

**CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y TIXOTRÓPICA DE CONCRETO AUTO-
COMPACTANTE MODIFICADO CON RESIDUO DE ARENA DE FUNDICIÓN Y
ESCORIA DE ALTO HORNO**

ALEISY JOHANA BAREÑO BERNAL

DIANA CAROLINA MONTERO PARRA

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

2019

**CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y TIXOTRÓPICA DE CONCRETO AUTO-
COMPACTANTE MODIFICADO CON RESIDUO DE ARENA DE FUNDICIÓN Y
ESCORIA DE ALTO HORNO**

**ALEISY JOHANA BAREÑO BERNAL
DIANA CAROLINA MONTERO PARRA**

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

Director:

LUIS EDUARDO ZAPATA ORDUZ
Ingeniero Civil PhD

Codirector:

SERGIO RUIZ MARTINEZ
Ingeniero Civil

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

2019

DEDICATORIA

A todos los millones de átomos y partículas que tienen la fortuna de coexistir en este mismo instante y forman en el caos a las tantas personas a las que es necesario dedicar esto:

A las personas que han construido este barco y llamo familia...

A la mujer que en las tormentas toma el timón y re direcciona la brújula...

Al amor de mi vida por lo etéreo y lo eviterno...

A todos los que se han embarcado en este camino y aún no olvido...

A las dos personas que han leído las siguientes páginas tantas veces como yo...

A los que se han tomado el tiempo de leer esto...

Y a la suerte, imposible de vender y comprar, que espero me tenga un océano entero por navegar...

Buen viento y buena mar.

ALEISY JOHANA BAREÑO BERNAL

DEDICATORIA

A la vida misma por permitirme culminar este proceso.

A mi madre por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, mi motor y mi mayor inspiración.

A mi padre y a mis hermanos por su entera confianza, por ser siempre la fuerza que me mantuvo confiando y con la esperanza intacta.

A las dos personas que lucharon y trabajaron conmigo hasta el final.

Y a todas las personas que de una u otra manera siempre estuvieron presentes, apoyándome y guiándome.

DIANA CAROLINA MONTERO PARRA

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. OBJETIVOS | 19 |
| 1.1. OBJETIVO GENERAL | 19 |
| 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 2. METODOLOGÍA | 20 |
| 2.1. DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO | 20 |
| 2.2. MATERIALES | 22 |
| 2.2.1. Agregado Grueso (AG) | 22 |
| 2.2.2. Agregado fino (AF)..... | 23 |
| 2.2.3. Cemento | 23 |
| 2.2.4. Escoria de alto horno (GGBFS) | 24 |
| 2.2.5. Residuo de arena de fundición (WFS) | 24 |
| 2.2.6. Superplastificante (SP) | 24 |
| 2.3. PROCESO DE MEZCLADO | 25 |
| 2.4. PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS | 25 |
| 2.5. ENSAYOS REOLÓGICOS..... | 28 |
| 2.5.1. Esfuerzo de Fluencia Dinámico | 28 |
| 2.5.1. Viscosidad Plástica | 29 |
| 2.5.2. Método Experimental | 30 |
| 2.6. ENSAYOS DE TIXOTROPÍA | 31 |
| 2.6.1. Método del área de ruptura..... | 31 |
| 2.6.2. Método de la caída de la viscosidad aparente | 32 |
| 3. RESULTADOS..... | 33 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1. | AJUSTE A MODELOS REOLÓGICOS | 33 |
| 3.2. | ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS Y TIXOTRÓPICOS DEL EXPERIMENTO | 40 |
| 3.2.1. | Parámetros Reológicos..... | 40 |
| 3.2.2. | PARÁMETROS TIXOTRÓPICOS | 45 |
| 3.3. | RANGO DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS..... | 51 |
| 4. | CONCLUSIONES | 54 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 56 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema del diseño estadístico de experimentos. | 21 |
| Figura 2. –Ensayo de flujo de asentamiento (slump flow). | 27 |
| Figura 3. Variación del esfuerzo de fluencia con el tiempo. | 29 |
| Figura 4. Reómetro para concreto ICAR RHM-3000..... | 30 |
| Figura 5. Torque vs velocidad de rotación para la mezcla GGBFS0-WFS30. | 33 |
| Figura 6. Modelo de Bingham lineal para un fluido. | 34 |
| Figura 7. Torque vs velocidad de rotación para la mezcla GGBFS0-WFS30. | 37 |
| Figura 8. Esfuerzo de fluencia dinámico. | 41 |
| Figura 9. Viscosidad plástica del concreto | 43 |
| Figura 10. Torque vs tiempo para la mezcla GGBFS0-WFS30..... | 46 |
| Figura 11. Método del área de ruptura para la mezcla GBBFS0-WFS30. | 47 |
| Figura 12. Área de ruptura estructural | 48 |
| Figura 13. Relación del comportamiento del área de ruptura y la viscosidad aparente ponderada..... | 50 |
| Figura 14. Áreas de trabajabilidad para el SCC | 51 |
| Figura 15. Áreas de trabajabilidad para el SCC en diferentes países..... | 52 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Granulometría del agregado grueso..... | 22 |
| Tabla 2. Granulometría del agregado fino. | 23 |
| Tabla 3. Granulometría de Residuo de arena de fundición WFS. | 24 |
| Tabla 4. Proporciones de los materiales de las mezclas del diseño experimental. | 28 |
| Tabla 5. Resultados de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica obtenidos del modelo reológico de Bingham..... | 36 |
| Tabla 6. Resultados de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica obtenidos del modelo reológico de Bingham modificado. | 39 |
| Tabla 7. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Esfuerzo fluencia dinámico . | 40 |
| Tabla 8. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Viscosidad plástica | 43 |
| Tabla 9. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Área de ruptura estructural | 45 |
| Tabla 10. Torque máximo y torque de equilibrio para la mezcla GGBFS0-WFS30. | 46 |
| Tabla 11. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Viscosidad aparente. | 49 |

LISTA DE ANEXOS

| | | |
|----------------|---|----|
| Anexo A | Ajuste al modelo de Bingham lineal | 61 |
| Anexo B | Ajuste al modelo de Bingham modificado | 63 |
| Anexo C | Torque máximo y torque de equilibrio de todas las mezclas en estudio en los ensayos de tixotropía. | 65 |
| Anexo D | Variación de los parámetros reológicos con respecto a la mezcla control | 66 |
| Anexo E | Variación de los parámetros tixotrópicos con respecto a la mezcla control | 67 |

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y TIXOTRÓPICA DE CONCRETO AUTO-COMPACTANTE MODIFICADO CON RESIDUO DE ARENA DE FUNDICIÓN Y ESCORIA DE ALTO HORNO*

AUTORES: ALEISY JOHANA BAREÑO BERNAL
DIANA CAROLINA MONTERO PARRA**

PALABRAS CLAVES: Concreto auto-compactante, reología, tixotropía, esfuerzo de fluencia dinámico, viscosidad ponderada, área de ruptura, viscosidad plástica, velocidad de corte.

En el presente estudio se caracterizó el comportamiento reológico y tixotrópico del concreto auto-compactante (SCC) modificado con residuo de arena de fundición (WFS) como reemplazo parcial de agregado fino; también se empleó escoria de alto horno (GGBFS) como reemplazo parcial del material cementicio, considerando sustituciones de 0%, 30% y 60% en masa para cada uno de los materiales de reemplazo. Mediante el uso de un reómetro y el ajuste al modelo reológico de Bingham, se determinaron los parámetros reológicos fundamentales como la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia dinámico. Se evaluó la tixotropía usando los métodos del área de ruptura estructural y la caída viscosidad aparente ponderada. A través de un diseño estadístico de experimentos factorial 3^k con dos factores, tres niveles y un punto central, y con el análisis de varianza ANOVA, se determinó el efecto de la incorporación de los materiales GGBFS y WFS y la interacción entre ellos en los parámetros antes mencionados. Los resultados más importantes indican un aumento en la viscosidad plástica por la presencia de WFS, y un aumento de la tixotropía y disminución del esfuerzo de fluencia dinámico debido a la influencia de las dos variables (WFS-GGBFS) para todas las mezclas de concreto auto-compactante desarrolladas.

*Trabajo de grado

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

ABSTRACT

TITLE: CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y TIXOTRÓPICA DE CONCRETO AUTO-COMPACTANTE MODIFICADO CON RESIDUO DE ARENA DE FUNDICIÓN Y ESCORIA DE ALTO HORNO*

AUTHORS: ALEISY JOHANA BAREÑO BERNAL
DIANA CAROLINA MONTERO PARRA**

KEYWORDS: Rheology, thixotropy, yield stress, drop in apparent viscosity, breakdown area, plastic viscosity, shear rate.

Through this study the rheological and thixotropic behaviour of modified self-compacting concrete considering substitutions up to 60% in mass of waste foundry sand (WFS) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as partial substitutes for fine aggregate and the cementitious material, correspondingly, was characterized. The properties of plastic viscosity and dynamic yield stress were determined by the use of a rheometer; furthermore, the thixotropy was evaluated by the method of breakdown area and drop in apparent viscosity. The effect of the incorporation of these substitutes on the targeted properties was determined by variance analysis of set experiments following a 3^k factorial design. The most relevant results indicate an augmentation on the plastic viscosity driven by the presence of WFS besides an augmentation of the thixotropy and a reduction of the dynamic yield stress, both related to the combined use of WFS and GGBFS.

*Bachelor Thesis

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

INTRODUCCIÓN

Durante años la ingeniería civil se ha encargado de innovar en el uso de nuevos materiales de acuerdo a las necesidades de la industria de la construcción. El concreto tradicional es el material de construcción más producido y el segundo material más empleado en el mundo después del agua, su uso causa un gran impacto ambiental, su producción es el segundo mayor emisor de dióxido de carbono y es el responsable del 5% de la emisión de gases producidos por el hombre ¹. La industria de la construcción juega un rol clave en el ambiente y tiene el deber de dar pasos hacia procesos y prácticas que estén alineados con el desarrollo sostenible ², la capacidad de generar bienestar térmico y la reducción de las emisiones o desperdicios derivados del proceso constructivo ³. En consecuencia, ha habido un ajuste y un incremento de las políticas gubernamentales en diferentes países para la adaptación al cambio climático y mejorar la eficiencia en el uso de recursos en este sector ⁴.

La práctica actual de la ingeniería impulsa el uso de varios subproductos o residuos generados por la industria en todo el mundo y aparece como alternativa ante el deterioro de los recursos naturales, surgiendo así nuevas estrategias para alcanzar el desarrollo sostenible en la industria de la construcción ⁵.

¹ AYLARD, Richard y HAWSON, Louise. 'Cement Sustainability Initiative'. 2002. p.40.

² SANTAMOURIS, et al. 'On the Impact of Urban Climate on the Energy Consumption of Building'. Solar Energy. 2001. p.201–216.

³ GHAMMOND y JONES. 'Embodied Energy and Carbon in Construction Materials', Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy. 2008. p.87–98.

⁴ OFORI. 'Challenges of Construction Industries in Developing Countries : Lessons from Various Countries'. 2000. p.15–17.

⁵ TORRES CARRASCO, Manuel, et al. 'Alkali Activated Slag Cements Using Waste Glass as Alternative Activators. Rheological Behaviour', Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2015. p.45–57.

El uso masivo del concreto debido al crecimiento de la urbanización ha dado como resultado la sobreexplotación de arena de río en los cauces, lo que ha originado numerosos problemas tales como: incremento del nivel de los ríos, reducción del nivel freático, pérdida de tierras debido a la erosión e impacto sobre los ecosistemas de los ríos, así como de los deltas costeros y marítimos. En consecuencia, la subsistencia de la industria de la construcción se ha visto afectada debido a las restricciones de extracción de arena a partir de los ríos. En este sentido, la búsqueda de un material alternativo a la arena de río se ha convertido en un objetivo para la industria de la construcción. El residuo de la arena de fundición (WFS, por sus siglas en inglés) es un subproducto de las industrias de fundición de metales ferrosos y no ferrosos. A nivel mundial son producidos varios millones de toneladas de WFS y su destino final son vertederos a cielo abierto ⁶. Sin embargo, este material posee un alto contenido de sílice y está cubierto con una película delgada de carbón quemado, polvo y aglomerante residual como bentonita, productos químicos o resinas, lo que lo convierte en un material prometedor para la utilización como reemplazo parcial de los agregados finos en el concreto, haciendo de este material un posible sustituto de la arena de río ⁷.

Por otro lado, la producción de cemento Portland es un proceso complejo que requiere una gran cantidad de energía y el uso masivo de materias primas. El cemento es un producto cuya estructura económica es rígida y de alto costo, además su industria es considerada como una de las que emiten mayores cantidades de CO₂ a la atmósfera en todo el mundo ⁸. En este contexto, se abre un debate sobre la formulación de nuevos concretos, que mitiguen costos ecológicos y por qué no, económicos. La incorporación de desechos abundantes y sin explotar, para producir concretos con características similares al convencional, muestran

⁶ BHARDWAJ, Bavita y KUMAR, Pardeep. 'Waste Foundry Sand in Concrete: A Review', *Construction and Building Materials*. 2017. p.661–74 .

⁷ AUXILIADORA, Maria, et al. 'Study on Waste Foundry Exhaust Sand, WFES, as a Partial Substitute of Fine Aggregates in Conventional Concrete', *Sustainable Cities and Society*. 2018. p.187–96.

⁸ TORRES CARRASCO, et al. Op. cit.

nuevas opciones a la industria actual. Así, la escoria de alto horno (GGBFS, por sus siglas en inglés), siendo una escoria ferrosa, subproducto de la fabricación del acero ⁹, es ahora conocida como aglutinante hidráulico ¹⁰ y con adecuadas propiedades cementantes ¹¹, se muestra a sí misma como un material apto para reemplazar porcentajes de cemento, dando una nueva visión a alternativas para el sector de la construcción.

La implementación de residuo de arena de fundición como reemplazo del agregado fino y la escoria de alto horno en reemplazo del cemento trae consigo modificaciones de las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto. Se han usado varios métodos de prueba disponibles actualmente para evaluar el comportamiento de concretos modificados en estado fresco ¹². Sin embargo, los ensayos tradicionales, como los de trabajabilidad, que miden el comportamiento del concreto en estado fresco no aportan datos con la suficiente confianza, debido a que son empíricos y subjetivos al operario ¹³. Entonces, la reología, como ciencia que estudia a los materiales que fluyen, surge para dar solución a este problema, evaluando el estado fresco del concreto con estimaciones cuantitativas que determinan parámetros físicos fundamentales como la viscosidad plástica, que representa la resistencia a fluir de un material; y el esfuerzo de fluencia, esfuerzo necesario que se debe generar para que un material empiece a fluir. Entonces con este enfoque más objetivo, es posible dar una visión científica al comportamiento

⁹ MORICONI, G.. Effect of Using Recycled Materials in Concrete on the Corrosion of the Steel Bars, Corrosion of Steel in Concrete Structures. 2016.

¹⁰ ALLAGOA, Mary. 'Comportamiento En Estados Fresco y Endurecido de Un Concreto Autocompactante, Adicionado Con Escoria de Carbón, y Elaborado Con Agregado Grueso de Concreto Reciclado'. 2014. p.128–139

¹¹ TAVASOLI, Syamak; NILI, Mahmoud y SERPOOSH, Behrad. 'Effect of GGBS on the Frost Resistance of Self-Consolidating Concrete'. 2018. p.717–22.

¹² GÜNEYISI, E., et al. 'Evaluation of the Rheological Behavior of Fresh Self-Compacting Rubberized Concrete by Using the Herschel-Bulkley and Modified Bingham Models', Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2016. p.9–19.

¹³ JIAO, Dengwu, et al. 'Effect of Constituents on Rheological Properties of Fresh Concrete-A Review', Cement and Concrete Composites. 2017. p.146–59.

del concreto en estado fresco ¹⁴. Cuando el cemento entra en contacto con el agua, una membrana hidratada, cubre y une las partículas. Estas uniones (flóculos), al ser sometidas a esfuerzos, se pueden dispersar y re-coagular, mostrando un comportamiento tixotrópico, comportamiento que puede ser definido como una disminución gradual en la viscosidad bajo un esfuerzo cortante, seguido de una recuperación gradual de la estructura molecular cuando el mismo es removido ¹⁵. Considerando el comportamiento del concreto en estado fresco como el de un fluido ¹⁶, estudios ¹⁷, ¹⁸ han mostrado que el tiempo después del mezclado modifica las propiedades del mismo, propiedades tales como el esfuerzo de fluencia, la viscosidad plástica la tixotropía y el asentamiento.

En este sentido, el presente estudio plantea la caracterización del comportamiento en estado fresco del concreto autocompactante modificado con residuo de arena de fundición y escoria de alto horno, a través del estudio reológico del mismo, mediante un diseño estadístico de experimentos, evaluando el efecto de la incorporación de estos materiales en la viscosidad plástica, esfuerzo de fluencia y la tixotropía de la mezcla resultante, como consecuencia del reemplazo parcial de agregado fino por residuo de arena de fundición y material cementicio por escoria de alto horno.

¹⁴ FALESCHINI, Flora, et al. 'Rheology of Fresh Concretes with Recycled Aggregates', Construction and Building Materials 2014. p.407–16.

¹⁵ AHARI, Reza Saleh; ERDEM, Tahir Kemal y RAMYAR, Kambiz. 'Thixotropy and Structural Breakdown Properties of Self Consolidating Concrete Containing Various Supplementary Cementitious Materials', Cement and Concrete Composites. 2015. p.26–37.

¹⁶ STRUBLE, Leslie y CHEN, Chun-Tao. 'Effect of Continuous Agitation on Concrete Rheology', Journal of ASTM International. 2005. 1–19; GOWER BANFILL, Phillip Frank. 'Rheology of Fresh Cement and Concrete', in Rheology Reviews 2006, British Society of Rheology. 2006. p. 61–130.

¹⁷ GÜNEYISI, et al. Op. cit.

¹⁸ WALLEVIK, Jon Elvar. 'Rheological Properties of Cement Paste: Thixotropic Behavior and Structural Breakdown', Cement and Concrete Research. 2009. p.14–29.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el estado fresco del concreto autocompactante modificado con residuo de arena de fundición como reemplazo parcial del agregado fino y escoria de alto horno como reemplazo parcial del material cementicio, mediante el estudio del comportamiento reológico y tixotrópico del mismo.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar la influencia del uso parcial de residuo de arena de fundición y de escoria de alto horno en la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia dinámico del concreto modificado en su estado fresco.

Determinar el ajuste al modelo reológico de Bingham del comportamiento en estado fresco del concreto autocompactante modificado con arena de fundición y escoria de alto horno.

Señalar el efecto de la tasa de corte en el comportamiento reológico en estado fresco del concreto autocompactante modificado con residuo de arena de fundición y escoria de alto horno.

2. METODOLOGÍA

2.1. DISEÑO ESTADÍSTICO DEL EXPERIMENTO

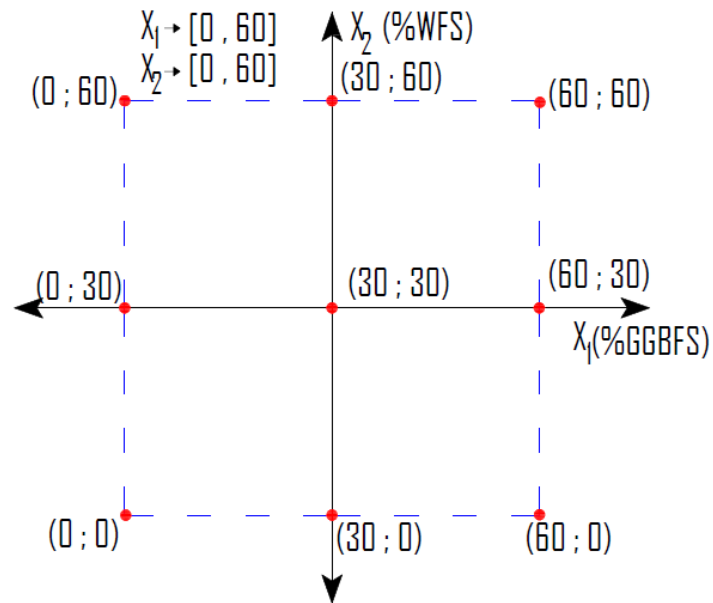
El uso del diseño estadístico de experimentos es una herramienta para la caracterización y optimización de experimentos en tratamientos variables, integrando métodos estadísticos simples y complejos en el diseño experimental, teniendo en cuenta la interacción de variables y un número limitado de experimentos basados en conclusiones estadísticamente sólidas ¹⁹.

El desarrollo de la presente investigación estuvo basado en un diseño estadístico factorial con dos factores, tres niveles y un punto central; y un análisis de varianza ANOVA, con el fin de determinar la incidencia de los factores del análisis sobre los parámetros reológicos y tixotrópicos analizados en estado fresco y el modelo reológico de Bingham. En este caso, los factores fueron las variables de entrada, el porcentaje de GGBFS como reemplazo en masa de cemento y el porcentaje de WFS como reemplazo en masa del agregado fino. Los niveles fueron los porcentajes de reemplazo 0%, 30% y 60% en masa para cada uno de ellos. Mediante el Software Minitab V. 19 [®], se obtuvo la distribución de los tratamientos los cuales son combinaciones de los factores y representan las proporciones de los materiales de reemplazo en las mezclas que se ejecutaron. El esquema del diseño 3^k generó 9 puntos y se representan en la Figura 1.

Para el análisis de varianza ANOVA se estableció un nivel de significancia $\alpha=0.05$. El punto central se realizó con 10 réplicas, mientras que los puntos externos del diseño estadístico se replicaron dos veces, lo que generó un total de 26 mezclas en la presente investigación.

¹⁹ KECIĆ, Vesna, et al. 'Optimization of Azo Printing Dye Removal with Oak Leaves-NZVI/H₂O₂ system Using Statistically Designed Experiment', Journal of Cleaner Production. 2018.

Figura 1. Esquema del diseño estadístico de experimentos.



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 que permite validar la información. Estos supuestos son:

- Los datos siguen una distribución normal.
- Las varianzas de los diferentes tratamientos son iguales.
- Existe independencia entre los datos.

2.2. MATERIALES

La caracterización de los materiales empleados se realizó bajo los parámetros establecidos por la American Society of Testing Materials (ASTM) y se registraron a continuación:

2.2.1. Agregado Grueso (AG) El material usado presentó un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/8", gravedad específica (GS) de 2.6 y porcentaje de absorción (%Abs) de 2.2%, peso unitario (SSS) de 1493.9 kg/m³ y porcentaje de vacíos de 43%. Las propiedades del agregado se establecieron bajo los parámetros establecidos en la ASTM C136, ASTM 128 y ASTM C29, respectivamente.

Tabla 1. Granulometría del agregado grueso.

| Tamiz | Tamaño tamiz (mm) | Retenido (gr) | % Retenido | % Retenido Acumulado | % Pasa |
|--------------|------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------|
| 1/2" | 12.7 | 2.70 | 0.27 | 0.27 | 99.73 |
| 3/8" | 9.52 | 68 | 6.83 | 7.10 | 92.90 |
| N°4 | 4.76 | 88.10 | 88.45 | 95.54 | 4.46 |
| N°10 | 2 | 37.80 | 3.79 | 99.34 | 0.66 |
| N°20 | 0.84 | 0.20 | 0.02 | 99.36 | 0.64 |
| N°40 | 0.42 | 0.30 | 0.03 | 99.39 | 0.61 |
| N°60 | 0.25 | 0.30 | 0.03 | 99.42 | 0.58 |
| N°100 | 0.15 | 0.90 | 0.09 | 99.51 | 0.49 |
| N°200 | 0.075 | 1.50 | 0.15 | 99.65 | 0.34 |
| Fondo | 0 | 1.70 | 0.17 | 99.83 | 0.17 |
| TOTAL | | 994.50 | 99.83 | | |

2.2.2. Agregado fino (AF) Arena fina lavada de río con un módulo de finura (MF) de 2.01, GS de 2.49 y %Abs de 1.62%, peso unitario (SSS) del agregado seco suelto de 1350.9 kg/m³ y porcentaje de vacíos 42.4%. Las propiedades del agregado se establecieron bajo los parámetros establecidos en la ASTM C136, ASTM C128 y ASTM C29, respectivamente.

Tabla 2. Granulometría del agregado fino.

| Tamiz | Abertura [mm] | Retenido [g] | % Retenido | % Retenido Acumulado | %Pasa |
|--------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------------|--------------|
| 1/2" | 12,7 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 3/8" | 9.52 | 8.2 | 0.85 | 0.85 | 99.15 |
| N°4 | 4.76 | 11.5 | 1.20 | 2.05 | 97.95 |
| N°10 | 2 | 19 | 1.98 | 4.03 | 95.97 |
| N°20 | 0.84 | 57.7 | 6.01 | 10.04 | 89.96 |
| N°40 | 0.42 | 110 | 11.46 | 21.50 | 78.50 |
| N°60 | 0.25 | 500.4 | 52.13 | 73.63 | 26.37 |
| N°100 | 0.15 | 160.9 | 16.76 | 90.39 | 9.61 |
| N°200 | 0.075 | 72.6 | 7.56 | 97.96 | 2.042 |
| Fondo | 0 | 12.3 | 1.28 | 99.24 | 0.76 |
| TOTAL | | 952.60 | 99.24 | | |

2.2.3. Cemento El cemento utilizado fue Portland Tipo I, con densidad específica de 2.99 g/ml determinada en el laboratorio según la especificación ASTM C188.

2.2.4. Escoria de alto horno (GGBFS) La escoria granulada usada presentó GS de 2.78 g/ml determinada en el laboratorio según la especificación ASTM C188.

2.2.5. Residuo de arena de fundición (WFS) El WFS presentó MF de 1.74, GS de 2.46 y %Abs de 3.13%, peso unitario del agregado seco suelto de 1117.61 kg/m³ y porcentaje de vacíos de 48.76%. Las propiedades del agregado se establecieron bajo los parámetros establecidos en la ASTM C136, ASTM C128 y ASTM C29, respectivamente.

Tabla 3. Granulometría de Residuo de arena de fundición WFS.

| Tamiz | Abertura [mm] | Retenido [g] | % Retenido | % Retenido Acumulado | % Pasa |
|--------------|--------------------------|-------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------|
| #4 | 4.75 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| #10 | 2 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| #20 | 0.84 | 7.70 | 0.77 | 0.77 | 99.23 |
| #40 | 0.42 | 164.20 | 16.42 | 17.19 | 82.81 |
| #60 | 0.25 | 476.10 | 47.61 | 64.8 | 35.20 |
| #100 | 0.15 | 272 | 27.20 | 92 | 8 |
| #200 | 0.075 | 43.60 | 4.36 | 96.36 | 3.64 |
| Fondo | 0 | 34.60 | 3.46 | 99.82 | 0.18 |
| TOTAL | | 998.20 | 99.82 | | |

2.2.6. Superplastificante (SP) El superplastificante utilizado fue Sika Viscocrete M5, policarboxilatos de tercera generación, con un contenido de sólidos del 43% y densidad específica 1.08 g/ml.

2.3. PROCESO DE MEZCLADO

El proceso de mezclado para las 26 mezclas realizadas en esta investigación, llevo a cabo con una mezcladora de capacidad de 300 litros. Antes de iniciar cada proceso, se controlaron las condiciones de humedad superficial de la mezcladora, manteniéndolas en lo posible constantes. Cada mezcla se inició con la adición del agregado grueso, agregado fino y residuo de arena de fundición según el requerimiento del diseño, mezclándolos durante 2 minutos. Posteriormente se adicionaron a la mezcladora el cemento junto con el porcentaje requerido de escoria de alto horno, los cuales se mezclaron durante 2 minutos más en conjunto. Finalmente se agregó el 70% del agua total requerida durante otros tres minutos de mezclado y por último se agregó el 30% del agua faltante, con el superplastificante disuelto en el contenido para ser mezclado 5 minutos más.

2.4. PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS

Una vez se realizó la caracterización de los materiales y ya con el diseño estadístico del tratamiento listo, se dispusieron las proporciones de las mezclas. Se partió de una mezcla de concreto base o de control, sin porcentajes de reemplazo de ninguno de los dos materiales y se garantizó su autocompactabilidad según las recomendaciones para el diseño de mezclas de concreto autocompactante (SCC) presentadas por Okamura y Ouchi, 1998 ²⁰:

- a)** Volumen de AG en 50% del volumen de sólidos.
- b)** Volumen de AF en 40% del volumen de mortero.
- c)** Relación agua/cemento (A/C) entre 0.9-1.0 en volumen.

²⁰ OKAMURA, H. y OUCHI, M.. 'Self-Compacting High Performance Concrete'. 2003. p.378–83.

Para la mezcla control (WFS = 0 y GGBFS = 0, denominada GGBFS0-WFS0) se mantuvieron lo más cercanas posibles las relaciones de Okamura-Ouchi [25], considerando los materiales de trabajo disponibles, y haciendo ajustes con base en ensayos en estado fresco para fijar la cantidad de superplastificante (SP) para garantizar la autocompactabilidad de la mezcla según los parámetros dados por la European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC) en The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification ²¹.

Los ensayos en estado fresco realizados para el diseño de la mezcla control fueron el ensayo de flujo de asentamiento (slump flow) y el ensayo T500 ²². En el primer ensayo, empleando el cono Abrams, se midió el diámetro medio alcanzado por el concreto en ausencia de obstrucciones, medido desde dos direcciones perpendiculares de su extensión después de levantar el cono, tal como se muestra en la Figura 2. Se aseguró un comportamiento autocompactante con un slump flow entre 650 y 800 [mm] tal como se estipula en EFNARC. En el segundo ensayo, el T500, se registró el tiempo que tarda el concreto en alcanzar un diámetro de 500 [mm] después de levantar el cono. Se aseguró un comportamiento autocompactante con un tiempo de flujo entre 2 a 5 segundos tal y como se estipula en EFNARC ²³.

²¹ EFNARC. 'The European Guidelines for Self-Compacting Concrete'. 2005.

²² Ibid.

²³ EFNARC. 'Especificaciones y Directrices Para El Hormigón Autocompactable'. 2003. p. 1–33.

Figura 2 Ensayo de flujo de asentamiento (slump flow).



Para las proporciones de las diferentes mezclas se mantuvieron constantes las cantidades de AG y de SP. La cantidad de SP se mantuvo constante en 0.4% de la masa del material cementante, considerando el contenido de sólidos del SP. La relación agua/cemento (A/C) utilizada fue 0.36, constante para todas las mezclas y de bajo valor para beneficiar el SCC. Por otro lado, los porcentajes de GGBFS y WFS correspondientes a cada mezcla se determinaron con base en la masa del cemento y de la arena fina, respectivamente. En la Tabla 4 aparecen los valores de cada uno de los materiales, utilizados en cada una de las mezclas.

Tabla 4. Proporciones de los materiales de las mezclas del diseño experimental.

| Mezcla | Cemento [kg/m ³] | GGBFS [kg/m ³] | AF [kg/m ³] | WFS [kg/m ³] | AG [kg/m ³] | SP [kg/m ³] |
|---------------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| GGBFS0-WFS0 | 536.11 | 0.00 | 662.49 | 0.00 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS0-WFS30 | 536.11 | 0.00 | 463.75 | 198.75 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS0-WFS60 | 536.11 | 0.00 | 265.00 | 397.50 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS30-WFS0 | 375.28 | 160.83 | 662.49 | 0.00 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS30-WFS30 | 375.28 | 160.83 | 463.75 | 198.75 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS30-WFS60 | 375.28 | 160.83 | 265.00 | 397.50 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS60-WFS0 | 214.44 | 321.67 | 662.49 | 0.00 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS60-WFS30 | 214.44 | 321.67 | 463.75 | 198.75 | 884.78 | 4.24 |
| GGBFS60-WFS60 | 214.44 | 321.67 | 265.00 | 397.50 | 884.78 | 4.24 |

2.5. ENSAYOS REOLÓGICOS

La reología es la rama de la física que estudia el vínculo existente entre la fuerza que se ejerce sobre un material y la deformación que éste experimenta al fluir. El uso de la reología en el concreto es la estimación cuantitativa de parámetros físicos fundamentales como la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia ²⁴

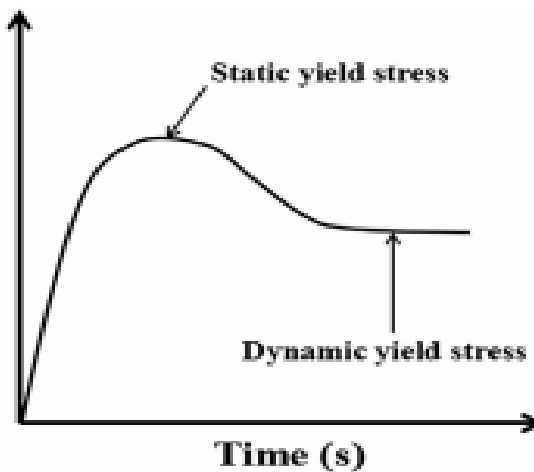
2.5.1. Esfuerzo de Fluencia Dinámico En la Figura 3 se presenta una gráfica típica de torque contra tiempo y muestra una región de deformación elástica lineal. Más allá de esta región elástica, los enlaces rígidos entre las partículas de cemento y las fuerzas de atracción formadas durante el período de reposo se rompen al alcanzar un esfuerzo máximo ²⁵. Al alcanzar este esfuerzo máximo, el

²⁴ FALESCHINI, et al. Op. cit.

²⁵ AHARI, ERDEM, AND RAMYAR. Op. cit.

cortante aplicado consigue que el material fluya, por lo tanto, el valor del torque deja de incrementar y logra alcanzar un estado de equilibrio al cual se le denomina “*esfuerzo de fluencia dinámico*”²⁶. En otras palabras, el esfuerzo de fluencia se es el esfuerzo necesario para que el material se mantenga en movimiento.

Figura 3. Variación del esfuerzo de fluencia con el tiempo.



Fuente: D. Jiao, C. Shi, Q. Yuan, X. An, Y. Liu, and H. Li. “Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete” 2017²⁷.

2.5.1. Viscosidad Plástica La viscosidad plástica representa la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte²⁸ e indica la resistencia a fluir de un material²⁹. También es un buen indicador para el llenado

²⁶ JIAO, et al. Op cit.

²⁷ Ibid.

²⁸ FERRARIS, Chiara. ‘Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report’, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1999.

²⁹ CHIDIAC y MAHMOODZADEH, ‘Plastic Viscosity of Fresh Concrete - A Critical Review of Predictions Methods’, Cement and Concrete Composites. 2009. p.535–44.

óptimo de formaletas y la tendencia a la segregación ³⁰. Afecta directamente la colocación del concreto que incluye transporte, bombeo, fundición y vibración.

2.5.2. Método Experimental Los parámetros reológicos fundamentales se evaluaron utilizando el reómetro para concreto ICAR RHM-3000 del Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR) tal como se muestra en Figura 3 con una paleta de cuatro palas que giraba coaxialmente dentro de un contenedor de concreto. El contenedor cilíndrico del reómetro tenía un radio interno de 143 mm y una profundidad de 280 mm, permitiendo un volumen de muestra de concreto de 23 L. Este instrumento permite medir la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia del SCC.

Figura 4. Reómetro para concreto ICAR RHM-3000



El ensayo consistió en mantener constante la velocidad del reómetro en 0.5 [rps], durante 20 segundos para asegurar la ruptura estructural de la mezcla, reduciéndola

³⁰ CYR, Martin; LEGRAND, Claude y MOURET, Michel. 'Study of the Shear Thickening Effect of Superplasticizers on the Rheological Behaviour of Cement Pastes Containing or Not Mineral Additives', Cement and Concrete Research. 2000. p.1477–83.

posteriormente en etapas para realizar las mediciones de torque correspondientes a las siguientes velocidades de rotación: 0.500, 0.425, 0.350, 0.275, 0.200, 0.125 y 0.050 [rps]. Estas se mantuvieron durante 5 segundos cada una y se registraron los datos de torque correspondientes. La metodología empleada se basó en lo planteado por Ahari et al. ³¹.

2.6. ENSAYOS DE TIXOTROPÍA

La tixotropía se puede definir como una disminución gradual de la viscosidad bajo la aplicación de un esfuerzo cortante seguido de una recuperación gradual de la estructura cuando el mismo es retirado ³². El comportamiento tixotrópico de la pasta de cemento está relacionado con la coagulación, dispersión y re-coagulación de las partículas de cemento ³³. La tixotropía se pudo evaluar utilizando el reómetro para concreto ICAR RHM-3000 del Centro Internacional de Investigación de Agregados (ICAR), usado también en los ensayos reológicos, y la metodología usada fue la siguiente:

2.6.1. Método del área de ruptura El método del área de ruptura es entendido como una medida de cuantificación de la energía requerida (en función del tiempo) para romper la acumulación estructural desarrollada, los enlaces rígidos entre las partículas de cemento y las fuerzas de atracción formadas durante el período de reposo del concreto.

³¹ AHARI, ERDEM, AND RAMYAR. Op. cit.

³² MEWIS, Jan y WAGNER, Norman J. 'Thixotropy', Advances in Colloid and Interface Science. 2009.

³³ AHARI, ERDEM, AND RAMYAR. Op. cit.

En este método, planteado por Lapasin et al. ³⁴ se dejó reposar la mezcla en el contenedor cilíndrico del reómetro durante 5 minutos, para luego ser sometida a una velocidad de rotación constante de 0.15 [rps] durante 10 segundos. Después de otro período de reposo de 5 minutos, la mezcla se sometió nuevamente a una velocidad de rotación constante de 0.30 [rps] durante otros 10 segundos. Se repitió el mismo procedimiento para velocidades de 0.45 y 0.60 [rps]. Para cada velocidad, se registraron valores de torque dependiente del tiempo. Seguido, se determinaron los valores de torque máximo (T_m) y torque de equilibrio (T_e) para cada una de las velocidades. Estos valores se representaron gráficamente y se ajustaron a funciones polinomiales de tercer orden. El área entre la curva de torque máximo y la curva de torque de equilibrio se denominó “*área de ruptura*” ³⁵.

2.6.2. Método de la caída de la viscosidad aparente La caída de la viscosidad aparente es otro método para cuantificar la tixotropía, propuesto por Ahari et al. ³⁶, en donde la diferencia entre torques muestra la amplitud de las transformaciones estructurales dentro del concreto. La tixotropía se cuantifica entonces como la diferencia entre los valores de torques máximos y torques de equilibrio determinados para cada velocidad media de rotación ³⁷.

En este método solo se usó una parte de los datos obtenidos en el método anterior, esto, según lo recomendado por Ahari et al. ³⁸. La diferencia entre los valores de torque máximo y torque de equilibrio determinados para una velocidad media de rotación de 0.3 [rps] se dividió por esta misma velocidad de 0.3 [rps].

³⁴ LAPASIN, R.; PAPO, A. y RAJGELJ, S.. ‘Flow Behavior of Fresh Cement Pastes. A Comparison of Different Rheological Instruments and Techniques’, Cement and Concrete Research. 1983.

³⁵ Ibid.

³⁶ AHARI, ERDEM, AND RAMYAR. Op. cit.

³⁷ GONZÁLEZ-TABOADA, Iris, et al. ‘Thixotropy and Interlayer Bond Strength of Self-Compacting Recycled Concrete’, Construction and Building Materials. 2018. p.479–88.

³⁸ AHARI, ERDEM, AND RAMYAR. Op. cit.

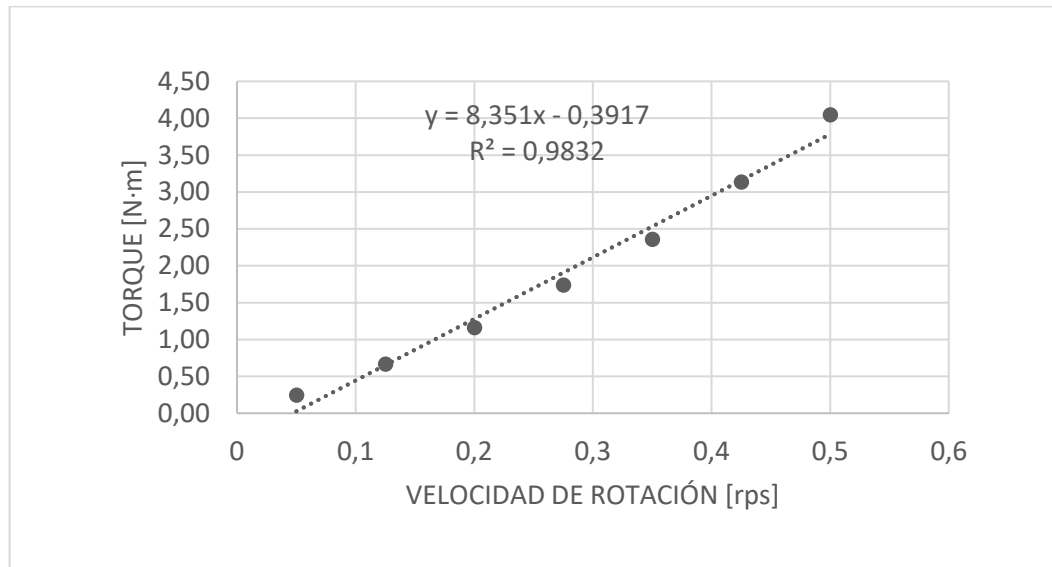
3. RESULTADOS

Como ejemplo se utilizarán los datos y resultados obtenidos para la mezcla GGBFS0-WFS30, seleccionada al azar, para la explicación de los parámetros reológicos, tixotrópicos y la presentación de los gráficos en esta sección.

3.1. AJUSTE A MODELOS REOLÓGICOS

La relación entre los valores de torque y velocidad de rotación de los ensayos de reología presentaron en su mayoría un comportamiento lineal ³⁹. El ajuste lineal de estos valores para todas las mezclas generó como resultado coeficientes de correlación (R^2) superiores a 0.98, tal como se puede observar en la Figura 5.

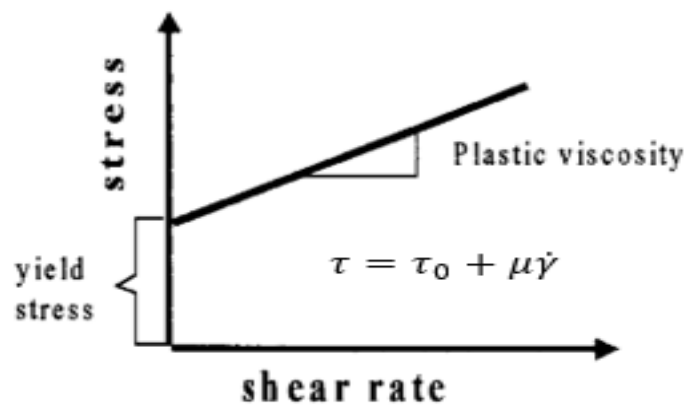
Figura 5. Torque vs velocidad de rotación para la mezcla GGBFS0-WFS30.



³⁹ FERRARIS. Op. cit.

El comportamiento lineal de la relación del torque y la velocidad de rotación es análogo al comportamiento lineal del esfuerzo cortante y la velocidad de corte después de alcanzar el esfuerzo de fluencia cuya pendiente es la viscosidad plástica, correspondiente a un fluido de Bingham ⁴⁰:

Figura 6. Modelo de Bingham lineal para un fluido.



Fuente: Ferraris. "Measurement of the rheological properties of high-performance concrete: State of the art report" 1999⁴¹.

El cual se rige mediante la siguiente ecuación:

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

donde

$$\tau = \text{Esfuerzo cortante [Pa]}$$

⁴⁰ FERRARIS. Op. cit.

⁴¹ Ibid.

τ_0 = Esfuerzo de fluencia [Pa]

μ = Viscosidad plástica [Pa·s]

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

Los datos obtenidos de la linealización de los valores de torque y velocidad de rotación en los ensayos, se ajustaron al modelo reológico de Bingham lineal mediante las ecuaciones de *Reiner-Riwlin* según lo propuesto por Feys et al. ⁴² y Singh ⁴³ de la siguiente manera:

$$T = G + HN \quad (ec. 2)$$

$$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (ec. 3)$$

$$\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (ec. 4)$$

donde

T = Torque [N·m]

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

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

N = Velocidad de rotación [rps]

R_1 = Radio paleta del reómetro [mm]

R_2 = Radio del contenedor cilíndrico [mm]

h = Altura de la paleta [mm]

⁴² FEYS, Dimitri; VERHOEVEN, Ronny y DE SCHUTTER, Geert. 'Fresh Self Compacting Concrete, a Shear Thickening Material', Cement and Concrete Research. 2008. p. 920–929.

⁴³ SINGH, Ran Bir y SINGH, Bhupinder. 'Rheological Behaviour of Different Grades of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregates', Construction and Building Materials. 2018.

Sin embargo, al estudiar todas las curvas reológicas obtenidas en cada uno de los ensayos, y realizando el ajuste al modelo lineal de Bingham, se observó una desviación de la relación lineal entre el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$), dando como resultado valores de esfuerzo de fluencia negativos, tal como se observa en la Tabla 5 de resultados.

Estos valores negativos de esfuerzo de fluencia aparecen cuando se presenta un engrosamiento o un adelgazamiento en la viscosidad debido al aumento de la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$). Sin embargo, los valores de esfuerzos de fluencia negativos no tienen explicación física alguna e indican que el ajuste matemático realizado no es el adecuado para estudiar el comportamiento obtenido en los presentes ensayos ^{44, 45, 46}.

Tabla 5. Resultados de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica obtenidos del modelo reológico de Bingham.

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

⁴⁴ FEYS, VERHOEVEN, AND DE SCHUTTER. Op. cit.

⁴⁵ BARNES, H. A.. 'Shear-Thickening ("Dilatancy") in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids', Journal of Rheology. 1989. p.329–66.

⁴⁶ FEYS, Dimitri, et al. 'Comparison of two concrete rheometers for shear thickening behaviour of SCC'. 2016. p.1–6.

Para realizar el ajuste correspondiente al comportamiento obtenido en los ensayos, se aplicó el modelo reológico de Bingham modificado, que es el modelo de Bingham, pero ajustado y ampliado a un polinomio de Taylor de segundo orden (ver ec.5), que tiene en cuenta la no-linealidad entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte ⁴⁷.

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 \quad (\text{ec. 5})$$

donde

τ = Esfuerzo Cortante [Pa]

τ_0 = Esfuerzo de fluencia [Pa]

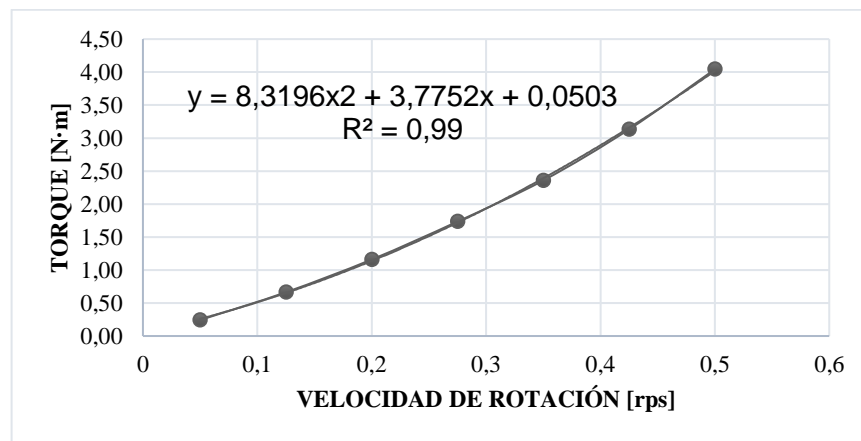
μ = Viscosidad plástica [Pa·s]

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

c = Parámetro de segundo orden [Pa·s²]

Los resultados obtenidos de este ajuste se representaron gráficamente y exhibieron valores de coeficiente de correlación (R^2) superiores a 0.99 como se muestra en el ejemplo de la Figura 7.

Figura 7. Torque vs velocidad de rotación para la mezcla GGBFS0-WFS30.



⁴⁷ FEYS, VERHOEVEN, AND DE SCHUTTER. Op. cit.

Las curvas resultantes del ajuste de todos los ensayos al modelo reológico de Bingham modificado fueron transformadas mediante las siguientes ecuaciones de *Reiner-Riwlin* según lo propuesto por Feys et al.⁴⁸,⁴⁹ y Singh⁵⁰:

$$T = G + HN + CN^2 \quad (ec. 6)$$

$$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (ec. 3)$$

$$\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (ec. 4)$$

$$c = \frac{C}{8\pi^3 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right) \quad (ec. 7)$$

donde:

T = Torque [N·m]

N = Velocidad de rotación [rps]

R₁ = Radio paleta del Reómetro [mm]

R₂ = Radio del contenedor cilíndrico [mm]

h = Altura de la paleta [mm]

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

⁴⁸ FEYS, VERHOEVEN, AND DE SCHUTTER. Op. cit.

⁴⁹ FEYS, Dimitri; WALLEVIK, Jon E y YAHIA, Ammar. 'Extension of the Reiner – Riwlin Equation to Determine Modified Bingham Parameters Measured in Coaxial Cylinders Rheometers'. 2012.

⁵⁰ SINGH AND SINGH. Op. cit.

Una vez realizado este tratamiento matemático, los resultados generados ya no presentaron valores de esfuerzo de fluencia negativos como se muestra en la Tabla 6 de resultados.

El comportamiento no-lineal es explicado por el análisis de la relación c/μ , así el engrosamiento de la viscosidad, “*shear thickening*” por cortante ocurre si $c/\mu > 0$, el adelgazamiento de la viscosidad o “*shear thinning*” por cortante se presenta si $c/\mu < 0$ y finalmente $c/\mu = 0$ indica un comportamiento lineal correspondiente al modelo de Bingham lineal ⁵¹.

El ajuste al modelo reológico de Bingham lineal y Bingham modificado para cada una de las mezclas de este estudio se registran en los Anexos A y B.

Tabla 6. Resultados de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica obtenidos del modelo reológico de Bingham modificado.

| Parámetros del Modelo de Bingham Modificado | | | | |
|--|---------------|--------------|--------------------------|---------|
| | τ_0 [Pa] | μ [Pa·s] | c [Pa·s ²] | c/μ |
| CONTROL | 20.13 | 42.80 | -0.29 | -0.007 |
| GGBFS0-WFS30 | 17.49 | 42.23 | 2.64 | 0.03 |
| GGBFS0-WFS60 | 8.19 | 54.44 | 2.64 | 0.05 |
| GGBFS30-WFS0 | 10.34 | 41.29 | 1.14 | 0.06 |
| GGBFS30-WFS30 | 8.03 | 32.74 | 10.85 | 0.04 |
| GGBFS30-WFS60 | 7.73 | 74.96 | 20.24 | 0.27 |
| GGBFS60-WFS0 | 14.48 | 40.37 | 1.33 | 0.03 |
| GGBFS60-WFS30 | 8.24 | 62.64 | 9.54 | 0.15 |
| GGBFS60-WFS60 | 5.24 | 65.92 | 9.10 | 0.14 |

⁵¹ FEYS, Dimitri; VERHOEVEN, Ronny y DE SCHUTTER, Geert. ‘Evaluation of Time Independent Rheological Models Applicable to Fresh Self-Compacting Concrete’. 2007. p.1–10.

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS Y TIXOTRÓPICOS DEL EXPERIMENTO

Con un nivel de significancia $\alpha=0.05$ para todas las variables respuestas, esfuerzo de fluencia dinámico, área viscosidad plástica, área de ruptura estructural y viscosidad ponderada, y mediante un análisis de la varianza ANOVA los resultados del análisis estadístico de la varianza se registran a continuación.

3.2.1. Parámetros Reológicos

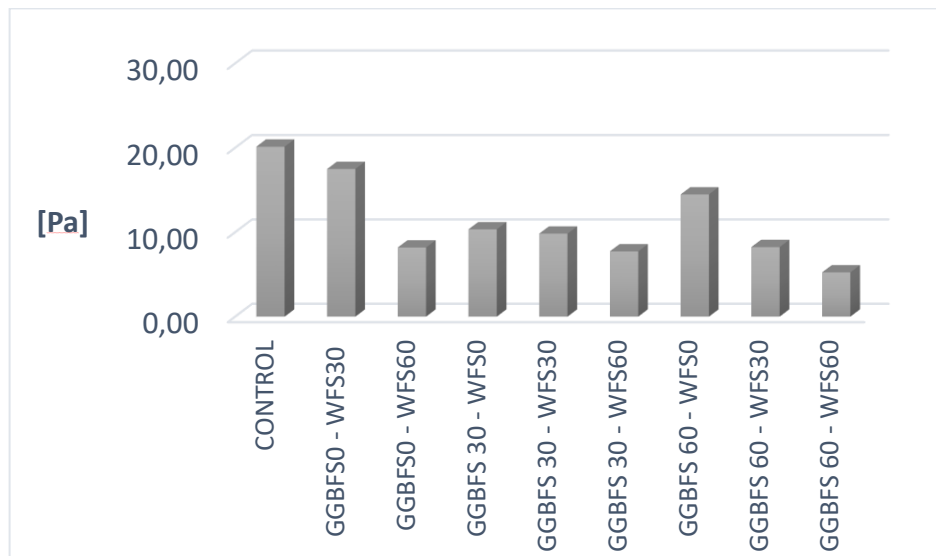
3.2.1.1. Esfuerzo de fluencia dinámico Los resultados del análisis de la varianza ANOVA muestran que, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, para el esfuerzo de fluencia dinámico, la presencia de GGBFS y WFS fue estadísticamente significativa. Los resultados del análisis estadístico de la varianza se registran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Esfuerzo fluencia dinámico

| ESFUERZO DE FLUENCIA DINÁMICO | | | | | |
|-------------------------------|----|---------|---------|---------|--------------|
| Factores | GL | Adj SC | Adj SMC | Valor-F | Valor-P |
| GGBFS | 1 | 74.907 | 74.907 | 7.450 | 0.029 |
| WFS | 1 | 230.64 | 230.64 | 22.930 | 0.002 |
| GGBFS*GGBFS | 1 | 22.028 | 22.028 | 2.190 | 0.182 |
| WFS*WFS | 1 | 9.190 | 9.190 | 0.910 | 0.371 |
| GGBFS*WFS | 1 | 42.250 | 42.250 | 4.200 | 0.080 |
| Error Puro | 4 | 32.008 | 8.002 | | |
| Total | 12 | 467.391 | | | |

Los valores obtenidos para el esfuerzo de fluencia dinámico de cada mezcla en la presente investigación se registraron gráficamente en la Figura 5. Se mostró una disminución del esfuerzo de fluencia dinámico con la incorporación de WFS en comparación con la muestra control y en ausencia de GGBFS. También, la adición de GGBFS hasta 30% y, en ausencia de WFS, redujo el esfuerzo de fluencia dinámico; no obstante, para valores superiores al 60% de reemplazo de GGBFS se detectó un aumento en el esfuerzo de fluencia, pero a pesar de este aumento, los valores obtenidos en los ensayos siguen estando por debajo de la muestra control (Fig. 8). Estos valores bajos de esfuerzo de fluencia dinámico benefician las mezclas de concreto autocompactante, ya que en teoría aumentan su trabajabilidad y pueden ser un indicador del equilibrio que debe presentarse entre la fluidez de la mezcla y la resistencia a la segregación ⁵². Así mismo, si se puede establecer una medida cuantitativa para la trabajabilidad, se mitigarían fallas prematuras de los materiales y estructuras debido a las propiedades de flujo inadecuadas de la mezcla de concreto y se podrían mitigar también residuos de materiales ⁵³.

Figura 8. Esfuerzo de fluencia dinámico.



⁵² EFNARC, Guidelines and Concrete. Op. cit.

⁵³ MAHMOODZADEH, F. y CHIDIAC, S. E.. 'Rheological Models for Predicting Plastic Viscosity and Yield Stress of Fresh Concrete', Cement and Concrete Research. 2013. p.1–9.

En la presente investigación, la disminución del esfuerzo de fluencia se generó probablemente debido a la presencia de las partículas de GGBFS, ya que estas presentan una superficie lisa y densa, lo que permite la generación de planos de deslizamiento lisos los cuales disminuyen la demanda de agua y pueden mejorar la fluidez del concreto en estado fresco ⁵⁴. Así, las adiciones de GGBFS pueden mejorar la trabajabilidad del concreto ^{55, 56}, lo cual es análogo a la disminución del esfuerzo de fluencia dinámico.

Valores bajos de esfuerzo de fluencia dinámico benefician el concreto autocompactante, ya que facilitan que éste logre fluir por su propio, sin que se presenten problemas de trabajabilidad alguno y favoreciendo el buen llenado de las formaletas. Estos valores bajos de esfuerzo de fluencia dinámico podrían, por ejemplo, evitar la formación de hormigueros sin que queden espacios en el encofrado.

3.2.1.2. Viscosidad plástica Los resultados del análisis de la varianza ANOVA muestran que, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, para la viscosidad plástica, la presencia de WFS fue estadísticamente significativa. Los resultados del análisis estadístico de la varianza se registran en la Tabla 8.

⁵⁴ YUKSEL, Isa. ' Blast-Furnace Slag, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete'. 2018.

⁵⁵ FEYS, VERHOEVEN, y DE SCHUTTER. Op. cit.

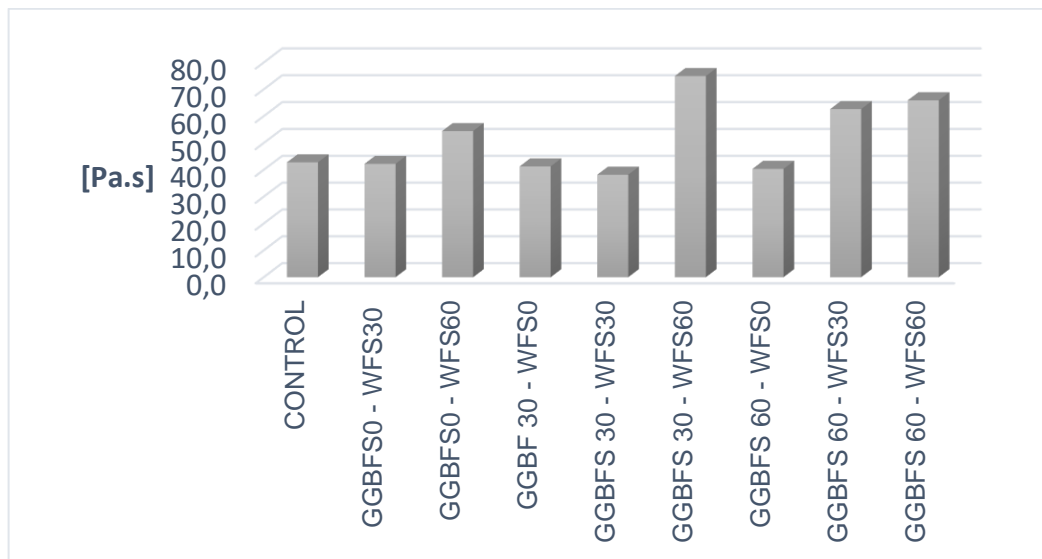
⁵⁶ YUKSEL. Op. cit.

Tabla 8. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Viscosidad plástica

| VISCOSIDAD PLÁSTICA | | | | | |
|---------------------|----|--------|---------|---------|--------------|
| Factores | GL | Adj SC | Adj SMC | Valor-F | Valor-P |
| GGBFS | 1 | 3.953 | 3.953 | 1.55 | 0.253 |
| WFS | 1 | 17.71 | 17.71 | 6.94 | 0.034 |
| GGBFS*GGBFS | 1 | 0.094 | 0.094 | 0.04 | 0.854 |
| WFS*WFS | 1 | 3.628 | 3.628 | 1.42 | 0.272 |
| GGBFS*WFS | 1 | 0.810 | 0.810 | 0.32 | 0.591 |
| Error Puro | 4 | 3.121 | 0.780 | | |
| Total | 12 | 44.17 | | | |

Los valores obtenidos para la viscosidad plástica de cada mezcla en la presente investigación se registraron gráficamente en la Figura 9.

Figura 9. Viscosidad plástica



De los resultados obtenidos se logró apreciar un aumento progresivo de la viscosidad plástica con la incorporación y aumento de WFS. Por otro lado, la adición de GGBFS, en ausencia de WFS, generó resultados similares al control, como en la mezcla GGBFS60-WFS0, la cual mostró una disminución del 6% con respecto a la muestra control. No obstante, la combinación de ambos materiales mostró un aumento en la viscosidad plástica cuando alguno de los dos reemplazos superaba el 30% como en la mezcla GGBFS30-WFS60 cuyo porcentaje de aumento fue 75% en comparación con la mezcla control. El análisis de varianza ANOVA (Tabla 8) reveló que la única variable estadísticamente significativa sobre la viscosidad plástica es WFS, lo que está de acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 9.

La incorporación de WFS, que posee un menor módulo de finura en comparación con el de la arena de río, incrementa la cantidad de finos presentes en la mezcla, lo que produce una mayor demanda de agua y genera, por lo tanto, un aumento en la viscosidad plástica y una disminución en la trabajabilidad ⁵⁷, ⁵⁸. Sin embargo, estos resultados no son del todo desfavorables, ya que, en concretos autocompactantes, mayores valores de viscosidad pueden evitar la segregación debido a que en periodos cortos de tiempo, el concreto fresco tiene más probabilidad de construir una estructura interna más cohesiva con la capacidad de soportar su propio peso ⁵⁹.

⁵⁷ FEYS, VERHOEVEN, y DE SCHUTTER. Op. cit.

⁵⁸ TITTARELLI, Francesca. 'Waste Foundry Sand, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete'. 2018.

⁵⁹ CYR, LEGRAND, AND MOURET. Op. cit.

3.2.2. PARÁMETROS TIXOTRÓPICOS

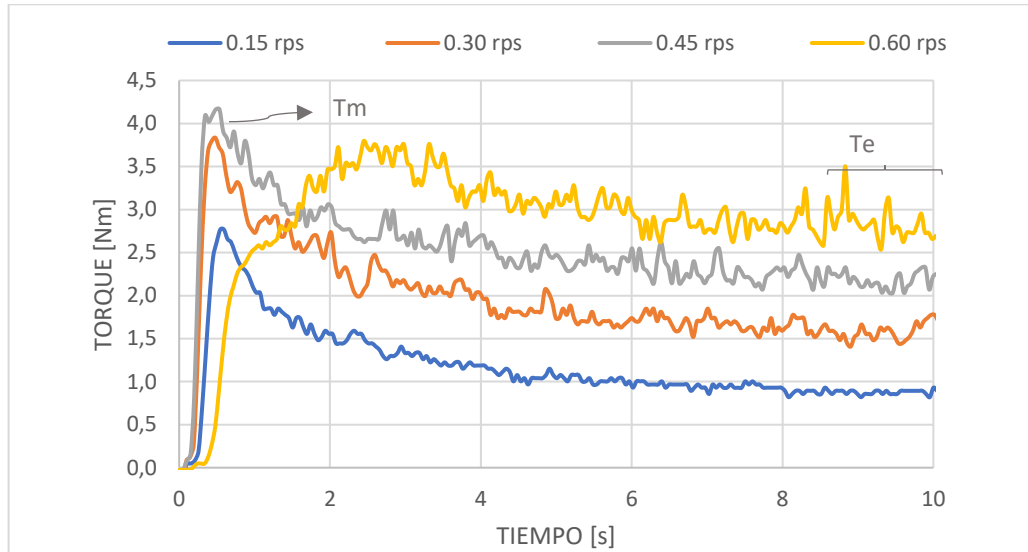
3.2.2.1. Área de ruptura estructural Los resultados del análisis de la varianza ANOVA muestran que, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, para el área de ruptura estructural, la presencia de GGBFS fue estadísticamente significativa. Los resultados del análisis estadístico de la varianza se registran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Área de ruptura estructural

| ÁREA DE RUPTURA | | | | | |
|--------------------|----|-----------|------------|-------------|--------------|
| Factores | GL | Adj SC | Adj SMC | Valor- F | Valor- P |
| GGBFS | 1 | 2.030 | 2.030 | 7.640 | 0.028 |
| WFS | 1 | 0.914 | 0.914 | 3.44 | 0.106 |
| GGBFS*GGBFS | 1 | 0.585 | 0.585 | 2.2 | 0.182 |
| WFS*WFS | 1 | 0.432 | 0.432 | 1.63 | 0.243 |
| GGBFS*WFS | 1 | 1.271 | 1.271 | 4.78 | 0.065 |
| Error Puro | 4 | 0.271 | 0.068 | | |
| Total | 12 | 7.714 | | | |

Para cada velocidad de rotación de los ensayos de tixotropía, se obtuvieron valores de torque dependiente del tiempo y se registraron gráficamente para cada una de las mezclas, esto se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Torque vs tiempo para la mezcla GGBFS0-WFS30



Seguido, se determinaron los valores de torque máximo y torque de equilibrio para cada una de las velocidades en cada punto, como se muestra en la Tabla 10 para la mezcla de ejemplo: GGBFS0-WFS30.

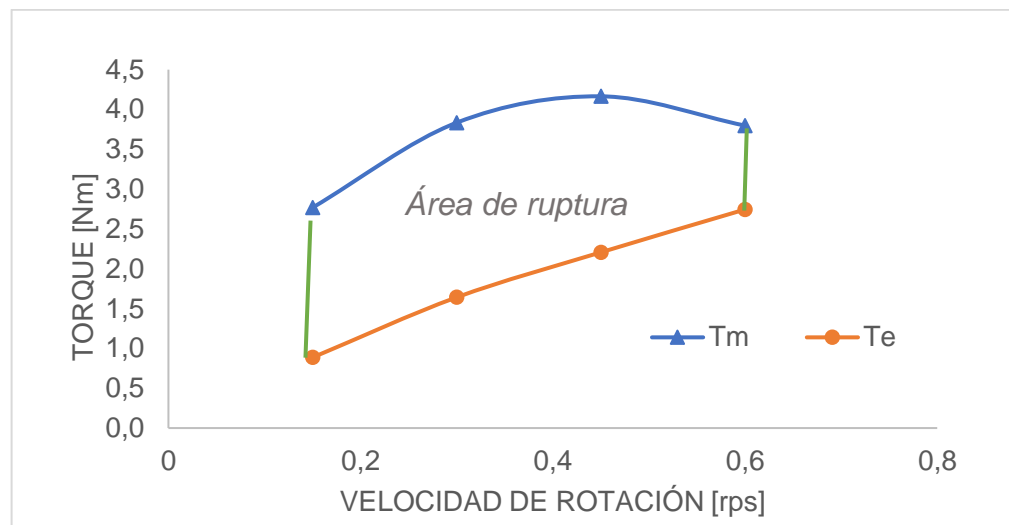
Tabla 10. Torque máximo y torque de equilibrio para la mezcla GGBFS0-WFS30.

| Velocidad de rotación [rps] | T_m [N·m] | T_e [N·m] |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0.15 | 2.77 | 0.89 |
| 0.30 | 3.83 | 1.64 |
| 0.45 | 4.17 | 2.21 |
| 0.60 | 3.80 | 2.75 |

Los resultados de torque máximo y torque de equilibrio para cada mezcla se encuentran en el Anexo C.

Estos valores de torque contra tiempo se representaron gráficamente y se ajustaron a funciones polinomiales de tercer orden obteniendo coeficientes de correlación R^2 superiores a 0.99. El área entre la curva de torque máximo y la curva de torque de equilibrio se denominó “*área de ruptura*” y fue calculada por integración para cuantificar la tixotropía y la ruptura estructural de cada punto, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Método del área de ruptura para la mezcla GBBFS0-WFS30.



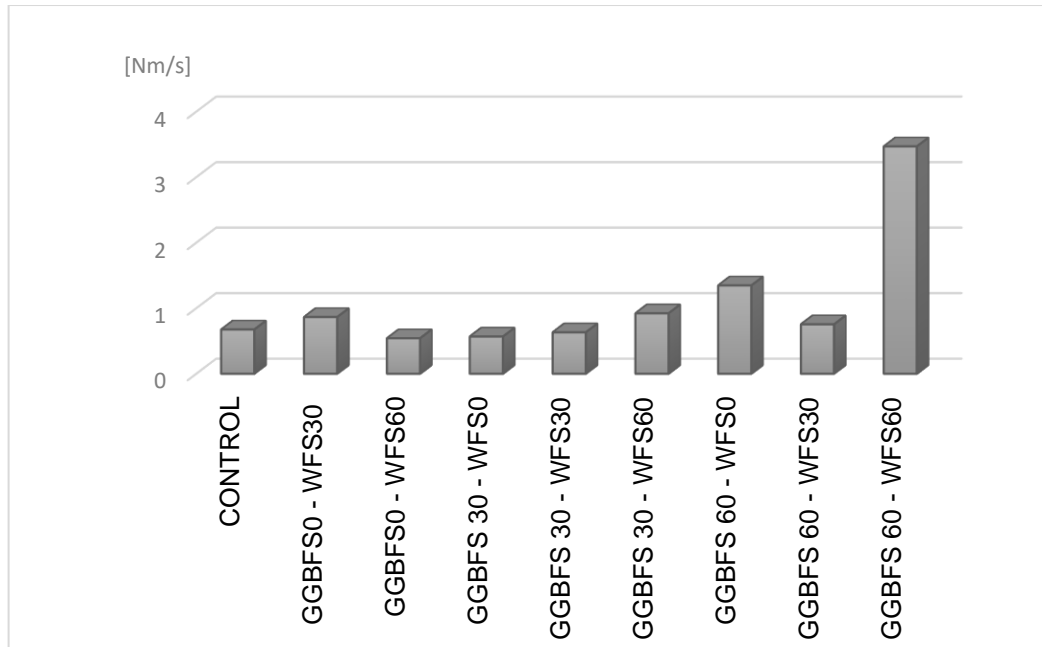
A mayor área de ruptura, se tiene mayor tixotropía, lo que indica una mayor cantidad de energía necesaria para romper los enlaces estructurales desarrollados en la mezcla en estado fresco cuando se deja en reposo ⁶⁰, lo que en términos prácticos se puede entender como generación de menores presiones de encofrado en la colocación del concreto autocompactante en múltiples capas, como es el caso de la construcción de edificaciones de gran altura y losas de concreto grandes ⁶¹. El

⁶⁰ GONZÁLEZ-TABOADA, et al. Op. cit

⁶¹ ROUSSEL, Nicolas. 'A Thixotropy Model for Fresh Fluid Concretes: Theory , Validation and Applications'. 2006. p.1797–1806.

comportamiento observado para cada una de las mezclas se registró en la Figura 12.

Figura 12. Área de ruptura estructural



En esta prueba particular, se observó que la mezcla GGBFS60- WFS60 obtuvo la mayor área de ruptura y el menor registro lo obtuvo la mezcla GGBFS0-WFS60 (Fig. 10). Los menores valores de área de ruptura se obtuvieron en las mezclas con sustitución 0 y 30% de cemento por GGBFS, lo que indica que no habría problemas relacionados a la tixotropía en usar la WFS en conjunto con bajos valores de GGBFS (hasta 30%)⁶². Por otro lado, se registró un aumento de la tixotropía en los puntos con mayor cantidad de GGBFS, como en GGBFS60-WFS0 que obtuvo aumento de 99% respecto a la muestra control, y una disminución en los puntos con mayor WFS, como en GGBFS0-WFS60 que tuvo una disminución del 20% en

⁶² ROUSSEL. Op. cit.

relación con la mezcla control. El uso en conjunto de estos materiales de reemplazo puede ser problemático tixotrópicamente, ya que el comportamiento tixotrópico está completamente vinculado con la superficie específica del material cementicio utilizado. Entre más fino sea el material, como en el caso de WFS y GGBFS, éste presentará mayor área específica, lo cual ocasiona un aumento en la cohesión y la floculación entre las partículas en suspensión de la pasta de cemento, requiriendo así mayor energía (mayor tixotropía) para romper los enlaces estructurales desarrollados en el reposo ⁶³. Este fenómeno podría generar planos de falla en la fundición en múltiples capas ⁶⁴.

3.2.2.2. Caída de la viscosidad aparente ponderada Los resultados del análisis de la varianza ANOVA muestran que, con un nivel de significancia $\alpha=0.05$, para la caída de la viscosidad aparente, la presencia de WFS y la interacción de ambos reemplazos GGBFS*WFS, fue estadísticamente significativa. Los resultados del análisis estadístico de la varianza se registran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultado del análisis de varianza ANOVA: Viscosidad aparente.

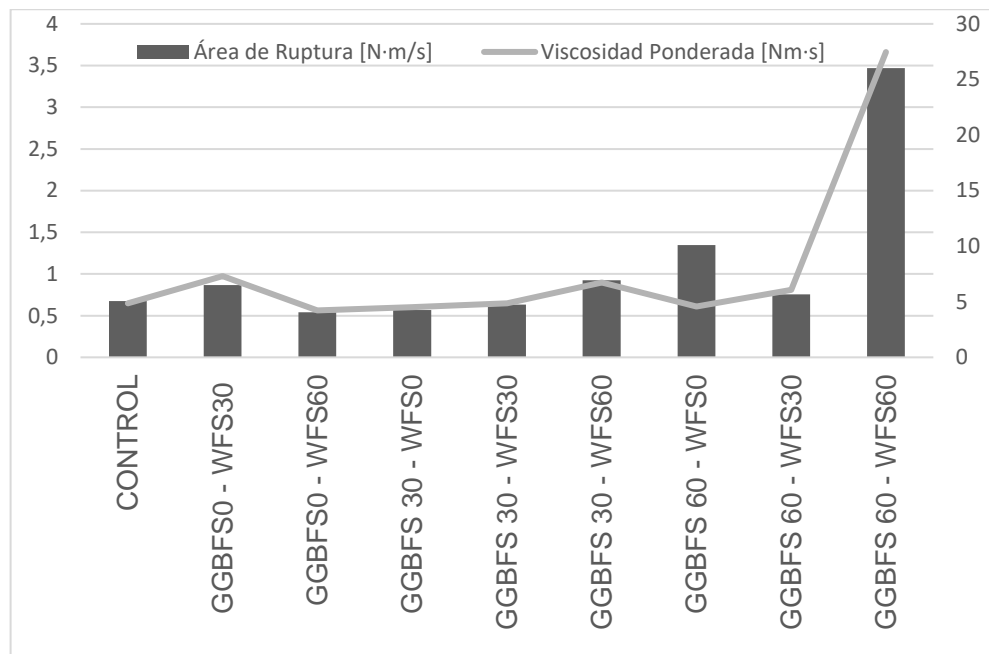
| VISCOSIDAD APARENTE | | | | | |
|----------------------------|-----------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Factores | GL | Adj SC | Adj SMC | Valor-F | Valor-P |
| GGBFS | 1 | 78.6 | 78.6 | 5 | 0.060 |
| WFS | 1 | 99.69 | 99.69 | 6.34 | 0.040 |
| GGBFS*GGBFS | 1 | 28.31 | 28.31 | 1.8 | 0.222 |
| WFS*WFS | 1 | 12.53 | 12.53 | 0.8 | 0.402 |
| GGBFS*WFS | 1 | 138.43 | 138.43 | 8.8 | 0.021 |
| Error Puro | 4 | 24.29 | 6.072 | | |
| Total | 12 | 491.35 | | | |

⁶³ ROUSSEL. Op. cit.

⁶⁴ Ibid.

Los resultados del método de la caída de la viscosidad aparente ponderada mostraron un comportamiento similar al del área de ruptura, tal como se esperaba, dado las correlaciones existentes entre ellas, tal como lo expone la teoría de Ahari, y se muestran a continuación en la Figura 13:

Figura 13. Relación del comportamiento del área de ruptura y la viscosidad aparente ponderada.

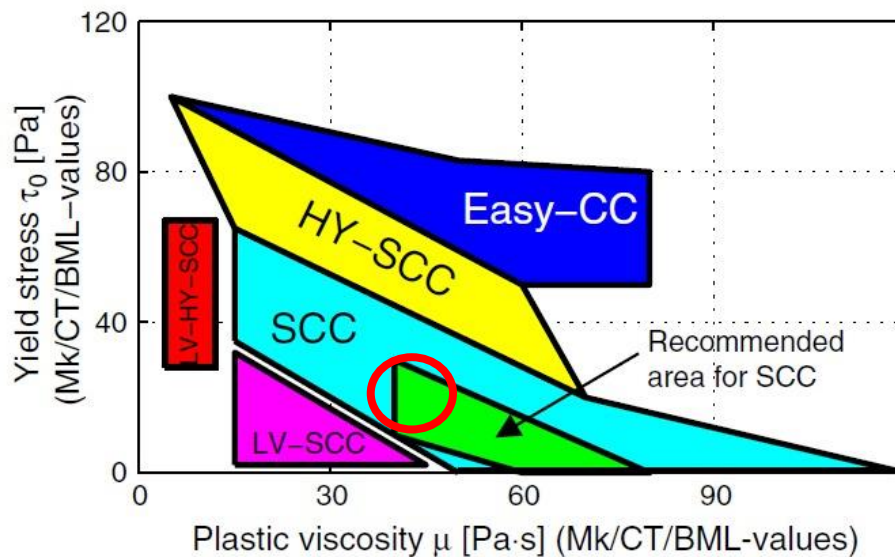


De estos dos métodos, el área de ruptura estructural y la caída de la viscosidad aparente ponderada, se puede inferir que, ambos materiales de reemplazo, WFS y GGBFS son estadísticamente significativos, ya que con ambos métodos se está cuantificando el comportamiento tixotrópico de las mismas mezclas de concreto autocompactante del ensayo.

3.3. RANGO DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS

La reología evalúa el estado fresco del concreto con estimaciones cuantitativas que determinan parámetros físicos fundamentales como la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia, proporcionando información valiosa sobre las propiedades del concreto fresco ⁶⁵. Esto, podría ser una buena herramienta para obtener una optimización del producto final. En la Figura 14, se muestran áreas de trabajabilidad para diferentes tipos de SCC. La Figura 15 muestra los valores típicos de los parámetros reológicos fundamentales para SCC en diferentes países, datos recolectados y basados en la experiencia. ⁶⁶

Figura 14. Áreas de trabajabilidad para el SCC



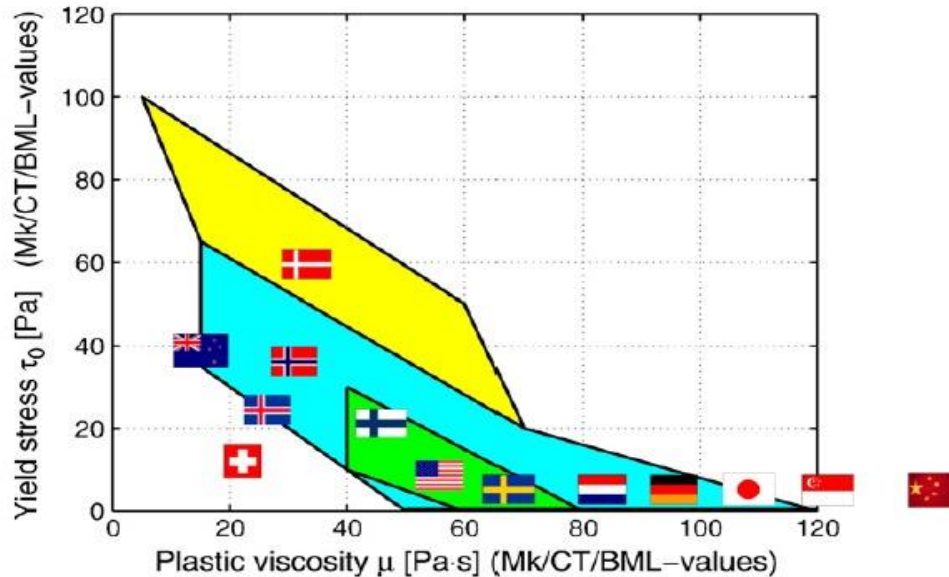
Fuente: Haraldsson y Wallevik. "Cement and Concrete Research Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes." 2011. ⁶⁷

⁶⁵ FALESCHINI, et al. Op. cit.

⁶⁶ HARALDSSON, Olafur y WALLEVIK, Jon Elvar. 'Cement and Concrete Research Rheology as a Tool in Concrete Science: The Use of Rheographs and Workability Boxes', Cement and Concrete Research. 2011. p.1279–88.

⁶⁷ Ibid.

Figura 15. Áreas de trabajabilidad para el SCC en diferentes países.



Fuente: Haraldsson & Wallevik. "Cement and Concrete Research Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes." 2011 ⁶⁸

El área designada como "Área recomendada para SCC" (verde) en la Figura 14 muestra los valores óptimos para SCC, mientras que los valores del área designada como "SCC" (azul claro), muestra el rango de los valores generalmente recomendados para SCC.

Los resultados obtenidos en la presente investigación, se encuentran todos en la zona más recomendada para SCC (zona verde), mostrada en la Figura 14. De la muestra control (GGBFS0 – WFS0), se obtuvieron valores de viscosidad plástica de 40 [Pa·s] y esfuerzo de fluencia dinámico de 20 [Pa], lo cual indica que es un concreto de calidad y características parecidas a los producidos en Finlandia; y las otras mezclas con los materiales de reemplazo presentaron parámetros reológicos

⁶⁸ HARALDSSON y WALLEVIK. Op. Cit.

similares a los obtenidos en SCC producidos en Estados Unidos y Suecia de acuerdo a la Figura 15 presentada por Haraldsson & Wallevik ⁶⁹.

En general, si la viscosidad plástica (μ) es baja, es decir, por debajo de unos 40 [Pa·s], el SCC debería tener un valor relativamente alto de esfuerzo de fluencia, para mantener la estabilidad. Por otro lado, si el SCC presenta una viscosidad plástica superior a 80 [Pa·s], el esfuerzo de fluencia debería estar en un rango por debajo de 15 [Pa], para mantener la fluidez requerida por un SCC ⁷⁰.

⁶⁹ Ibid.

⁷⁰ Ibid.

4. CONCLUSIONES

Del estudio del comportamiento reológico y tixotrópico del concreto autocompactante en estado fresco, modificado con residuo de arena de fundición (WFS) como reemplazo parcial de agregado fino y escoria de alto horno (GGBFS) como reemplazo parcial del material cementicio, considerando sustituciones hasta de un 60% en masa, se pudo concluir lo siguiente:

El ajuste de los datos al modelo reológico de Bingham lineal mostró una desviación de la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$), dando como resultado valores negativos de esfuerzo de fluencia, los cuales no tienen explicación física alguna y representan un engrosamiento o adelgazamiento de la viscosidad debido al aumentar la velocidad de corte.

Un ajuste más adecuado para el comportamiento reológico de las mezclas se obtuvo con el modelo de Bingham modificado, ya que este considera la no-linealidad de los resultados y se adapta a los cambios de la viscosidad, dando como resultado valores positivos de esfuerzo de fluencia dinámico y coeficientes de correlación (R^2) superiores a 0.99.

El esfuerzo de fluencia dinámico mostró una disminución con la adición de cualquiera de los dos materiales de reemplazo (GGBFS y WFS). Los resultados de ANOVA constataron que tanto GGBFS como WFS fueron estadísticamente significativos ($\alpha = 0.05$) en la generación del esfuerzo de fluencia dinámico.

En la viscosidad plástica los resultados de ANOVA indicaron que sólo la WFS fue significativa, es decir, estadísticamente hablando, la presencia de GGBFS no presentó efecto sobre la viscosidad plástica. Esto se pudo constatar con los resultados de los ensayos, donde la incorporación y aumento del reemplazo de WFS en ausencia de GGBFS generó efectos visibles en la viscosidad plástica.

Los torques máximos y de equilibrio mostraron un aumento directamente proporcional con las velocidades de corte aplicadas a cada una de las mezclas.

BIBLIOGRAFIA

AHARI REZA SALEH TAHIR KEMAL ERDEM, AND KAMBIZ RAMYAR, 'Thixotropy and Structural Breakdown Properties of Self Consolidating Concrete Containing Various Supplementary Cementitious Materials', *Cement and Concrete Composites*, 59 (2015).

ALLAGOVA MARY. 'Comportamiento En Estados Fresco y Endurecido de Un Concreto Autocompactante, Adicionado Con Escoria de Carbón, y Elaborado Con Agregado Grueso de Concreto Reciclado', *Informador Técnico*, 78 (2014), pp.128–39.

AUXILIADORA, MARIA, DE BARROS MARTINS, REGINA MAMBELI, GILBERT SILVA, AND IVAN FELIPE, 'Study on Waste Foundry Exhaust Sand , WFES , as a Partial Substitute of Fine Aggregates in Conventional Concrete', *Sustainable Cities and Society*, 45 (2019).

AYLARD RICHARD AND LOUISE HAWSON, 'Cement Sustainability Initiative', 2002, 40

BANFILL PHILLIP AND FRANK GOWER, 'Rheology of Fresh Cement and Concrete', in *Rheology Reviews 2006 (British Society of Rheology, 2006)*, pp. 61–130.

BARNES H. A., 'Shear-Thickening ("Dilatancy") in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids', *Journal of Rheology*, 33 (1989), 329–66.

BHARDWAJ BAVITA AND PARDEEP KUMAR, 'Waste Foundry Sand in Concrete: A Review', *Construction and Building Materials*, 156 (2017), 661–74.

CHIDIAC S. E. AND F. MAHMOODZADEH. 'Plastic Viscosity of Fresh Concrete - A Critical Review of Predictions Methods', *Cement and Concrete Composites*, 2009. p. 535–44.

CYR MARTIN, CLAUDE LEGRAND AND MICHEL MOURET, 'Study of the Shear Thickening Effect of Superplasticizers on the Rheological Behaviour of Cement Pastes Containing or Not Mineral Additives', *Cement and Concrete Research*. 2000. 1477–83.

EFNARC, Guidelines, The European, and Self-compacting Concrete, 'The European Guidelines for Self-Compacting Concrete', 2005

FALESCHINI FLORA, JIMÉNEZ CRISTIAN, BARRA MARILDA, APONTE DIEGO, VÁZQUEZ ENRIC, AND PELLEGRINO CARLO, 'Rheology of Fresh Concretes with Recycled Aggregates', *Construction and Building Materials*, 73 (2014), 407–16.

FERRARIS CHIARA F., 'Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report', *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104 (1999).

FEYS DIMITRI, GERT HEIRMAN, GEERT DE SCHUTTER, RONNY VERHOEVEN, LUCIE VANDEWALLE, AND DIONYS VAN GEMERT, 'Comparison of two concrete rheometers for shear thickening behaviour of scc', 2016, pp.1–6

FEYS DIMITRI, RONNY VERHOEVEN, AND GEERT DE SCHUTTER, 'Evaluation of Time Independent Rheological Models Applicable to Fresh Self-Compacting Concrete', 17 (2007), 1–10

FEYS DIMITRI, RONNY VERHOEVEN, AND GEERT DE SCHUTTER, 'Fresh Self Compacting Concrete, a Shear Thickening Material', *Cement and Concrete Research*, 38 (2008), 920–29.

FEYS DIMITRI, JON E WALLEVIK, AND AMMAR YAHIA, 'Extension of the Reiner – Rivlin Equation to Determine Modified Bingham Parameters Measured in Coaxial Cylinders Rheometers 2012.

GONZÁLEZ-TABOADA IRIS, BELÉN GONZÁLEZ-FONTEBOA, FERNANDO MARTÍNEZ AND SINDY SEARA-PAZ, 'Thixotropy and Interlayer Bond Strength of Self-Compacting Recycled Concrete', *Construction and Building Materials*. 2018. 479–88.

GÜNEYISI E., M. GESOGLU, N. NAJI, AND S. IPEK, 'Evaluation of the Rheological

Behavior of Fresh Self-Compacting Rubberized Concrete by Using the Herschel-Bulkley and Modified Bingham Models', *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16 (2016), 9–19.

GUZMÁN EDUARDO, JAVIER TAJUELO, JUAN MANUEL PASTOR, MIGUEL ÁNGEL RUBIO, FRANCISCO ORTEGA, AND RAMÓN G. RUBIO, 'Shear Rheology of Fluid Interfaces: Closing the Gap between Macro- and Micro-Rheology', *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 37 (2018), 33–48.

HAMMOND G. P., AND C. I. JONES, 'Embodied Energy and Carbon in Construction Materials'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*. 2008. p. 87–98.

HARALDSSON OLAFUR, AND JON ELVAR, 'Cement and Concrete Research Rheology as a Tool in Concrete Science : The Use of Rheographs and Workability Boxes', *Cement and Concrete Research*, 41 (2011), 1279–88.

JIAO DENGWU, CAIJUN SHI, QIANG YUAN, XIAOPENG AN, YU LIU, AND HUANG LI, 'Effect of Constituents on Rheological Properties of Fresh Concrete-A Review', *Cement and Concrete Composites*, 83 (2017), 146–59.

K. P. BHARGAV KUMAR, GEETHA KRISHNA, AND B. UMASHANKAR, 'Evaluation of Waste Foundry Sand and Blast Furnace Steel Slag as Geomaterials', *Geo-Congress*, 2019, 203–11

KECIĆ VESNA, ĐURĐA KERKEZ, MILJANA PRICA, OGNJAN LUŽANIN, MILENA BEČELIĆ-TOMIN, DRAGANA TOMAŠEVIĆ PILIPOVIĆ, AND OTHERS, 'Optimization of Azo Printing Dye Removal with Oak Leaves-NZVI/H₂O₂system Using Statistically Designed Experiment', *Journal of Cleaner Production*, 202 (2018), 65–80.

KLEINEN JOHN, 'Tropicality and Topicality: Pierre Gourou and the Genealogy of French Colonial Scholarship on Rural Vietnam', *Singapore Journal of Tropical Geography*, 26 (2005), 339–58.

LAPASIN R., A. PAPO, AND S. RAJGELJ, 'Flow Behavior of Fresh Cement Pastes. A

Comparison of Different Rheological Instruments and Techniques', *Cement and Concrete Research*, 13 (1983), 349–56.

MAHMOODZADEH F., AND S. E. CHIDIAC, 'Rheological Models for Predicting Plastic Viscosity and Yield Stress of Fresh Concrete', *Cement and Concrete Research* 2013. 1–9.

MEWIS, JAN, AND NORMAN J. WAGNER, 'Thixotropy', *Advances in Colloid and Interface Science*, 147–148 (2009), 214–27

MORICONI, G, *Effect of Using Recycled Materials in Concrete on the Corrosion of the Steel Bars, Corrosion of Steel in Concrete Structures* (Elsevier Ltd, 2016).

OFORI, G, 'Challenges of Construction Industries in Developing Countries : Lessons from Various Countries', *Citeseerx.Ist.Psu.Edu*, 2000, 15–17.

OKAMURA H, y OUCHI M, 'Self-Compacting High Performance Concrete', 2003, 378–83

ROBAYO SALAZAR, RAFAEL ANDRES, PEDRO ENRIQUE MATTEY CENTENO, YIMMY FERNANDO SILVA URREGO, AND SILVIO DELVASTO ARJONA, 'Comportamiento En Estados Fresco y Endurecido de Un Concreto Autocompactante, Adicionado Con Escoria de Carbón, y Elaborado Con Agregado Grueso de Concreto Reciclado', *Informador Técnico*, 78 (2014).

ROUSSEL, NICOLAS, 'A Thixotropy Model for Fresh Fluid Concretes : Theory , Validation and Applications', 36 (2006), 1797–1806.

ROY, D. M., AND K. ASAGA, 'Rheological Properties of Cement Mixes: V. The Effects of Time on Viscometric Properties of Mixes Containing Superplasticizers; Conclusions', *Cement and Concrete Research*, 10 (1980), 387–94

SANTAMOURIS, M., N. PAPANIKOLAOU, I. LIVADA, I. KORONAKIS, C. GEORGAKIS, A. ARGIRIOU, AND OTHERS, 'On the Impact of Urban Climate on the Energy Consumption of Building', *Solar Energy*, 70 (2001), 201–16.

SENANI, M, N FERHOUNE, A GUETTALA, AND J B AGUIAR, 'Eco-Concrete with Incorporation of Blast Furnace Slag as Natural Aggregates Replacement', *Science and Technology of Materials*, 2018, 1–7.

SINGH, RAN BIR, AND BHUPINDER SINGH, 'Rheological Behaviour of Different Grades of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregates', *Construction and Building Materials*, 161 (2018), 354–64.

STRUBLE, LESLIE J, AND CHUN-TAO CHEN, 'Effect of Continuous Agitation on Concrete Rheology', *Journal of ASTM International*, 2 (2005), 1–19.

TAVASOLI, SYAMAK, MAHMOUD NILI, AND BEHRAD SERPOOSH, 'Effect of GGBS on the Frost Resistance of Self-Consolidating Concrete', *Construction and Building Materials*, 165 (2018), 717–22.

TITTARELLI, FRANCESCA, *Waste Foundry Sand, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (Elsevier Ltd, 2018).

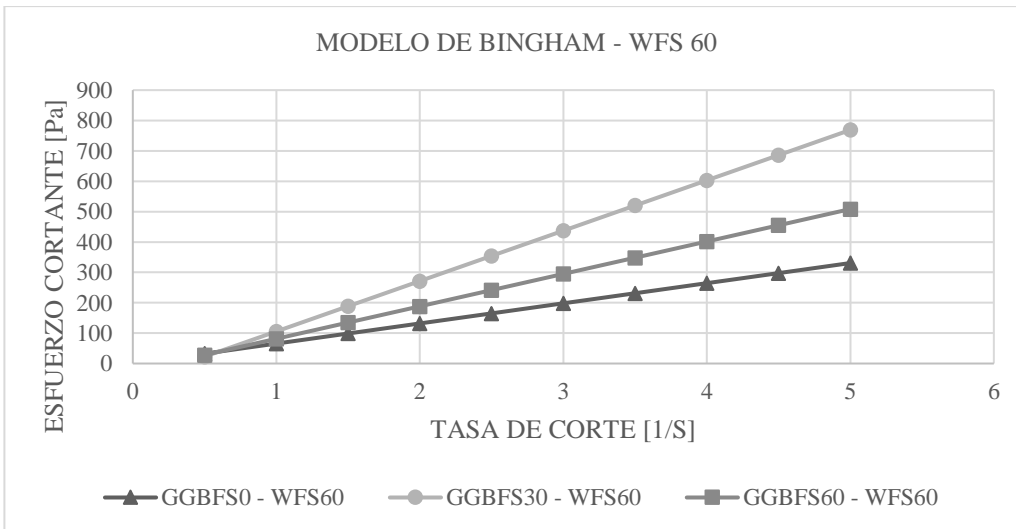
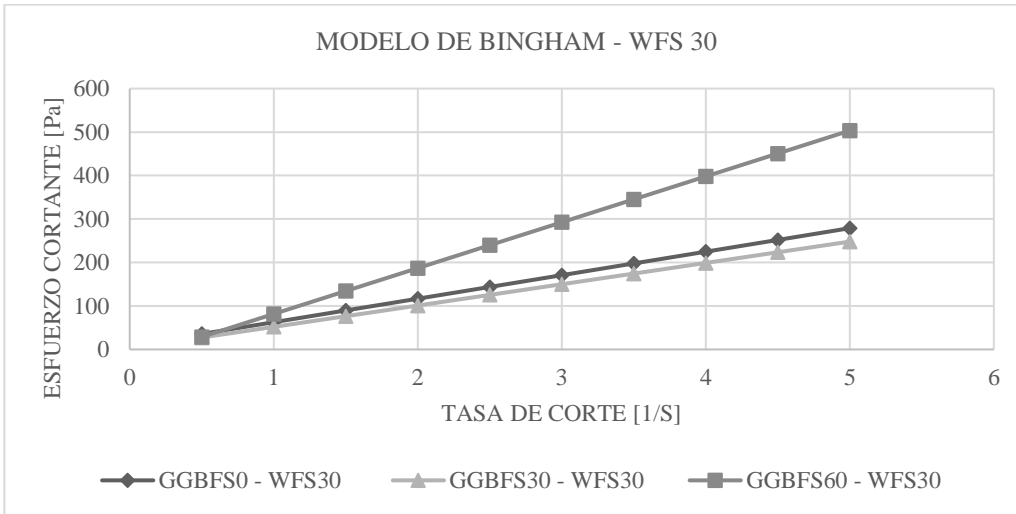
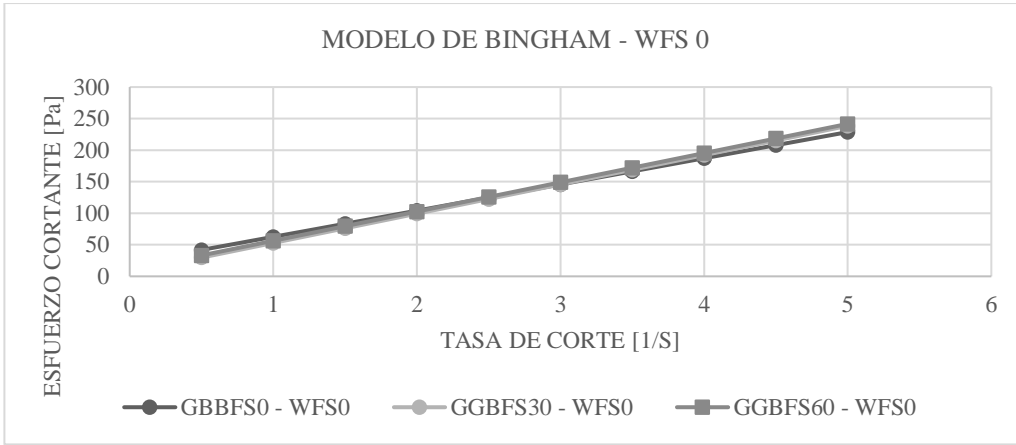
TORRES-CARRASCO, MANUEL, CARLOS RODRÍGUEZ-PUERTAS, MARÍA DEL MAR ALONSO, AND FRANCISCA PUERTAS, 'Alkali Activated Slag Cements Using Waste Glass as Alternative Activators. Rheological Behaviour', *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54 (2015), 45–57.

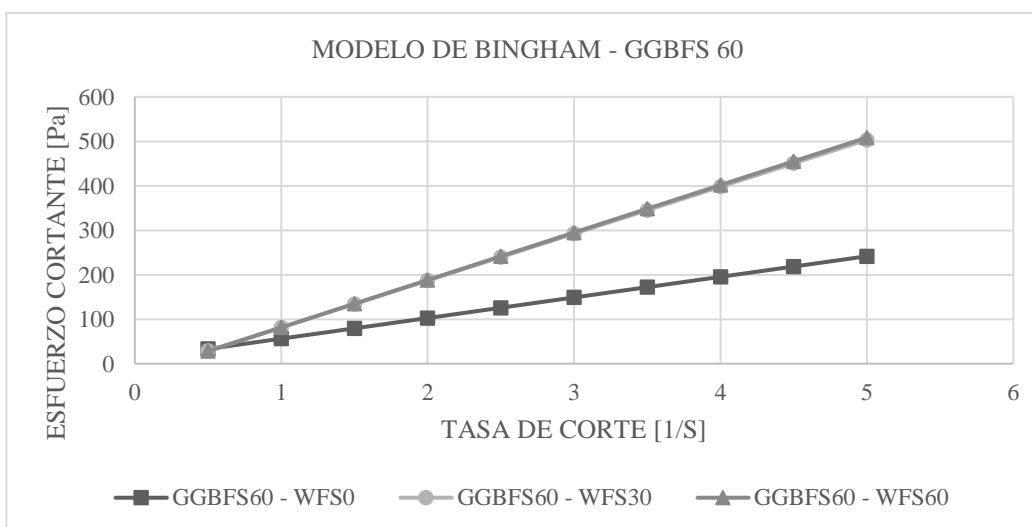
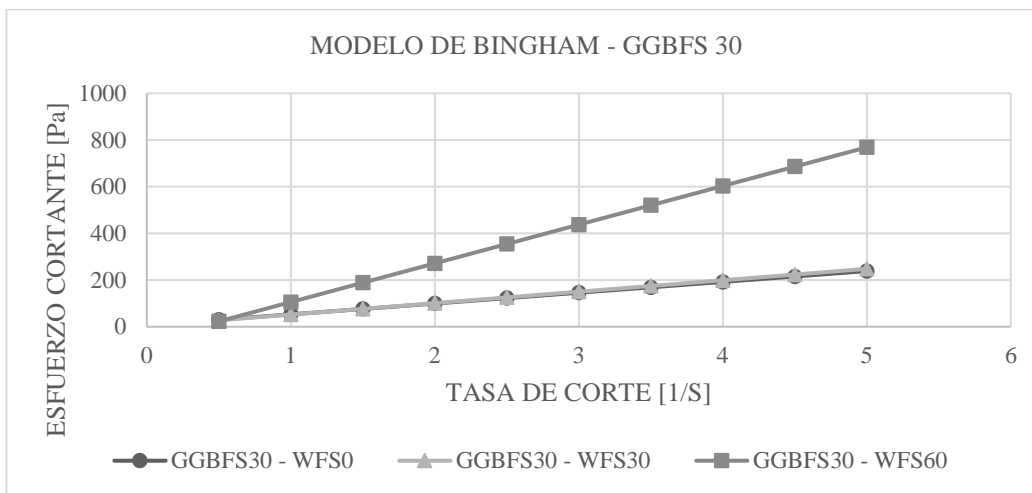
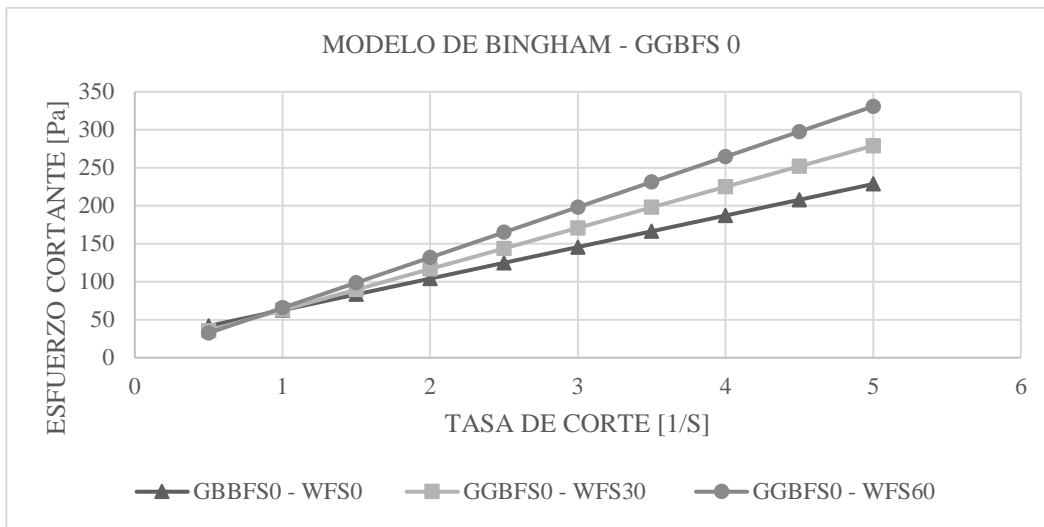
WALLEVIK, JON ELVAR, 'Rheological Properties of Cement Paste: Thixotropic Behavior and Structural Breakdown', *Cement and Concrete Research*, 39 (2009), 14–29.

YUKSEL, ISA. *Blast-Furnace Slag, Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (Elsevier Ltd, 2018) <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2>>

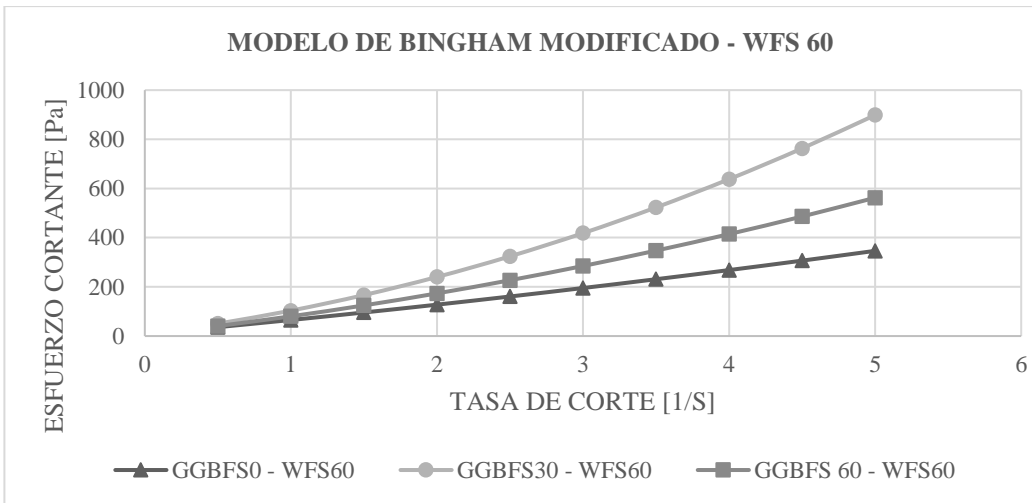
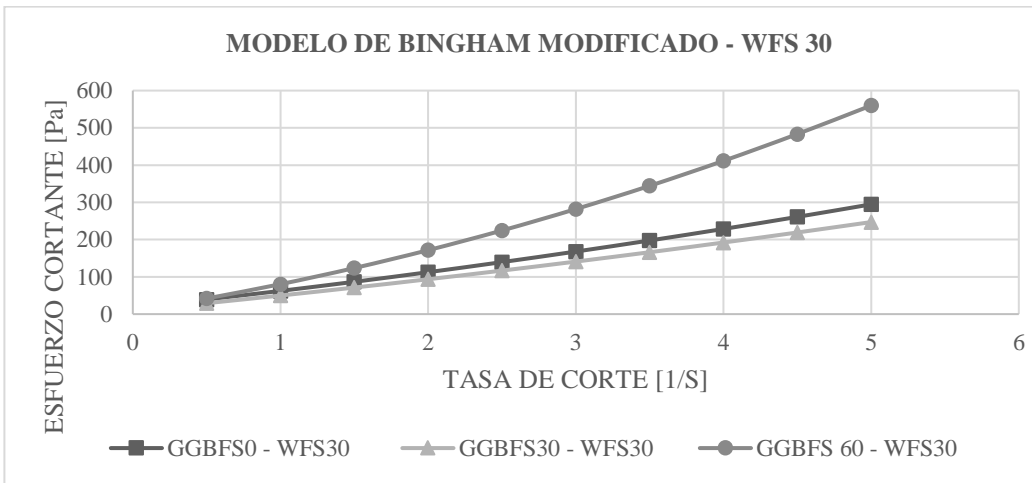
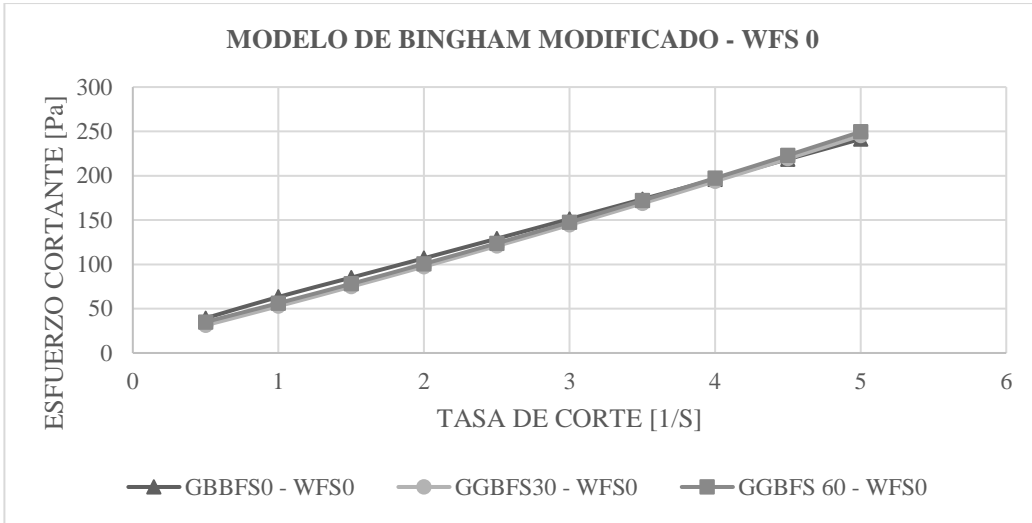
Anexo A

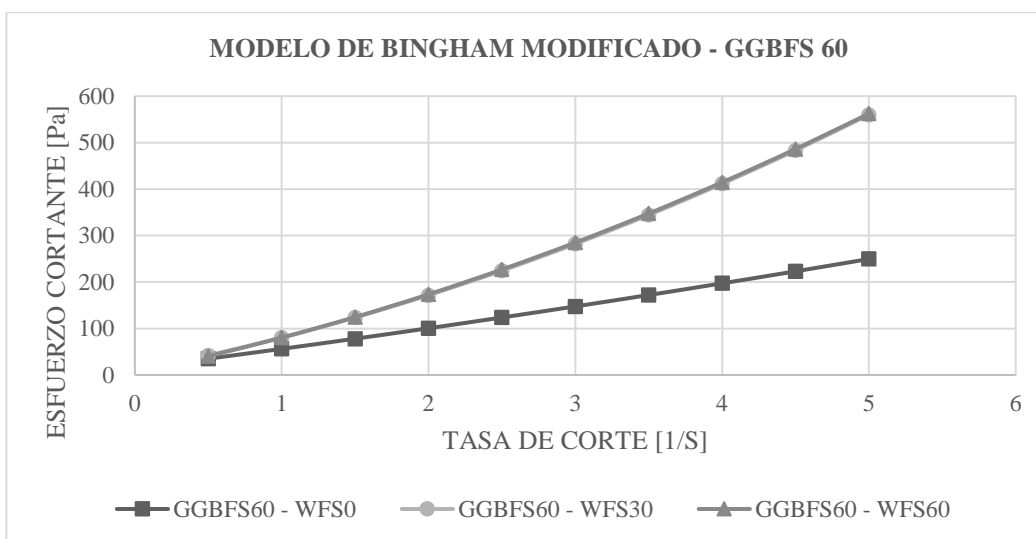
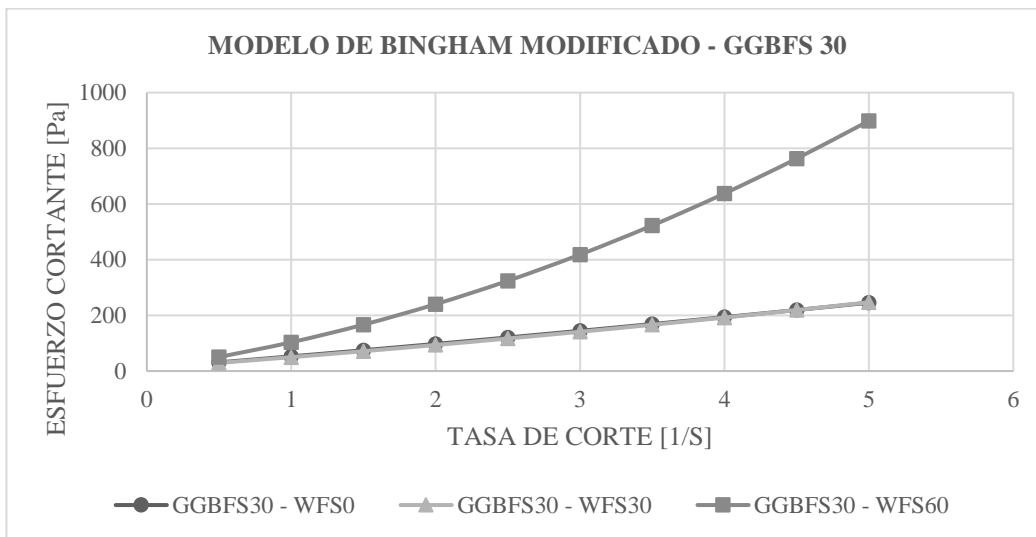
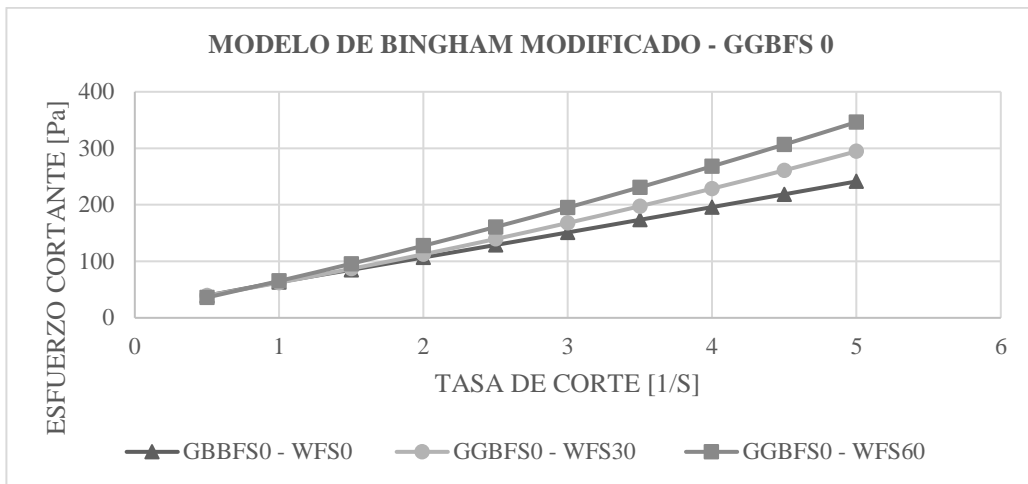
Ajuste al modelo de Bingham lineal





Anexo B Ajuste al modelo de Bingham modificado





Anexo C Torque máximo y torque de equilibrio de todas las mezclas en estudio en los ensayos de tixotropía.

Tabla 1. Torque máximo para las mezclas del ensayo.

| TORQUE MÁXIMO [N·M] | | | | |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0.15 | 0.3 | 0.45 | 0.6 |
| | [rps] | [rps] | [rps] | [rps] |
| CONTROL | 1.95 | 2.73 | 3.49 | 3.13 |
| GGBFS0 – WFS30 | 2.76 | 3.83 | 4.17 | 3.79 |
| GGBFS0 – WFS60 | 1.71 | 2.77 | 3.51 | 3.88 |
| GGBFS 30 – WFS0 | 1.73 | 2.58 | 3.06 | 2.84 |
| GGBFS 30 – WFS30 | 1.29 | 2.03 | 2.54 | 2.87 |
| GGBFS 30 – WFS60 | 2.53 | 4.59 | 6.25 | 7.61 |
| GGBFS 60 – WFS0 | 2.01 | 2.86 | 3.37 | 3.41 |
| GGBFS 60 – WFS30 | 2.10 | 3.98 | 4.89 | 5.71 |
| GGBFS 60 – WFS60 | 7.89 | 10.65 | 12.71 | 7.82 |

Tabla 2. Torque de Equilibrio para las mezclas del ensayo.

| TORQUE MÁXIMO [N·M] | | | | |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 0.15 | 0.3 | 0.45 | 0.6 |
| | [rps] | [rps] | [rps] | [rps] |
| CONTROL | 0.77 | 1.26 | 1.67 | 2.17 |
| GGBFS0 – WFS30 | 0.88 | 1.64 | 2.21 | 2.75 |
| GGBFS0 – WFS60 | 0.86 | 1.51 | 2.23 | 2.76 |
| GGBFS 30 – WFS0 | 0.70 | 1.23 | 1.59 | 2.21 |
| GGBFS 30 – WFS30 | 0.52 | 1.01 | 1.37 | 1.78 |
| GGBFS 30 – WFS60 | 1.24 | 2.58 | 3.98 | 5.36 |
| GGBFS 60 – WFS0 | 0.74 | 1.48 | 1.77 | 2.31 |
| GGBFS 60 – WFS30 | 1.04 | 2.16 | 3.10 | 4.21 |
| GGBFS 60 – WFS60 | 1.12 | 2.42 | 3.67 | 4.78 |

Anexo D**Variación de los parámetros reológicos con respecto a la mezcla control****Tabla 3.** Variación del esfuerzo de Fluencia

| Mezcla | WFS | GGBFS | Esfuerzo de Fluencia Dinámico [Pa] | Variación del esfuerzo de Fluencia dinámico en % con respecto al control | |
|------------------|------------|--------------|---|---|-------------|
| CONTROL | 0 | 0 | 20,13 | CONTROL | - |
| GGBFS0 - WFS30 | 30 | 0 | 17,49 | 13% | Disminución |
| GGBFS0 - WFS60 | 60 | 0 | 8,19 | 59% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS0 | 0 | 30 | 10,34 | 49% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS30 | 30 | 30 | 9,83 | 51% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS60 | 60 | 30 | 7,73 | 62% | Disminución |
| GGBFS 60 - WFS0 | 0 | 60 | 14,48 | 28% | Disminución |
| GGBFS 60 - WFS30 | 30 | 60 | 8,24 | 59% | Disminución |
| GGBFS 60 - WFS60 | 60 | 60 | 5,24 | 74% | Disminución |

Tabla 4. Variación de la Viscosidad plástica

| Punto | WFS | GGBFS | Viscosidad plástica [Pa·s] | Variación de la Viscosidad Plástica en % con respecto al control | |
|------------------|------------|--------------|-----------------------------------|---|-------------|
| CONTROL | 0 | 0 | 42,80 | CONTROL | - |
| GGBFS0 - WFS30 | 30 | 0 | 42,23 | 1% | Disminución |
| GGBFS0 - WFS60 | 60 | 0 | 54,44 | 27% | Aumento |
| GGBFS 30 - WFS0 | 0 | 30 | 41,29 | 4% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS30 | 30 | 30 | 38,18 | 11% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS60 | 60 | 30 | 74,96 | 75% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS0 | 0 | 60 | 40,37 | 6% | Disminución |
| GGBFS 60 - WFS30 | 30 | 60 | 62,64 | 46% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS60 | 60 | 60 | 65,92 | 54% | Aumento |

Anexo E**Variación de los parámetros tixotrópicos con respecto a la mezcla control****Tabla 5.** Variación del área de ruptura

| Mezcla | WFS | GGBFS | Área de Ruptura [N·m/s] | Variación de la Viscosidad Plástica en % con respecto al control | |
|------------------|------------|--------------|--------------------------------|---|-------------|
| CONTROL | 0 | 0 | 0,675 | CONTROL | - |
| GGBFS0 - WFS30 | 30 | 0 | 0,866 | 28% | Aumento |
| GGBFS0 - WFS60 | 60 | 0 | 0,542 | 20% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS0 | 0 | 30 | 0,568 | 16% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS30 | 30 | 30 | 0,633 | 6% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS60 | 60 | 30 | 0,923 | 37% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS0 | 0 | 60 | 1,348 | 100% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS30 | 30 | 60 | 0,755 | 12% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS60 | 60 | 60 | 3,469 | 414% | Aumento |

Tabla 6. Variación de la caída de la viscosidad aparente

| Punto | WFS | GGBFS | Caída de la viscosidad aparente [Nm·s] | Variación de la caída de la viscosidad aparente en % con respecto al control | |
|------------------|------------|--------------|---|---|-------------|
| CONTROL | 0 | 0 | 4,869 | CONTROL | - |
| GGBFS0 - WFS30 | 30 | 0 | 7,309 | 50% | Aumento |
| GGBFS0 - WFS60 | 60 | 0 | 4,223 | 13% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS0 | 0 | 30 | 4,510 | 7% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS30 | 30 | 30 | 4,855 | 0,3% | Disminución |
| GGBFS 30 - WFS60 | 60 | 30 | 6,728 | 38% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS0 | 0 | 60 | 4,579 | 6% | Disminución |
| GGBFS 60 - WFS30 | 30 | 60 | 6,073 | 25% | Aumento |
| GGBFS 60 - WFS60 | 60 | 60 | 27,464 | 464% | Aumento |