

Influencia del aditivo poli (glicerol – ácido cítrico) en la reología del concreto de baja viscosidad

Natalia Carolina Uribe Contreras

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

Luis Eduardo Zapata Orduz

Ingeniero Civil, PhD

Codirector

Lina María Abril Moreno

Ingeniera Química, (c) MsC

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi familia por ser mi polo a tierra, mi motivación y por brindarme apoyo incondicional
en cada paso de mi vida.

A todos los que de una u otra forma me guiaron y colaboraron para hacer posible este
proyecto.

A Apolo por ser mi fiel compañero, aunque ya no esté conmigo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	10
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos	14
2. Marco teórico.....	15
2.1 Aditivo poli (glicerol – ácido cítrico).....	15
3. Desarrollo experimental	16
3.1 Caracterización de materiales	16
3.1.1 Agregado grueso	16
3.1.2 Agregado fino.....	17
3.1.3 Aditivo químico en investigación	17
3.1.4 Cemento.....	18
3.1.5 Proporciones de la mezcla	18
3.2 Proceso de mezclado	19
3.3 Propiedades del concreto de baja viscosidad	19
3.3.1 Prueba de asentamiento	19
3.3.2 Ensayos de reología.....	20
3.3.3 Ensayos de compresión.....	21
3.4 Diseño estadístico factorial del experimento.....	23
4. Resultados y discusión	24
4.1 Ensayos de asentamiento	24

INFLUENCIA DEL POLI (GLICEROL – ÁCIDO CÍTRICO) EN CONCRETO

	4
4.2 Ajuste lineal de los parámetros según modelo de Bingham	26
4.3 Diseño estadístico – experimental.....	29
4.4 Ensayos de compresión	35
5. Conclusiones	41
Referencias Bibliográficas.....	42
Anexos.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Granulometría del agregado grueso Granulometría del agregado grueso	17
Tabla 2. Granulometría del agregado fino.....	18
Tabla 3. Proporciones de las mezclas	19
Tabla 4. Valores de torque y velocidad rotacional de cada una de las mezclas.	26
Tabla 5. Parámetros de ajuste del modelo reológico de Bingham.....	28
Tabla 6. Análisis estadístico ANOVA del esfuerzo de fluencia.....	30
Tabla 7. Análisis estadístico ANOVA de la viscosidad plástica.	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo reológico de Bingham y Herschel - Bulkey.....	12
Figura 2. Representación esquemática de la eterificación de glicerol a poliglicerol.....	16
Figura 3. Prueba de asentamiento según EFNARC.....	20
Figura 4. Reómetro para concreto de cilindros coaxiales ICAR RHM-3000.....	21
Figura 5. Ensayos de resistencia a la compresión.....	22
Figura 6. Diseño experimental factorial 2 ²	24
Figura 7. Resultados prueba de asentamiento	25
Figura 8. Relación de torque vs velocidad rotacional de la mezcla “a-c 0.500 AQ 0.95%”.....	29
Figura 9. Diagrama de Pareto del esfuerzo de fluencia.....	31
Figura 10. Diagrama de Pareto de la viscosidad plástica.....	32
Figura 11. Superficie estadística de respuesta de la viscosidad plástica.....	33
Figura 12. Superficie estadística de respuesta de la viscosidad plástica.....	34
Figura 13. Resistencia a la compresión a diferentes edades de maduración.....	35
Figura 14. Intervalo de confianza 95%: mezcla a-c 0.450.....	37
Figura 15. Intervalo de confianza 95%: mezcla a-c 0.475.....	38
Figura 16. Intervalo de confianza 95%: mezcla a-c 0.500.....	39

Lista de Anexos

pág.

Anexo A. Relaciones de torque contra velocidad rotacional de cada mezcla47

Resumen

Título: Influencia del aditivo poli (glicerol – ácido cítrico) en la reología del concreto de baja viscosidad*

Autor: Natalia Carolina Uribe Contreras**

Palabras Clave: concreto de baja viscosidad, aditivo químico, reología, esfuerzo de fluencia, viscosidad plástica, esfuerzo de compresión.

Descripción: Este documento presenta los resultados experimentales de la investigación del aditivo químico poli (glicerol – ácido cítrico) sintetizado por el Grupo de Investigación de Polímeros de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, del cual se desconocía su efecto en el concreto como material de construcción. La clasificación e influencia de este aditivo químico se determinó a través del ajuste de los datos obtenidos mediante un reómetro ICAR RHM-3000 al modelo reológico de Bingham y un diseño estadístico – experimental 2^2 teniendo como variables: la relación de agua – cemento (0.450, 0.475 y 0.500) y concentración de aditivo químico con valores de 0.65%, 0.80% y 0.95% conforme el peso de cemento. Los resultados obtenidos muestran que el aditivo poli (glicerol – ácido cítrico) actúa fundamentalmente como superplastificante debido a que disminuye el esfuerzo de fluencia, no afecta la viscosidad plástica y aumenta la trabajabilidad, además presenta comportamiento retardante. La resistencia a la compresión promedio no presenta una variación estadística significativa al 95 % de confianza frente a mezclas sin el poli (glicerol - ácido cítrico) a iguales relaciones agua – cemento, sin embargo, se requiere mayor investigación por la heterogeneidad en los rangos de error de los tratamientos en las diferentes edades empleadas.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Ingeniero Civil, PhD. Codirector: Lina María Abril Moreno. Ingeniera Química, (c) MsC

Abstract

Title: Influence of poly (glycerol-citric acid) admixture on the rheology of low viscosity concrete*

Author(s): Natalia Carolina Uribe Contreras**

Key Words: low viscosity concrete, chemical admixture, rheology, yield stress, plastic viscosity, compressive stress.

Description: This paper presents the experimental findings of the investigation on the chemical additive poly(glycerol-citric acid) synthesized by the Polymer Research Group at the School of Chemical Engineering, Industrial University of Santander. The effect of this additive on concrete as a construction material was previously unknown. The researchers determined the classification and influence of this chemical additive by using an ICAR RHM-3000 rheometer to fit the data to the Bingham rheological model, employing a 22 experimental design with water-cement ratios of 0.450, 0.475, and 0.500, and additive concentrations of 0.65%, 0.80%, and 0.95% based on cement weight as variables. The results demonstrate that the poly(glycerol - citric acid) additive primarily acts as a superplasticizer, reducing the yield stress and enhancing workability without affecting the plastic viscosity. Additionally, it exhibits retardant behavior. The average compressive strength does not show statistically significant variation at the 95% confidence level compared to mixes without poly(glycerol - citric acid) at the same water-cement ratios. However, further research is necessary due to the heterogeneity in the error ranges of the treatments at different ages employed.

* Degree Work

**Faculty of Physical Mechanical Engineering. Civil Engineering School. Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Civil Engineer, PhD. Codirector: Lina María Abril Moreno. Chemical Engineer, (c) MsC

Introducción

El concreto es el material mayormente empleado en construcciones y demás áreas de la ingeniería civil en la actualidad. La calidad de las estructuras de concreto depende de la calidad que posea cada uno de sus componentes. Generalmente, el concreto está compuesto de agregados, agua y cemento, y en ocasiones, se hace uso de aditivos químicos en su proceso de producción (Celestine Ezeagu & Ebuka Edwin, 2021; Wallevik & Wallevik, 2011).

Los aditivos químicos brindan mejoras en las propiedades del concreto fresco o endurecido dependiendo la necesidad a satisfacer (Celestine Ezeagu & Ebuka Edwin, 2021). Dichos aditivos pueden actuar principalmente como acelerantes, retardantes, modificadores de viscosidad, o como superplastificantes (SP) (Devi et al., 2020). El efecto de los aditivos químicos ha sido objeto de investigación debido a que su comportamiento depende de la composición y proceso de producción del concreto; además que el tipo y cantidad del aditivo químico empleado afecta la hidratación, fraguado, deformación y en general, la reología de los materiales cementicios (Ahmad, 2013).

Para el correcto desarrollo de la presente investigación se requería un tipo de concreto que fuese viable con el reómetro ICAR RHM-3000, por esto se seleccionó uno que permitiera su correcto funcionamiento como lo es el de baja viscosidad, hubiese sido viable haber empleado concreto autocompactante o cualquier otro tipo de concreto de alta fluidez que evitara la avería del reómetro. En cualquier caso, los resultados obtenidos sea cual fuere el concreto empleado, son válidos para determinar el efecto del aditivo en todo tipo de concreto en general. No obstante, en cualquier tipo de concreto los aditivos químicos y la relación agua – cemento modifican el comportamiento y propiedades, en términos de trabajabilidad, consistencia, fluidez, movilidad y bombeabilidad (Ahmad, 2013); por esto es necesario realizar un análisis de la reología de este,

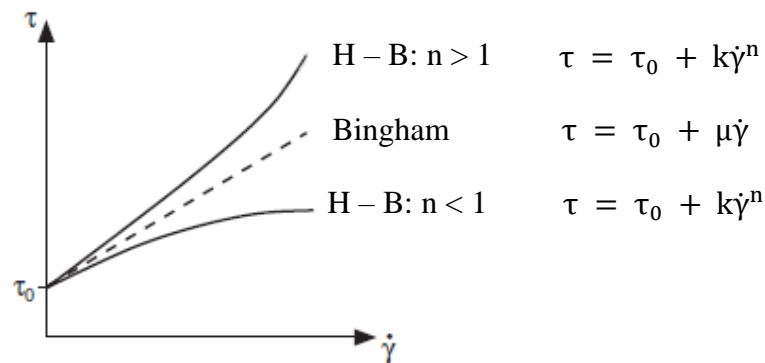
llegando a controlarla sistemáticamente (Germann Instruments A/S, s. f.). La reología es definida como *el estudio de la deformación y fluencia de la materia*, según la Sociedad Americana de Reología (Wallevik y Wallevik, 2011, p. 1280). Adicionalmente, los concretos son considerados como fluidos Bingham (Kwon et al., 2011), por lo tanto, un enfoque matemático apropiado para aproximar su comportamiento es mediante dicho modelo reológico en donde la relación entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) es lineal; su pendiente es definida como viscosidad plástica (μ) y la tensión requerida para que la mezcla inicie su flujo se denomina esfuerzo de fluencia (τ_0) (Figura 1) (Banfill, 2011; Feys et al., 2008; Gwon et al., 2023). Sin embargo, el concreto no siempre se comporta según este modelo ($n = 1$), puesto que puede presentar un comportamiento no lineal ($n \neq 1$), siendo “n” definida como el exponente de ley de potencia de las ecuaciones de la Figura 1. En caso tal, se cumpla que $n \neq 1$, se adapta de manera más adecuada al modelo reológico de Herschel – Bulkey, en el cual se presentan dos posibles comportamientos: de adelgazamiento ($n < 1$) o ensanchamiento ($n > 1$) de la viscosidad plástica debido a esfuerzos cortantes aplicados (Figura 1) (Feys et al., 2008; Wallevik & Wallevik, 2011). Dado estas múltiples opciones de posibles comportamientos al emplear aditivos en investigación, suele ser recomendado realizar estudios del comportamiento reológico del concreto usando reómetros, como lo es el ICAR RHM-3000 (Germann Instruments A/S, s. f.).

Los aditivos químicos como los retardantes y acelerantes principalmente afectan el inicio de la reacción entre el agua y el cemento, de manera tal, que este proceso se retrase o precipite, respectivamente; teniendo repercusiones directas sobre el tiempo de fraguado, entendiéndose este como la duración entre el cambio del estado plástico a sólido donde el concreto comienza a adquirir resistencia, el cual a su vez es un factor que afecta la trabajabilidad del concreto (Alsadey, 2013; Saeed et al., 2022; Wang et al., 2023). Los modificadores de viscosidad pueden aumentar el

esfuerzo de fluencia y la viscosidad, reducir la deformación del concreto bajo su propio peso (Marchon et al., 2018), además de mejorar la estabilidad del concreto previniendo problemas de sangrado y segregación (Kong et al., 2021).

Figura 1

Modelo reológico de Bingham y Herschel - Bulkey



Nota. La figura representa el comportamiento que presentan los fluidos según el modelo reológico de Bingham y el de Herschel – Bulkey. Adaptado de *Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes* (p. 1280), por O. H. Wallevik y J. E. Wallevik, 2011, Cement and Concrete Research.

Por otro lado, los superplastificantes son considerados uno de los más efectivos en cuanto a su capacidad de fluidificación de la mezcla y reducción de la cantidad de agua en esta (Bispo et al., 2021; Devi et al., 2020; Sainz-Aja et al., 2020). Suelen presentar una disminución en el esfuerzo de fluencia, y una tendencia de la viscosidad plástica a permanecer inalterada (Banfill, 2011). Existen diferentes tipos de superplastificantes: lignosulfonatos, base de naftalina, base melamina y los modernos policarboxilatos modificados, PCE, por sus siglas en inglés (Alsadey, 2013); siendo estos últimos más conocidos por su gran capacidad de dispersar las partículas de

cemento en mezclas de concreto y mortero (Ilg & Plank, 2019; Plank & Sachsenhauser, 2009; Yamada et al., 2000).

En esta investigación, el aditivo químico empleado llamado poli (glicerol – ácido cítrico), sintetizado previamente por el Grupo de Investigación de Polímeros de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS, 2023), está conformado principalmente por el poliglicerol y el ácido cítrico. El primero proveniente de la polimerización del glicerol, un subproducto industrial de la elaboración de biodiesel. Dicha polimerización permite obtener un polímero versátil con alta funcionalidad, estructura central inerte de poli-éter y un número abundante de grupos hidroxilos altamente reactivos que están expuestos y permiten su transformación para el desarrollo de materiales con diferentes utilidades (Ilg & Plank, 2019). Formando este mismo aditivo está el ácido cítrico, un monómero de bajo costo, fácil acceso y biocompatible. Los copolímeros derivados del ácido cítrico y el glicerol al sintetizarse a través de pocos pasos de reacción han presentado adecuadas propiedades térmicas y mecánicas (Chandra Kumari & Jaisankar, 2018; Zahlan et al., 2019).

Puesto que es imprescindible conocer el comportamiento del aditivo químico en cuanto a su aplicación en el concreto, se estudia la potencial afectación en las propiedades reológicas, como lo son el esfuerzo de fluencia y la viscosidad plástica, frente a diferentes proporciones de relación agua – cemento y de aditivo químico, estipuladas mediante un diseño estadístico - experimental. Estas propiedades son principalmente las que determinan la clasificación de dicho aditivo químico, en el presente caso se emplea concreto de baja viscosidad para hacer viable el uso de reómetro. Sin embargo, el efecto del aditivo es válido en todo tipo de concreto en general. Para complementar el estudio de la influencia del poli (glicerol – ácido cítrico) sobre el concreto, se determinó la resistencia a la compresión a distintas edades de maduración y así conocer la posible afectación del aditivo en el normal desarrollo de la resistencia.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar el estado fresco del concreto de baja viscosidad modificado con aditivo poli (glicerol-ácido cítrico) mediante el estudio del comportamiento reológico.

1.2 Objetivos Específicos

Analizar el ajuste de la linealidad del concreto de baja viscosidad con influencia del aditivo poli (glicerol-ácido cítrico), según el modelo reológico de Bingham o modelos alternativos que contemplen no linealidad.

Determinar en el estado fresco del concreto de baja viscosidad la influencia del uso del aditivo poli (glicerol-ácido cítrico) en el esfuerzo de fluencia dinámico y la viscosidad plástica para clasificar su efecto como aditivo en concretos.

2. Marco teórico

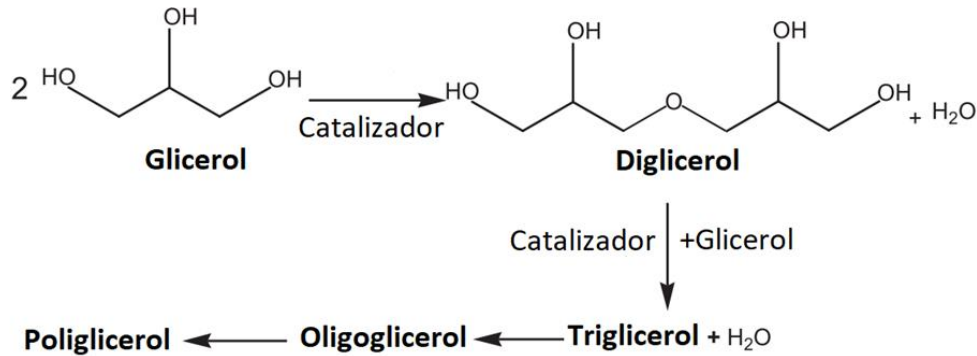
2.1 Aditivo poli (glicerol – ácido cítrico)

Entre sus componentes se encuentra el poliglicerol, que es un material que se obtiene de forma industrial a partir de la polimerización por apertura del anillo del glicidol, el cual es un monómero tóxico y peligroso para el medio ambiente (Sunder et al., 1999; Wilms et al., 2009). Se ha encontrado que la polimerización del glicerol, un subproducto de la industria de biodiesel permite obtener un polímero versátil de alta funcionalidad, con estructura central inerte de poliéter y un número abundante de grupos hidroxilos altamente reactivos, que están expuestos y permiten su transformación para el desarrollo de materiales con diferentes utilidades. Este polímero se obtiene por medio de la eterificación catalítica directa de glicerol, en una reacción de polimerización en cadena (Figura 2) (Ilg & Plank, 2019; Miyasaki et al., 2015; Solano Delgado, 2018; Suárez, 2014).

El uso de diferentes catalizadores, incluidos los ácidos, hidróxidos, carbonatos y óxidos de varios metales ha sido estudiado a diferentes temperaturas. Se ha encontrado que el uso de ácido sulfúrico como catalizador homogéneo, produce poligliceroles con buena estabilidad térmica y de relativo alto peso molecular en tiempos de reacción más cortos y a mejores tasas de conversión (Sivaiah et al., 2012). Adicionalmente, el aditivo posee entre sus componentes el ácido cítrico, un monómero de bajo costo, fácil acceso y biocompatible, que junto al glicerol proporciona un beneficio medioambiental al recuperar residuos de otras industrias.

Figura 2

Representación esquemática de la eterificación de glicerol a poliglicerol



Nota. La figura representa el proceso de síntesis del poliglicerol. Tomado de *Towards the Sustainable Production of Higher-Molecular-Weight Polyglycerol* (p. 1285), por S. Salehpour, 2011, *Macromolecular Chemistry and Physics*.

3. Desarrollo experimental

3.1 Caracterización de materiales

Cada uno los materiales presentaron las características mostradas a continuación.

3.1.1 Agregado grueso

Este material presentó un tamaño máximo nominal de 12.7 mm, el cual siguiendo lo estipulado en el ASTM C127 (ASTM International, 2017) presenta una gravedad específica de 2.58 y absorción de 0.381%, según ASTM C29 (ASTM International, 2016b) posee un peso unitario de 1547.8 kg/m³. Adicionalmente, se presentan en la Tabla 1 su granulometría.

Tabla 1*Granulometría del agregado grueso*

Tamiz	Tamaño tamiz (mm)	Retenido (gr)	%Retenido acumulado	%Pasa
1"	25.40	0	0	100.0
3/4"	19.10	0	0	100.0
1/2"	12.70	0	0	100.0
3/8"	9.52	1836	26.23	73.7
N°4	4.75	5164	100.00	-
Total		7000		

Nota. Distribución que presentan los granos del agregado grueso en tamices superiores al N°4.

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Agregado fino

La arena lavada de río como agregado fino con módulo de finura de 2.69, el cual, de acuerdo con las pautas establecidas en el ASTM C128 (ASTM International, 2023) presenta gravedad específica de 2.54 con absorción de 0.938%, y conforme al ASTM C29 (ASTM International, 2016b) posee un peso unitario de 1794.3 kg/m³. Adicionalmente se adjunta en la Tabla 2 la granulometría del agregado fino.

3.1.3 Aditivo químico en investigación

El poli (glicerol – ácido cítrico) es un aditivo químico desarrollado en la Universidad Industrial de Santander por el Grupo de Investigación de Polímeros (Escuela de Ingeniería Química (UIS, 2023)), el cual se caracteriza por tener un contenido de sólidos de 96% y cuyo comportamiento reológico era el que se deseaba investigar y clasificar según su uso en concretos estructurales. La dosificación de este aditivo químico se determinó de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, identificando el rango de cantidades óptimas a implementar, estableciéndose en valores expresados en porcentaje de cemento, de forma tal que garantizara las

características del concreto de baja viscosidad, presentando una mejora en la trabajabilidad, es decir, un aumento en la fluidez de la mezcla, sin permitir segregaciones o sangrados en el concreto (Banfill, 2011; Sainz-Aja et al., 2020; Xie et al., 2013).

Tabla 2

Granulometría del agregado fino

Tamiz No.	Tamaño tamiz (mm)	Retenido (gr)	%Retenido acumulado	%Pasa
4	4.75	34.8	3.48	96.52
8	2.38	121.3	15.61	84.39
16	1.19	139.2	29.53	70.47
30	0.59	208.0	50.33	49.67
50	0.30	273.5	77.68	22.32
100	0.15	149.7	92.65	7.35
Fondo	0	71.4	99.79	0.21
Total		997.9		

Nota. Esta tabla muestra la distribución que presentan los granos del agregado grueso en tamices superiores al N°4. Fuente: elaboración propia.

3.1.4 Cemento

En esta investigación, el cemento empleado es cemento Portland ordinario Tipo I

3.1.5 Proporciones de la mezcla

Los materiales mencionados anteriormente cumplen un papel importante en la mezcla, por esto, es relevante conocer las proporciones que presentan cada uno de estos, de forma tal que puedan llegar a reproducirse dichos ensayos, las cantidades estimadas para los materiales son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3*Proporciones de las mezclas*

Relación agua – cemento	0.450		0.475		0.500	
Aditivo químico [%]	0.65	0.95	0.80	0.65	0.95	
Material [kg/m³]						
Grava	840	840	840	840	840	
Arena	570	570	570	570	570	
Cemento	570	570	570	570	570	
Agua	256.5	256.5	270.8	256.5	285.0	
AQ	3.82	5.58	4.69	3.82	5.58	

Nota. Esta tabla muestra las proporciones dadas para las mezclas en unidades de kg/m³ para cada uno de los componentes establecidos. Fuente: elaboración propia.

3.2 Proceso de mezclado

Cada uno de los diseños producidos se realizaron en una mezcladora Baker, con carga máxima 120 kg. Inicialmente en este proceso, se adicionó el agregado fino, el cemento y el agregado grueso, respectivamente. Dichos materiales de forma conjunta se mezclaron durante un tiempo de tres (3) minutos, posteriormente a esto, se agregó el 80% de la cantidad de agua total, mezclándose durante los cuatro (4) minutos siguientes. Finalmente, se incorporó el porcentaje de agua restante en la que se disolvió el aditivo químico en cada una de sus proporciones conforme a la Tabla 2, mezclándose durante cuatro (4) minutos adicionales. El tiempo total de mezclado empleado fue de once (11) minutos.

3.3 Propiedades del concreto de baja viscosidad

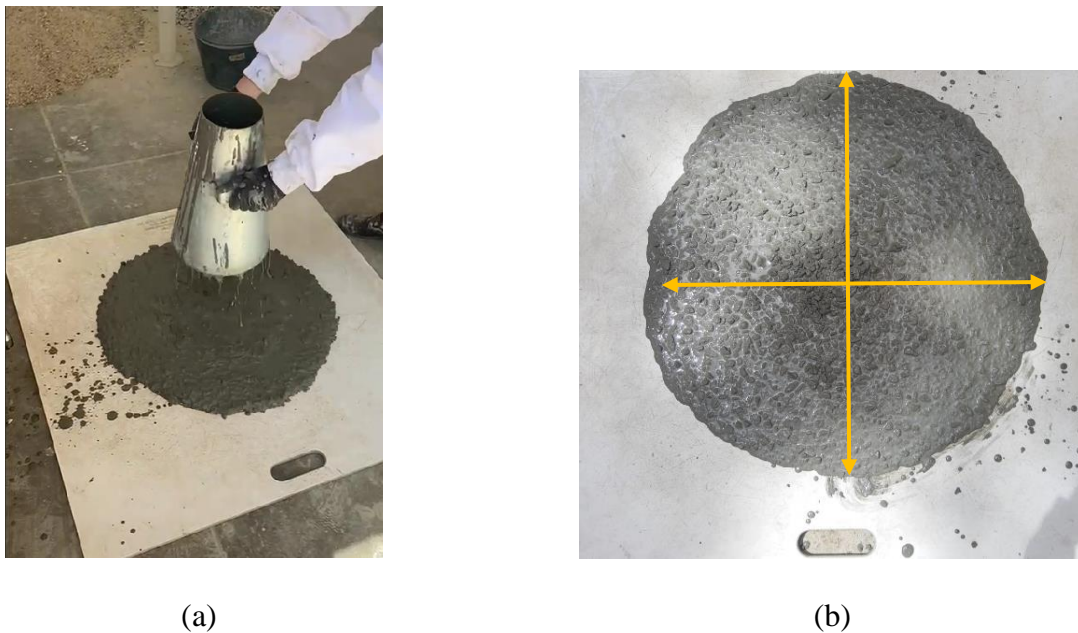
3.3.1 Prueba de asentamiento

El concreto en estado fresco puede ser analizado mediante pruebas de asentamiento (Figura 4), en este caso, conforme a las indicaciones previamente dadas en el ASTM C1611 (ASTM International, 2021b); asegurando que el concreto empleado poseía la suficiente fluidez para

posteriormente determinar las propiedades reológicas empleando el reómetro ICAR RHM-3000 (Germann Instruments A/S, s. f.) sin causar afectaciones en dicho equipo. La fluidez se comprobó comparando el diámetro para cada una de las mezclas con el del concreto convencional, buscando valores mayores a 170 mm (Wallevik & Wallevik, 2011) siendo el valor máximo para este último.

Figura 3

Prueba de asentamiento



Nota. Esta figura representa el concreto de baja viscosidad (a) prueba de asentamiento en flujo (b) medición de diámetro de forma perpendicular según el ASTM C1611 (ASTM International, 2021b). Fuente: Fuente: elaboración propia.

3.3.2 *Ensayos de reología*

Las propiedades reológicas del concreto de baja viscosidad en estado fresco se determinaron mediante el reómetro ICAR RHM-3000 (Figura 3), el cual posee un recipiente con capacidad de 23L. Las propiedades reológicas se determinaron según el proceso establecido por Ahari et al., 2015 (Ahari et al., 2015), en donde se inició el análisis con una velocidad de 0.500

rev/s durante 20 s, la velocidad del reómetro se fue reduciendo gradualmente por periodos de 5s, por último, fueron empleados los siguientes valores: 0.500, 0.425, 0.350, 0.275, 0.200, 0.125 y 0.050 rev/s. Para todas las velocidades establecidas se recopilaron los valores de torque (N·m).

Figura 4

Reómetro para concreto de cilindros coaxiales ICAR RHM-3000



Nota. Esta figura muestra el equipo empleado en los ensayos reológicos. Tomado de *Rheology using the ICAR Plus – An Introduction Overview* (p. 9), por Germann Instruments A/S, s.f.

3.3.3 Ensayos de compresión

En el concreto en estado endurecido se determinó la resistencia a la compresión a través de ensayos a los 7, 14 y 28 días según lo estipulado en el ASTM C39 (ASTM International, 2021a). El fraguado del concreto se dio de forma particular, puesto que el concreto para ser desmoldado tardó cerca de 72 horas y así proceder a ser sumergidos en agua y cumplir los periodos de análisis; no obstante, esto no afecta los resultados dado que el procedimiento fue el mismo para todos y

cada uno de los ensayos reológicos. Los moldes cilíndricos fueron de 100mm de diámetro y 200 mm de altura, estos cilindros conforme al ASTM C470 (ASTM International, 2016a).

Adicionalmente, se realizaron análisis de intervalos de confianza al 95% (Molina Arias, 2013) para así identificar las posibles variaciones a nivel estadístico que se podrían presentar en cada una de las relaciones de agua – cemento en los porcentajes de aditivo químico de 0.00%, 0.65% y 0.95% permitiendo visualizar desde un enfoque probabilístico los potenciales efectos de estas concentraciones sobre la resistencia a la compresión.

Figura 5

Ensayos de resistencia a la compresión



(a)



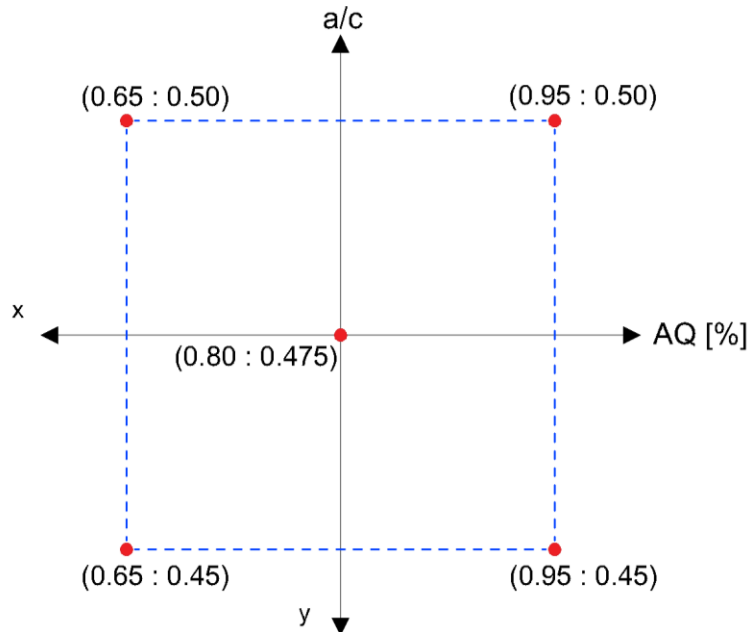
(b)

Nota. Esta figura muestra la prueba de resistencia de compresión (a) moldes cilíndricos de concreto (b) ensayo de compresión en proceso. Fuente: Fuente: elaboración propia.

3.4 Diseño estadístico factorial del experimento

En esta investigación mediante un diseño estadístico experimental del tipo 2^2 , se estableció un rango óptimo en cuanto al comportamiento en estado fresco del concreto de baja viscosidad, donde los puntos límites se seleccionaron mediante ensayos previos de trabajabilidad, en este caso, con la prueba de asentamiento descrita en la Sección 3.3.1 y la Figura 4; el criterio de aceptación de los puntos límites se basó en obtener al menos el doble del asentamiento de un concreto convencional que es de 170 mm (Wallevik & Wallevik, 2011), garantizando una mayor fluidez en el concreto experimental para evitar daños en el reómetro.

Los factores de estudio fueron el porcentaje de aditivo químico (AQ) respecto al peso del cemento ubicado en el eje X y la relación de agua – cemento (a - c) correspondiente al eje Y. Se determinó la incidencia de los factores del diseño estadístico factorial sobre los parámetros reológicos y el modelo de Bingham en el concreto en estado fresco, empleando un nivel de significancia: $P = 0.01$. Para realizar dicho proceso se requiere conocer las repeticiones para cada uno de los puntos correspondientes al diseño estadístico factorial, para los puntos límites establecidos se realizaron duplicados, y para el punto central, una única prueba, siendo las presentes repeticiones reportadas según el software estadístico Minitab® 19.

Figura 6*Diseño experimental factorial 2²*

Nota. El gráfico representa los valores de aditivo químico y relación agua – cemento como objeto de estudio para analizar la influencia que presentan sobre el concreto de estudio. Fuente: elaboración propia.

4. Resultados y discusión

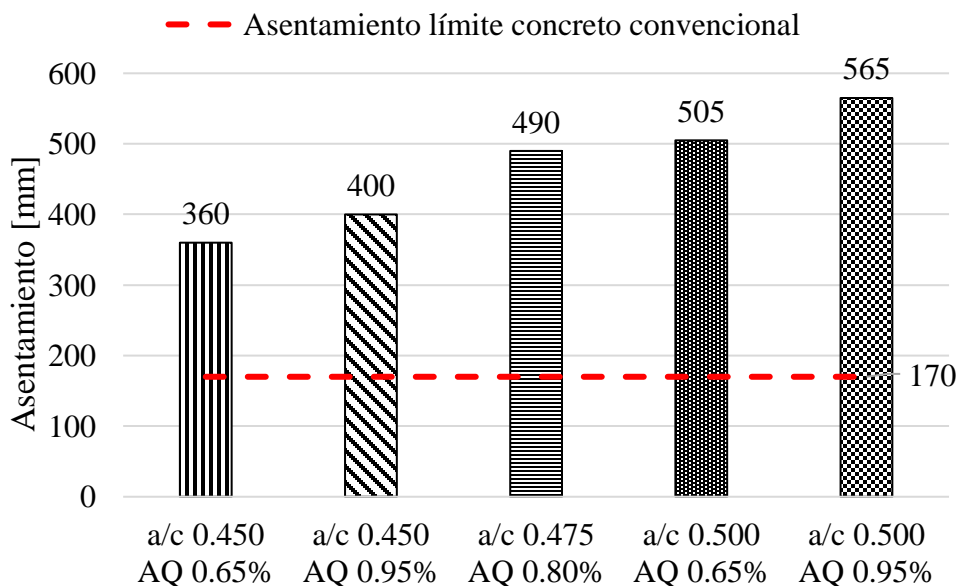
4.1 Ensayos de asentamiento

A través de los ensayos de asentamiento, es posible medir la trabajabilidad que presenta un concreto en estado fresco, puesto que esta prueba evalúa el flujo horizontal libre que posee, es decir, sin procesos de vibración adicionales (EPG, 2005). En este caso, los datos presentados en la Tabla 3 fueron los obtenidos para cada una de las mezclas. El fin de esta prueba preliminar de

asentamiento era comprobar que las mezclas presentaban una mayor trabajabilidad frente al concreto convencional, el cual posee asentamientos inferiores a 170 mm (Wallevik & Wallevik, 2011). Los resultados obtenidos fueron satisfactorios debido a que todos los valores mostrados en la Figura 7 son mayores al tomado como referencia, asegurando un correcto funcionamiento del equipo empleado para las pruebas reológicas posteriores descritas en la Sección 3.3.2.

Figura 7

Resultados prueba de asentamiento



Nota. El gráfico representa los valores de asentamiento para cada una de las mezclas, comparándose con el límite del asentamiento que presenta el concreto convencional. Fuente: elaboración propia.

Adicional a esto, hay que tener presente que los datos presentados en la Tabla 3 poseen una característica particular, pues a mayor relación agua – cemento (a - c), mayor es el asentamiento, pero a su vez, la presencia del aditivo químico (AQ) aumenta dicho asentamiento para una relación agua – cemento constante. Según la literatura, si al incrementar la concentración del aditivo

químico sin variar la relación a-c se mejora la fluidez, este puede ser clasificado como un superplastificante (Alsadey, 2013), debido a que estos dispersan las partículas del cemento en el concreto, lo cual generan un incremento en la fluidez en estado fresco (Banfill, 2011). De igual forma, al ser los ensayos de asentamiento una prueba preliminar, no se asegura que el aditivo químico actúe específicamente como superplastificante, y se requiere una confirmación mediante las pruebas reológicas.

4.2 Ajuste lineal de los parámetros según modelo de Bingham

Los ensayos de reología se realizaron por medio del uso del reómetro ICAR RHM-3000 (Germann Instruments A/S, s. f.), mediante estas pruebas se conocieron los valores de torque, T (N·m), y velocidad rotacional, N (rev/s), para cada una de las mezclas. En la Tabla 4, se pueden observar dichos resultados, en donde se presentan las réplicas para cada punto límite del diseño estadístico - experimental, y un único punto para el valor central conforme a la Figura 6.

Tabla 4

Valores de torque y velocidad rotacional de cada una de las mezclas.

Velocidad rotacional (rev/s)	0.500	0.425	0.350	0.275	0.200	0.125	0.050
Mezcla	Torque (N·m)						
a-c 0.450 AQ 0.65%	1,425	1,375	1,308	1,219	1,175	1,073	0,999
a-c 0.450 AQ 0.65%	1,477	1,373	1,318	1,251	1,145	1,075	0,968
a-c 0.450 AQ 0.95%	0,929	0,901	0,855	0,819	0,787	0,731	0,691
a-c 0.450 AQ 0.95%	0,912	0,867	0,801	0,774	0,743	0,721	0,654
a-c 0.475 AQ 0.80%	1,371	1,347	1,236	1,172	1,097	1,038	0,929
a-c 0.500 AQ 0.65%	1,269	1,219	1,137	1,060	1,045	0,947	0,820
a-c 0.500 AQ 0.65%	1,256	1,181	1,135	1,092	1,035	0,926	0,856
a-c 0.500 AQ 0.95%	0,598	0,563	0,542	0,526	0,499	0,452	0,412
a-c 0.500 AQ 0.95%	0,625	0,586	0,559	0,532	0,513	0,487	0,456

Nota. La tabla muestra los valores de torque para cada una de las mezclas a las diferentes velocidades estipuladas. Fuente: elaboración propia.

La relación entre dichas variables se describe a través de la Ecuación 1 (Singh & Singh, 2018); a esta ecuación lineal también pertenecen el intercepto, G (N·m), y la pendiente, H (N·m·s), de la relación entre T y N.

$$T = G + HN \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (1)$$

Adicionalmente, desde la ecuación 1 se pueden obtener los parámetros que definen el modelo reológico de Bingham: el esfuerzo de fluencia (τ_0) y la viscosidad plástica (μ), y así confirmar si es de ajuste lineal este modelo. Dichos parámetros pueden ser calculados por medio de las Ecuaciones 2 y 3 (Singh & Singh, 2018), conocidas como ecuaciones de Reiner – Rivlin (Feys et al., 2008). Los parámetros reológicos calculados se encuentran en la Tabla 5.

$$\tau_0 = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

$$\mu = \frac{H}{8\pi^2 h} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad (3)$$

en donde,

G = Intercepto de la relación lineal entre el torque y la velocidad rotacional (N·m)

H = Pendiente de la relación lineal entre el torque y la velocidad rotacional (N·m·s)

R_1 = Radio de la paleta del reómetro (m)

R_2 = Radio del contenedor cilíndrico (m)

h = Altura de paleta del reómetro (m)

Tabla 5

Parámetros de ajuste del modelo reológico de Bingham.

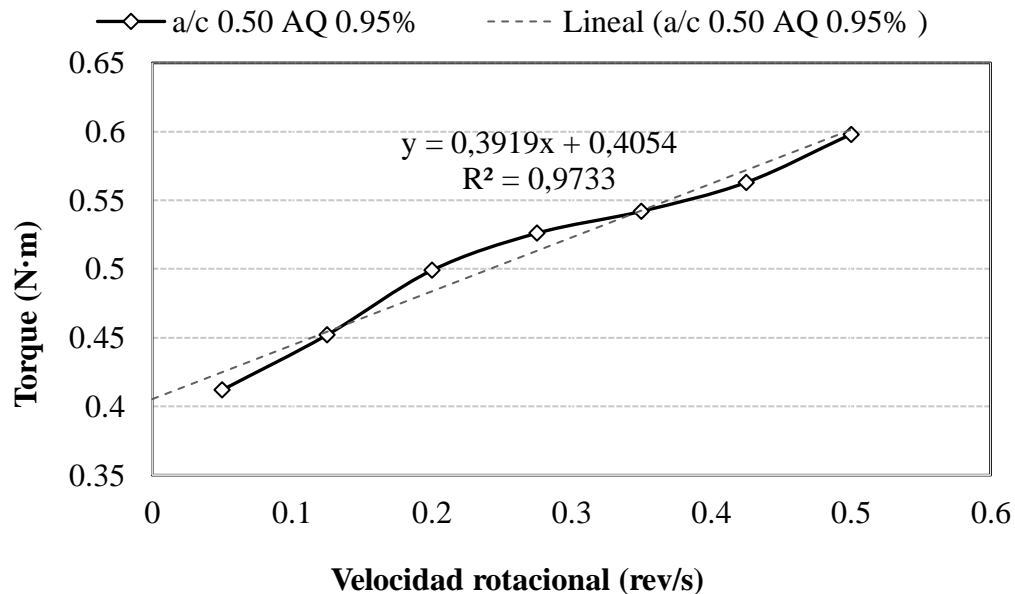
Mezcla		μ [Pa·s]	τ_0 [Pa]
a-c 0.450	AQ 0.65%	19,06	147,53
a-c 0.450	AQ 0.65%	21,64	142,92
a-c 0.450	AQ 0.95%	10,72	102,96
a-c 0.450	AQ 0.95%	10,52	096,82
a-c 0.475	AQ 0.80%	19,66	138,31
a-c 0.500	AQ 0.65%	18,66	124,48
a-c 0.500	AQ 0.65%	17,08	127,55
a-c 0.500	AQ 0.95%	07,74	063,01
a-c 0.500	AQ 0.95%	07,15	067,62

Nota. La tabla muestra los valores de torque para cada una de las mezclas a las diferentes velocidades estipuladas. Fuente: elaboración propia.

Todos los resultados de la relación torque vs velocidad rotacional presentaron un comportamiento lineal, con coeficientes de correlación (R^2) mayores a 0.97. A modo de ejemplo, en la Figura 8 se muestra de forma gráfica la relación T vs N de la mezcla “a-c 0.500 AQ 0.95%”. Debido a que la relación existente entre T y N es de carácter lineal, y todos los datos presentados en la Tabla 5 son positivos, se confirma la hipótesis inicial que los datos posiblemente se adaptaran a un ajuste lineal, logrado mediante las ecuaciones de Reiner – Riwlin, permitiendo dilucidar que el efecto de la adición del poli (glicerol – ácido cítrico) en mezclas de concreto sobre las propiedades reológicas: la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia, puede tratarse desde el modelo reológico de Bingham.

Figura 8

Relación de torque vs velocidad rotacional de la mezcla “a-c 0.500 AQ 0.95%”



Nota. El gráfico representa el comportamiento aproximado que llegan a tener los datos en la relación de torque contra velocidad rotacional. Fuente: elaboración propia.

4.3 Diseño estadístico – experimental

El análisis de varianza desarrollado sobre los valores de esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica de las mezclas de concreto se muestran en las Tablas 6 y 7, en donde se empleó un nivel de significancia: $P = 0.01$. Todos los valores obtenidos en la casilla “valor P” que sean menores o iguales al nivel de significancia propuesto, se consideran variables estadísticamente significativas, siendo los más cercanos o iguales a cero los significativos de manera contundente. Complementando el análisis de varianza, (ANOVA), por sus siglas en inglés, se realizaron los diagramas de Pareto (Figuras 9 y 10) para los parámetros reológicos, en donde ambos presentaron

la línea de referencia en el valor de 4.60, el cual representa gráficamente la división entre los factores que fueron estadísticamente significativos (Minitab®, 2021).

Tabla 6

Análisis estadístico ANOVA del esfuerzo de fluencia.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	4	7944.00	1986.00	177.26	0.000
Lineal	2	7068.12	3534.06	315.44	0.000
a-c	1	5621.71	5621.71	501.78	0.000
AQ	1	1446.41	1446.41	129.10	0.000
Interacciones de 2 términos	1	118.04	118.04	10.54	0.031
(a-c)·(AQ)	1	118.04	118.04	10.54	0.031
Curvatura	1	757.84	757.84	67.64	0.001
Error	4	44.81	11.20		
Total	8	7988.82			

Nota. La tabla muestra los valores de relacionados con el análisis de varianza de forma tal que se puedan identificar cuáles son las variables significativas. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7

Análisis estadístico ANOVA de la viscosidad plástica.

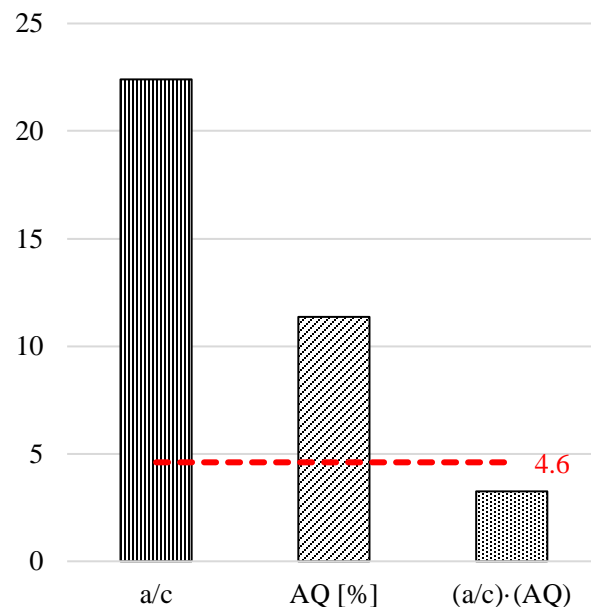
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	4	247.107	61.777	51.80	0.001
Lineal	2	219.102	109.551	91.86	0.000
a-c	1	203.112	203.112	170.31	0.000
AQ	1	15.990	15.990	13.41	0.022
Interacciones de 2 términos	1	0.242	0.242	0.20	0.676
(a-c)·(AQ)	1	0.242	0.242	0.20	0.676
Curvatura	1	27.764	27.764	23.28	0.008
Error	4	4.770	1.193		
Total	8	251.877			

Nota. La tabla muestra los valores de relacionados con el análisis de varianza de forma tal que se puedan identificar cuáles son las variables significativas. Fuente: elaboración propia.

El esfuerzo de fluencia posee un comportamiento particular presentado en la Tabla 6 y Figura 9, dado que tanto la relación de agua – cemento como la concentración del aditivo químico son variables estadísticamente significativas, ya que poseen un valor de $P = 0.000$, es decir, afectan el comportamiento que tiene el esfuerzo de fluencia. En la presente investigación, el aditivo poli (glicerol – ácido cítrico) genera una disminución del esfuerzo de fluencia a mayor cantidad de aditivo químico incorporado, como se detalla en los datos presentados en la Tabla 5.

Figura 9

Diagrama de Pareto del esfuerzo de fluencia



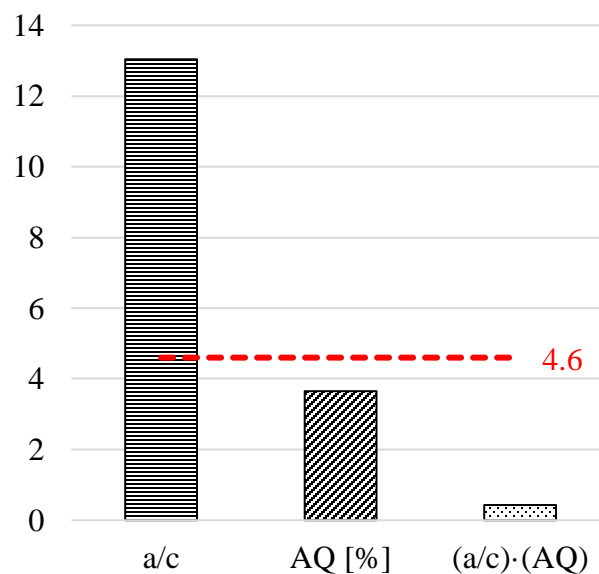
Nota. El gráfico representa mediante el diagrama de Pareto cuáles factores influyen sobre el esfuerzo de fluencia, debido a que sobrepasa el límite de 4.6. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la viscosidad plástica, según los datos obtenidos en la Tabla 7 y la Figura 10, la única variable significativa es la relación agua – cemento debido a que presenta un valor de $P = 0.000$. Según la literatura los concretos presentan una tendencia a disminuir la viscosidad plástica

a mayores valores de relación de agua – cemento (Wallevik & Wallevik, 2011) como se puede ver en la Tabla 5; por esto se emplea la investigación estadística, para lograr discernir entre la relación agua – cemento, el porcentaje de aditivo químico y entre la interacción entre ambos, empleándose para ellos la técnica de intervalos de confianza.

Figura 10

Diagrama de Pareto de la viscosidad plástica

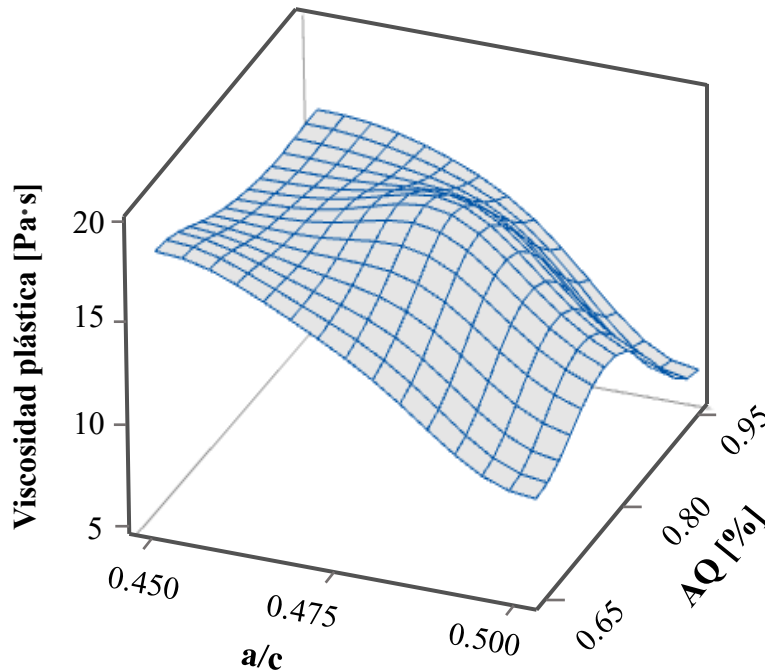


Nota. El gráfico representa mediante el diagrama de Pareto cuáles factores influyen sobre el esfuerzo de fluencia, debido a que sobrepasa el límite de 4.6. Fuente: elaboración propia.

Generalmente, cuando un aditivo químico es adicionado en una mezcla de concreto y ocasiona una disminución del esfuerzo de fluencia y de manera simultánea la viscosidad plástica no presenta una variación significativa, según la literatura este es fundamentalmente conocido como superplastificante (Banfill, 2011; Wallevik & Wallevik, 2011), de esta forma confirmando la preclasificación dada en la Sección 4.1.

Figura 11

Superficie estadística de respuesta de la viscosidad plástica



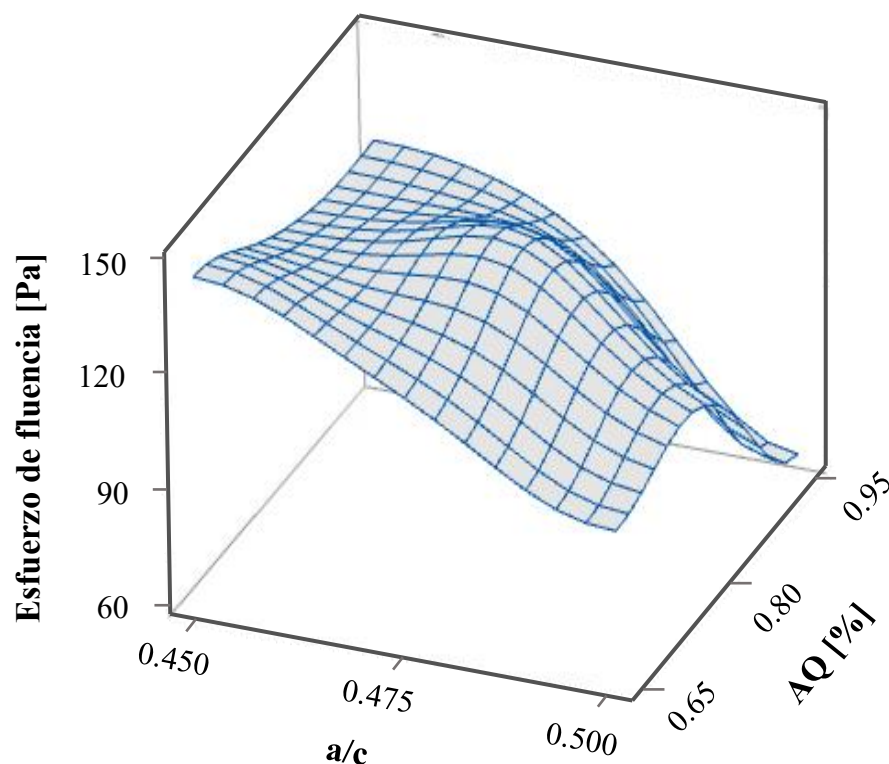
Nota. El gráfico representa la interacción que presentan las variables de la relación de agua – cemento y el porcentaje de aditivo químico, relacionado con la variable respuesta de la viscosidad plástica. Fuente: elaboración propia.

Las superficies estadísticas de respuesta permiten analizar cómo se relacionan dos variables con un valor de respuesta ajustado mediante una malla tridimensional (Minitab®, 2020); en la presente investigación, las dos variables relacionadas son: la relación agua – cemento (a-c) y la concentración del aditivo químico (AQ%) siendo los valores de respuesta: la viscosidad plástica [Pa·s] y el esfuerzo de fluencia [Pa]. En las Figuras 11 y 12 se observan las superficies de respuesta obtenidas para ambos parámetros reológicos, en donde presentan un comportamiento similar, de forma cóncava, siendo de manera aproximada el punto central del diseño estadístico

experimental el punto de curvatura máxima. Debido a esto, cuando el objetivo fundamental sea optimizar el desempeño del sistema se recomienda analizar más puntos de referencia para obtener un comportamiento más claro de la relación de estas dos variables, llegando a favorecer de forma adecuada la mezcla y sus posibles usos.

Figura 12

Superficie estadística de respuesta de la viscosidad plástica



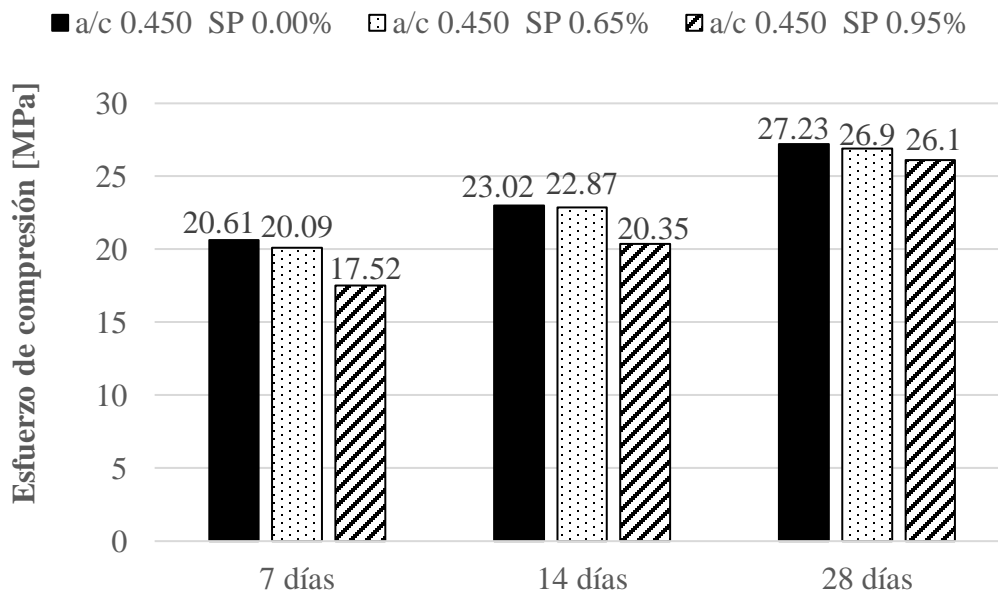
Nota. Nota. El gráfico representa la interacción que presentan las variables de la relación de agua – cemento y el porcentaje de aditivo químico, relacionado con la variable respuesta del esfuerzo de fluencia. Fuente: elaboración propia.

4.4 Ensayos de compresión

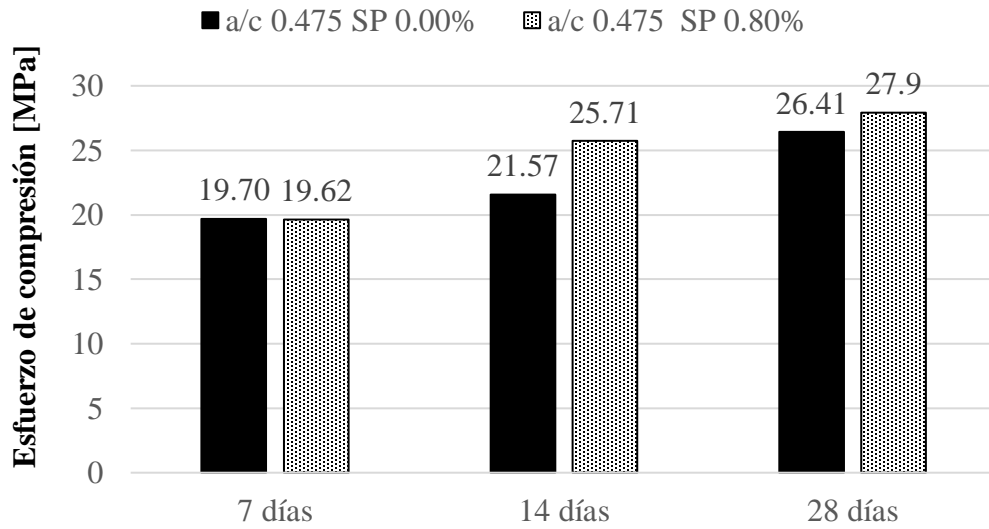
En la resistencia a la compresión, se empleó el método dado por el ASTM C39 (ASTM International, 2021a), con el fin de observar la variación de dicha resistencia ante la presencia del aditivo químico a diferentes concentraciones, al ser comparado respecto a cada relación a - c planteada, como se muestra en la Figura 13. Debido a la particularidad en el fraguado, específicamente en el tiempo previo a sumergir los moldes cilíndricos en agua se informará al Grupo de Investigación de Polímeros (GIP) una revisión de la estructura molecular del poli (glicerol – ácido cítrico) dado que este efecto tiende a ser el de un retardante, siendo un efecto adicional a la clasificación de superplastificante.

Figura 13

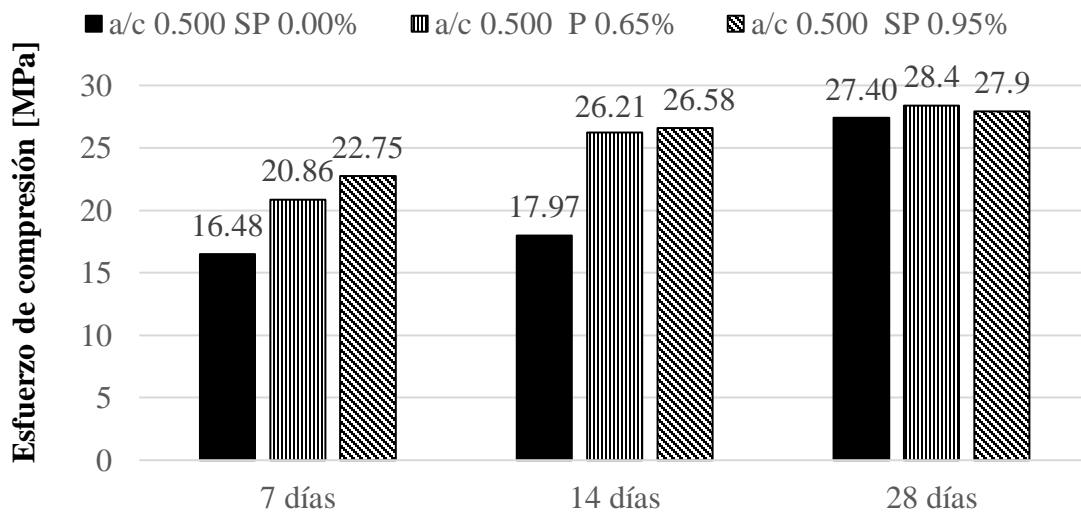
Resistencia a la compresión a diferentes edades de maduración



(a)



(b)



(c)

Nota. Resistencia a la compresión de cada una de las mezclas a diferentes edades de maduración.

(a). Relación a-c de 0.450 con concentraciones de aditivo químico de 0.00%, 0.65% y 0.95%. (b).

Relación a-c de 0.475 con concentraciones de aditivo químico de 0.00% y 0.80%. (c). Relación

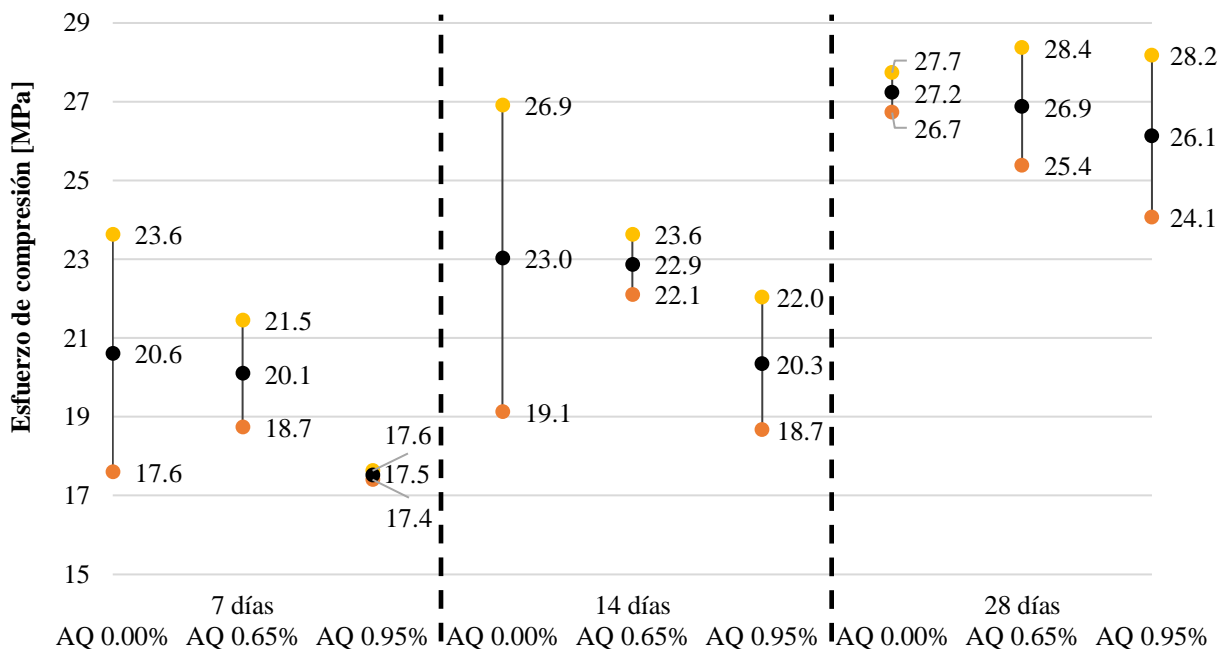
a-c de 0.500 con concentraciones de aditivo químico de 0.00%, 0.65% y 0.95%. Fuente:

elaboración propia.

Adicionalmente a lo planteado en la Figura 13, mediante estadística más avanzada se busca identificar la influencia que posee el aditivo químico sobre la resistencia a la compresión de una forma más técnica, se realizaron intervalos de confianza al 95% para las diferentes edades estipuladas: 7, 14 y 28 días.

Figura 14

Intervalo de confianza 95%: mezcla a-c 0.450



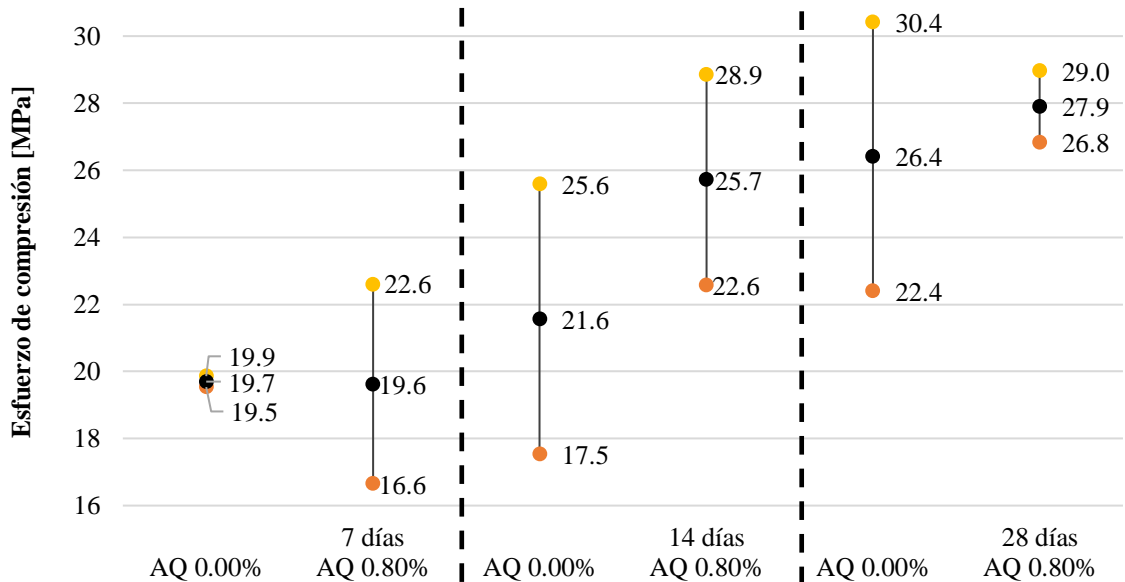
Nota. El gráfico representa el análisis de intervalos de confianza comparando las diferentes concentraciones de aditivo químico con la mezcla sin aditivar. Fuente: elaboración propia.

Los esfuerzos de compresión promedio en las mezclas con relación de agua – cemento 0.450 (Figura 14) mediante análisis de intervalos de confianza de 95% muestran que en las diferentes edades los tratamientos pueden tener efectos similares en los esfuerzos de compresión promedio a causa del solapamiento entre estos, indicando que no hay una diferencia

estadísticamente significativa. Sin embargo, el esfuerzo de compresión promedio tiende a presentar una disminución a los 7 y 14 días. Adicionalmente, en cada edad el tratamiento que proporciona una estimación más precisa y confiable varía, siendo necesario investigar a profundidad la heterogeneidad en los rangos de error de los tratamientos en las diferentes edades empleadas.

Figura 15

Intervalo de confianza 95%: mezcla a-c 0.475



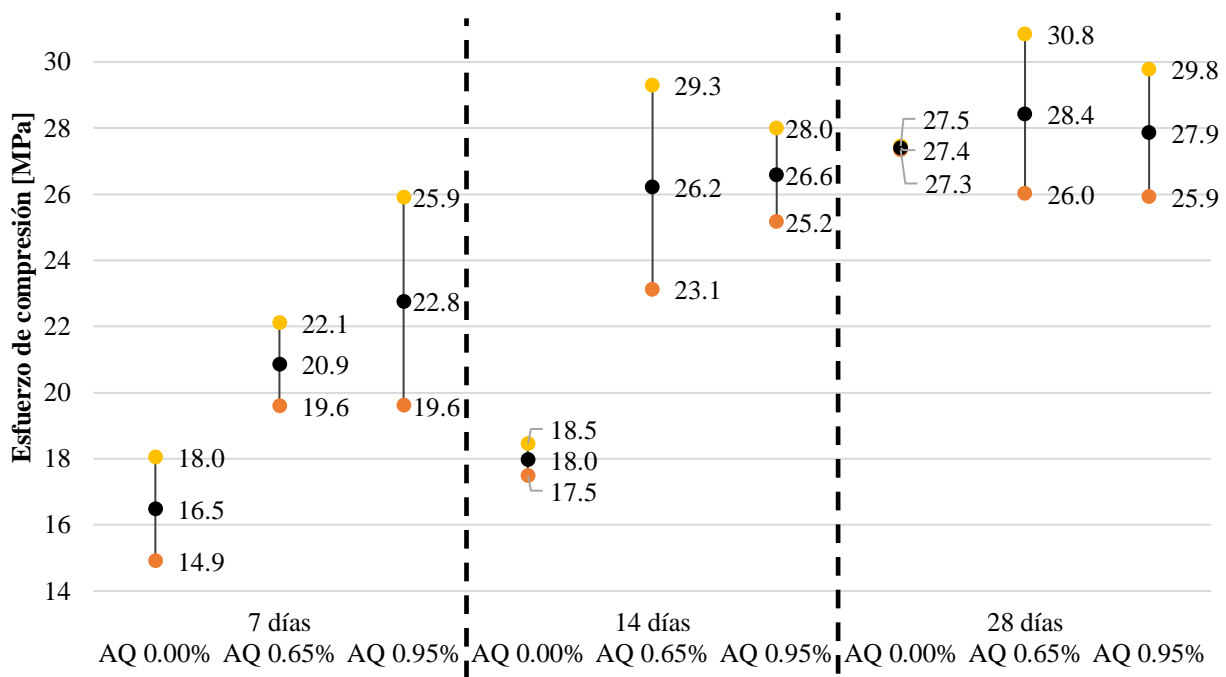
Nota. El gráfico representa el análisis de intervalos de confianza comparando las diferentes concentraciones de aditivo químico con la mezcla sin aditivar. Fuente: elaboración propia.

Los esfuerzos de compresión promedio en las mezclas con relación de agua – cemento 0.475 (Figura 15) mediante análisis de intervalos de confianza de 95% muestran que en las diferentes edades los tratamientos pueden tener efectos similares en los esfuerzos de compresión promedio a causa del solapamiento entre estos, indicando que no hay una diferencia

estadísticamente significativa. Y a diferencia del caso anterior (Figura 14), el esfuerzo de compresión promedio tiende a presentar un aumento a los 14 y 28 días. Adicionalmente, en las edades de 7 y 28 días el tratamiento que proporciona una estimación más precisa y confiable varía, siendo necesario investigar a profundidad la heterogeneidad en los rangos de error de los tratamientos de estas edades.

Figura 16

Intervalo de confianza 95%: mezcla a-c 0.500



Nota. El gráfico representa el análisis de intervalos de confianza comparando las diferentes concentraciones de aditivo químico con la mezcla sin aditivar. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, los esfuerzos de compresión promedio en las mezclas con relación de agua – cemento 0.500 (Figura 16) mediante análisis de intervalos de confianza de 95% muestran que en las edades de 7 y 14 días se presenta una diferencia estadísticamente significativa ante la adición

del aditivo poli (glicerol – ácido cítrico), aunque el cambio de concentración desde 0.65% hacia 0.95% no genera un aumento significativo en el esfuerzo de compresión promedio. Finalmente, al cabo de los 28 días, no existe una diferencia estadísticamente significativa puesto que los valores de esfuerzo de compresión promedio se consideran similares. De igual forma es necesario investigar a profundidad la heterogeneidad en los rangos de error de los tratamientos en las edades analizadas.

5. Conclusiones

Todas las mezclas aditivadas con poli (glicerol – ácido cítrico) empleadas se ajustan a un modelo reológico de Bingham, caracterizado por poseer valores de correlación R^2 mayores a 0.97 en la relación torque ($N\cdot m$) contra velocidad rotacional (rev/s) cumpliendo con la hipótesis de una relación lineal a través de las ecuaciones de Reiner – Riwlin.

El aditivo químico empleado en la presente investigación se comporta fundamentalmente como un superplastificante, debido a que genera un aumento en la fluidez del concreto (de baja viscosidad) detectado por el ensayo de asentamiento, una disminución en el esfuerzo de fluencia y sin alteraciones apreciables en la viscosidad plástica del material desde reometría a un nivel de significancia estadística con valor $P = 0.01$. Adicionalmente, la presente investigación determina que el poli (glicerol - ácido cítrico) presenta efectos retardantes en el tiempo de fraguado.

El aditivo poli (glicerol - ácido cítrico) no afecta significativamente la resistencia a la compresión promedio detectado mediante intervalos de confianza al 95% en las relaciones agua – cemento 0.450, 0.475 y 0.500. Se requiere futura investigación dado que hubo tendencias a la baja y/o alta, conforme variaban los porcentajes de aditivo y las edades dentro de una misma relación de agua – cemento, por ende, se enviará información al Grupo de Investigación de Polímeros encargados de sintetizar el aditivo químico.

Referencias Bibliográficas

- Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. (2015). Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 59, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.009>
- Ahmad, S. (2013). Evaluation of effect of superplasticizer on performance of self-compacting concrete. *Journal of Testing and Evaluation*, 41(5). <https://doi.org/10.1520/JTE20120208>
- Alsadey, S. (2013). *Effects of Super Plasticizing and Retarding Admixtures on Properties of Concrete*. <https://doi.org/10.15242/IIE.E1213607>
- ASTM International. (2016a). *Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically*. https://doi.org/10.1520/C0470_C0470M-15
- ASTM International. (2016b). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. <https://doi.org/10.1520/C0127-15>
- ASTM International. (2017). *Standard Test Method for Bulk Density («Unit Weight») and Voids in Aggregate*. https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-17a
- ASTM International. (2021a). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- ASTM International. (2021b). *Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. https://doi.org/10.1520/C1611_C1611M-21
- ASTM International. (2023). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. <https://doi.org/10.1520/C0128-22>
- Banfill, P. F. G. (2011). Additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-

- reducing admixtures. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2955-2960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.001>
- Bispo, R. A., Vicente, G. O., da Silva Júnior, G. P., Benjamim, D. U., & de Moraes Alcântara, M. A. (2021). Investigation of rheological behavior of self-compacting and high performance composite concretes. *Materials Research*, 24. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0264>
- Celestine Ezeagu, A., & Ebuka Edwin, E. (2021). Influence of Super plasticizer on the Compressive Strength and Setting Time of Concrete. *American Journal of Engineering and Technology Management*, 6(5), 82. <https://doi.org/10.11648/j.ajetm.20210605.12>
- Chandra Kumari, M., & Jaisankar, V. (2018). Synthesis and Characterisation of Poly (Glycerol-co-Citrate)/ n-HAp Composite for Biomedical Applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 8824-8831. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.313>
- Devi, K., Aggarwal, P., & Saini, B. (2020). Admixtures Used in Self-Compacting Concrete: A Review. En *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* (Vol. 44, Número 2, pp. 377-403). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00244-4>
- EPG. (2005). ERMCO The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*, May.
- Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2008). Fresh self compacting concrete, a shear thickening material. *Cement and Concrete Research*, 38(7), 920-929. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.008>
- Germann Instruments A/S. (s. f.). *Rheology using the ICAR Plus – An Introduction Overview*. <https://doi.org/10.14440/jbm.2014.20>
- Gwon, S., Han, S. H., Vu, T. D., Kim, C., & Shin, M. (2023). Rheological and Mechanical

- Properties of Kenaf and Jute Fiber-Reinforced Cement Composites. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00565-1>
- Ilg, M., & Plank, J. (2019). Synthesis and Properties of a Polycarboxylate Superplasticizer with a Jellyfish-Like Structure Comprising Hyperbranched Polyglycerols. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(29), 12913-12926. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02077>
- Kong, T. W., Yang, H. M., Lee, H. S., & Yoon, C. B. (2021). Evaluations of all-in-one, polycarboxylate-based superplasticizer with viscosity modifying agents for the application of normal-strength, high-fluidity concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311141>
- Kwon, D.-H., Lee, H.-S., Jeon, J.-Y., Jeong, W.-T., Jo, H.-K., & Kim, H.-R. (2011). Evaluation of Pumping Characteristics of High Strength Concrete using Continuous Pumping System. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 11(4), 387-395. <https://doi.org/10.5345/jkibc.2011.11.4.387>
- Marchon, D., Kawashima, S., Bessaies-Bey, H., Mantellato, S., & Ng, S. (2018). Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. En *Cement and Concrete Research* (Vol. 112, pp. 96-110). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.014>
- Minitab®. (2020). *Interpretar los resultados clave para Gráfica de superficie*. Soporte de Minitab® 20. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/key-results/>

Minitab®. (2021). *Diagrama de Pareto de efectos estandarizados*. Soporte de Minitab® 21.

<https://support.minitab.com/es-mx/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/pareto-chart/>

Molina Arias, M. (2013). El significado de los intervalos de confianza. *Pediatría Atención Primaria*, 15(57), 91-94. <https://doi.org/10.4321/S1139-76322013000100016>

Plank, J., & Sachsenhauser, B. (2009). Experimental determination of the effective anionic charge density of polycarboxylate superplasticizers in cement pore solution. *Cement and Concrete Research*, 39(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.09.001>

Saeed, M. K., Rahman, M. K., Alfawzan, M., Basha, S., & Dahish, H. A. (2022). Evaluation of date kernel powder (DKP) for potential use as setting and hydration retarder in concrete. *Journal of Building Engineering*, 57. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104855>

Sainz-Aja, J. A., Carrascal, I. A., Polanco, J. A., Sosa, I., Thomas, C., Casado, J., & Diego, S. (2020). Determination of the optimum amount of superplasticizer additive for self-compacting concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/app10093096>

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

UIS. (2023). *Grupo de Investigación de Polímeros (GIP)*. <https://uis.edu.co/ffq-gruinv-gip-es/>

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

- Wang, W. C., Duong, H. T. H., & Zhang, C. H. (2023). Influence of accelerating admixtures on high early strength cement performance using heat curing method. *Case Studies in Construction Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01746>
- Xie, H., Liu, F., Fan, Y., Yang, H., Chen, J., Zhang, J., & Zuo, C. (2013). Workability and proportion design of pumping concrete based on rheological parameters. *Construction and Building Materials*, 44, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.051>
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 197-207. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00230-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00230-6)
- Zahlan, H., Saeed, W. S., Alrasheed, R., Alandes, N. M., & Aouak, T. (2019). Synthesis of poly (citric acid-co-glycerol) and its application as an inhibitor of CaCO₃ deposition. *Materials*, 12(22). <https://doi.org/10.3390/ma12223800>

Anexos

Anexo A. Relaciones de torque contra velocidad rotacional de cada mezcla

