</b>	138.90	159.60	160.40
<b>Resistencia 7 días [MPa]</b>	79.23	68.99	69.56

Fuente: Autores.

#### 4. CONCLUSIONES

En este documento se consolidaron los resultados producto de la investigación de concreto auto-compactante con reemplazos de arena por escoria metálica de 0.00-0.50 y de variación en la relación agua/material cementante de 0.30-0.50, desde un diseño estadístico multivariable del tipo central compuesto desde puntos axiales basado en un factorial  $2^k$  con puntos centrales y un análisis de varianza ANOVA, utilizando un nivel de significancia de 0.10. Luego de realizados los ensayos y analizar los resultados, se puede concluir que:

Se encontró que, la relación agua/material cementante es una variable significativa en todos los ensayos realizados (Slump-Flow, T500, J-Ring, L-Box, Reología y

compresión uniaxial), y la escoria metálica en todos a excepción del ensayo de T500.

Con un aumento en la cantidad de escoria metálica presente en el CACEM, disminuye la capacidad de paso (según los ensayos de J-ring y L-Box) de la mezcla tomando como referencia los límites propuestos por la EFNARC, y llegando a no cumplirlos en algunas mezclas.

Se encontró que la resistencia a compresión del punto óptimo con proporciones ( $A/C=0.30$  y  $\%EM=0.50$ ) sin nS superó el punto de mayor resistencia a la compresión obtenido en el diseño estadístico experimental de proporciones ( $A/C=0.33$  y  $\%EM=0.43$ ) en un 28.6% para una edad de curado de 7 días (Ver Tabla 10).

La relación agua/material cementante afecta linealmente la resistencia a compresión obtenida para 7, 14 y 28 días de curado según se observó en el análisis ANOVA, con una significancia de 69.8%, 69.5% y 71% respectivamente.

La mezcla optimizada de CACEM en conjunto a la acción de nS presenta inconsistencias en la resistencia a la compresión a 7 días, esto se puede deber a que su reacción puzolánica no se ha completado y no resalta en su totalidad el potencial de la adición de nano-partículas.

Debido a que las proporciones que generan el punto óptimo ( $A/C=0.30$  y  $\%EM=0.50$ ), encontrado mediante la metodología de superficie de respuesta, se ubica en el borde de los intervalos planteados, no se puede afirmar que es el óptimo para un rango mayor de investigación (0-100% de reemplazo de arena por escoria metálica). Se recomiendan futuras investigaciones con un mayor rango de reemplazo para encontrar los límites adecuados de reemplazo.

## REFERENCIAS

- [1] A. S. y. T. D. Raharjo, «Mixed concrete optimization using fly ash, silica fume and iron Slag on the SCC's compressive strength,» Construction and Building Materials, vol. 54, pp. 827-839, 2013.
- [2] A. L. C. R. Selma Gonzalez, «Propuesta para el diseño de mezcla. Beneficios y consideraciones básicas para su implementación en el Salvador.,» Eniversidad de el Salvador, El Salvador, 2005.
- [3] «U.N.d Colombia,» 17 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://minas.medellin.unal.edu.co/noticias/facultad/396-reducir-el-impacto-ambiental-en-la-produccion-de-cemento>.
- [4] ANEFA, «Asogravas,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.asogravas.org/Portals/0/Archivos2014/BP%20Extractivas%20CHE%2009032011>. [Último acceso: 20 Abril 2017].
- [5] S. S. R. N. Anshuman Tiwari, «Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete,» ELSEVIER, Jaipur, 2016.
- [6] H. Qasrawi, «The use of steel slag aggregates to enhance the mechanical properties of recycled aggregate and retain the environment,» construction and building materials p.10, 2014.
- [7] R. S. Ph.D., «Effect of iron slag as partial replacement if fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete,» ELSEVIER, Punjab, India , 2016.

- [8] C. U. K. R. y. S. R. P. S. Ambily, «Studies on ultra high performance concrete incorporating sopper slag as fine aggregate, construction and Building materials,» vol. 77, pp. 233-240, 2015.
- [9] M. G. J. C. y. S. L. Md Safiuddin, «State of the art report on use of nano-materials in concrete.,» Centre for pavement and tansportation technology , Canada, 2014.
- [10] S. R. Ali Nazari, «The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles on physical and mechanical properties if high strength compacting concrete,» ELSEVIER, Saveh, Iran, 2010.
- [11] W. J. Wallevik, «Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes.,» Cement and Concrete Research, Vol 41 n 12, pp 1279-1288, 2011.
- [12] M. G. A. A.-G. S. I. Erhan Guneyisi, «Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete.,» ELSEVIER, Turkey, 2015.
- [13] A. International, «ASTM C128 Standard Test Method for Relative (Specific Gravity) and Absorption if fine Aggregate,» ASTM, 2015.
- [14] A. international, «ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates de Annual Book of ASTM Standards,» ASTM International , pp. 3-7, 2006.
- [15] A. C150, «Standard Specification for Portland Cement de Annual Book of ASTM Standards,» ASTM International, pp.1-8, 2007.
- [16] M. V.17, «Normality Test Kolmogorov-Smirnov,» 2017.
- [17] M. V.17, «Test of equal variances Barlett's Test,» 2017.

- [18] M. V.17, «Durbin-Watson statics,» 2017.
- [19] A. A. a. J. Anderson, «On the Existence of Maximum Likelihood Estimates in Logistic Regression Models,» de Biometrika, 1984, pp. 179-183.
- [20] A. 211.1, «Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass concrete,» ACI Manual of concrete Practice , 2007.
- [21] I.N.V., «Tiempo de fraguado del cemento hidráulico método del aparato de vicat,» 2012.
- [22] B. E. L. D. y. K. R. K. P, «Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction,» Vol. 59, Lanham, MD, 1996.
- [23] A. O. S. H. A. T. Officials, «Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing,» AASHTO Specifications. Twentieth Edition: Part II, Washington, DC, 2000.
- [24] A. o. S. H. a. T. Officials, «Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Twentieth Edition Part II,» AASHTO Specifications, Washington, DC, 2000.
- [25] A. B. o. A. Standards, «Standard Specification for Portland Cement,» ASTM, pp. 1-8, 2007.
- [26] S. D. a. N. S. Muhd Fadhil Nuruddin, «Effect of mix composition on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete,» Construction and Building Materials, pp. 163-172, 2015.

[27] G. C. J. G. M. P. Drewniok, «Influence of the rheological properties of SCC on the formwork pressure,» *Procedia Engineering* 192, pp. 124-129, 2017.

[28] G. Singh y R. Siddique, «Strength properties and micro-structural analysis of self-compacting concrete made with iron slag as partial replacement of fine aggregates,» *Construction and Building Materials* , pp. 144-152, 2016.

[29] R. S. P. Gurpreet Singh, «Strength properties and micro-structural analysis of self-compacting concrete made with iron slag as partial replacement of fine aggregates,» *Construction and Building Materials*, pp. 144-152, 2016.

[30] C. T. A. C. K.K. Sideris, «Production of durable self compacting concrete using ladle furnace slag (LFS) as filler material,» 7th Scientific technical conference material problem in civil engineering (MATBUD'2015), Vols. %1 de %2592-597, n° 108, 2015.

[31] L. E. Zapata, «Weibull statistical analysis of splitting tensile strength of concretes containing class F fly ash, micro/nano-SiO<sub>2</sub>,» ELSEVIER, Mayaguez, USA, 2013.

## BIBLIOGRAFÍA

ACI 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete., de *ACI Manual of Concrete Practice*, 2007.

Association of State Highway and Transportation Officials, Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, Twentieth Edition: Part II – Tests, de *AASHTO Specifications*, Washington, D.C., 2000.

European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, EFNARC-05, 2005.

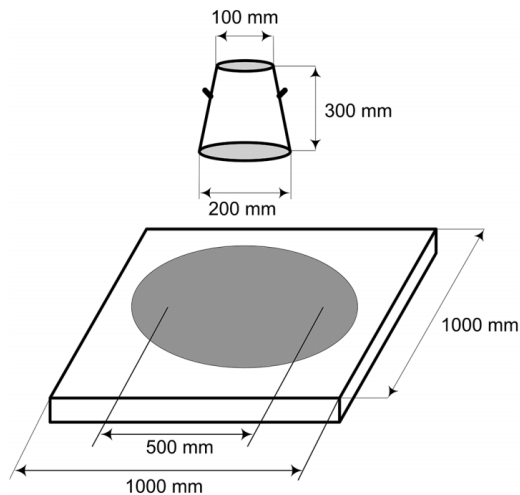
MONTGOMERY, Douglas, Diseño y análisis de experimentos, 2da Edición, Limusa Wiley, 1995.

## ANEXOS

### ANEXO A Ensayos en estado fresco, uso y aplicación

- **Slump-Flow y T500**

Estos ensayos se usaron para evaluar el flujo horizontal libre del CACEM en ausencia de obstrucciones dentro de una distancia de flujo de 500 [mm] de diámetro. Para realizar la prueba, fue necesario colocar un cono de asentamiento rígido en una placa plana no absorbente, cómo se muestra en la Figura 1 y posteriormente verter el concreto sin vibrar o apisonar. Después de que el cono de asentamiento se llenó con concreto, se levanta verticalmente y este fluye libremente. Simultáneamente, se tomó el tiempo necesario para que el concreto alcance el ciclo de dispersión de 500 [mm] empleando un cronómetro, este tiempo de flujo, se conoce cómo flujo de asentamiento de T50 cm, el cual proporciona una indicación de la viscosidad relativa y proporciona una evaluación relativa e la velocidad de flujo de la mezcla de CACEM [20]. Después de que el flujo del concreto se ha detenido, se mide el diámetro del concreto. Cuanto mayor es el valor de flujo de asentamiento, mayor es su capacidad de encofrado por su propio peso. el objetivo de medir la capacidad de paso del CAC [21].

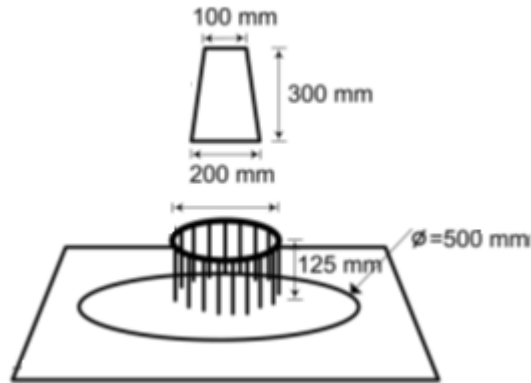


**Figura 1** Aparato ensayo Slump-Flow y T500.

**Fuente.** Muhd Fadhil Nuruddin, Samuel Demie, and Nasir Shafiq

- **J-Ring**

Este ensayo consiste en un cono de asentamiento convencional colocado dentro de un anillo de acero, conectado a barras verticales de refuerzo, como se muestra en la Figura 2. Para realizar esta prueba, el cono de asentamiento se colocó en el centro del anillo J y se llenó de concreto sin ningún tipo de compactación externa. Posteriormente, el cono de asentamiento se levantó, permitiendo que se extendiera horizontalmente a través de los espacios entre las barras verticales. Se registraron las alturas externas y la altura interna central de anillo de manera perpendicular, desde la circunferencia del anillo hasta la superficie del concreto. La diferencia de estas dos medidas se conoce como paso de bloqueo (BJ). Si el valor de paso de bloqueo está cercano a cero, indica una mejor capacidad de llenado, su rango aceptable es de 0-10 [mm] de acuerdo con los límites propuestos por el EFNARC [20] [21].

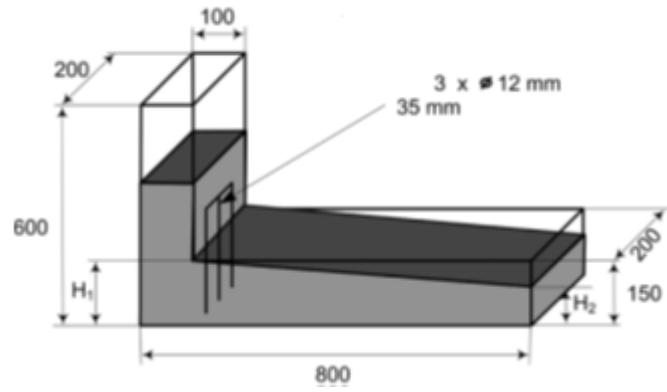


**Figura 2** Aparato ensayo J-Ring.

**Fuente.** Muhd Fadhil Nuruddin, Samuel Demie, and Nasir Shafiq

- **L-Box**

Esta prueba se usa para medir el llenado y la capacidad de paso además se puede verificar visualmente la falta de estabilidad (Segregación). Como el nombre lo indica, el aparato consiste en una caja de sección rectangular en forma de L que se muestra en la Figura 3, con una sección horizontal y vertical, separados por una puerta que se desliza verticalmente frente a la cual se instalan barras refuerzo. Para llevar a cabo esta prueba, se colocó el L-Box sobre una superficie plana, después se vertió el concreto sobre la porción vertical de la caja, se levantó la puerta, permitiendo así que el concreto fluyera libremente. Cuando el concreto se detiene, se miden las alturas del concreto en el extremo de la porción horizontal (H1) y en la porción vertical (H2), para calcular la relación  $H2/H1$  y determinar la relación de bloqueo. Cuanto más se acerque la relación de bloqueo a la unidad, mejor será la capacidad de llenado y el paso del hormigón. Los límites apropiados según el EFNARC, son una relación entre 0.8 y 1.0. Se puede considerar que la mezcla posee resistencia a la segregación, si se ve que el agregado de grueso se distribuye uniformemente en la superficie horizontal hasta el final de la sección [20] [21].



**Figura 3** Aparato ensayo L-Box.

**Fuente.** Muhd Fadhil Nuruddin, Samuel Demie, and Nasir Shafiq

## ANEXO B Análisis ANOVA Minitab V17® Slump-Flow

MODELO NO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
Slump-Flow	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.029	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.012	SI
		%EM-%EM	0.168	NO
	Bilineal	A/C-%EM	0.513	NO
	<b>Factor Predictivo</b>			42.40%

$$SlumpFlow = 135.3 - 308 a/c + 10.9em + 343 a/c * a/c + 28.2em * em - 43.4 a/c * em$$

MODELO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
Slump-Flow	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.03	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.017	SI
<b>Factor Predictivo</b>			51.10%	

$$SlumpFlow = 134.8 - 300.7 a/c + 7.64em + 320 a/c * a/c$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $X^9$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

MODELO NO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
$X^9$ Slump-Flow	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.041	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.009	SI
		%EM-%EM	0.156	NO
	Bilineal	A/C-%EM	0.488	NO
	<b>Factor Predictivo</b>			36.78%

$$X^9 SlumpFlow = 436173202498164800 - 18542853138476800 a/c + 64042342230465416em$$

MODELO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
$X^9$ Slump-Flow	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.043	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.014	SI

---

**Factor Predictivo**

47.27%

---

$X^9$  SlumpFlow

$$= 433953274621667970 - 1810615923616867800 a/c \\ + 4150228651142240em$$

---

**TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA**

---

<b>Parámetro</b>	<b>Kolmogorov-Smirnov</b>	<b>Barlett</b>	<b>Durbin-Watson</b>
	P 0.416	T 13.238	D 1.62
	No se rechaza Ho	X <sup>2</sup> 13.36	DL=1.22 DU=1.55
<b>X<sup>9</sup> Slump-Flow</b>	La distribución es normal	No se rechaza Ho Las varianzas son iguales	No se rechaza Ho Observaciones independientes

---

## ANEXO C Análisis ANOVA Minitab V17® T500

MODELO NO DEPURADO				
Parámetro	Término		Valor P	Significancia
T500	Lineal	A/C	0.055	SI
		%EM	0.772	NO
	Cuadrado	A/C-A/C	0.192	NO
		%EM-%EM	0.151	NO
	Bilineal	A/C-%EM	0.109	NO
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c = 6.28 - 28.7 A/M + 8.96em + 53.4 A/C * A/C + 9.46\%EM * \%EM - 35.0 a/c * \%EM$$

MODELO DEPURADO				
Parámetro	Término		Valor P	Significancia
T500	Lineal	A/C	0.065	SI
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c = 0.91 - 5.31 A/C$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $Cos(x)$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

MODELO NO DEPURADO				
Parámetro	Término		Valor P	Significancia
Cos(x) T500	Lineal	A/C	0.809	NO
		%EM	0.169	NO
	Cuadrado	A/C-A/C	0.683	NO
		%EM-%EM	0.036	SI
	Bilineal	A/C-%EM	0.116	NO
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c(Cos(x)) = -0.61 + 1.23 A/C - 1.92\%EM - 3.88 A/C * A/C - 3.36\%EM * \%EM + 8.12 A/C * \%EM$$

MODELO DEPURADO				
Parámetro	Término		Valor P	Significancia
Cos (x) T500	Lineal	%EM	0.166	NO
	Cuadrado	%EM-%EM	0.037	SI
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c(Cos(x)) = -0.7516 + 1.288\%EM - 3.28em * \%EM$$

### TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA

Parámetro	Kolmogorov-Smirnov		Barlett		Durbin-Watson	
<b>Cos(x) T500</b>	P	0.15	T	8.38	D	2.43
	No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55
	La distribución es normal		No se rechaza Ho Las varianzas son iguales		No se rechaza Ho Observaciones independientes	

## ANEXO D Análisis ANOVA Minitab V17® J-Ring

MODELO NO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
J-Ring	Lineal	A/C	0.398	NO
		%EM	0.418	NO
	Cuadrado	A/C-A/C	0.408	NO
		%EM-%EM	0.039	SI
	Bilineal	A/C-%EM	0.812	NO
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c = -2.16 + 15.1 A/C - 5.38\%EM - 18.3 A/C * A/C + 7.62\%EM * \%EM + 2.8 A/C * \%EM$$

MODELO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
J-Ring	Lineal	%EM	0.401	NO
		Cuadrado	0.024	SI
		%EM-%EM		
<b>Factor Predictivo</b>			2.01%	

$$F'c = 0.939 - 4.47\%EM + 8.00\%EM * \%EM$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $X^2$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

MODELO NO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
X <sup>2</sup> J-Ring	Lineal	A/C	0.367	NO
		%EM	0.172	NO
	Cuadrado	A/C-A/C	0.775	NO
		%EM-%EM	0.028	SI
	Bilineal	A/C-%EM	0.778	NO
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c(X^2) = -0.31 + 6.2 A/C - 7.04\%EM - 7.1 A/C * A/C + 9.30\%EM * \%EM + 3.7 A/C * \%EM$$

MODELO DEPURADO				
Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
X <sup>2</sup> J-Ring	Lineal	%EM	0.152	NO
		Cuadrado	0.018	SI
		%EM-%EM		
<b>Factor Predictivo</b>			1.31%	

$$F'c(X^2) = 1.036 - 5.64\%EM + 9.45\%EM * \%EM$$

TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA						
Parámetro	Kolmogorov-Smirnov		Barlett		Durbin-Watson	
	X <sup>2</sup> J-Ring	P	0.15	T	4.99	D
No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55	
La distribución es normal		No se rechaza Ho Las varianzas son iguales		No se rechaza Ho Observaciones independientes		

**ANEXO E** Análisis ANOVA Minitab V17® L-Box

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Termino</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>L-Box</b>	Lineal	A/C	0.001	SI
		%EM	0.003	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.170	NO
		%EM-%EM	0.679	NO
	Bilineal	A/C-%EM	0.243	NO
	<b>Factor Predictivo</b>			20.31%

$$F'c = 3.25 - 11.45 A/C + 1.85\%EM + 13.27 A/C * A/C - 0.63\%EM * \%EM - 5.91 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Termino</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>L-Box</b>	Lineal	A/C	0.001	SI
		%EM	0.003	SI
<b>Factor Predictivo</b>			33.48%	

$$F'c = 1.788 - 2.305 A/C - 0.8029\%EM$$

<b>TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA</b>						
<b>Parámetro</b>	Kolmogorov-Smirnov		Barlett		Durbin-Watson	
<b>L-Box</b>	P	0.15	T	8.88	D	2.04
	No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55
	La distribución es normal		No se rechaza Ho Las varianzas son iguales		No se rechaza Ho Observaciones independientes	

**ANEXO F** Análisis ANOVA Minitab V17® Esfuerzo de Fluencia Estático

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>EFE</b>	Lineal	A/C	0.029	SI
		%EM	0.048	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.733	NO
		%EM-%EM	0.142	NO
		Bilineal	A/C-%EM	0.798
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c = -4.55 + 2927 A/C - 895\%EM - 2547 A/C * A/C + 1801\%EM * \%EM + 1006 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>EFE</b>	Lineal	A/C	0.027	SI
		%EM	0.045	SI
<b>Factor Predictivo</b>			2.68%	

$$F'c = -234 + 1141 A/C + 408\%EM$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $1/X$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>1/X EFE</b>	Lineal	A/C	0.005	SI
		%EM	0.109	NO
		A/C-A/C	0.243	NO
	Cuadrado	%EM-%EM	0.212	NO
		Bilineal	A/C-%EM	0.416
<b>Factor Predictivo</b>			1.93%	

$$F'c\left(\frac{1}{X}\right) = 0.0295 - 0.1026 A/C - 0.0094\%EM + 0.0974 A/C * A/C - 0.0167\%EM * \%EM + 0.035 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>1/X EFE</b>	Lineal	%EM	0.007	SI
<b>Factor Predictivo</b>			11.16%	

$$F'c\left(\frac{1}{X}\right) = 0.01050 - 0.01678 A/C$$

TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA						
Parámetro	Kolmogorov-Smirnov		Barlett		Durbin-Watson	
	1/X EFE	P	0.15	T	7.7	D
No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55	
La distribución es normal		No se rechaza Ho Las varianzas son iguales		No se rechaza Ho Observaciones independientes		

**ANEXO G** Análisis ANOVA Minitab V17® Viscosidad Plástica

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>VP</b>	Lineal	A/C	0.002	SI
		%EM	0.595	NO
	Cuadrado	A/C-A/C	0.727	NO
		%EM-%EM	0.065	SI
	Bilineal	A/C-%EM	0.231	NO
	<b>Factor Predictivo</b>			16.23%

$$F'c = 147 - 370 A/C + 124\%EM + 371 A/C * A/C + 327\%EM * \%EM - 681 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>VP</b>	Lineal	A/C	0.002	SI
		%EM	0.592	NO
	Cuadrado	%EM-	0.065	SI
		%EM		
<b>Factor Predictivo</b>			24.27%	

$$F'c = 156.3 - 243.8 A/C - 144.7\%EM + 319\%EM * \%EM$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $Sen(x)$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Sen(x) VP</b>	Lineal	A/C	0.393	NO
		%EM	0.494	NO
	Cuadrado	A/C-A/C	0.136	NO
		%EM-	0.382	NO
	%EM			
	Bilineal	A/C-%EM	0.796	NO
<b>Factor Predictivo</b>			0.00%	

$$F'c(Sen(x)) = -9.00 + 47.4 A/C - 5.43\%EM - 58.2 A/C * A/C + 5.36\%EM * \%EM + 5.2 A/C * \%EM$$

<b>TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA</b>						
<b>Parámetro</b>	Kolmogorov-Smirnov		Barlett		Durbin-Watson	
<b>Sen(x) VP</b>	P	0.15	T	13.232	D	1.571
	No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55
	La distribución es normal		No se rechaza Ho		No se rechaza Ho	
			Las varianzas son iguales		Observaciones independientes	

**ANEXO H** Análisis ANOVA Minitab V17® Resistencia a 7 días

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>	<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>	
<b>Resistencia 7 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.002	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.573	NO
		%EM-%EM	0.521	NO
		Bilineal	A/C-%EM	0.022
<b>Factor Predictivo</b>			64.17%	

$$F'c = 23.3 + 75 A/C + 182.5\%EM - 156 A/C * A/C - 28.4\%EM * \%EM - 355 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>	<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>	
<b>Resistencia 7 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.001	SI
	Cuadrado	A/C-%EM	0.018	SI
		<b>Factor Predictivo</b>		

$$F'c = 48.9 - 49.1 A/C + 168.3\%EM - 355 A/C * \%EM$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $X^3$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>	<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>	
<b>X<sup>3</sup> Resistencia 7 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.001	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.275	NO
		%EM-%EM	0.950	NO
		Bilineal	A/C-%EM	0.001
<b>Factor Predictivo</b>			63.36%	

$$F'c(X^3) = 205781 - 1029097 A/C + 1209548\%EM + 1411448 A/C * A/C + 12728\%EM * \%EM - 2711025 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>	<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>	
<b>X<sup>3</sup> Resistencia 7 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.001	SI
	Cuadrado	A/C-%EM	0	SI
<b>Factor Predictivo</b>			67.47%	

$$F'c(X^3) = -16258 + 100061 A/C + 1215912\%EM - 2711025 A/C * \%EM$$

<b>TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA</b>						
<b>Parámetro</b>	<b>Kolmogorov-Smirnov</b>		<b>Barlett</b>		<b>Durbin-Watson</b>	
	P	0.15	T	7.62	D	1.625
<b>X<sup>3</sup></b>	No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55
<b>Resistencia</b>			No se rechaza Ho		No se rechaza Ho	
<b>7 días</b>	La distribución es normal		Las varianzas son iguales		Observaciones independientes	

**ANEXO I** Análisis ANOVA Minitab V17® Resistencia a 14 días

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Resistencia 14 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.047	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.613	NO
		%EM-%EM	0.547	NO
	Bilineal	A/C-%EM	0.465	NO
	<b>Factor Predictivo</b>			61.10%

$$F'c = 138 - 337 A/C + 87.7\%EM + 236 A/C * A/C - 32.8\%EM * \%EM - 132 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Resistencia 14 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0	SI
	<b>Factor Predictivo</b>			69.48%

$$F'c = 115.54 - 181.1 A/C + 18.67\%EM$$

Mediante un proceso iterativo se obtuvo un modelo estabilizado, empleando la función  $Log_{10}$  con el fin de cumplir satisfactoriamente los supuestos de ANOVA.

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>LOG<sub>10</sub> Resistencia 14 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.033	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.766	NO
		%EM-%EM	0.430	NO
	Bilineal	A/C-%EM	0.550	NO
	<b>Factor Predictivo</b>			67.43%

$$F'c(LOG_{10}) = 2.048 - 0.76 A/C + 0.701\%EM - 0.83 A/C * A/C - 0.357\%EM * \%EM - 0.89 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>LOG<sub>10</sub> Resistencia 14 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.025	SI
	<b>Factor Predictivo</b>			74.80%

$$F'c(LOG_{10}) = 2.2827 - 1.646 A/C + 0.1671\%EM$$

TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA						
Parámetro	Kolmogorov-Smirnov		Barlett		Durbin-Watson	
<b>LOG<sub>10</sub> Resistencia 14 días</b>	P	0.15	T	9.54	D	2.1066
	No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55
	La distribución es normal		No se rechaza Ho Las varianzas son iguales		No se rechaza Ho Observaciones independientes	

**ANEXO J** Análisis ANOVA Minitab V17® Resistencia a 28 días

<b>MODELO NO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Resistencia 28 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.017	SI
	Cuadrado	A/C-A/C	0.223	NO
		%EM-%EM	0.874	NO
		Bilineal	A/C-%EM	0.479
<b>Factor Predictivo</b>			64.29%	

$$F'c = 186.5 - 530 A/C + 84.7\%EM + 455 A/C * A/C - 9.30\%EM * \%EM - 138 A/C * \%EM$$

<b>MODELO DEPURADO</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Término</b>		<b>Valor P</b>	<b>Significancia</b>
<b>Resistencia 28 días</b>	Lineal	A/C	0	SI
		%EM	0.014	SI
<b>Factor Predictivo</b>			70.98%	

$$F'c = 129.29 - 200.8 A/C + 24.95\%EM$$

<b>TEST ESTADÍSTICO VERIFICACIÓN SUPUESTOS DE ANOVA</b>						
<b>Parámetro</b>	<b>Kolmogorov-Smirnov</b>		<b>Barlett</b>		<b>Durbin-Watson</b>	
<b>Resistencia 28 días</b>	P	0.15	T	10.045	D	1.90
	No se rechaza Ho		X <sup>2</sup>	13.36	DL=1.22	DU=1.55
	La distribución es normal		No se rechaza Ho Las varianzas son iguales		No se rechaza Ho Observaciones independientes	

**ANEXO K** Desviación estándar de cada uno de los promedios de la resistencia a la compresión uniaxial a 7, 14 y 28 días.

Punto w/b - %EM	Resistencia a 7 días [MPa]	Desviación estándar 7 días	Resistencia a 14 días [MPa]	Desviación estándar 14 días	Resistencia a 28 días [MPa]	Desviación estándar 28 días
P1 (0.32-0.43]	55.7	2.0	64.5	4.6	76.8	3.6
P2 (0.47-0.07)	26.7	0.6	33.8	1.5	38.8	0.9
P3 (0.40-0.25)	36.8	4.4	47.6	5.2	54.0	5.8
P4 (0.40-0.00)	29.2	4.2	39.0	2.9	46.0	3.5
P5 (0.40-0.50)	39.6	2.3	52.8	2.2	61.3	1.3
P6 (0.50-0.25)	22.6	5.0	33.4	2.9	40.1	3.0
P7 (0.33-0.07)	36.8	2.0	57.7	0.3	65.8	2.0
P8 (0.30-0.25)	54.8	9.5	67.3	13.7	77.4	15.0
P9 (0.47-0.43)	27.1	1.0	35.1	0.6	42.2	1.7