

**ESTUDIO DEL ESTADO FRESCO DEL CONCRETO AUTO-COMPACTANTE
REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO**

**SARA JULIANA CARRILLO QUINTERO
IVÁN CAMILO COTES PRIETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2017**

**ESTUDIO DEL ESTADO FRESCO DEL CONCRETO AUTO-COMPACTANTE
REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO**

**SARA JULIANA CARRILLO QUINTERO
IVÁN CAMILO COTES PRIETO**

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

Director:

LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ

Ingeniero Civil. Ph D

Codirector:

DAVID SEBASTIÁN COTES PRIETO

Ingeniero Civil

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

2017

DEDICATORIA

A mis padres por su amor, dedicación y paciencia. Por ser luz, guía, fuerza.

A mi familia por el apoyo incondicional.

A mis amigos por permitirme crecer, crear y soñar a su lado.

Esto es posible gracias a ustedes.

Sara Juliana Carrillo Quintero

DEDICATORIA

Por una meta más alcanzada. Eterna gratitud a mis padres por su incansable y constante apoyo en el desarrollo de este proyecto. Sólo ustedes conocen el recorrido que viví.

A mi director de tesis que, con su admirable conocimiento, orientó el camino de este trabajo que tantos retos presentó.

A mi codirector de proyecto, mi hermano y mejor amigo, que siempre estuvo allí con la mejor disponibilidad en todo momento.

Especial reconocimiento a mi compañera de tesis, que sin su esfuerzo y dedicación no hubiera sido posible lograr esto.

A cada uno de los individuos que participaron de mi diario vivir durante esta etapa universitaria, y que de alguna u otra forma contribuyeron a mi crecimiento personal. También son parte de esto.

Gracias.

Iván Camilo Cotes Prieto

AGRADECIMIENTOS

Reconocemos los agradecimientos al director y al co-director de este proyecto, Ingeniero Luis Eduardo Zapata Orduz, PhD., e Ingeniero David Sebastián Cotes Prieto por su dedicación, entrega y asesoría durante el desarrollo de la investigación.

Agradecemos especialmente al personal del laboratorio de materiales de construcción de la escuela de Ingeniería Civil UIS por el constante apoyo durante la elaboración de las pruebas experimentales, con el préstamo de equipos, espacios y herramientas.

SARA JULIANA CARRILLO QUINTERO
IVÁN CAMILO COTES PRIETO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS	18
1.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. METODOLOGÍA.....	19
2.1. MATERIALES	19
2.1.1. Cemento.	19
2.1.2. Ceniza volante	19
2.1.3. Agregado Fino	20
2.1.4. Agregado Grueso	20
2.1.5. Fibras de Acero	21
2.1.6. Super-plastificante	21
2.2. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA.....	22
2.3. DISEÑO DE MEZCLA.....	23
2.4. PROCESO DE MEZCLADO	28
2.5. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	29
2.6. ENSAYO DE REOLOGÍA	31
2.7. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	32
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	32
3.2. ENSAYO DE REOLOGÍA	37
3.3. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.....	42

4. CONCLUSIONES.....46
REFERENCIAS49
BIBLIOGRAFÍA.....54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del cemento y ceniza.	19
Tabla 2. Granulometría de agregados.	20
Tabla 3. Granulometrías combinadas - %Pasa.....	24
Tabla 4. Proporciones en los diseños de mezcla.....	28
Tabla 5. Resultados promedio de pruebas en estado fresco.....	33
Tabla 6. Resultados promedio obtenidos del reómetro.....	38
Tabla 7. Análisis ANOVA Minitab V.16®. Modelo no depurado de los factores.....	39
Tabla 8. Análisis ANOVA Minitab V.16®.Modelo depurado de los factores.	39
Tabla 9. Verificación de los supuestos de ANOVA.	42
Tabla 10. Resultados promedio obtenidos de resistencia a compresión a los 7 días.	43
Tabla 11. Análisis ANOVA Minitab V.16®. Modelo no depurado de la compresión.	43
Tabla 12. Análisis ANOVA Minitab V.16®. (Ajustado). Modelo depurado de la compresión.	44
Tabla 13. Verificación de supuestos de ANOVA.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fibra de acero con gancho $L/D = 80$	21
Figura 2. Esquema del diseño estadístico experimental.....	22
Figura 3. Cuadro de potencia 0.45.....	25
Figura 4. Cuadro de porcentaje retenido.	26
Figura 5. Cuadro de factor de grosor.	27
Figura 6. Slump-flow y T500.	29
Figura 7. J-Ring.	30
Figura 8. L-Box.	30
Figura 9. Reómetro ICAR RHM-3000.	31
Figura 10. Resultados del Slump-flow vs. % Fibras.....	34
Figura 11. Resultados del T500 vs. % Fibras.	35
Figura 12. Resultados del J-Ring vs. % Fibras.	36
Figura 13. Obstrucción de fibras en L-Box.....	37
Figura 14. Superficie de respuesta del modelo depurado de la viscosidad plástica (μ).	40
Figura 15. Superficie de respuesta del modelo depurado para el Log_{10} del esfuerzo de fluencia estático (τ_0).	41
Figura 16. Superficie de respuesta del modelo depurado para la resistencia a compresión a 7 días ($f'_{cr 7}$).	45

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL ESTADO FRESCO DEL CONCRETO AUTO-COMPACTANTE REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO*

AUTORES: SARA JULIANA CARRILLO QUINTERO
IVÁN CAMILO COTES PRIETO**

PALABRAS CLAVE: Fibras de acero, Concreto auto-compactante, Reología, Superficie de respuesta.

La implementación de fibras de acero en concretos auto-compactantes es un tema objeto de investigación en la actualidad debido a las ventajas que proporciona este material en términos estructurales, económicos y ambientales. Este proyecto pretende evaluar las propiedades en estado fresco del concreto auto-compactante reforzado con fibras de acero, a partir de un análisis de estadística descriptiva y un estudio de sensibilidad estadístico. En esta investigación se determinó la incidencia de utilizar proporciones de fibra del 0.0% - 2.0% (con respecto al volumen total de la mezcla) y relaciones agua cemento entre 0.4-0.6, en las propiedades reológicas del concreto auto-compactante. Para lograr el objetivo se utilizó un diseño estadístico de experimentos multi-variable del tipo central compuesto desde puntos axiales basado en un factorial 2^k con puntos al centro, en conjunto con la metodología de superficie de respuesta y el análisis de varianza (ANOVA). Se evaluó la incidencia de los factores estudiados sobre la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia calculados con base en el modelo lineal de Bingham. Los resultados obtenidos evidencian una disminución en la trabajabilidad del concreto auto-compactante al añadir fibras de acero. Además, las superficies de respuesta sugieren una incidencia estadísticamente significativa ($\alpha=0.10$) de la relación agua cemento en la viscosidad plástica, el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la compresión; mientras que la incorporación de fibras de acero solo resultó estadísticamente significativa ($\alpha=0.10$) en el esfuerzo de fluencia.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: David Sebastián Cotes Prieto

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE FRESH STATE OF STEEL FIBER REINFORCED SELF COMPACTING CONCRETE*

**AUTHORS: SARA JULIANA CARRILLO QUINTERO
IVÁN CAMILO COTES PRIETO****

KEYWORDS: Steel fiber, Self-compacting concrete, Rheology, Response surface.

The implementation of steel fibers in self-compacting concrete is subject of research nowadays due to the advantages the material provides in structural, economic and environmental terms. This project aims to evaluate the fresh state properties of self-compacting concrete reinforced with steel fibers, based on a descriptive statistics analysis and a statistical sensitivity study. In this research the incidence of using fiber proportion between 0.0%-2.0% (regarding the total volume of the mixture) and water-binder ratios between 0.4-0.6 was determined in rheological properties of the self-compacting concrete. To achieve the objectives, a statistical design of multi-variable experiments of the type central composed from axial points based on a 2^k factorial with central points was used, along with the response surface methodology and analysis of variance (ANOVA). The influence of the factors studied on the plastic viscosity and yield stress calculated based on the Bingham linear model, was evaluated. The obtained results evidenced a decrease in the workability of the self-compacting concrete when adding steel fibers. In addition, the results obtained suggest a statistically significant ($\alpha=0.10$) incidence of the water binder ratio on the plastic viscosity, static yield stress and compressive strength; whereas the addition of steel fibers only was statistically significant ($\alpha=0.10$) on the static yield stress.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: David Sebastián Cotes Prieto

INTRODUCCIÓN

La permanente necesidad de innovación y mejora en los materiales de construcción ha llevado a la comunidad científica a hacer investigación exhaustiva en el área de la ciencia de los materiales, con el fin de desarrollar tecnologías funcionales que puedan implementarse en la industria de la construcción [1, 2].

Durante los últimos años se ha determinado experimentalmente que el concreto reforzado con fibras de acero (CRFA) muestra un comportamiento mecánico superior al concreto convencional, especialmente en términos de su capacidad de carga, deformación, ductilidad y tenacidad [3], esto debido a que al momento de la fisuración del concreto, las fibras de acero actúan como un enlace permitiendo la transferencia de esfuerzos entre las partes no fisuradas del material [4, 5]. Entre los tipos de fibras de acero existentes, destacan las terminadas en gancho. Este tipo de fibras es ampliamente utilizado debido a las ventajas que presenta en términos de adherencia a la matriz de concreto [6]. En consecuencia, el CRFA es cada vez más usado en la construcción de placas, túneles, pavimentos para vías, puentes, entre otras obras de infraestructura. Las virtudes de esta nueva tecnología vislumbran la posibilidad de reemplazar de forma parcial o total, en casos específicos, el refuerzo tradicional utilizado en el concreto reforzado [4].

De manera simultánea, en la actualidad, se hace cada vez más frecuente el uso del concreto auto-compactante (CAC), ya que proporciona ventajas al proceso constructivo en aspectos técnicos, económicos y ambientales [7, 8]. La *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC) [9] propone una serie de recomendaciones para el diseño y la elaboración de este tipo de concretos. El CAC en estado fresco opone poca resistencia a fluir, por lo que se compacta sin la necesidad de algún tipo de vibrado [10, 11]. Sin embargo, a pesar de su fluidez, conserva la suficiente consistencia para que los componentes

de la mezcla permanezcan homogéneos y así evitar fenómenos de segregación como la segregación, que consiste en la distribución no uniforme de las partículas, y el sangrado, referido a la elevación del agua hacia la superficie del concreto [12].

El concreto auto-compactante reforzado con fibras de acero (CACRFA), es un material compuesto que aprovecha las propiedades mecánicas de las fibras en conjunto con las características del CAC [13]. La caracterización del comportamiento de este material se hace tanto en estado endurecido como en estado fresco, estudiándose este último a través de la reología.

La reología se define como la ciencia del flujo y deformación de la materia, por ende, es la encargada de estudiar el comportamiento en estado fresco del concreto [14]. El flujo del hormigón convencional puede definir su comportamiento mediante el modelo de curva de flujo visco-plástico de Bingham en el cual los esfuerzos cortantes (τ) varían de forma lineal con la tasa de corte ($\dot{\gamma}$). La Ecuación 1 corresponde a la curva de flujo lineal propuesta por Bingham, donde τ_0 es el esfuerzo de fluencia y μ , la viscosidad plástica [15], ambos parámetros caracterizan el comportamiento reológico del material. Cabe resaltar que se han presentado casos en donde el CAC exhibe desviación del modelo lineal propuesto por Bingham, por lo cual se han llegado a sugerir otros modelos de curva de flujo tales como Herschel–Bulkey o Bingham-modificado [15, 16].

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

Con el propósito de caracterizar el estado fresco del CACRFA este estudio implementó un diseño central compuesto desde puntos axiales basado en un factorial 2^k con puntos al centro y la metodología de superficie de respuesta por medio de ensayos en el reómetro, para determinar la incidencia de la adición de fibras de acero y la variación de la relación agua cemento en los parámetros de la curva de flujo lineal propuesta por Bingham. Se realizaron ensayos de trabajabilidad con base en las recomendaciones del EFNARC y ensayos de compresión simple a

la edad de 7 días. De los resultados obtenidos se concluyó que al adicionar fibras de acero existe una disminución en la trabajabilidad de este tipo de concretos. Además, que los factores de estudio inciden en la reología del material.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento en estado fresco de diferentes mezclas de concreto auto-compactante modificado con fibras de acero, mediante experimentación y posterior análisis numérico y estadístico para determinar la influencia de las fibras en la trabajabilidad del material.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar las propiedades reológicas de las mezclas de concreto auto-compactantes modificadas con dosificaciones en volumen entre 0% y 2% de fibras de acero terminadas en gancho y variando la relación agua-cemento, mediante ensayos en estado fresco utilizando J-Ring (ASTM C1621/EFNARC-05), L-Box (EFNARC-05), T500 (mm) desde el cono de Abrams (EFNARC-05), esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica.

Analizar la posible desviación del comportamiento lineal tipo Bingham entre el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica de las diferentes mezclas de concreto auto-compactante modificado con fibras.

Realizar un análisis de sensibilidad estadístico de los resultados en estado fresco del concreto auto-compactante modificado con fibras, para determinar la incidencia de la dosificación de la fibra propuesta en la trabajabilidad de la mezcla.

2. METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES

Se caracterizaron las propiedades de los materiales componentes del CACRFA por medio de ensayos de laboratorio con base en las recomendaciones de la American Society of Testing Materials (ASTM). A continuación, se muestra la información obtenida.

2.1.1. Cemento El cemento utilizado fue Portland Tipo I, con gravedad específica de 2.90, ensayado según lo planteado en la norma ASTM C150 [17]. La composición química del material se muestra en la Tabla 1.

2.1.2. Ceniza volante Se utilizó ceniza volante proveniente de la planta Caracolito (Santander, Colombia) de la compañía CEMEX, como material de reemplazo parcial del cemento con el fin de contribuir al comportamiento auto-compactante de la mezcla. La gravedad específica que se registró fue de 2.00. La Tabla 1 presenta la composición química del material.

Tabla 1. Propiedades químicas del cemento y ceniza.

Composición Química	Cemento Tipo I %	Ceniza Volante %
SiO ₂	20.17	59.54
Al ₂ O ₃	5.20	24.42
Fe ₂ O ₃	3.44	4.75
CaO	56.54	1.23
MgO	2.13	0.59
SO ₃	3.44	0.49
Na ₂ O	0.80	0.93
K ₂ O	0.65	1.33
PF	-	6.91

Fuente: Autores.

2.1.3. Agregado Fino El agregado fino (AF) fue suministrado por proveedores locales (Bucaramanga, Santander, Colombia). Presentó gravedad específica de 2.71, capacidad de absorción de 3.29%, contenido de humedad de 0.30% y módulo de finura de 1.9 calculado a partir de la granulometría mostrada en la Tabla 2. Lo anterior, fue ensayado siguiendo la normativa ASTM C128 [18] y ASTM C136 [19].

2.1.4. Agregado Grueso El agregado grueso (AG) fue suministrado por proveedores locales (Bucaramanga, Santander, Colombia). El tamaño máximo nominal de este material fue 3/8" (19 mm), presentó una gravedad específica de 2.63, peso unitario (seco) 1556.7 kg/m³, capacidad de absorción del 0.70% y contenido de humedad de 0.54%. Los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos del ASTM C128 [18] y ASTM C136 [19]. La granulometría correspondiente al agregado grueso se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Granulometría de agregados.

Tamaño tamiz (mm)	Grueso (% Pasa)	Fino (% Pasa)
19.00	100.00	100.00
12.70	99.64	100.00
9.52	88.89	98.65
4.76	11.73	95.88
2.36	11.73	91.52
1.18	11.73	84.56
0.60	11.73	69.13
0.18	11.73	38.07
0.15	11.73	12.22
Fondo	0.00	0.00

Fuente: Autores.

2.1.5. Fibras de Acero Las fibras de acero terminadas en gancho utilizadas en este proyecto se muestran en la Figura 1. La gravedad específica de las fibras fue de 7.85. Su longitud (L) de 60 mm y diámetro (D) de 0.75 mm. Estos valores fueron proporcionados por los proveedores del material. La relación de aspecto (L/D) fue de 80.

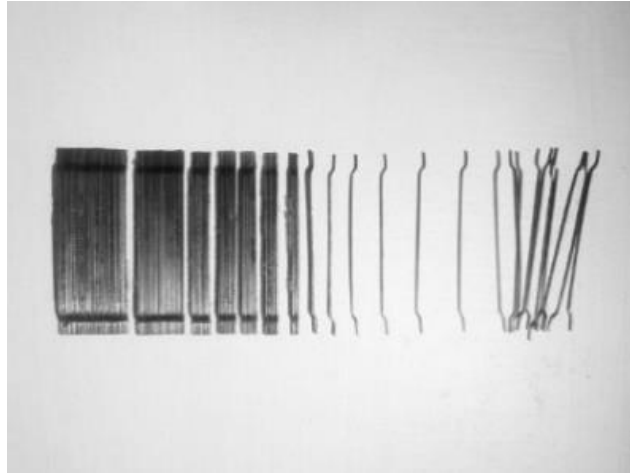


Figura 1. Fibra de acero con gancho L/D = 80.
Fuente: Autores.

2.1.6. Super-plastificante El super-plastificante (SP) empleado fue Sika Viscocrete 2100, un aditivo líquido reductor de agua de alto desempeño basado en policarboxilatos sin contenido de cloruros, el cual permite aumentar la fluidez de las mezclas de concreto. Presentó 40% de contenido sólido determinado a partir de ensayos de laboratorio (autores). La gravedad específica fue de 1.08 obtenida desde la ficha técnica del material proporcionada por la empresa productora.

2.2. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

Se realizó un diseño estadístico de experimentos multi-variable del tipo central compuesto, en conjunto con la metodología de superficie de respuesta y el análisis de varianza (ANOVA), con el fin de determinar la incidencia de los factores estudiados sobre los parámetros del modelo lineal de Bingham. Estos factores fueron la relación agua cemento (a/c), en un dominio de 0.40 a 0.60; y el porcentaje de fibras (%F), en un dominio de 0.00% a 2.00%, porcentaje medido como fracción del volumen total de la mezcla. Para el desarrollo del experimento estadístico se empleó el software *Minitab* v.16®, obteniéndose la distribución de tratamientos (puntos) mostrada en la Figura 2, así como las réplicas y el orden de ejecución (bache) de cada uno. Para los tratamientos P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8 se llevaron a cabo dos réplicas, mientras que para el punto P9 se hicieron 10, lo cual da un total de 26 mezclas ensayadas.

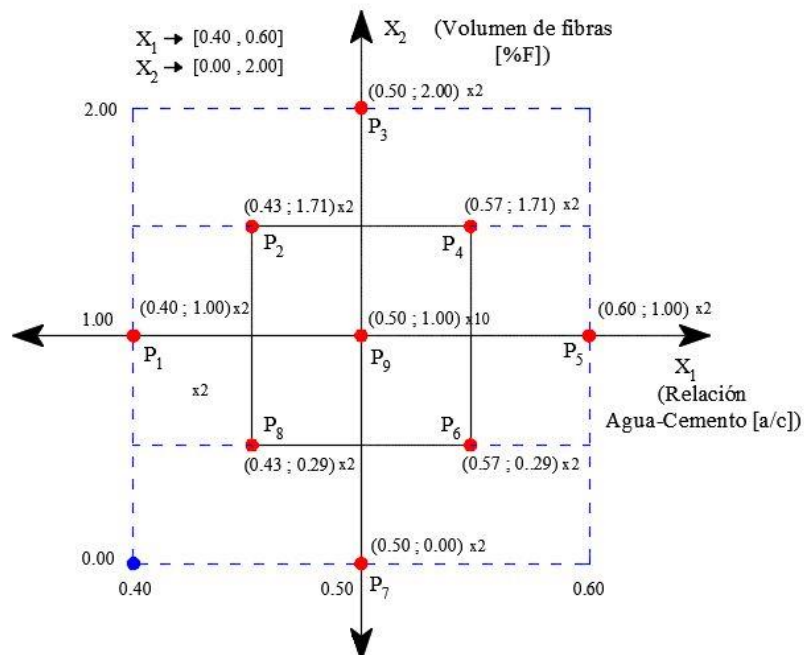


Figura 2. Esquema del diseño estadístico experimental.

Fuente: Autores.

Para validar la aplicación del ANOVA sobre el conjunto de datos obtenidos a partir de la campaña experimental, se realizó una revisión del cumplimiento de los supuestos o hipótesis en los que se basa este tipo de análisis.

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. Los supuestos con los que se garantiza la funcionalidad del ANOVA y el respectivo test estadístico [20] que permite validar esta información son:

- ✓ Los datos siguen una distribución normal - Test Kolmogorov-Smirnov.
- ✓ Las varianzas de los diferentes tratamientos son iguales - Test de Barlett.
- ✓ Existe independencia entre los datos - Test de Durbin-Watson.

2.3. DISEÑO DE MEZCLA

Se calcularon los diseños de mezcla para cada uno de los tratamientos resultantes del diseño experimental, con base en el método volumétrico propuesto por el *American Concrete Institute (ACI)* en el documento ACI 211.1-80 [21]. Inicialmente, se obtuvieron proporciones para cinco mezclas de concreto convencional con a/c de 0.40, 0.43, 0.50, 0.57 y 0.60. Con el fin de obtener los diseños de mezcla de CACRFA necesarios para ejecutar el plan experimental, se realizaron tres modificaciones a los diseños de mezcla convencional. La primera de ellas consistió en modificar el material cementante mediante un remplazo del 20% de la masa de cemento por ceniza volante, siguiendo la recomendación de [22, 23]. La segunda modificación consistió en añadir SP en proporciones de 1.5% y 2% medidas en porcentaje del peso del material cementante. Por último, se fijó la relación de agregados en un 40% para AG y 60% para AF, porcentajes medidos como fracción

del peso total de agregados. Esta se obtuvo a partir de la realización de tres granulometrías combinadas en diferentes proporciones, presentadas en la Tabla 3, a las que se les aplicaron pruebas de gradación optimizada de los agregados: Cuadro de potencia 0.45 [24], cuadro factor de grosor y cuadro de porcentaje retenido. Estas dos últimas propuestas en el capítulo 8-18 de la American Association of State Highway And Transportation Officials (AASHTO) [25]. 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 3-5.

Tabla 3. Granulometrías combinadas - %Pasa.

Tamaño tamiz (mm)	Combinación 1 (40 AG – 60 AF)	Combinación 2 (43 AG – 57 AF)	Combinación 3 (35 AG – 65 AF)
19.00	100.00	100.00	100.00
12.70	99.85	99.70	100.00
9.52	93.56	89.41	93.94
4.76	61.57	58.64	64.65
2.36	56.83	53.26	58.66
1.18	52.68	49.14	54.34
0.60	42.91	40.43	46.26
0.18	25.12	22.89	25.43
0.15	8.66	7.37	7.71
Fondo	0.04	0.17	0.00

Fuente: Autores.

El cuadro de potencia 0.45 mostrado en la Figura 3 compara la gradación del agregado combinado con los límites de tamaño nominal, que en este caso es de 3/8". Mientras más cercana sea la gradación a la línea central, esta se acercará más a una densidad máxima. Aquellas granulometrías combinadas que se encuentren por encima del límite superior se comportarán de manera más rígida, por lo que requerirán mayor uso de SP. En cambio, aquellas que estén por debajo del límite inferior serán más gruesas y presentarán fenómenos de segregación.

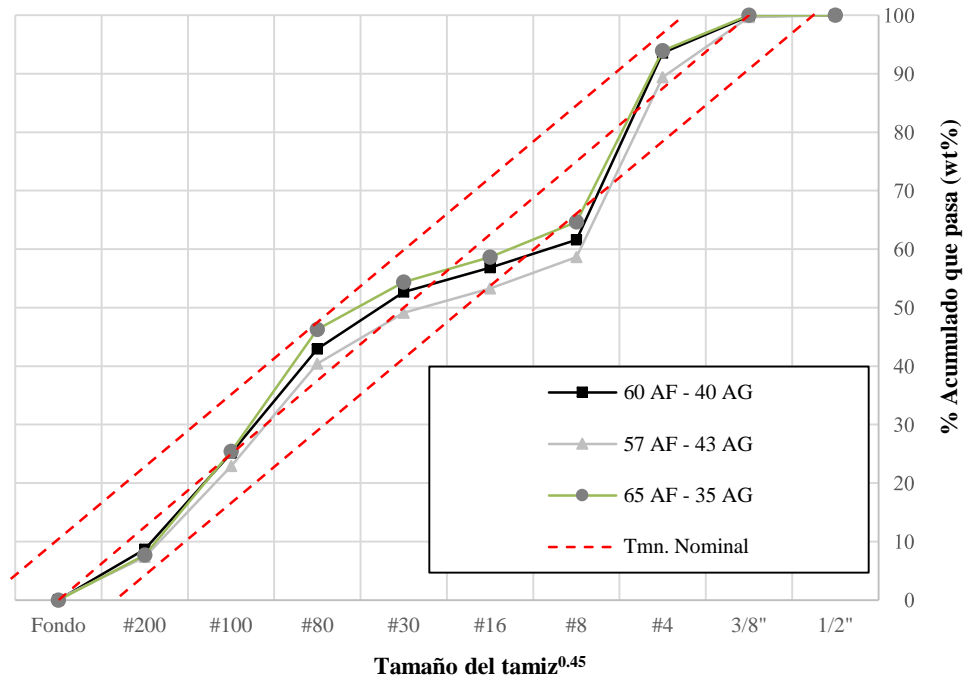


Figura 3. Cuadro de potencia 0.45.

Fuente: Autores.

El cuadro de porcentaje presentado en la Figura 4 es usado para indicar gradaciones que provean adecuada trabajabilidad y baja demanda de agua. Granulometrías por fuera de los límites establecidos [25] tienden a segregar.

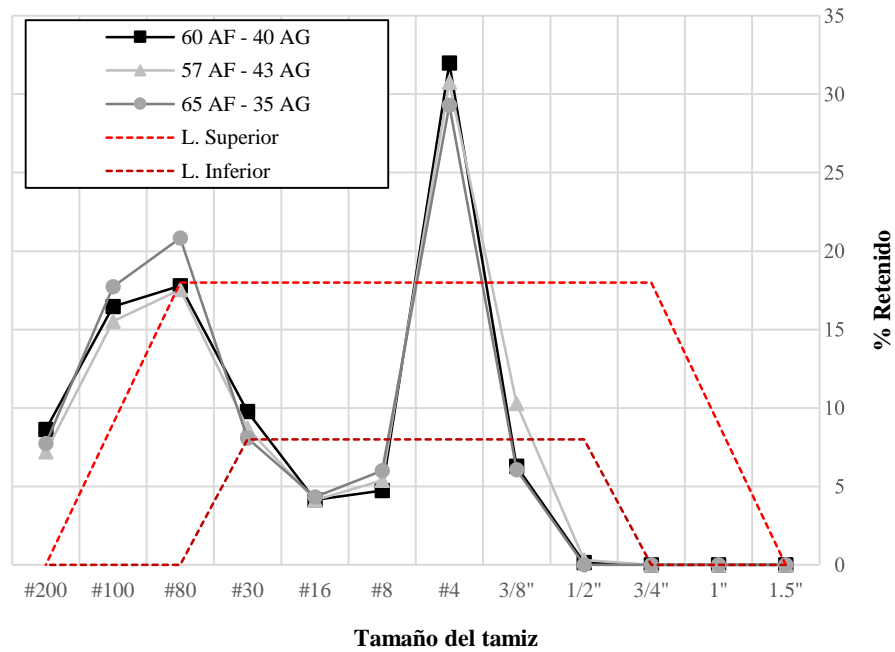


Figura 4. Cuadro de porcentaje retenido.
Fuente: Autores.

En la Figura 5 se presenta el cuadro factor de grosor, este posiciona las granulometrías según su Factor de Trabajabilidad (WF%) y su Factor de grosor (CF%) [25]. Entre más cerca se encuentren a la zona ideal, tendrán una mayor trabajabilidad.

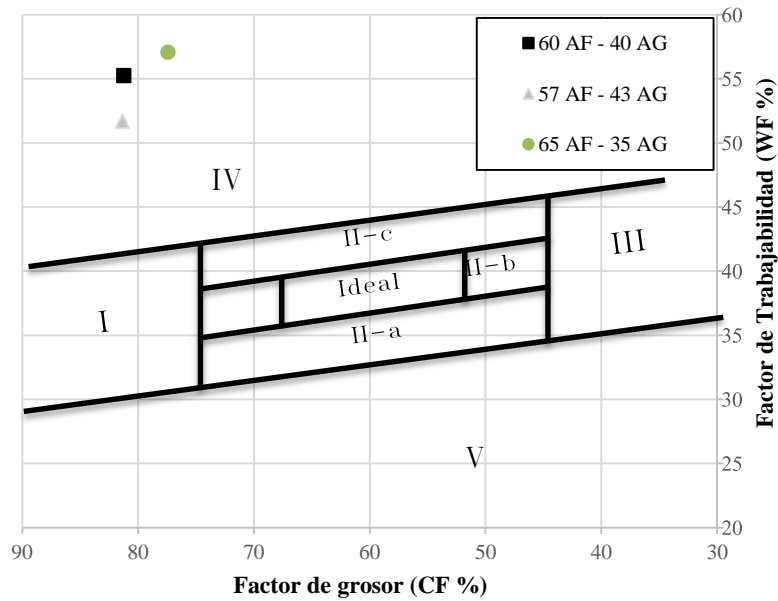


Figura 5. Cuadro de factor de grosor.
Fuente: Autores.

En este caso las granulometrías combinadas presentadas distan del valor ideal. No obstante, todas estas pruebas de gradación indican una simple aproximación para empezar a ensayar los diferentes baches. Por lo que el verdadero factor que influyó en la determinación de la relación AG-AF fue la experimentación.

Las proporciones de los diseños de mezcla para los tratamientos arrojados por el diseño estadístico se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Proporciones en los diseños de mezcla.

Punto (a/c – %F)	Cemento [kg/m³]	Fino [kg/m³]	Grueso [kg/m³]	Ceniza [kg/m³]	Agua [kg/m³]	SP %
P1 (0.40 – 1.00)	458.33	833.39	555.44	91.67	202.14	1.50
P2 (0.43 – 1.71)	426.38	837.60	557.82	85.27	199.15	2.00
P3 (0.50 – 2.00)	383.33	851.55	567.18	76.67	210.60	2.00
P4 (0.57 – 1.71)	336.53	894.63	595.62	67.25	212.02	2.00
P5 (0.60 – 1.00)	319.44	925.98	617.88	63.89	215.28	1.50
P6 (0.57 – 0.29)	336.26	924.61	616.33	67.25	214.85	1.50
P7 (0.50 – 0.00)	383.33	891.89	595.17	76.67	213.79	1.50
P8 (0.43 – 0.29)	406.98	901.27	600.79	81.40	193.09	1.50
P9 (0.50 – 1.00)	366.67	897.35	597.61	73.33	200.91	2.00

Fuente: Autores.

2.4. PROCESO DE MEZCLADO

Una mezcladora de 120 kg de capacidad se utilizó para mezclar los materiales. Se procuró mantener el interior de la olla debidamente humedecido antes de empezar el proceso. Inicialmente se mezclaron los agregados pétreos durante 1 minuto. Posteriormente se añadieron el cemento y la ceniza volante, mezclándose durante 1 minuto. Paso siguiente se incorporaron la totalidad de las fibras y un 70% del agua mezclándose todo durante 2 minutos. Un 50% del SP se agregó diluido en el 30% del agua restante. El vertido de esta solución se realizó en tres fases, cada una de un 1 minuto. Luego, se adicionó el 50% restante de SP directamente sobre la mezcla. Finalmente se mezcló todo durante 2 minutos [26].

2.5. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Inmediatamente después de culminar el proceso de mezclado se realizó la prueba de capacidad de llenado del concreto siguiendo las recomendaciones del EFNARC con base en los ensayos Slump-flow y T500 (EFNARC-05 [9]). Los ensayos se realizaron utilizando el cono de Abrams. Seguido a estos, se midió la capacidad de paso del CACRFA a través de obstáculos con base en los ensayos: J-Ring (ASTM C1621 [27]/EFNARC-05 [9]) y L-Box (EFNARC-05 [9]). Estos ensayos se llevaron a cabo en cada una de las 26 mezclas del programa experimental definido en el diseño estadístico (Figura 2). Las Figuras 6-8 son evidencia de realización de las pruebas.

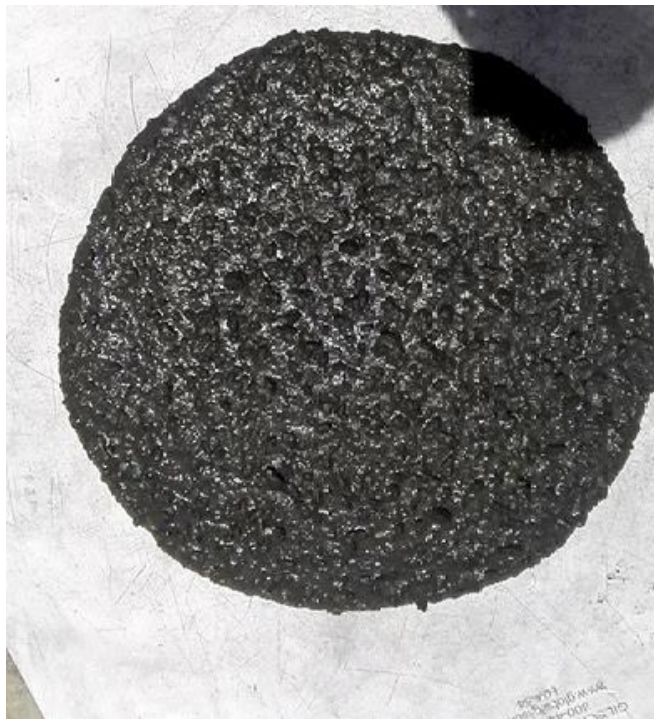


Figura 6. Slump-flow y T500.
Fuente: Autores.



Figura 7. J-Ring.
Fuente: Autores.



Figura 8. L-Box.
Fuente: Autores.

2.6. ENSAYO DE REOLOGÍA

Se realizaron las pruebas utilizando el reómetro ICAR RHM-3000 diseñado por el Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Austin, Texas. El dispositivo se presenta en la Figura 9.



Figura 9. Reómetro ICAR RHM-3000.
Fuente: Autores.

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

Con el objetivo de controlar la resistencia a compresión, se realizaron ensayos de compresión simple a 7 días según ASTM C39 [28]. Para llevar a cabo los ensayos se elaboraron 4 cilindros de concreto para cada una de las mezclas de CACRFA. Las dimensiones de los cilindros utilizados fueron: 75 mm de diámetro y 150 mm de altura. Los cilindros se retiraron de los moldes 24 horas después de fundidos y puestos inmediatamente en una pila de agua donde permanecieron a una temperatura de $21 \pm 2^\circ \text{C}$ para efectuar el proceso de curado. Los cilindros permanecieron sumergidos hasta cumplir el tiempo establecido para ejecutar la prueba a compresión. Una vez cumplido el tiempo se realizó el ensayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Los resultados promedio de las pruebas en estado fresco se muestran en la Tabla 5. Así mismo se indica el rango sugerido por el EFNARC para establecer un comportamiento auto-compactante del concreto.

Tabla 5. Resultados promedio de pruebas en estado fresco.

Punto (a/c – %F)	Slump-flow (mm)	T500 (s)	J-Ring (mm)	L-Box (mm)
P1 (0.40 – 1.00)	660.50	9.62	31.25	-
P2 (0.43 – 1.71)	630.00	22.86	45.13	-
P3 (0.50 – 2.00)	640.00	26.64	29.75	-
P4 (0.57 – 1.71)	685.00	14.64	55.88	-
P5 (0.60 – 1.00)	697.50	17.08	40.75	-
P6 (0.57 – 0.29)	675.00	7.56	32.94	0.76
P7 (0.50 – 0.00)	697.50	4.67	3.25	0.94
P8 (0.43 – 0.29)	620.00	22.86	33.50	0.74
P9 (0.50 – 1.00)	663.50	35.83	42.88	-
EFNARC	650-800	2-5	0-10	0.8-1.0

Fuente: Autores.

A partir de los resultados de las pruebas se deduce que el punto P7 (%F=0) es el único que cumple satisfactoriamente todos los criterios propuestos por el EFNARC para concreto auto-compactante.

Específicamente, los resultados evidencian que en a/c de 0.50, la medida obtenida del Slump-flow disminuye conforme aumenta el porcentaje de fibras, mientras que en las mezclas con relación a/c 0.43 y 0.57 la medida obtenida del Slump-flow aumenta con el porcentaje de fibras, lo que puede indicar que la presencia de fibras contribuye a la disgregación en la mezcla. Lo descrito anteriormente se presenta en la Figura 10.

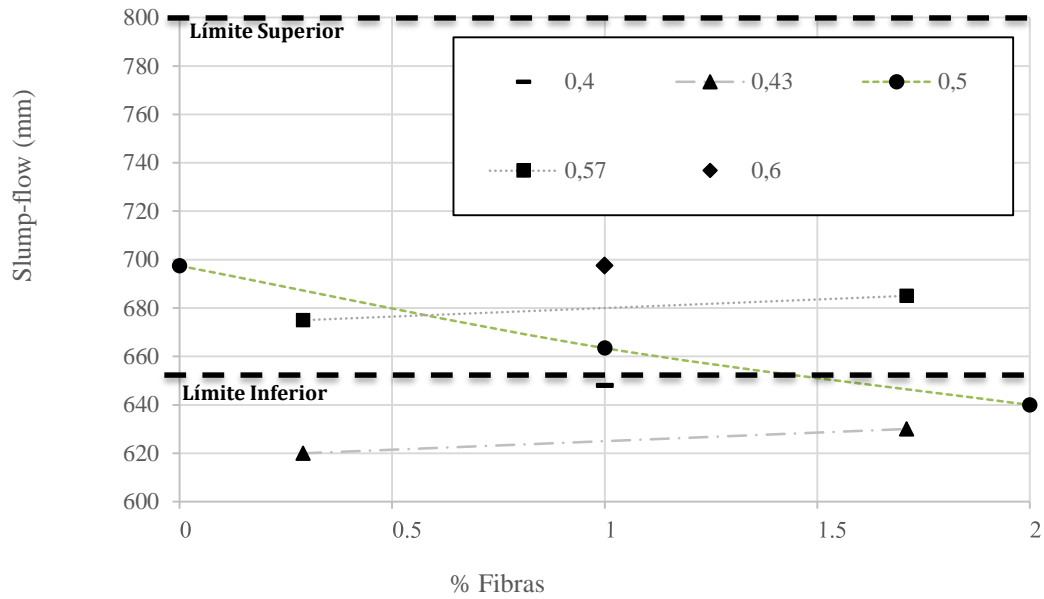


Figura 10. Resultados del Slump-flow vs. % Fibras.
Fuente: Autores.

Aunque la mayoría de los puntos cumple con los límites propuestos por el EFNARC para el ensayo de Slump-flow, los resultados del ensayo T500 demuestran que al adicionar fibras de acero a la mezcla, el tiempo de llenado tiende a aumentar, llegando incluso a exceder los límites sugeridos. La Figura 11 presenta los resultados del ensayo T500.

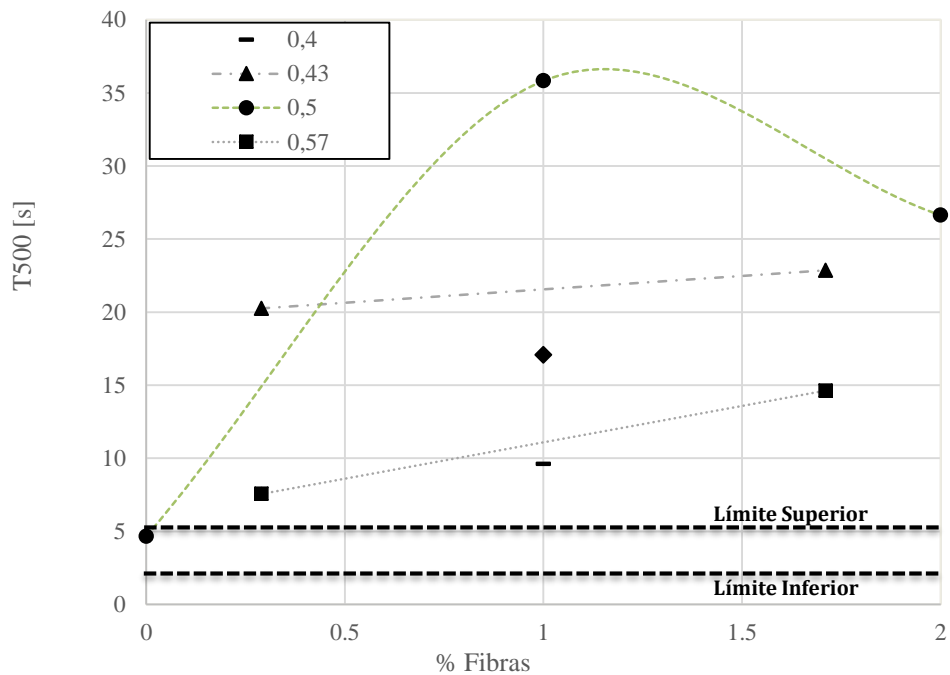


Figura 11. Resultados del T500 vs. % Fibras.
Fuente: Autores.

Los resultados de la prueba J-Ring indican que ante la presencia de fibras en la mezcla, se disminuye notablemente la capacidad de paso, puesto que la diferencia de alturas entre el material dentro y fuera del anillo, aumenta con la cantidad de fibras añadidas. Se evidencia que la variación de a/c tiene menor impacto en los resultados del ensayo J-Ring, tal como presenta la Figura 12.

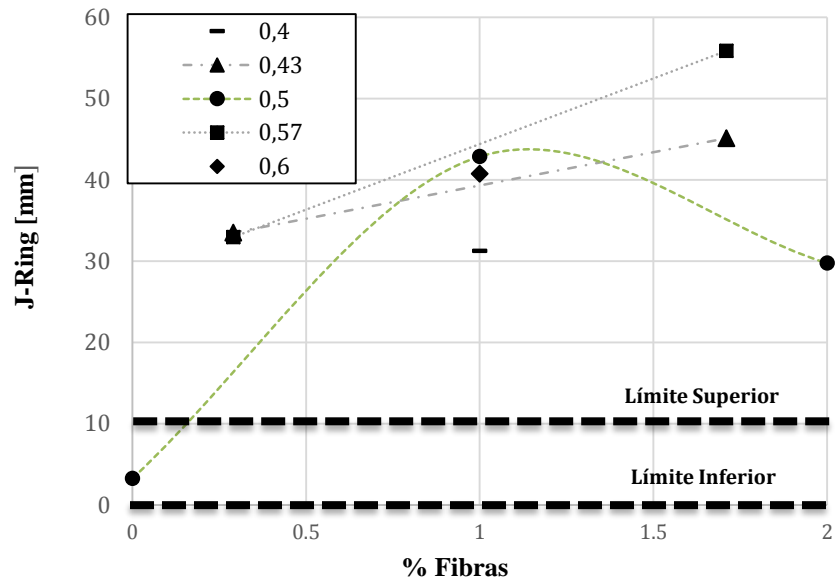


Figura 12. Resultados del J-Ring vs. % Fibras.
Fuente: Autores.

Con respecto a la prueba L-Box, únicamente fue posible registrar resultados para los puntos con porcentajes de fibra menores a 1%. Esto debido en mayores cantidades, se presentaba una obstrucción en el equipo lo que impedía el paso del material e imposibilitaba la realización de la prueba [29] . Este fenómeno se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Obstrucción de fibras en L-Box.
Fuente: Autores.

Los resultados presentados anteriormente sugieren que la incorporación de fibras en el CAC afecta el comportamiento en estado fresco del material, sin embargo, se realizó un análisis reológico para caracterizar de forma cuidadosa los efectos de a/c y $\%F$ en el comportamiento en estado fresco de las mezclas de CACRFA.

3.2. ENSAYO DE REOLOGÍA

De las pruebas realizadas en el reómetro ICAR, se obtuvieron valores del esfuerzo de fluencia estático, viscosidad plástica y factor de correlación al modelo de Bingham. En la Tabla 6 se presentan los resultados promedio de estos.

Tabla 6. Resultados promedio obtenidos del reómetro.

Punto (a/c – %F)	Esfuerzo de Fluencia Estático [Pa]	Viscosidad Plástica [Pa·s]	Factor de correlación [R ²]
P1 (0.40 – 1.00)	860.70	153.50	0.94
P2 (0.43 – 1.71)	1385.35	318.35	0.99
P3 (0.50 – 2.00)	4164.90	289.40	0.99
P4 (0.57 – 1.71)	2280.55	256.20	1.00
P5 (0.60 – 1.00)	477.80	119.85	1.00
P6 (0.57 – 0.29)	284.10	152.65	1.00
P7 (0.50 – 0.00)	168.90	190.10	1.00
P8 (0.43 – 0.29)	656.75	294.15	0.99
P9 (0.50 – 1.00)	818.80	302.82	0.99

Fuente: Autores.

El resultado del factor de correlación indica que el comportamiento de curva de las mezclas se ajusta al modelo visco-plástico lineal de Bingham.

Con el fin de cuantificar el nivel de incidencia del porcentaje de fibras y la relación agua cemento sobre la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia estático, se analizan las superficies de respuesta a través de la metodología ANOVA.

Se estableció un nivel de significancia estadístico $\alpha = 0.10$. La Tabla 7 muestra los resultados del análisis de varianza llevado a cabo en el software *Minitab V.16*[®] para la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia estático. Para garantizar la validez del análisis estadístico ANOVA y la metodología de superficie de respuesta empleados, se hizo necesario estabilizar los datos obtenidos para el esfuerzo de fluencia estático. Mediante un proceso iterativo se determinó que los datos cumplían satisfactoriamente los supuestos del ANOVA al ser estabilizados con la función logaritmo base 10 (Log_{10}).

Tabla 7. Análisis ANOVA *Minitab* V.16®. Modelo no depurado de los factores.

Parámetro	Término		Valor P	Significancia
Viscosidad Plástica	Lineal	a/c	0.23	No
		%F	0.20	No
	Cuadrado	a/c · a/c	0.02	Sí
		%F · %F	0.59	No
	Bilineal	a/c · %F	0.59	No
	Factor Predictivo			0.00%
Log10 Esfuerzo de Fluencia Estático	Lineal	a/c	0.38	No
		%F	0.00	Sí
	Cuadrado	a/c · a/c	0.97	No
		%F · %F	0.43	No
	Bilineal	a/c · %F	0.06	Sí
	Factor Predictivo			65.60%

Fuente: Autores.

Dado que algunos términos del modelo completo de superficie de respuesta no fueron estadísticamente significativos, se genera un modelo depurado, cuyos resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Análisis ANOVA *Minitab* V.16®. Modelo depurado de los factores.

Parámetro	Término		Valor P	Significancia
Viscosidad Plástica	Lineal	a/c	0.22	No
	Cuadrado	a/c · a/c	0.02	Sí
	Factor Predictivo			7.82%
Log10 Esfuerzo de Fluencia Estático	Lineal	a/c	0.37	No
		%F	0.00	Sí
	Bilineal	a/c · %F	0.05	Sí
	Factor Predictivo			70.30%

Fuente: Autores.

La gráfica de superficie de respuesta y la ecuación del modelo depurado de la viscosidad plástica se presentan en la Figura 14 y en la Ecuación 2.

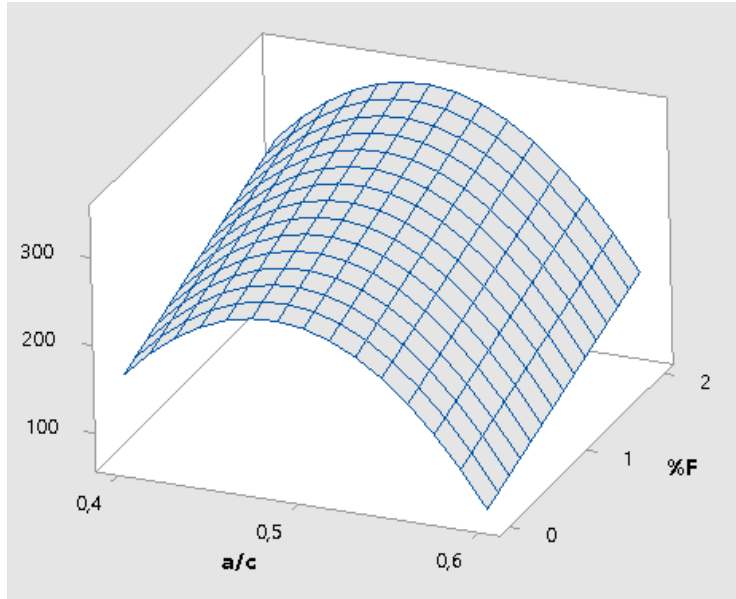


Figura 14. Superficie de respuesta del modelo depurado de la viscosidad plástica (μ).
Fuente: Autores.

$$\mu = -2704 + 12429 a/c - 12873 a/c^2 \text{ [Pa}\cdot\text{s]} \quad (2)$$

La gráfica de superficie de respuesta y la ecuación del modelo depurado para el Log_{10} del esfuerzo de fluencia estático se presentan en la Figura 15 y la Ecuación 3.

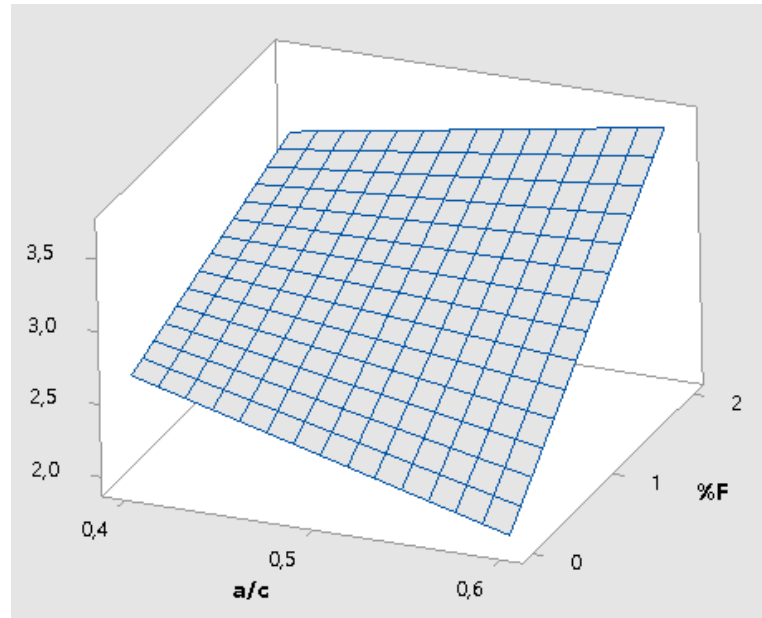


Figura 15. Superficie de respuesta del modelo depurado para el Log_{10} del esfuerzo de fluencia estático (τ_0).

Fuente: Autores.

$$\text{Log}_{10} \tau_0 = 4.041 - 3.46 a/c - 0.842\%F + 2,83 a/c \cdot \%F \quad (3)$$

En los resultados consignados en la Tabla 8 se aprecia que la viscosidad plástica se ve afectada únicamente por la relación agua cemento de forma no lineal. La capacidad de predicción de este modelo no es suficiente para entrever un posible valor máximo de la viscosidad plástica a pesar que se percibe curvatura en el modelo.

En contraste, para el esfuerzo de fluencia estático, la interacción bilineal de los factores demuestra significancia estadística, por lo cual, tanto la relación agua cemento, como el porcentaje de fibras, afectan la cantidad de esfuerzo de fluencia estático en las mezclas de CACRFA. Un alto esfuerzo de fluencia estático es deseable para disminuir la presión lateral en el encofrado y aumentar la resistencia

a la segregación [30], efecto que según el modelo depurado se logra a través del incremento conjunto del porcentaje de fibras, y de la relación agua cemento.

Para garantizar la validez del análisis presentado, se revisaron los supuestos de ANOVA sobre los residuales de los modelos depurados. Este análisis se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Verificación de los supuestos de ANOVA.

Parámetro	Test Estadístico ($\alpha = 0.1$)				
	Kolmogorov –Smirnov	Barlett		Durbin – Watson	
Viscosidad Plástica	P = 0.15	Estadístico	4.25	Estadístico	1.56
	Se acepta la Ho	P=	0.83	dL= 1.22	dU=1.55
	La distribución es normal	Se acepta la Ho	Las varianzas son iguales	Las observaciones son independientes	
Log₁₀ Esfuerzo de fluencia estático	P = 0.15	Estadístico	8.86	Estadístico	1.86
	Se acepta la Ho	P=	0.35	dL= 1.22	dU=1.55
	La distribución es normal	Se acepta la Ho	Las varianzas son iguales	Las observaciones son independientes	

Fuente: Autores.

3.3. ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO

Los resultados promedio de las pruebas a compresión para las 26 mezclas ensayadas, se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados promedio obtenidos de resistencia a compresión a los 7 días.

Punto (a/c – %F)	Resistencia [MPa]
P1 (0.40 – 1.00)	23.49
P2 (0.43 – 1.71)	24.05
P3 (0.50 – 2.00)	23.73
P4 (0.57 – 1.71)	15.17
P5 (0.60 – 1.00)	14.32
P6 (0.57 – 0.29)	16.87
P7 (0.50 – 0.00)	19.77
P8 (0.43 – 0.29)	23.87
P9 (0.50 – 1.00)	20.01

Fuente: Autores.

Se realizó un análisis de superficie de respuesta para la resistencia a compresión simple a la edad de 7 días, con la intención de establecer la incidencia de los factores estudiados (%F y a/c) sobre la resistencia a compresión de las mezclas de CACRFA. En la Tabla 11 se consignan los resultados obtenidos del análisis de varianzas ANOVA ejecutado en el software *Minitab* V.16® para un nivel de significancia del 10%.

Tabla 11. Análisis ANOVA *Minitab* V.16®. Modelo no depurado de la compresión.

Parámetro	Término	Valor P	Significancia	
Resistencia compresión 7 días	Lineal	a/c	0.00	Sí
		%F	0.36	No
	Cuadrado	a/c · a/c	0.29	No
		%F · %F	0.19	No
	Bilineal	a/c · %F	0.38	No
Factor Predictivo		47.61%		

Fuente: Autores.

Como se puede observar, el término lineal correspondiente a la relación agua cemento es el único cuyo valor P resulta estadísticamente significativo, por tanto, de los dos factores estudiados, la relación agua cemento es el único que afecta la resistencia a la compresión del CACRFA. Los resultados obtenidos soportan lo concluido en otras investigaciones [31], existiendo una relación inversamente proporcional entre la relación agua cemento y la resistencia a la compresión en mezclas de CACRFA. En la Tabla 12 se presenta el análisis del modelo depurado.

Tabla 12. Análisis ANOVA *Minitab* V.16®. (Ajustado). Modelo depurado de la compresión.

Parámetro	Término		Valor P	Significancia
Resistencia compresión 7 días	Lineal	a/c	0.00	Si
	Factor Predictivo			57.60%

Fuente: Autores.

Se muestra la superficie de respuesta del modelo depurado para la resistencia a compresión en la Figura 16. De este modelo se obtiene la Ecuación 4.

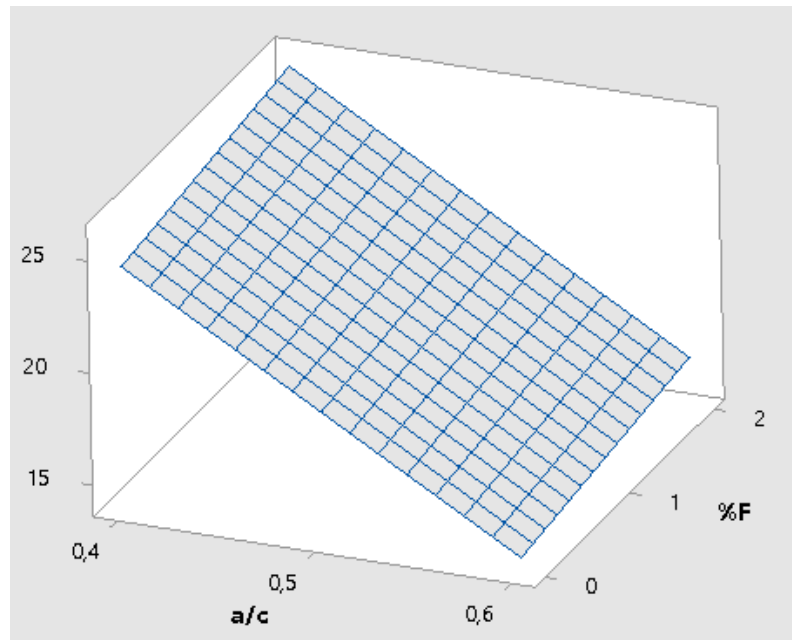


Figura 16. Superficie de respuesta del modelo depurado para la resistencia a compresión a 7 días ($f'_{cr 7}$).
Fuente: Autores.

$$f'_{cr 7} = 45,6 - 50,99 a/c \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

La Tabla 13 consigna la verificación de supuestos de ANOVA con el fin de validar el modelo resultante del análisis planteado para la resistencia a compresión.

Tabla 13. Verificación de supuestos de ANOVA.

Parámetro	Test Estadístico ($\alpha = 0.1$)				
	Kolmogorov -Smirnov	Barlett	Durbin - Watson		
Resistencia compresión 7 días	P = 0.15	Estadístico 4.72 P = 0.79	Estadístico 2.15 dL= 1.22 dU=1.55		
	Se acepta la Ho	Se acepta la Ho	Se acepta la Ho		
	Distribución normal	Varianzas Iguales	Observaciones independientes		

Fuente: Autores.

4. CONCLUSIONES

El presente proyecto de investigación estudió mezclas de concreto auto-compactante reforzado con fibras de acero, con dominios de relación agua cemento de 0.4 a 0.6 y porcentaje de fibras de 0.0% a 2.0% (fracción del volumen total de la mezcla), mediante un diseño estadístico multi-variable del tipo central compuesto desde puntos axiales basado en un factorial 2^k con puntos al centro conjunto a la metodología de superficie de respuesta y a un análisis ANOVA, utilizando un nivel de significancia de 0.10. Con base en los resultados obtenidos de ensayos en estado fresco, reología y resistencia a la compresión a la edad de 7 días, es posible concluir que:

La adición de fibras al concreto auto-compactante produce una disminución en la fluidez de las mezclas, afectando la capacidad de llenado y de paso a través de obstáculos, teniendo en cuenta los límites propuestos por el EFNARC.

Se pueden obtener las propiedades reológicas, viscosidad plástica y esfuerzo de fluencia estático, de las mezclas de concreto auto-compactantes reforzado con fibras de acero a partir de ensayos en el reómetro como se muestran la Tabla 6.

Es posible modelar satisfactoriamente el comportamiento reológico de las mezclas ensayadas de concreto auto-compactante reforzado con fibras de acero, utilizando el modelo visco-plástico lineal de Bingham. Esto debido a que se obtuvieron factores de correlación R^2 cercanos a 1, como se muestra en la Tabla 6.

La relación agua cemento incide de forma no lineal en la magnitud de la viscosidad plástica. Debido a la baja capacidad predictiva del análisis estadístico correspondiente, es necesario hacer estudios con dominios más amplios e intervalos más cortos entre cada punto de los factores, esto con el fin de caracterizar de manera más precisa la viscosidad plástica en función de los factores estudiados.

La relación agua cemento incide de forma lineal e inversamente proporcional en la magnitud de la resistencia a la compresión para una edad de 7 días.

La interacción entre la relación agua cemento y cantidad de fibras de acero incide de forma no lineal en la magnitud del esfuerzo de fluencia estático, resultando en un aumento de este parámetro cuando ambos factores se incrementan.

Para los dominios planteados en esta investigación el factor cantidad de fibras de acero no es estadísticamente significativo sobre la magnitud de los parámetros: viscosidad plástica y resistencia a la compresión a la edad de 7 días.

REFERENCIAS

- [1] ACI Commmittee 544, «State of the art report on FiBer Reinforced Concrete,» ACI544, Reno, Nevada., 2002.
- [2] R. K. Kunieda M, «Recent Progress on HPFRCC in Japan,» *J Adv Concr Tech*, vol. 4, nº 1, pp. 19-33, 2006.
- [3] L. V. C. Li Mo, «Rheology, fiber dispersion, and robust properties of Engineered Cementitious Composites,» *Materials and Structures*, vol. 46, pp. 405-420, 2012.
- [4] M. R. C. Antonio Domingues de Figueiredo, «Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced concrete using Slump and Ve-Be Test,» *Materials Research*, vol. 18, nº 6, pp. 1284-1290, 2015.
- [5] F. AD, Concreto reforzado con fibras, Tesis de docencia., Sao Paulo: Universidad de Sao Paulo, 2011.
- [6] G. M. Remigijus Salna, «Influence of fiber shape on the strength of steel fiber reinforced concrete,» de *Modern Building Materials, Structures and Techniques, The 10th International Conference*, Vilnius, Lithuania, 2010.
- [7] F. D. Koehler E, «Aggregates in Self-Consolidaing Concrete,» The University of Texas at Austin, Texas, 2007.
- [8] B. Persson, «A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete.,» *Cement*

Concrete, vol. 31, pp. 193-198, 2001.

- [9] European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, «The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification,» EFNARC-05, 2005.
- [10] S. A. T. Raharjo D, «Mixed concrete optimization using Fly Ash, Silica Fume and iron Slag on the SCC's compressive strength,» *Procedia Engineering*, vol. 54, pp. 827-839, 2013.
- [11] V. R. B. Krishna Rao, «Steel Fiber Reinforced Self-Compacting concrete incorporating class F Fly Ash,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, nº 9, pp. 4936-4943, 2012.
- [12] O. M. Ozawa Kazumasa, «Proceedings of the international workshop on self-compacting concrete,» de *International workshop on self-compacting concrete*, Tokyo, Japan, 1999.
- [13] A. Y. I. O. Y. Mustafa Sahmaran, «Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete,» *Building and Environment*, vol. 40, pp. 1672-1677, 2005.
- [14] W. J. Wallevik O, «Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes.,» *Cement and Concrete Research*, vol. 41, nº 12, pp. 1279-1288, 2011.
- [15] A. P., «Reología del Concreto,» de *Congreso Nacional de Ingeniería Perú*, Lima, Perú., 2003.

- [16] V. R. D. S. G. Dimitri F, «Evaluation of Time Independent Rheological Models Applicable to Fresh Self-Compacting Concrete.,» *Applied Rheology*, vol. 17, n° 5, 2007.
- [17] ASTM C150, «Standard Specification for Portland Cement,» de *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, 2007, pp. 1-8.
- [18] ASTM International, «ASTM C128 Standard Test Method for Relative (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate,» ASTM, 2015.
- [19] ASTM International, «ASTM C136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,» de *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, 2006, pp. 3-7.
- [20] M. D. C, *Diseño y análisis de experimentos*, 2da Edición, Limusa Wiley, 1995.
- [21] ACI 211.1, «Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.,» de *ACI Manual of Concrete Practice*, 2007.
- [22] N. O. M. R. S. & A. A. Puthipad, «Enhanced entrainment of fine air bubbles in self-compacting concrete with high volume of fly ash using defoaming agent for improved entrained air stability and higher aggregate content.,» *Construction and Building Materials*, vol. 144, pp. 1-12, 2017.
- [23] T. Y. Y. & W. Z. Meng, «Effect of nano -CaCO₃ slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash.,»

Composites Part B: Engineering, vol. 117, pp. 124-129, 2017.

- [24] K. P. B. E. L. D. a. K. T. Roberts F.L., *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.*, vol. 59, Lanham, MD, 1996.
- [25] 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.
- [26] S. A. Abibasheer Basheerudeen, «Simplified Mix Design Procedures for Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete,» *Engineering Journal*, vol. 19, n° 1, 2014.
- [27] ASTM C1621, «Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring,» de *Annual Book of ASTM Standard*, ASTM, 2014.
- [28] ASTM C39, «Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,» de *American Society for Testing and Materials*, 2016, pp. 1-7.
- [29] S. Z. G.P.A.G van Zijl, «The Impact of Rheology on the Mechanical Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete,» *HPFRCC*, vol. 6, pp. 59-66, 2012.
- [30] G. C. J. G. Michal P. Drewniok, «Influence of the rheological properties of SCC on the formwork pressure,» *Procedia Engineering 192*, pp. 124-129, 2017.

- [31] W. B. T. D. & M. T. Osman Gencil, «Workability and Mechanical Performance of Steel Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete with Fly Ash,» *Composite Interfaces*, vol. 12, nº 2, pp. 169-184, 2011.
- [32] P. T., «Influencia de las Fibras de Acero en las Propiedades Reológicas del concreto Autocompactante (CAC),» *BFT International, Edición Española*, vol. 1, pp. 23-27, 2013.
- [33] G. G. C. J. Gallo Lina P, «Comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306 sometido a esfuerzos de compresión,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 23, nº 1, pp. 117-133, 2013.
- [34] G. S. L., *Influencia de los componentes del concreto reforzado con fibras en sus propiedades mecánicas*, Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 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.

M. D. C, *Diseño y análisis de experimentos*, 2da Edición, Limusa Wiley, 1995.