

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO REOLÓGICO DE CONCRETOS  
AUTOCOMPACTANTES INCORPORANDO ESCORIA METÁLICA COMO  
REEMPLAZO DE AGREGADO FINO**

**YULIET PAOLA FIGUEROA ALDANA**

**ERICK ALFONSO TORRES CHACHÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2017**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO REOLÓGICO DE CONCRETOS  
AUTOCOMPACTANTES INCORPORANDO ESCORIA METÁLICA COMO  
REEMPLAZO DE AGREGADO FINO**

**YULIET PAOLA FIGUEROA ALDANA**

**ERICK ALFONSO TORRES CHACHÓN**

**Trabajo de grado como requisito para optar por el título de  
INGENIERO CIVIL**

**Director**

**LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ**

**Ing. MSc. PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

*A Dios por ser mi mayor fuente de energía en este proceso, por darme la inteligencia, paciencia y sabiduría para cumplir mi meta y afrontar los inconvenientes del día a día y por permitirme estar rodeada de muchas personas que me hacen feliz.*

*A mis padres **YOLANDA ALDANA SANCHEZ** y **CHARLES GARCIA NIEVES** por apoyarme en cada etapa de este proceso, gracias por todos los sacrificios que hicieron por hacer realidad este propósito, por dar todo por mí y por el amor que me han dado incondicionalmente; Este logro es para ustedes.*

*A mi madre **OMAIRA ALDANA**, mis tías **DELFINA ALDANA** y **MARIA ALDANA**, mi hermano **SMITH ALDANA**, por su amor, sus consejos y por su apoyo en cada momento de mi vida.*

*A mis nonos **JOSE CADENA** y **MARIA SANCHEZ**, y a **EDGAR CADENA** por ser mi mano derecha y ser con quienes siempre podía contar, por todo su amor.*

*a mi nono **TOMAS ANASTACIO GARCIA** por brindarme lo mejor de él y gracias porque en cada momento que estuviste junto a mí me hiciste sentir que me amabas y que siempre creíste en mí, y sé que desde el cielo me apoyaste y lo seguirás haciendo.*

*A **DIEGO BENITEZ** por ser mi amigo, por apoyarme en los buenos y malos momentos, y por apostar por mí. Y a todas las personas que de alguna manera me apoyaron*

**YULIET PAOLA FIGUEROA ALDANA.**

## **DEDICATORIA**

*Me gustaría expresar mi más sincera línea en agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en esta etapa de mi vida como lo es el pregrado, pero sobre todo a Dios quien me dio fuerzas para continuar día a día construyendo mí futuro.*

*A la universidad Industrial de Santander, alma mater, por permitir desarrollar mis estudios de formación profesional.*

*Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibido por mis padres, abuelos y demás familiares, quienes me han apoyado en trascurso de los años a cumplir mis metas y de haber culminado con éxito esta etapa.*

*también a mí director de proyecto de grado el ingeniero Luis Eduardo Zapata por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa, pero sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo del desarrollo de esta.*

*Por último, a mis amigos y compañeros del proceso de formación académica, quienes aportaron en este trayecto alegrías, gratos momentos y experiencias vividas.*

*A todos ellos es a quienes les debo por su incondicional apoyo, muchas gracias.*

**ERICK ALFONSO TORRES CHACÓN**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	14
1. METODOLOGÍA .....	16
1.1. PRELIMINARES.....	16
1.1.1. Revisión bibliográfica .....	16
1.1.2. Propiedades de los materiales .....	16
1.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	21
1.2.1. Diseño de mezcla .....	21
1.2.2. Proceso de mezclado .....	26
1.2.3. Método de ensayo.....	26
1.2.4. Estudio reológico .....	35
1.2.5. Metodología estadística .....	40
1.2.6. Control resistencia a la compresión .....	42
2. ANALISIS DE RESULTADOS .....	43
3. CONCLUSIONES .....	49
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA.....	50

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Análisis de tamices de agregado fino con límites de la NTC 174.....	17
Figura 2. Análisis de tamices de agregado grueso con límites de la NTC 174.....	17
Figura 3. Análisis de tamices de escoria metálica con límites de la NTC 174.....	18
Figura 4. Ejemplo de las fracciones volumétricas de los materiales usados en el CAC comparadas con las del CC .....	23
Figura 5. Combinaciones a/c y EM.....	26
Figura 6. Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.4 IS=0% .....	29
Figura 7. Ensayo J-ring test a/c=0.4 IS=0% .....	30
Figura 8. Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.4 IS=20% .....	30
Figura 9. Ensayo J-ring test a/c=0.4 IS=20% .....	31
Figura 10. Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.4 IS=40% .....	31
Figura 11. Ensayo J-ring test a/c=0.4 IS=40% .....	32
Figura 12. Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.6 IS=0% .....	32
Figura 13. Ensayo J-ring test a/c=0.6 IS=0% .....	33
Figura 14. Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.6 IS=20% .....	33
Figura 15. Ensayo J-ring test a/c=0.6 IS=20% .....	34
Figura 16. Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.6 IS=40% .....	34

Figura 17. Ensayo J-ring test $a/c=0.6$ $IS=40\%$ .....	35
Figura 18. Combinaciones para estudio reológico .....	35
Figura 19. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.5$ $IS=20\%$ ) .....	36
Figura 20. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.6$ $IS=40\%$ ) .....	37
Figura 21. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.6$ $IS=0\%$ ) .....	37
Figura 22. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.4$ $IS=40\%$ ) .....	38
Figura 23. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.4$ $IS=0\%$ ) .....	38
Figura 24. Slump flow test vs. escoria metálica según $a/c$ .....	44
Figura 25. T500[mm] vs. escoria metálica según $a/c$ .....	44
Figura 26. J-ring [mm] vs. escoria metálica según $a/c$ .....	45
Figura 27 Grafica de la Viscosidad plastica vs. Relación $a/c$ y reemplazo de escoria metálica .....	46
Figura 28. Grafica del esfuerzo de fluencia vs. Relación agua/cemento y porcentaje de escoria metálica .....	46
Figura 29. Resistencia a compresión a 7 y 28 días de probetas con relación $a/c$ 0.6.....	47
Figura 30. Resistencia a compresión a 7 y 28 días de probetas con relación $a/c$ 0.4.....	48

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades químicas de la escoria metálica.....	19
Tabla 2. Propiedades químicas del cemento .....	20
Tabla 3. Propiedades químicas de la ceniza .....	21
Tabla 4. Diseños de mezcla de concreto convencional .....	22
Tabla 5. Diseños de mezcla de concreto autocompactante .....	24
Tabla 6. Proporciones de remplazos de escoria metálica por agregado fino .....	25
Tabla 7. Resultados de ensayos en estado fresco del concreto autocompactante ..	27
Tabla 8. Resultados promedios de ensayos en estado fresco del concreto autocompactante .....	29
Tabla 9. Viscosidad plástica y fluencia de CAC en estado fresco .....	39
Tabla 10. Resultados del Diseño Factorial .....	41
Tabla 11. Resistencia a la compresión .....	42
Tabla 12. Requisitos de ensayos para CAC .....	43

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO REOLÓGICO DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES INCORPORANDO ESCORIA METÁLICA COMO REEMPLAZO DE AGREGADO FINO. \*

**AUTORES:** YULIET PAOLA FIGUEROA ALDANA  
ERICK ALFONSO TORRES CHACÓN\*\*

**PALABRAS CLAVES:** ESCORIA METÁLICA, CONCRETO AUTOCOMPACTANTE, REOLOGÍA.

### DESCRIPCIÓN:

En la actualidad la industria de la construcción está implementando cada vez más el uso del concreto autocompactante para mejorar aspectos constructivos en edificaciones, puesto que, éste ofrece varias ventajas en aspectos técnicos, económicos y ambientales. El concreto autocompactante en estado fresco cuando es adecuadamente diseñado fluye con facilidad bajo su propio peso evitando las obstrucciones para llenar completamente el encofrado y autocompacta sin ninguna segregación. Aún existen varios interrogantes por resolver en su producción, los cuales se pueden explorar por medio de investigación. En el presente caso se propone estudiar una de dichas falencias que consiste en el desempeño reológico incorporando escoria metálica como remplazo de agregado fino. La industria del sector metalúrgico produce anualmente grandes cantidades de desechos sólidos que representan una problemática ambiental para el país. Entre estos residuos se encuentra la escoria metálica (EM), La necesidad de eliminar este tipo de residuos genera no solo gastos de transporte, transformación, almacenaje y disposición final, sino que además a largo plazo producirá un impacto en el medio ambiente por degradación ambiental

En este estudio se observó que el aumento de la escoria metálica (0%, 20% y 40%) y la relación agua cemento (0.4 y 0.6) no produce efectos de curvatura en las propiedades reológicas (viscosidad plástica y esfuerzo de fluencia) de las mezclas de concreto autocompactante.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ingeniero Civil. MSc. PhD.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF THE REOLOGICAL PERFORMANCE OF AUTOCOMPACTANT CONCRETES INCORPORATING IRON SLAG AS REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE. \*

**AUTHORS:** YULIET PAOLA FIGUEROA ALDANA  
ERICK ALFONSO TORRES CHACÓN\*\*

**KEYWORDS:** IRON SLAG, SELF – COMPACTING CONCRETE, RHEOLOGY, VISCOSITY.

### DESCRIPTION:

Currently the construction industry is increasingly implementing the use of self-compacting concrete to improve constructive aspects in buildings, since it offers several advantages in technical, economic and environmental aspects. Self-compacting concrete when properly designed flows easily under its own weight avoiding blockages to completely fill formwork and self-compacting without any segregation. There are still several questions to be solved in its production, which can be explored through research. In the present case, it is proposed to study one of these shortcomings that consists of the rheological performance incorporating metallic slag as a replacement of fine aggregate. The metallurgical industry annually produces large quantities of solid waste that represent an environmental problem for the country. Among these waste is iron slag (EM), the need to eliminate this type of waste generated not only costs of transport, processing, storage and final disposal, but it also long-term it will produce an impact on the environment by environmental degradation

In this study it was observed that the increase of the metallic slag (0%, 20% and 40%) and the ratio of cement water (0.4 and 0.6) did not produce curvature effects on the rheological properties (plastic viscosity and yield strength) of The mixtures self-compacting concrete.

---

\* Graduation Project

\*\* Faculty of Physics-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Civil Engineer. MSc. PhD.

## INTRODUCCIÓN

La industria del sector metalúrgico produce anualmente grandes cantidades de desechos sólidos que representan una problemática ambiental para el país. Entre estos residuos se encuentra la escoria metálica (EM), es un fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral que se extrae de diversos procesos de mecanizado; para su comercialización es pasada por procesos de triturado para facilitar su transporte. La necesidad de eliminar este tipo de residuos genera no solo gastos de transporte, transformación, almacenaje y disposición final, sino que además a largo plazo producirá un impacto en el medio ambiente por degradación ambiental [1]. En la actualidad la industria de la construcción se está implementando cada vez más el uso del concreto autocompactante (CAC) para mejorar aspectos constructivos, ya que este ofrece varias ventajas en aspectos técnicos, económicos y ambientales. El CAC en estado fresco cuando es adecuadamente diseñado, fluye con facilidad bajo su propio peso evitando las obstrucciones para llenar completamente el encofrado y autocompacta sin ninguna segregación [2]. Pese a las ventajas técnicas, económicas y ambientales antes mencionadas, aún existen varios interrogantes por resolver en la producción del CAC los cuales se pueden explorar por medio de investigación en el desempeño de sus propiedades, una de estas es el comportamiento reológico de la mezcla CAC incorporando EM como remplazo de agregado fino.

La reología se puede definir: “*ciencia del flujo y deformación de la materia*” [3]. Esta ciencia posee gran importancia, ya que las propiedades reológicas del concreto definen no solo su estado fresco sino propiedades del estado endurecido como viscosidad plástica,  $\mu$ , y el esfuerzo de fluencia,  $\tau_0$ . El CAC fresco se puede considerar como un material con potencial a fluir bajo la acción de esfuerzos cortantes,  $\tau$ . En este sentido, el comportamiento del flujo del concreto puede ser

representado por lo que se conoce como el modelo de Bingham:  $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$  ; donde,  $\dot{\gamma}$  es la tasa de corte. [3]. Los parámetros  $\mu-\tau_0$  definen una *curva de flujo*, que provee una completa descripción del comportamiento reológico de las mezclas de concreto [3]. Sin embargo, en algunos casos, por ejemplo, en Bélgica y países vecinos el CAC ha demostrado un comportamiento no lineal, y por ende, desviaciones del modelo de Bingham [3].

Por otro lado, se ha encontrado que el CAC cuando incorpora EM como reemplazo al agregado fino da una mayor resistencia y durabilidad [4], pero también ha generado pérdidas de trabajabilidad medidas por el ensayo de asentamiento [5]. Por lo tanto, en el presente proyecto se plantea desarrollar diseños estadísticos multivariable proporcionando reemplazos de agregado fino por EM y variando la relación agua-cemento (a/c), con el fin de estudiar posibles efectos de comportamiento no-lineal en las propiedades reológicas de la mezcla.

# 1. METODOLOGÍA

## 1.1. Preliminares

### 1.1.1. Revisión Bibliografica

Consistio en recopilar la información requerida para abordar temas de reologia (viscosidad y fluencia), aplicaciones de la EM, diseños de mezcla utilizando ceniza volante, todo estos en CAC. La consulta teórica de los temas a tratar y la revision de investigaciones que se han realizado hasta el momento fue una constante a lo largo de todo el periodo de investigación.

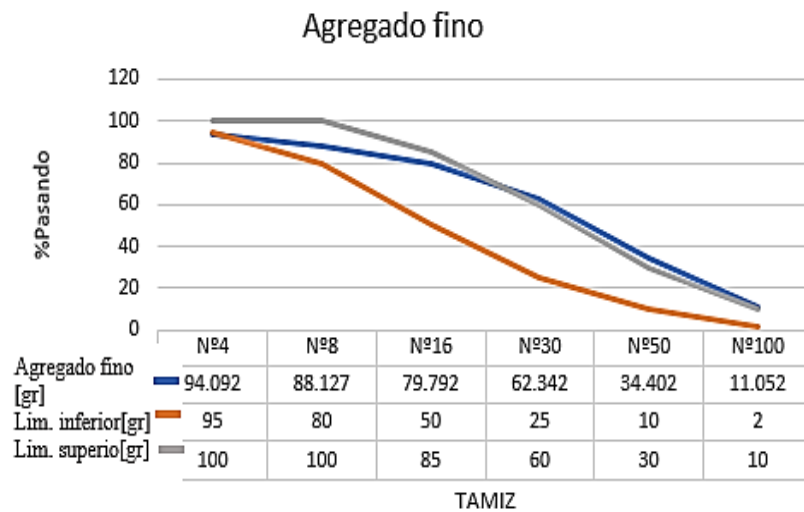
### 1.1.2. Propiedades de los Materiales

Para obtener un buen diseño de mezcla, lo primero que se debe realizar es la caracterización de los materiales (escoria metálica, arena, grava, cemento y ceniza volante) con el fin de conocer sus propiedades, para ello se utilizaron las siguientes normas: Norma Técnica Colombiana NTC. Y American Society of Testing Materials, ASTM.

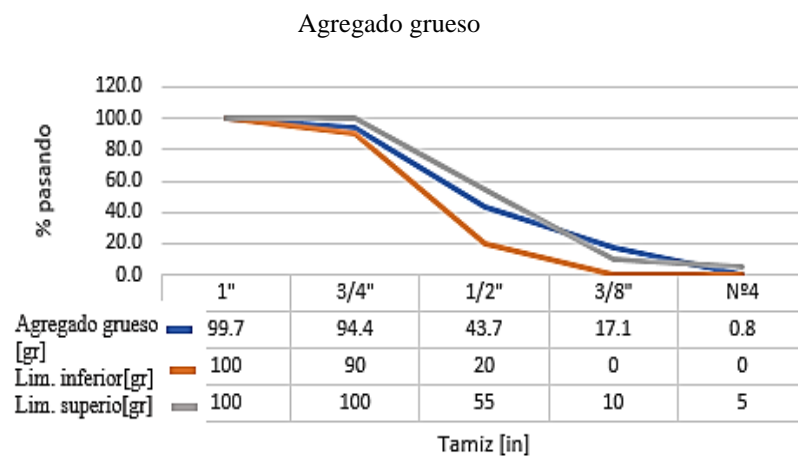
Los materiales en el estudio fueron agregado grueso (triturado), agregado fino (arena), escoria metálica (EM), cemento Cemex Tipo III, ceniza volante y agua potable. Todos los materiales fueron comercialmente disponibles, el agregado grueso con tamaño máximo nominal 19 mm, gravedad específica, peso unitario y absorción según NTC 176 equivalente ASTM C127 [6] 2.6, 1367.3 (kg/m<sup>3</sup>) y 1.6%

respectivamente, el agregado fino con gravedad específica, peso unitario, absorción según NTC 237 equivalente ASTM C128 [7] 2.7, 1351.9(kg/m<sup>3</sup>), 2.6%, y módulo de finura 2.3, la granulometría del agregado fino y agregado grueso según NTC 77 equivalente ASTM C128 [8] se muestran en las Figuras 1 y 2, respectivamente.

**Figura 1.** Análisis de tamices de agregado fino con límites de la NTC 174.

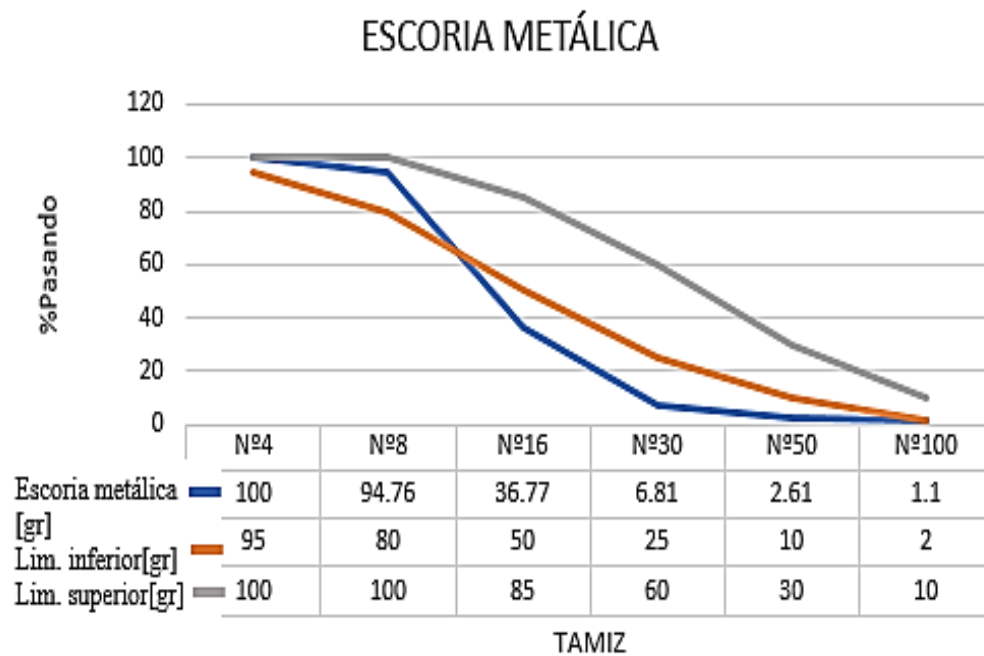


**Figura 2.** Análisis de tamices de agregado grueso con límites de la NTC 174.



Las gravedades específicas de la EM, cemento y ceniza volante son 5.7, 3.1 y 2.0, respectivamente, el módulo de finura de la EM 3.58, su granulometría y propiedades químicas se presentan en la Figura 3 y Tabla 1. El cemento empleado fue tipo III con propiedades químicas descritas en la Tabla2, la ceniza volante presenta sus propiedades en la Tabla 3. Además, se utilizó como aditivo un super-plastificante (SP) en cantidades que varían entre (1 y 3% de masa de material cementante) denominado Isoflow 8800 con un 30% de contenido de sólido y densidad específica  $1 \frac{g}{cm^3}$ .

**Figura 3.** Análisis de tamices de escoria metálica con límites de la NTC 174



**Tabla 1.** *Propiedades químicas de la escoria metálica.*

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
<b>Cristalino</b>	$Fe_3 O_4$	Magnetita	17.3%
	$Fe_3 O_4$	Magnetita	N.C
	$Si O_2$	Cuarzo	9.0%
	Fe	Hierro alto	2.4%
	$Fe O (O H)$	Lepidocrocita	2.0%
	$Na (Al Si_3 O_8)$	Albita tratada térmicamente	4.5%
	$Ti O_2$	Rutilo	1.70%
	$Cu_6 (S O_4) (O H)_{10} (H_2 O)_2$	Montetrisaita	1.1%
Total, Cristalino			38.0%
Amorfos y otros			62.0%

**Fuente:** [Laboratorio rayos X Universidad Industrial de Santander].

**Tabla 2.** *Propiedades químicas del cemento*

FASE		NOMBRE	CUANTITATIVO
<b>Cristalino</b>	$\text{Ca}_3 (\text{Si O}_4) \text{O}$	Hatruita	59.4%
	$\text{Ca} (\text{S O}_4)$	Anhidrita	5.0%
	$\text{Si O}_2$	Cuarzo	2.5%
	$\text{Fe S}_2$	Pirita	1.7%
	$\text{Ca}_2 (\text{Fe Al}_{0.9} \text{Mg}_{0.1}) \text{O}_5$	Brownmillerita	8.8%
Total, Cristalino			77.4%
Amorfos y otros			22.6%

**Fuente:** [Laboratorio rayos X Universidad Industrial de Santander].

**Tabla 3.** *Propiedades químicas de la ceniza.*

<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CENIZA PTA. FLORIDA LINEA I</b>	<b>CENIZA PTA. FLORIDA LINEA II</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	62.86	59.54
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	25.76	24.42
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	5.66	4.75
<b>CaO</b>	1.82	1.23
<b>MgO</b>	0.64	0.59
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.67	0.49
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.94	0.93
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1.36	1.33
<b>PF</b>	6.67	6.91

**Fuente:** [Planta caracolito Cemex Colombia].

## **1.2. Desarrollo Experimental**

### **1.2.1. Diseño de Mezcla**

La dosificación para los diseños de mezcla se realizarón empleando el metodo de volumen absoluto estandarizado por el Instituto del Concreto (ACI 211.1) [9], se

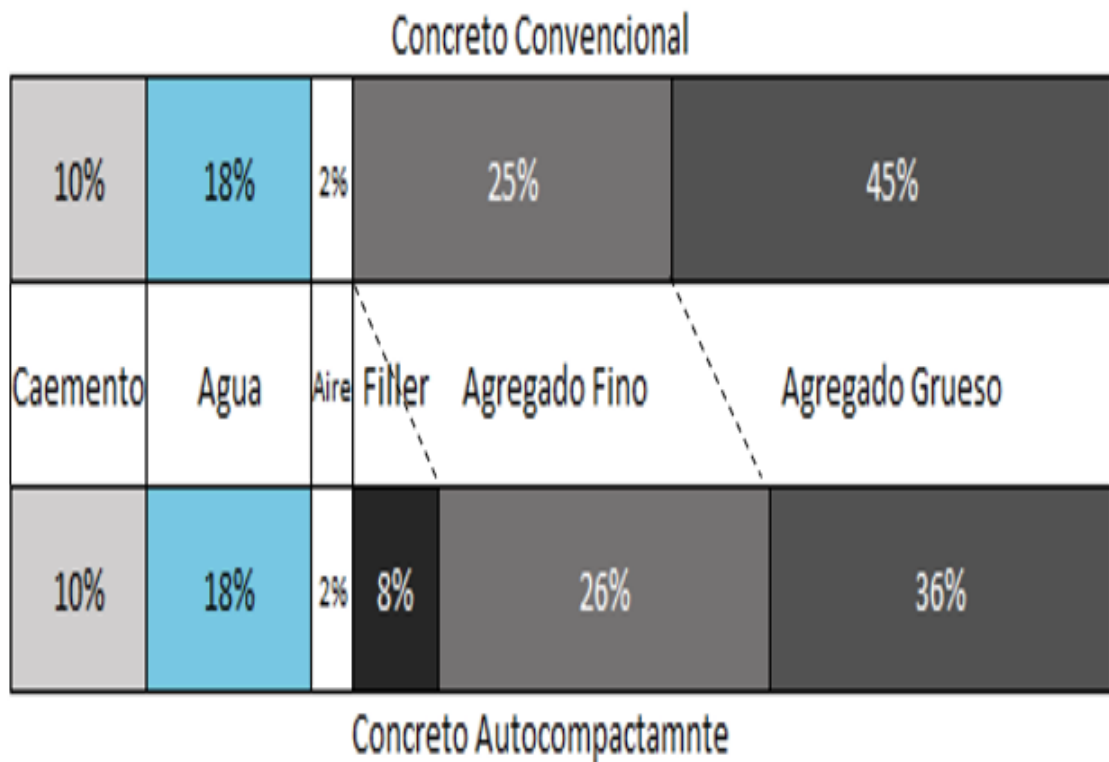
diseñó un concreto convencional (CC) con diferente relación a/c (0.4 y 0.6) para tomarlos como mezcla base (MB) Tabla 4.

**Tabla 4.** Diseños de mezcla de concreto convencional.

<b>Relación a/c</b>	0.6	0.5	0.4
<b>Agregado fino (kg/m<sup>3</sup>)</b>	743.6	743.6	608.9
<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	334.0	400.0	500.0
<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1044.0	1044.0	1044.0
<b>Agua(kg/m<sup>3</sup>)</b>	200.0	200.0	200.0
<b>SP (kg/m<sup>3</sup>)</b>	22.3	13.3	6.7

Se tomó como referencia inicial la MB para el diseño de las mezclas de CAC disminuyendo en un 6% el contenido total de agregado grueso, buscando también una relación agregado fino– agregado grueso mayor respecto a la MB (Figura 4), incluyendo una ceniza en un porcentaje del 20% en volumen de material cementante para todas las mezclas como filler. Este porcentaje de remplazo fue en la revisión bibliografica de cenizas volantes en mezclas CAC [10,11], y un SP con dosificaciones de 1%, 1.5%, 2% y 2.5% de la masa del material cementante, seleccionando las proporciones adecuadas controladas por los ensayos en estado fresco del CAC obteniendo así las proporciones presentadas en la Tabla 5, los remplazos EM por arena se presentan en la Tabla 6.

**Figura 4.** Ejemplo de las fracciones volumétricas de los materiales usados en el CAC comparadas con las del CC [12].



**Tabla 5.** Diseños de mezcla de concreto autocompactante.

<b>a/c</b>	0.6	0.5	0.4
<b>Cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	300.0	333.0	417.0
<b>Ceniza volante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	60.0	67.0	83.0
<b>agua (kg/m<sup>3</sup>)</b>	216.0	216.0	216.0
<b>Agregado grueso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	732.4	732.4	732.4
<b>Agregado fino (kg/m<sup>3</sup>)</b>	979.0	984.1	883.5
<b>SP (kg/m<sup>3</sup>)</b>	30.0	33.3	41.7

**Tabla 6.** *Proporciones de remplazos de escoria metalica por agregado fino.*

<b>a/c</b>	<b>EM</b>	<b>Agregado fino (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Escoria metálica (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.4	0%	883.5	0.0
0.4	20%	706.8	176.7
0.4	40%	530.1	353.4
0.5	20%	0.0	984.1
0.6	0%	979.0	0.0
0.6	20%	783.2	195.8
0.6	40%	587.4	391.6

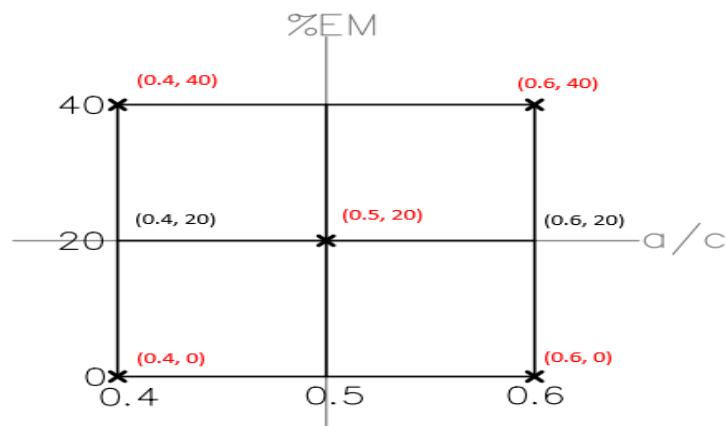
### 1.2.2. Proceso de Mezclado

Los diferentes diseños de CAC se llevaron a cabo en una mezcladora durante un tiempo total de 10 min. El interior de esta fue inicialmente humedecido con agua para evitar que este absorba el agua proporcionada para la mezcla, luego se inició el proceso de mezclado incorporando el agregado fino, escoria metálica, y el material cementicio con el 50% del agua requerida, seguido a esto se inició el mezclado, al transcurrir 1 min se adicionó el agregado grueso y el SP diluido en el agua restante continuando con el mezclado durante los restantes 9 min.

### 1.2.3. Métodos de Ensayo

El comportamiento de un CAC en estado fresco es diferentes al de un CC, puesto que fluye con facilidad bajo su propio peso evitando las obstrucciones para llenar completamente el encofrado y autocompacta sin ninguna segregación [2], como control de diseño de las combinaciones planteadas (Figura 5).

**Figura 5.** *Combinaciones a/c y EM.*



se realizaron 3 ensayos: slump test (slump flow, test-500) [13] se utiliza para evaluar el flujo libre horizontal de CAC en ausencia de obstrucciones y el J-ring test [14] consiste en evaluar la capacidad paso en medio de obstrucciones.

Cada ensayo se le realizó tres replicas y adicional un punto central (a/c=0.5 y EM=0%) con el fin de ejecutar un diseño de experimento (factorial  $2^k$ ) que permiten detectar la posible presencia de curvatura en al menos uno de los factores (a/c y EM). De estos ensayos se obtuvo resultados que se presentan en la Tabla 7 y los promedios en la Tabla 8. (Figura 6-17).

**Tabla 7.** Resultados de ensayos en estado fresco del concreto autocompactante.

a/c	%EM	SFT[mm]	T500[mm]	J-RING[mm]
0.4	0	810	4	9
0.4	0	730	6	8
0.4	0	750	8	10

0.4	20	710	5	9
0.4	20	700	6	9
0.4	20	690	10	12
0.4	40	690	7	10
0.4	40	680	8	12
0.4	40	680	11	14
0.6	0	710	3	9
0.6	0	660	5	11
0.6	0	700	10	7
0.6	20	680	5	10
0.6	20	650	10	9
0.6	20	690	14	14
0.6	40	680	4	11
0.6	40	664	12	13
0.6	40	612	20	12

**Tabla 8.** Resultados promedios de ensayos en estado fresco del concreto autocompactante.

a/c	0.4			0.5	0.6		
EM [%]	0	20	40	20	0	20	40
Slump Flow Test[mm]	763	700	683	720	690	673	652
T500mm [s]	6	7	9	6	9	10	12
Jring [mm]	9	10	12	9	11	11	12

**Figura 6** Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.4 IS=0%.



**Figura 7.** *Ensayo J-ring test a/c=0.4 IS=0% ).*



**Figura 8.** *Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.4 IS=20%.*



**Figura 9.** *Ensayo J-ring test a/c=0.4 IS=20% ).*



**Figura 10.** *Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.4 IS=40%.*



**Figura 11.** *Ensayo J-ring test a/c=0.4 IS=40% ).*



**Figura 12.** *Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.6 IS=0%.*



**Figura 13.** *Ensayo J-ring test a/c=0.6 IS=0% ).*



**Figura 14.** *Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.6 IS=20%.*



**Figura 15.** *Ensayo J-ring test a/c=0.6 IS=20% ).*



**Figura 16.** *Ensayo slump test (slump flow, test-500) a/c=0.6 IS=40%.*



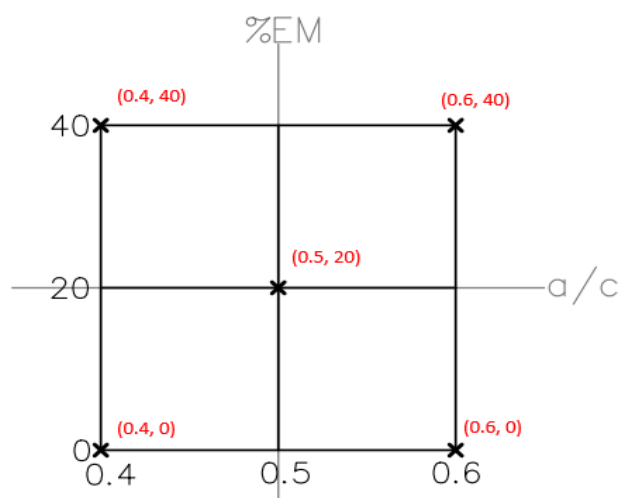
**Figura 17.** *Ensayo J-ring test a/c=0.6 IS=40% ).*



#### 1.2.4. Estudio Reológico

Para este estudio se utilizó un ICAR RHM-3000 del Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Texas en Austin. Es un instrumento robusto y portátil para medir las propiedades fundamentales de flujo (reológicas) del CAC fresco. Se realizó el ensayo a las combinaciones (Figura 18).

**Figura 18.** *Combinaciones para estudio reológico.*



Ejecutando tres réplicas por cada punto extremo, y cinco del punto central ( $a/c=0.5$  y  $EM=20\%$ ), este número de réplicas está basado en un modelo estadístico con el fin de tener una significancia en los resultados. Luego del proceso de mezclado de cada combinación se descargó el CAC desde la mezcladora a un recipiente y del recipiente al contenedor del reómetro hasta obtener el volumen necesario (25 litros) para el ensayo, luego de realizar esta prueba el software del reómetro nos arrojó las propiedades reológicas y el ajuste al modelo Bingham, en la Figura 19-23 se presenta una réplica de cada punto ensayado y en la tabla 9 todos los resultados de los ensayos.

**Figura 19.** Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.5$   $IS=20\%$  ).

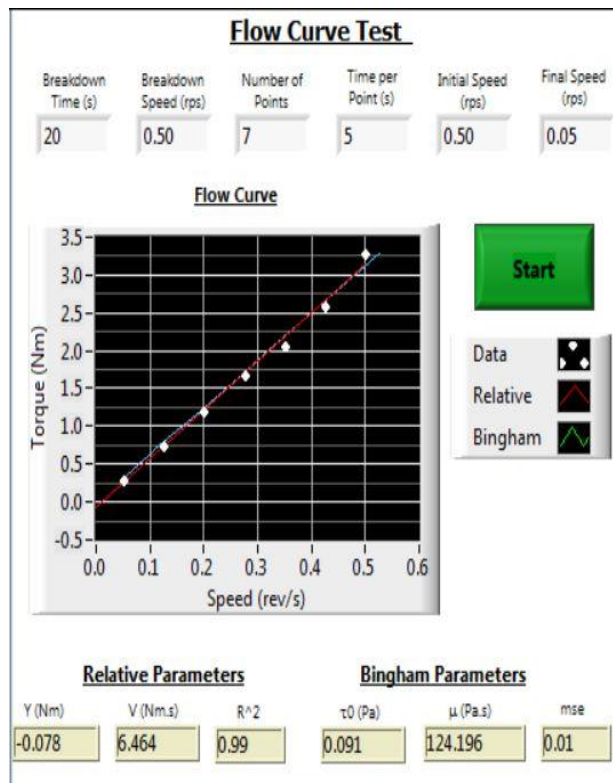


Figura 20. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.6$   $IS=40\%$  ).

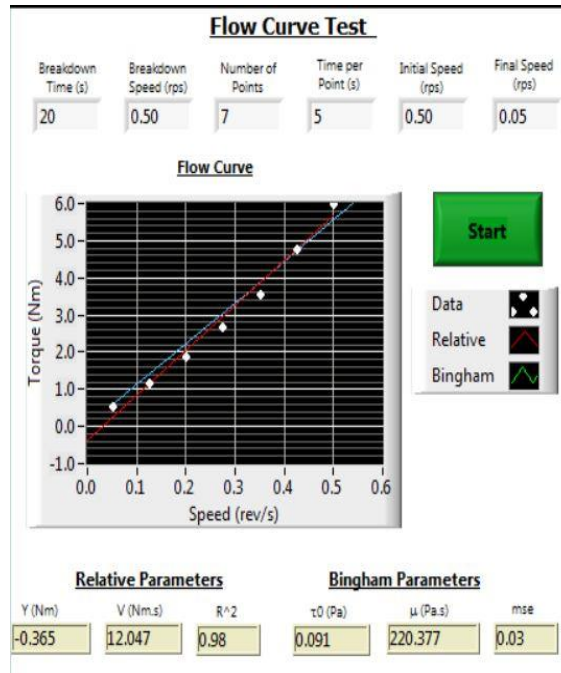


Figura 21. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.6$   $IS=0\%$  ).

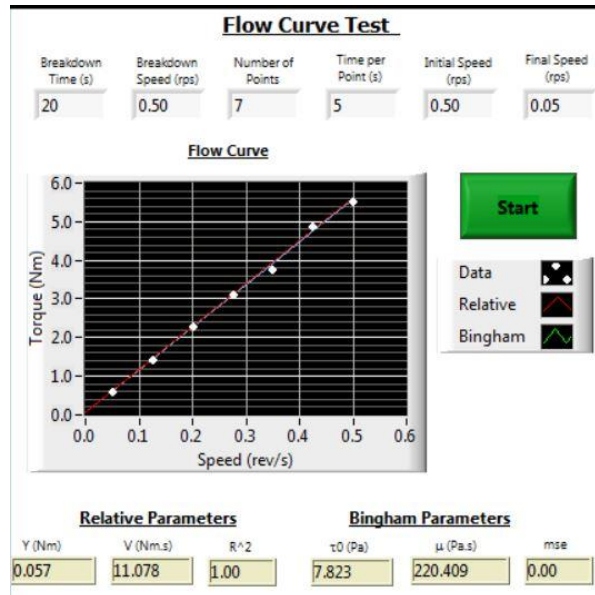


Figura 22. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.4$   $IS=40\%$  ).

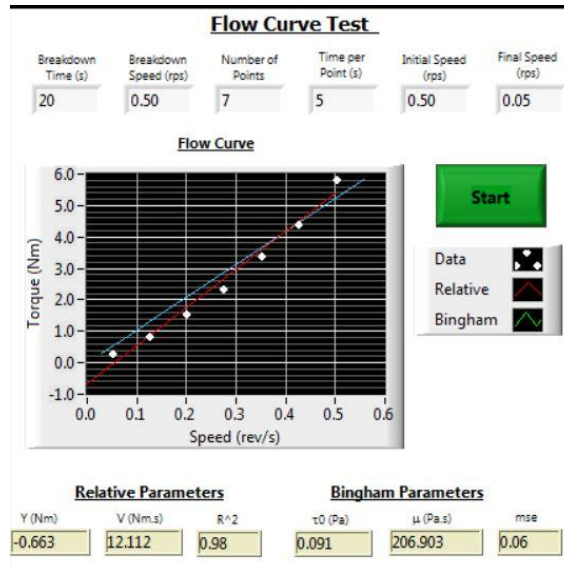
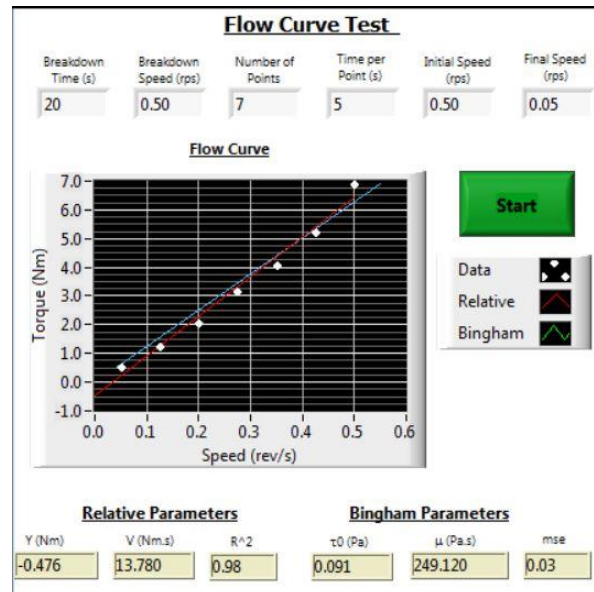


Figura 23. Modelo reológico de Bingham ( $a/c=0.4$   $IS=0\%$  ).



**Tabla 9.** *Viscosidad plastica y fluencia de CAC en estado fresco*

<b>w/b</b>	<b>%EM</b>	<b>Esfuerzo de fluencia (Pa)</b>	<b>Viscosidad (Pa.s)</b>	<b>Coefficiente de determinación</b>
0.5	20	0.091	116.275	0.98
0.6	0	0.091	205.7	0.98
0.4	0	0.091	522.9	0.98
0.6	0	7.823	220.4	1.00
0.4	0	0.091	249.8	0.98
0.4	40	0.091	371.4	0.99
0.5	20	0.091	122.17	0.99
0.6	40	0.091	220.4	0.98

0.4	0	0.091	249.12	0.99
0.4	40	0.091	193.3	0.98
0.5	20	0.091	280.4	1.00
0.5	20	0.091	124.2	0.99
0.4	40	0.091	206.9	0.98
0.5	20	0.100	358.2	1.00
0.6	40	7.900	105.1	0.99
0.6	0	0.100	205.7	0.98
0.6	40	0.100	220.4	1.00

### 1.2.5. Metodología Estadística

Se realizó un diseño factorial  $2^k$ , es un conjunto de técnicas avanzadas de diseño de experimentos que sirve para diseñar las condiciones ideales de un producto, proceso o servicio para que cumpla con nuestras expectativas usando el mínimo número de experimentos[15], estos permiten detectar la posible presencia de curvatura en al menos uno de los factores. En este caso se emplearon dos factores, cada uno con dos niveles (bajo (-) y alto (+)). factor 1: relación w/b (0.4 y 0.6) y factor 2: porcentaje de reemplazo en masa de EM por agregado fino (0.0% y 40.0%). Se realizó tres réplicas para estado fresco de cada combinación (entre factores) y cinco

réplicas al punto ( $a/c=0.5$   $EM=20\%$ ), el análisis se realizó en un software estadístico (Minitab V.17) y se obtuvo el resultado del diseño factorial (Tabla 10)

**Tabla 10.** *Resultados del Diseño Factorial.*

Factores			Valor P
<b>Esfuerzo de Fluencia</b>	Lineal	a/c	0.11
		%EM	0.99
	Interacciones de 2 terminos	a/c * %EM	0.99
	Curvatura		0.37
	Error		
	Total		
<b>Viscosidad Plástica</b>	Lineal	a/c	0.11
		%EM	0.37
	Interacciones de 2 terminos	a/c * %EM	0.66
	Curvatura		0.41
	Error		
	Total		

### 1.2.6. Control Resistencia a la Compresión.

Las respuestas promedio y la formulación matemática de los ensayos experimentales de resistencia a la compresión 7 días y 28 días de todas las mezclas (dos cilindros ensayados por cada diseño) se dan en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Resistencia a la compresión

Tipo de mezcla	a/c	EM	Resistencia a la compresión	
			7 días [psi]	28 días [psi]
CC	0.6	No aplica	3013.0	3757.0
CC	0.5	No aplica	4402.6	4966.6
CC	0.4	No aplica	5616	6786.6
CAC	0.6	0%	3081.6	3966.6
CAC	0.6	20%	3129.9	3792.2
CAC	0.6	40%	3183.7	3722.6
CAC	0.4	0%	4591.8	6112.2
CAC	0.4	20%	5116.9	6030.3
CAC	0.4	40%	5343.2	5319.1

## 2. ANALISIS DE RESULTADOS

En el estudio de mezcla CAC modificada con EM por remplazos del agregado fino se tiene que el óptimo porcentaje en estado fresco es del 15% en un rango de remplazos entre 0% y 25% [2], pese a esto para realizar el comportamiento reológico, la EM se remplazó en proporciones superiores llegando a un 40%. Analizando los resultados por medio del slump flow, test-500mm y J-ring test se observó que a medida se aumentó la relación a/c (0.4 y 0.6) sin remplazo de EM la a/c=0.4 se comportó como un CAC, mientras que a/c=0.6 no desarrollo la capacidad de fluir por obstrucciones Tabla 12, al aumentar la EM (20% y 40%) generó deficiencia para la fluidez Figuras 24-26.

**Tabla 12.** *Requisitos de ensayos para CAC.*

<b>a/c</b>	<b>0.4</b>			<b>0.5</b>	<b>0.6</b>			<b>Parámetros</b>
<b>EM [%]</b>	0.0	20	40	20	0.0	20	40	
<b>Slump Flow Test[mm]</b>	763	700	683	720	690	673	652	<b>650-800</b>
<b>T500mm [s]</b>	6	7	9	6	9	10	12	<b>2 – 10</b>
<b>Jring [mm]</b>	9	10	12	9	11	11	12	<b>0 – 10</b>

Figura 24. Slump flow test vs. escoria metálica según a/c.

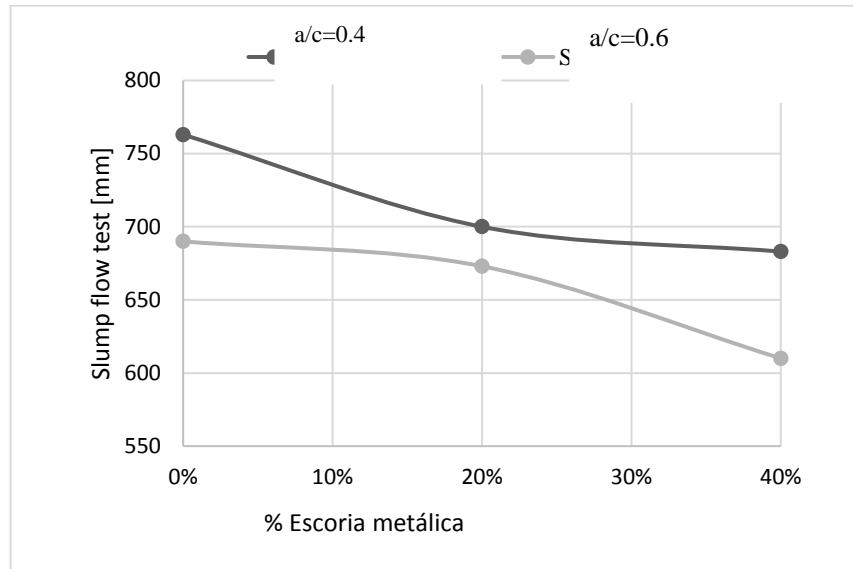
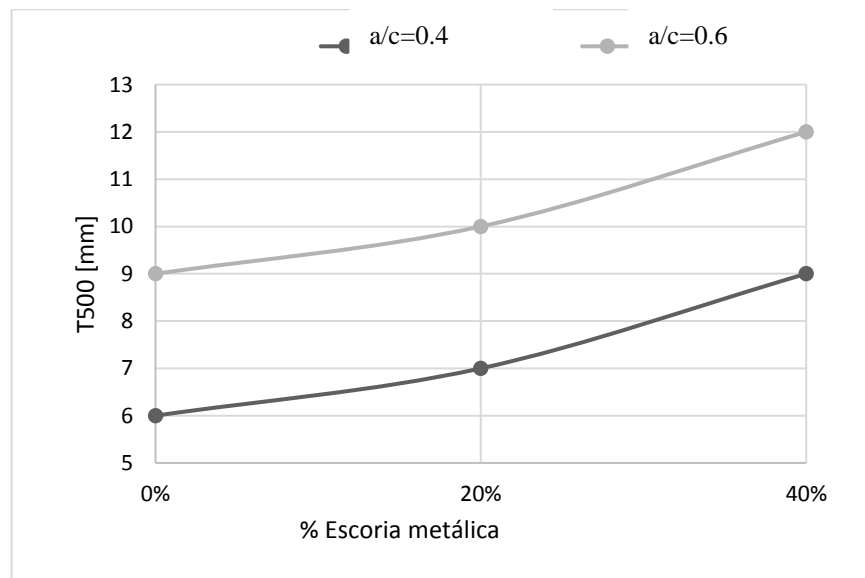
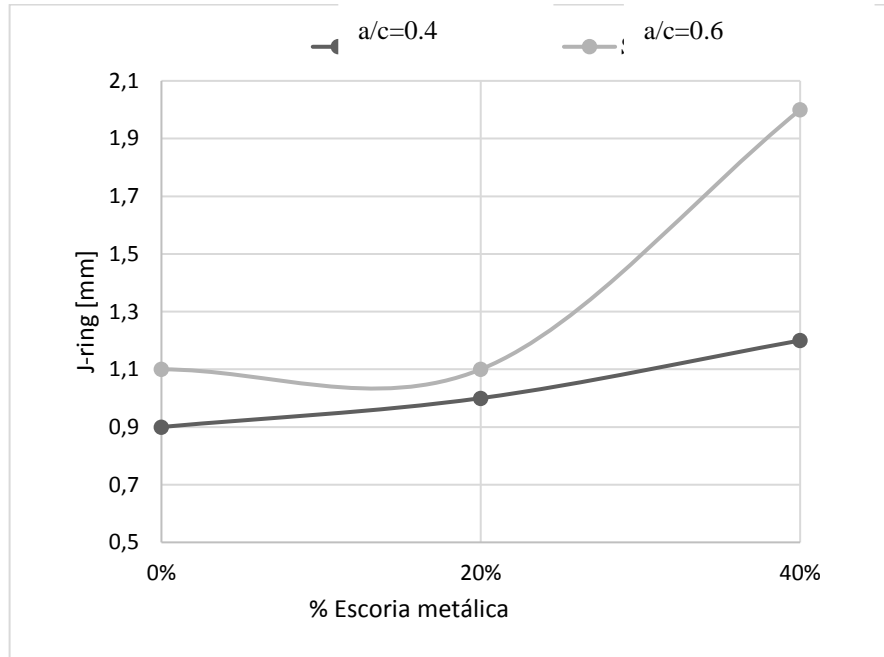


Figura 25. T500[mm] vs. escoria metálica según a/c.

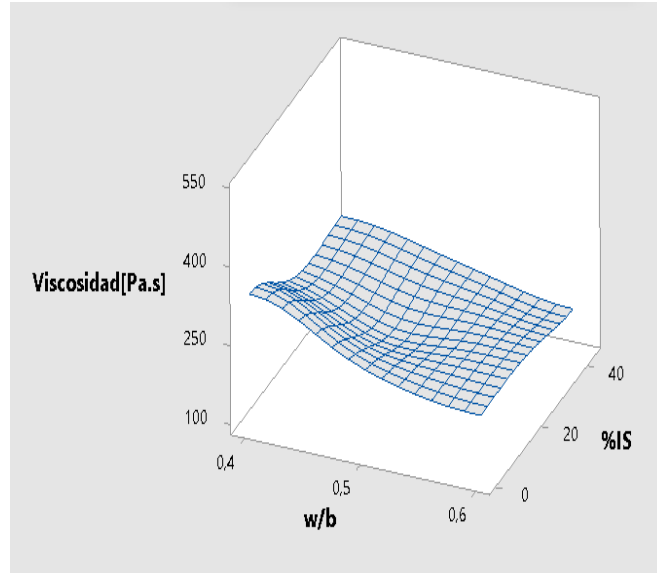


**Figura 26.** J-ring [mm] vs. escoria metálica según a/c

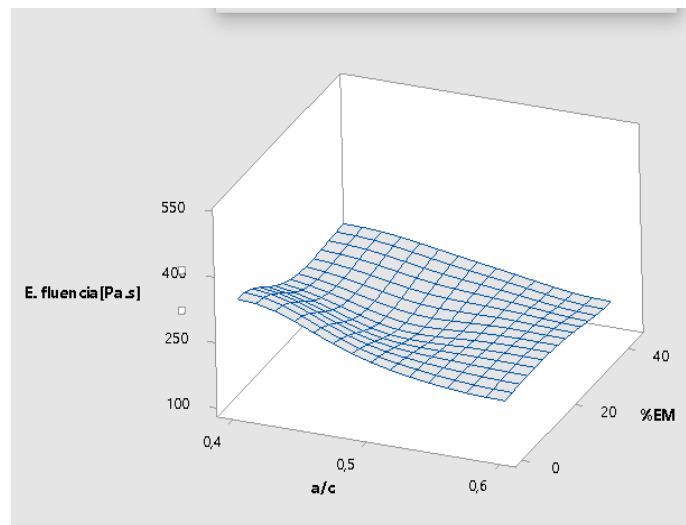


El CAC en Islandia se caracteriza por una viscosidad plástica relativamente baja (20[Pa.s]), mientras que el esfuerzo de fluencia es ligeramente elevado (30[Pa]). En contraste, el CAC japonés tiene una viscosidad plástica mayor a 100[Pa.s] y muy bajo esfuerzo de fluencia (cercano o cero) [3], algo muy parecido al resultado que se obtuvo en esta investigación (Tabla 11). Estos resultados fueron analizados en un software estadístico en el cual se observó que no existe una curvatura [Figuras 27-29], manteniendo todo en el margen del valor P que consiste en determinar si los resultados son estadísticamente significativos, en este caso no se rechaza la hipótesis nula (linealidad) ya que el valor P asociado a los resultados (Tabla 12) son mayores que el nivel de significancia establecido (valor p del 10%) [15].

**Figura 27** Grafica de la Viscosidad plástica vs. Relación a/c y reemplazo de escoria metálica.



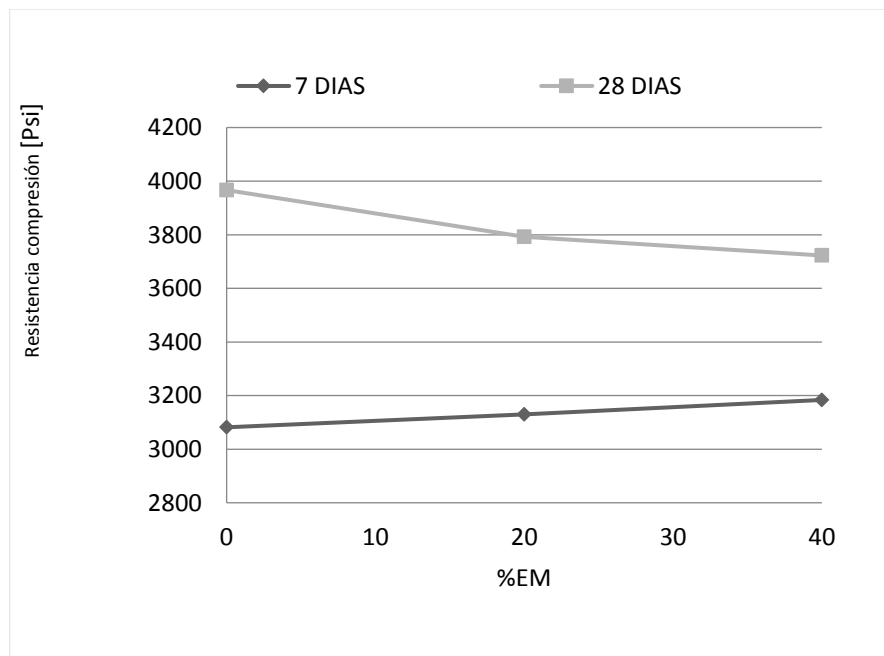
**Figura 28.** Grafica del esfuerzo de fluencia vs. Relación agua/cemento y porcentaje de escoria metálica.



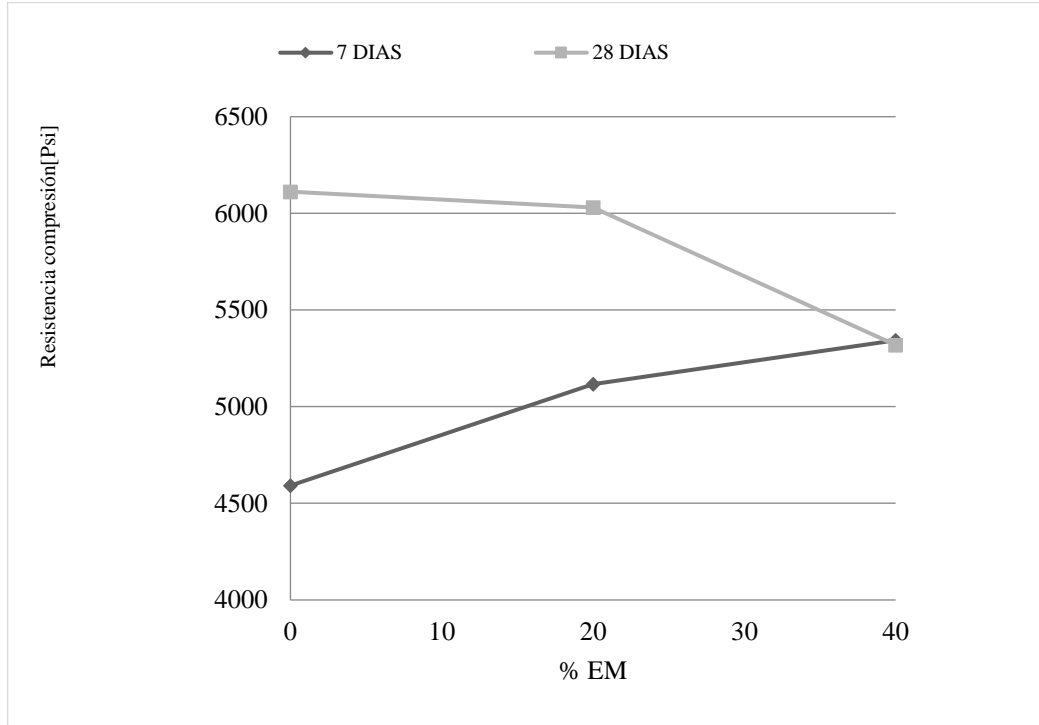
Y se observa en la Tabla 9 que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) está entre el 98% y 100% esto nos indica que la viscosidad plástica tiene un comportamiento similar al modelo de Bingham.

Otro aspecto analizado son los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión a 7 y 28 días de las probetas, se observa que el remplazo de EM en las probetas ensayadas a los 7 días mejora la resistencia del concreto pero que al ensayar las probetas a 28 días los resultados se invierten, es decir que la adición de EM disminuye la resistencia. [Figuras 29-30].

**Figura 29.** Resistencia a compresión a 7 y 28 días de probetas con relación a/c 0.6.



**Figura 30.** Resistencia a compresión a 7 y 28 días de probetas con relación a/c 0.4.



### 3. CONCLUSIONES

En este estudio, se investigó experimentalmente la producción de CAC variando la relación agua-cemento (0.4 y 0.6) y el porcentaje de masa de remplazo de fino por escoria metálica (20% y 40%), dados los valores obtenidos de los ensayos en estado fresco y de resistencia a la compresión a 28 días de maduración se concluye que:

(i) Todas las mezclas de concreto autocompactante modificados con escoria metálica como reemplazo de agregado fino y variación de la relación agua-cemento planteados se ajustan al modelo reológico de Bingham como se demostró en los valores de  $0.98 < R^2 < 1.0$  según el software del ICAR RHM-3000.

(ii) A medida que aumenta el reemplazo de EM en cada relación agua cemento disminuyó la fluidez y aumentó la capacidad de formar obstrucciones reflejado en los ensayos: Slump flow test y J-ring respectivamente. Basados en los resultados de las réplicas de los ensayos mencionados se concluye que los diseños planteados con remplazos de EM mayores a 20% no se comportan como concretos autocompactantes siguiendo la normativa EFNARC.

(iii) La resistencia a la compresión a los 28 días de maduración de las mezclas incorporando escoria metálica con respecto a los diseños CAC de control (EM=0%) disminuyó en un 3% en promedio con remplazo EM=20% y un 9% en promedio con remplazos EM=40%.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFIA

ACI 211-1; Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete; ACI Manual of Concrete Practice, USA; 2007. [9].

ASTM C127; Standard test method for density; relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate; American society for testing and materials; West Conshohocken; 2014. [6].

ASTM C128; Standard test method for specific gravity, and absorption of fine aggregate; American society for testing and materials; West Conshohocken; 2014. [7].

ASTM C136; Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates; American society for testing and materials; West Conshohocken; 2001. [8].

ASTM C1611; Slump flow self-consolidating concrete; American society for testing and materials; 2014. [13].

ASTM C1621; Passing ability of self-consolidating concrete by j-ring; American society for testing and materials; 2014. [14].

Diseño de experimentos (DOE); <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/getting-started/designing-an-experiment/>; (citado 14 de Abril de 2017). [15].

EFNARC; Specification and guidelines for self-compacting concrete; EFNARC association house; UK; 2005. [16].

Gurpreet Singh, Rafat Siddique; Effect of iron slag as partial replacement of fine aggregates on the durability characteristics of self-compacting concrete; Construction and building materials; 2016, 12. [4].

H. Qasrawi; The use of Steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregated and retain the environment; Construction and building materials; 2014, 10. [1].

Jon E. Wallevik; Relationship between the Bingham parameters and slump; Cement and concrete research; 2006, 36. [5].

N. Puthipad, M. Ouchi, S. Rath and A. Attachaiyawuth; 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; 2017, 12. [11]

O. Boukendakdji, S. Kenai, E.H. Kadri, F. Rouis; Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete; Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete; Construction and Building Materials; 2009, 23. [2].

Olafur H. Wallevik, Jon E. Wallevik; Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes; Construction and building materials; 2011, 9. [3].

S. Kosmatka and W. Panarese; Diseño y control de mezclas de concreto; Portland Cement Association (PCA); 2004. [12].

T. Meng, Yue Yu and Z. Wang; Effect of nano CaCO<sub>3</sub> slurry on the mechanical properties and micro-structure of concrete with and without fly ash; Composites part B: engineering; 2017, 124-129. [10].