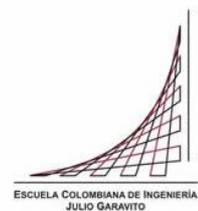


Maestría en Ingeniería Civil

**Evaluación del efecto de la concentración de sulfatos en el agua de
mezcla sobre las propiedades mecánicas del concreto**

Andrea Valentina Niño Ramírez

Bogotá, D.C, 13 de diciembre de 2022



**Evaluación del efecto de la concentración de sulfatos en el agua de
mezcla sobre las propiedades mecánicas del concreto**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en
Ingeniería Ambiental**

**Amalia Avendaño Sánchez
Directora**

**Sandra Rocío Jerez Barbosa
Codirectora**

Bogotá, D.C, 13 de diciembre de 2022



La tesis de maestría titulada “Evaluación del efecto de la concentración de sulfatos en el agua de mezcla sobre las propiedades mecánicas del concreto”, presentada por Andrea Valentina Niño Ramírez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

Directora de la tesis
Amalia Avendaño Sánchez

Codirectora de tesis
Sandra Rocío Jerez

Jurado 1
María Paulina Villegas de Brigard

Jurado 2
Jairo Alberto Romero Rojas

Bogotá, D.C., 13 de diciembre de 2022

Dedicatoria

A mi familia, por su apoyo, compañía, motivación y buen humor.

Agradecimientos

A mi familia por su amor incondicional, por motivarme a continuar mis estudios, así como por el apoyo y confianza que siempre me han brindado.

A mi directora de tesis la ingeniera Amalia Avendaño, por su constante motivación y ayuda, por ser una parte fundamental en este estudio y en mi decisión de continuar mi aprendizaje en el área de saneamiento y medio ambiente.

A mi codirectora de tesis la ingeniera Sandra Jerez, por brindarme su conocimiento y guía para la culminación exitosa de este documento; así como por la confianza y apoyo brindado.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por el financiamiento de la presente investigación; en especial al personal de la Dirección de posgrados, el ingeniero German Santos, Yennifer Bibiana Romero y Yamile Camacho.

Al equipo del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la institución por la ayuda y compañía durante el proceso, en especial al ingeniero Camilo Vega, el ingeniero Mateo Pulido y los operarios Ramón Torres y Jairo Paéz, quienes siempre tuvieron la disposición de ayudarme y guiarme durante el desarrollo de la parte experimental de mi trabajo de investigación.

A mis profesores del Centro de Estudios Ambientales, la bióloga Gladys Rocío González, los ingenieros María Paulina Villegas, Héctor Matamoros y el ingeniero Jairo Alberto Romero por la confianza, apoyo y cariño brindado; así como por afianzar en mí el amor y deseo de dedicar mi vida profesional al cuidado y recuperación del recurso hídrico.

Finalmente, quiero agradecer a aquellos amigos inesperados que realice durante mi época de estudios, Mónica Huertas y José Lizardo Claros, por su compañía, amabilidad y cariño.

Resumen

La producción de concreto emplea el 1.7% de la extracción de agua a nivel global (Miller et al., 2018); razón por la cual se han realizado diversas investigaciones con el objetivo de plantear alternativas para remplazar el agua potable de las mezclas de concreto. Dichos estudios han evaluado diferentes tipos de aguas como: residuales domésticas, grises, de lluvia, entre otras; cuyos contenidos de sulfatos se encontraban entre los 5 a 240 mg/L; no obstante, se pueden encontrar concentraciones mucho mayores en aguas residuales, aunque en la literatura consultada no se reporta que estas hayan sido evaluadas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, que el estudio de la nocividad de este compuesto ha estado limitado principalmente a establecer su efecto sobre el concreto endurecido cuando actúa como agente agresivo externo y que la concentración máxima permitida por las normas para el agua de mezcla es hasta de 3,500 mg/L de sulfatos como SO_4^{2-} ; este estudio pretende contribuir en este campo de estudio mediante la evaluación del efecto de diecisiete (17) concentraciones de sulfato entre los 0 mg/L y los 30.000mg/L, sobre el tiempo de fraguado inicial de la pasta de cemento, la resistencia a la compresión y la expansión de morteros. De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo establecer que los sulfatos disminuyen el tiempo de fraguado, incrementan la resistencia a la compresión a edades tempranas, presentan expansiones entre el 0.001% y 0.021% y a altas concentraciones es visualmente notorio el deterioro del material por acción de este compuesto, pues se apreció una mayor porosidad de los especímenes, desprendimiento de material de la capa más superficial (descascamiento) y se presentó el fenómeno de eflorescencia a partir de la concentración de 10,000 mg/L.

Índice general

Introducción.....	12
Objetivos.....	15
1. Marco teórico.....	16
1.1. Concreto	16
1.1.1. Características físicas y mecánicas.....	17
1.1.2. Características químicas.....	19
1.1.3. Deterioro del concreto.....	21
1.1.3.1. Materiales perjudiciales.....	21
1.1.3.2. Efecto de sustancias presentes en el agua de mezcla	22
1.1.3.2.1. Efecto de los sulfatos.....	23
1.1.3.2.2. Eflorescencia	29
1.2. El agua en las mezclas de concreto	30
1.2.1. Aguas negras e industriales.....	31
1.2.2. Aguas grises	31
1.2.3. Aguas tratadas, clarificadas o parcialmente recicladas	32
1.3. Normatividad sobre el agua de mezcla.....	32
1.3.1. IS 456.....	34
1.3.2. AS 1379 -2007	34
1.3.3. EN 1008-2002	35
1.3.4. ASTM C1602.....	36
1.3.5. IRAM 1601	37
1.3.6. NMX C-122	38
1.3.7. NTC 3459.....	38
2. Metodología de investigación.....	40
2.1. Materiales	42
2.1.1. Cemento	42
2.1.2. Arena.....	42
2.1.3. Agua.....	43
2.2. Tiempo de fraguado.....	44
2.3. Resistencia a la compresión.....	46
2.4. Expansión en barras.....	48
3. Resultados y contribución	50

3.1. Tiempo de fraguado.....	50
3.2. Resistencia a la compresión.....	52
3.3. Expansión en barras.....	61
3.4. Efecto de los sulfatos evidenciados en los especímenes	66
4. Conclusiones y recomendaciones	68
5. Bibliografía.....	70

Índice de tablas

Tabla 1. Contenido de sulfatos en diferentes tipos de agua.	13
Tabla 2. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, IS-456.....	34
Tabla 3. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, EN1008-2002	35
Tabla 4. Requerimientos del desempeño del concreto para el agua de mezcla, ASTM C1602 ..	36
Tabla 5. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, ASTM C1602.....	36
Tabla 6. Requisitos físicos, IRAM 1601	37
Tabla 7. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, IRAM 1601	37
Tabla 8. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, NMX C-122	38
Tabla 9. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, NTC3459.....	39
Tabla 10. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, NTC 3459.....	40
Tabla 11. Compilación de los valores máximos permisibles para los sulfatos en el agua de mezcla en diferentes normas	40
Tabla 12. Concentraciones de sulfato evaluadas.....	41
Tabla 13. Características del reactivo de sulfato de sodio anhidro	43
Tabla 14. Consistencia normal	45
Tabla 15. Fluidez del mortero	46
Tabla 16. Dosificación mezcla de mortero.....	48
Tabla 17. Resultados ensayo tiempo de fraguado inicial	50
Tabla 18. Resultados ensayo de resistencia a la compresión	52
Tabla 19. Desarrollo porcentual de la resistencia para cada mezcla, con base al valor obtenido a los 28 días.....	57
Tabla 20. Resultados ensayo de expansión	61

Índice de figuras

Figura 1. Desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto	18
Figura 2. Tasa típica de liberación de calor del cemento Portland durante la hidratación	19
Figura 3. Arena, material retenido en tamiz No. 16	42
Figura 4. Arena empleada en las mezclas de morteros	43
Figura 5. Pesado del reactivo	44
Figura 6. Preparación de solución de sulfatos (agua).....	44
Figura 7. Ensayo tiempo de fraguado inicial.....	45
Figura 8. Mezcla del mortero	47
Figura 9. Cubos de mortero.....	47
Figura 10. Ensayo de resistencia a la compresión.....	48
Figura 11. Ensayo de expansión en barras de mortero.....	49
Figura 12. Resultados Ensayo Tiempo de Fraguado Inicial.....	51
Figura 13. Resultados resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días	53
Figura 14. Resultados resistencia a la compresión a los 92 días	54
Figura 15. Desarrollo de la resistencia para concentraciones entre 0 - 1,000 mg/L.....	55
Figura 16. Desarrollo de la resistencia para concentraciones entre 1,500 - 10,000 mg/L.....	56
Figura 17. Desarrollo de la resistencia para concentraciones entre 15,000 - 30,000 mg/L.....	56
Figura 18. Desarrollo porcentual de la resistencia a la edad de 7 días	58
Figura 19. Desarrollo porcentual de la resistencia a la edad de 14 días	59
Figura 20. Desarrollo porcentual de la resistencia a la edad de 92 días	60
Figura 21. Resultados ensayo de expansión.....	62
Figura 22. Resultados ensayo de expansión a los 7 días	63
Figura 23. Resultados ensayo de expansión a los 14 días	64
Figura 24. Resultados ensayo de expansión a los 28 días	65
Figura 25. Resultados ensayo de expansión a los 92 días	65
Figura 26. Porosidad en los especímenes. Concentración 10,000 mg/L (derecha) y 15,000 mg/L (izquierda)	66
Figura 27. Desprendimiento de material. Concentración 10,000 mg/L (izquierda) y 20,000 mg/L (derecha).....	66
Figura 28. Eflorescencia. Concentración 20,000 mg/L (derecha) y 30,000 mg/L (izquierda)....	67

Anexos

- Anexo 1.** Resultados ensayo de fraguado.
- Anexo 2.** Resultados ensayo de resistencia a la compresión.
- Anexo 3.** Resultados ensayo de expansión.

Introducción

A nivel mundial, el consumo anual de concreto es de aproximadamente 30 billones de toneladas; cifra que se incrementa exponencialmente a causa de la creciente demanda de este material, como resultado de la inversión en infraestructura que adelantan algunos países (Miller et al., 2018). Lo anterior, se suma a la creciente preocupación por la escasez del recurso hídrico y al hecho de que para el año 2012 la producción de concreto fue la responsable de la extracción del 9% del agua para la industria, lo que corresponde aproximadamente al 1.7% de la extracción de agua a nivel global (Miller et al., 2018); este contexto ha propiciado en el ámbito académico, el desarrollo de investigaciones cuyo objetivo es proponer alternativas para remplazar el agua potable de las mezclas de concreto.

De acuerdo con lo establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, la normatividad en materia de calidad de agua para mezclas de concreto se enmarca en las normas ASTM C1602M y NTC 3459, esta última basada en los requisitos de la norma inglesa BS3148; en éstas se establecen los criterios y los límites de sustancias dañinas que se deben cumplir y/o garantizar a la hora de emplear otras fuentes de agua en la elaboración del concreto. Adicionalmente, en estas normas se indica que el agua de mezcla puede ser cualquiera de origen natural, que no tenga olor o sabor inusuales o altos contenidos de impurezas que puedan afectar el tiempo de fraguado, la manejabilidad, la resistencia del concreto y su estabilidad volumétrica.

A partir del análisis de algunas investigaciones realizadas hasta el momento, en las que se han estudiado la calidad del agua de lluvia, de las aguas residuales grises y domésticas, crudas y tratadas en la producción de concretos, se encuentra que los niveles de sulfato en las aguas estudiadas eran significativamente inferiores a los valores máximos permitidos en la normatividad sobre la calidad del agua de mezcla para concretos (ver Tabla 1), lo que sugiere que si el único criterio de selección del agua de mezcla fuera el contenido de sulfatos, cualquier tipo de agua podría ser empleada en la producción de este material.

Sin embargo, la reacción de los iones de sulfato del agua con el hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento produce yeso, el cual se deposita en los poros del concreto y se cristaliza; dicho proceso es acompañado por un incremento del volumen al interior de los poros que ocasiona su expansión y por ende el agrietamiento de la pasta de cemento (Escobar et al., 1984). Cabe resaltar que, dentro de la literatura consultada, no se evidencia que se haya estudiado el incremento del volumen del material (expansión) como producto de la reacción de los sulfatos

contenidos en el agua de mezcla con el cemento hidratado, lo anterior puede atribuirse a que por lo general la normatividad únicamente exige que para determinar la aptitud del agua para la mezcla se realice un ensayo de resistencia a la compresión junto con un ensayo de tiempo de fraguado, y a que la mayoría de investigaciones relacionadas con el efecto de los sulfatos sobre el concreto buscan estudiar el ataque externo de los primeros sobre este material, asociados a ambientes agresivos.

Escobar et al. (1984) encontraron que para concentraciones de sulfatos de 600 ppm la resistencia del concreto endurecido empieza a disminuir y que a concentraciones mayores a 900 ppm aumenta la rapidez con la que los sulfatos atacan el concreto. Dado que las aguas residuales estudiadas hasta al momento presentan niveles muy por debajo del rango de concentración permitido por la norma NTC 3459, se hace importante el desarrollo de investigaciones que permitan establecer el efecto del contenido de sulfatos en el agua de mezcla del concreto sobre las propiedades físicas y mecánicas de este material, que permitan evaluar las concentraciones reales que puedan llegar a presentarse en aguas diferentes a la potable y su efecto sobre el tiempo de fraguado, la expansión y la resistencia del material.

Tabla 1. Contenido de sulfatos en diferentes tipos de agua.

Tipo de agua	Concentración de sulfatos (mg/L)	Valor permisible de sulfatos (mg/L)	Norma	Referencia
Lluvia	5	1000	NTC 3459	Bedoya-Montoya & Medina-Restrepo (2016)
Agua gris cruda	222	2000	ASTM C94 o EN 1008	Ghrais & Al-Mashaqbeh, (2016)
Agua gris tratada	237			
Agua residual	78.4			
Agua residual doméstica después del tratamiento primario	106			
Agua residual doméstica después del tratamiento secundario	106.2			
Agua destilada	<5	3000	ASTM C 1602/ C 1602M-12	Onesmus Mulwa et al. (2016)
Agua residual	955.52			
Agua de pantano	788.83			
Aguas lluvia	233.55			
Agua enbotellada	74.66			
Agua potable	7.28			

Fuente: El Autor, 2022

Considerando lo anteriormente expuesto, el presente documento expondrá en el Capítulo 1 toda la información recopilada acerca del concreto como material, indicando sus principales características tanto físicas como químicas y las sustancias que pueden tener un efecto adverso sobre él; luego en ese mismo capítulo se presentarán los principales hallazgos sobre las investigaciones realizadas sobre distintos tipos de aguas empleadas como sustitutas del agua potable y a las cuales se les determinó el contenido de sulfatos; por último, se listan las normas que existen a nivel nacional e internacional referentes a la calidad del agua de mezcla.

En el Capítulo 2 se presenta la metodología de la investigación, la cual consistió en la realización de ensayos experimentales que permitieran evaluar el efecto de diecisiete (17) concentraciones de sulfato entre los 0 mg/L y los 30.000mg/L, sobre el tiempo de fraguado inicial de la pasta de cemento, la resistencia a la compresión y la expansión del mortero.

En el Capítulo 3, se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo y su análisis, presentando en primer lugar los resultados obtenidos para el ensayo de tiempo de fraguado, en el cual se evalúa la incidencia de los sulfatos en el tiempo de fraguado inicial de la pasta de cemento; posteriormente, los resultados del ensayo de resistencia a la compresión y finalmente los del ensayo de expansión.

En el Capítulo 4, se presentan las conclusiones derivadas del proceso de investigación, detallando para cada uno de los ensayos efectuados y objetivos planteados las relaciones encontradas entre el contenido de sulfatos del agua de mezcla y las propiedades del material que fueron objeto de estudio del presente documento. De igual forma, se suministran algunas recomendaciones para el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas con esta temática, con base a los resultados derivados de este trabajo.

En el Capítulo 5, se presentan todas las referencias bibliográficas de los documentos consultados para la elaboración del presente documento, empleando para su organización y presentación, los lineamientos de la American Psychological Association (APA) en su sexta edición.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de sulfatos en el agua de mezcla sobre las propiedades físicas y mecánicas del mortero.

Objetivos específicos

- Revisar y compilar la normatividad a nivel nacional e internacional referente a la calidad del agua de mezcla para la elaboración de concretos.
- Determinar el efecto de la concentración de sulfatos sobre el tiempo de fraguado inicial en las mezclas de mortero evaluadas.
- Evaluar la resistencia a la compresión de los cubos de mortero elaborados con diferentes concentraciones de sulfatos en el agua de mezcla y a diferentes edades.
- Evaluar la expansión y pérdida de masa de barras de mortero elaboradas con diferentes concentraciones de sulfatos en el agua de mezcla y a diferentes edades.
- Proponer para el nivel de resistencia evaluado una concentración de sulfatos apropiada para la elaboración de concretos.

1. Marco teórico

En el presente capítulo se presenta el marco conceptual del proyecto, estableciendo en primer lugar la definición y aspectos más importantes del concreto en relación con sus materias primas, composición química, características físicas y mecánicas; así como el efecto que tiene los sulfatos presentes en el agua de mezcla sobre las características y propiedades de este material.

Posteriormente, se presenta un breve resumen de las investigaciones que se han realizado a nivel mundial para evaluar diferentes tipos de aguas, con el fin de establecer su empleabilidad como agua de mezcla en la producción del concreto. Finalmente, se presenta la compilación de las diferentes normas encontradas que reglamentan la caracterización y evaluación del agua de mezcla para concreto.

1.1. Concreto

El concreto es uno de los materiales que más se emplea a nivel mundial para la construcción de infraestructura gracias a las ventajas que presenta frente a otros materiales, como por ejemplo la facilidad que tiene para moldearse en estado fresco y su durabilidad durante largos periodos de tiempo.

Por definición el concreto es un material heterogéneo, compuesto principalmente por agregados, cemento, aire y agua. Los agregados, constituyen el material de relleno del concreto y se componen por una fracción fina (arena) y otra gruesa (grava). El cemento es el material que permite la unión de los otros materiales, pues al entrar en contacto con el agua se hidrata formando una masa plástica que posteriormente se endurece (fraguado) permitiéndole soportar esfuerzos mecánicos; se estima que 1 gramo de cemento requiere en promedio 0.253 gramos de agua para su hidratación (Peche et al., 2014), además el agua también es necesaria durante el proceso de curado del concreto, pues permite la hidratación total del cemento para que desarrolle su máxima eficiencia. Finalmente, el aire, es un componente que se introduce en la mezcla durante el proceso de mezclado y colocación, pero que además puede ser predeterminadamente adicionado para dotar el concreto de características especiales (Matallana Rodríguez, 2006) tales como la baja permeabilidad, característica que le permiten reducir la penetración del agua y otros agentes externos.

Entre las funciones que cumple la pasta de cemento, se encuentran la de permitir la manejabilidad de la mezcla en estado fresco, ya que funciona como lubricante de los componentes que la conforman; en estado endurecido, el cemento disminuye la permeabilidad de la mezcla al llenar los espacios producidos por los agregados; desarrolla la resistencia del material durante la etapa de fraguado y endurecimiento; además es aglomerante, permitiendo la unión de los demás componentes que conforman el concreto.

Como se mencionó anteriormente una característica del concreto es su manejabilidad, esta característica depende directamente de la humedad de la mezcla; es decir de la cantidad de agua, la cual debe ser tal que permita el manejo, transporte, colocación y consolidación del material sin que se produzca segregación, que es la separación de las partículas de la porción gruesa de los agregados de su parte más fina; ni exudación, la cual se presenta cuando el agua de la mezcla tiende a quedarse en la superficie del concreto recién colocado o durante el proceso de fraguado.

1.1.1. Características físicas y mecánicas

El concreto tiene la capacidad de resistir diferentes tipos de esfuerzos mecánicos; entre los esfuerzos mecánicos de mayor importancia para este material se encuentran la compresión, tracción, flexión, cortante y adherencia al acero de refuerzo. Sin embargo, el esfuerzo más importante al hablar del concreto y que además permite su clasificación, es el esfuerzo de compresión; frente al cual este material presenta un muy buen comportamiento.

De acuerdo con lo expresado por Matallana Rodríguez (2006) la resistencia del concreto tiene su origen en la hidratación del cemento, de tal forma que a mayor hidratación mayor será la resistencia, por consiguiente, el principal factor que incide en la resistencia de este material será la relación agua/cemento y consecuentemente la calidad del agua; la perturbación del proceso de hidratación a edades tempranas afecta el desarrollo de la resistencia en edades posteriores e incluso ocasiona su reducción (Kurdowski, 2014). Sin embargo, también influyen factores como la temperatura, las características de los agregados, los aditivos, el curado y la edad del material. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y asumiendo que la resistencia máxima del material se obtiene a los 28 días, en su libro, Matallana Rodríguez (2006) presenta la gráfica que se ilustra a continuación, y en la cual es posible ver la forma en la que se desarrolla la resistencia a la compresión del concreto a lo largo del tiempo, es decir a diferentes edades.

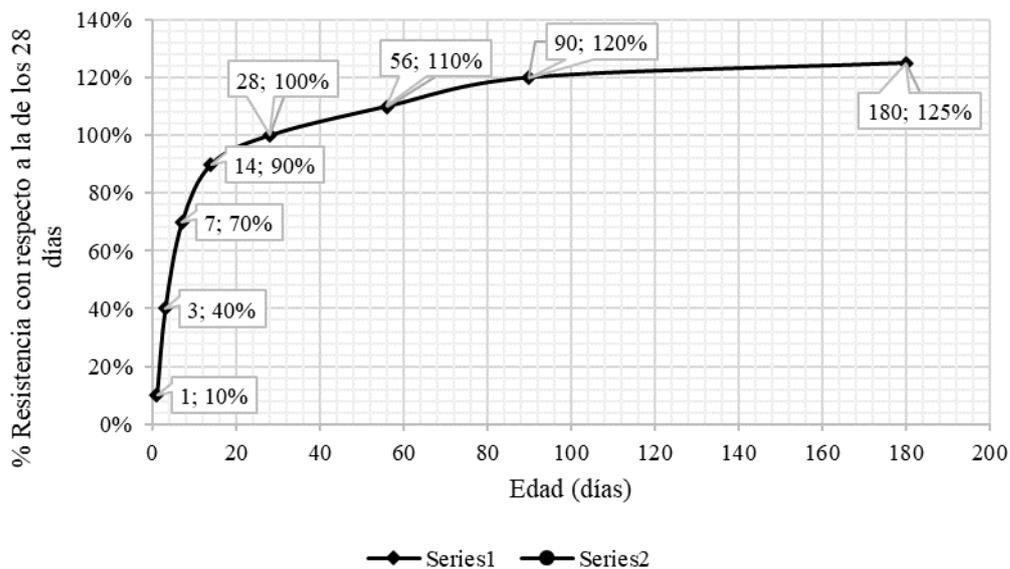


Figura 1. Desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto
Fuente. Matallana R. (2006)

Por el contrario, el concreto es muy débil frente a esfuerzos de tensión, motivo por el cual se emplea el acero para “reforzar el concreto en aquellos sitios en que su pequeña resistencia a tracción podría limitar la capacidad portante del elemento” (Matallana Rodríguez, 2006). Además, es necesario indicar que algunas de las propiedades del concreto están directamente relacionadas con las propiedades físicas del cemento, el VDT – Virginia Transportation Department (2015) menciona las siguientes propiedades:

Finura del cemento: La finura del cemento afecta la producción de calor y la tasa de hidratación de este material, acelerando el desarrollo de la resistencia. Este parámetro afecta en gran medida el fraguado y la resistencia de la pasta de cemento, lo cual se atribuye a que la actividad química de los sólidos es directamente proporcional a la superficie de su área, la cual aumenta con el incremento de la finura de las partículas (Kumar Chatterjee, 2018).

Tiempo de fraguado: Esta propiedad indica si las reacciones químicas causadas por la hidratación del cemento ocurren de la forma en la que deberían, permitiéndole desarrollar inicialmente la pasta fluida que aglomera los demás materiales y posteriormente el endurecimiento de dicha pasta. Esta propiedad se ve afectada por la finura del cemento, la relación agua/cemento (a/c), las adiciones del concreto y el yeso.

La plasticidad: Es la propiedad que permite que el material sea fluido y moldeable. Cuando se presenta un falso fraguado se evidencia la pérdida de plasticidad sin que se presente calor después

del mezclado; no obstante, la plasticidad se puede restaurar con un mayor tiempo de mezclado sin adicionar agua.

La permeabilidad: Esta propiedad controla el transporte de iones/agua agresiva o perjudicial para el concreto, afectando principalmente la durabilidad de las estructuras en ambientes agresivos (Yu et al., 2018).

Calor de hidratación: Es el calor generado por la reacción agua cemento, depende de la composición química de este último, la relación agua cemento, la finura del cemento y la temperatura de curado. La evolución del calor de hidratación es representada en la siguiente figura:

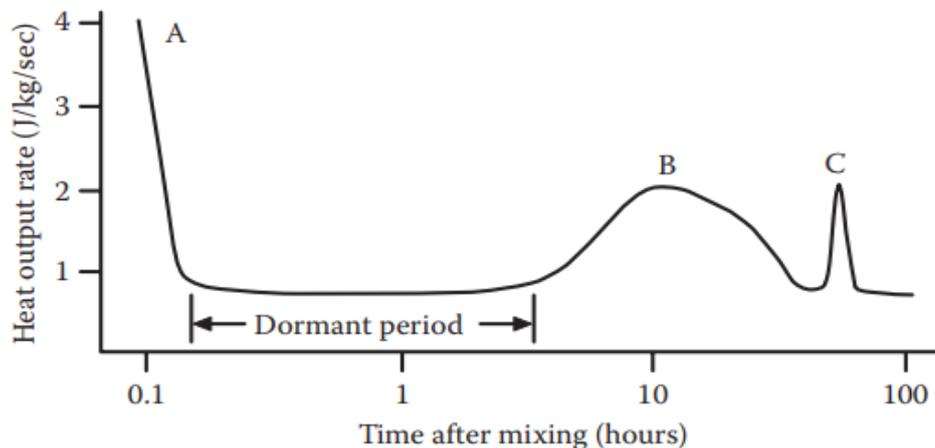


Figura 2. Tasa típica de liberación de calor del cemento Portland durante la hidratación
Fuente. Kumar Chatterjee, 2018

1.1.2. Características químicas

Como se mencionó anteriormente, uno de los componentes del concreto es el cemento, el cual se encuentra conformado por cal (CaO) usualmente encontrada en piedras calizas o conchas, sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) principalmente encontrados en arcillas y escoria de alto horno, y óxido de hierro (Fe₂O₃); los cuales, gracias a su calcinación a 14750°C y consecuente reacción química dentro del horno de mezclado (Bediako & Amankwah, 2015), alcanzan el equilibrio químico, formando así compuestos más complejos.

Los compuestos complejos que se forman son: silicato tricálcico (3CaO.SiO₂ – Abr. C₃S), silicato bicálcico (2CaO.SiO₂ Abr. C₂S), aluminato tricálcico (3CaO.Al₂O₃ – Abr. C₃A), ferroaluminato

tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Abr. C}_4\text{AF}$); estos conforman lo que se denomina como clínquer (Ali et al., 2008).

Es necesario indicar que los silicatos corresponden entre el 70 y 80% del cemento, con la diferencia que el silicato tricálcico se hidrata más rápidamente que el silicato bicálcico, por ende, contribuye al tiempo de fraguado y a la resistencia inicial del material, además un exceso en su contenido y rápida reacción con el agua son causantes del fenómeno de “fraguado relámpago” en el cual se produce una liberación excesiva de calor y un endurecimiento severo de la pasta (Kumar Chatteree, 2018). Por el contrario, el C_2S desarrolla la resistencia lentamente, contribuyendo al endurecimiento entre los 7 y 28 días.

Además, el aluminato tricálcico es el compuesto menos estable, se hidrata rápidamente y genera calor; es un compuesto cuyas propiedades favorece el cambio volumétrico del cemento y su baja resistencia a los sulfatos. Por el contrario, el ferroaluminato tetracálcico, cumple la función de catalizador, es decir su función es acelerar o retardar las reacciones químicas, además de aportar resistencia al material (Matallana Rodríguez, 2006).

El cemento se forma a partir de la mezcla del clínquer con yeso hidratado (sulfato de calcio hidratado – $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), este último compuesto es el encargado de controlar el fraguado del material al momento de entrar en contacto con el agua, ya que la reacción entre el aluminato tricálcico presente en el clínquer y el agua, ocasiona un endurecimiento instantáneo de la pasta.

La reacción entre el yeso y el aluminato tricálcico forma sulfoaluminato cálcico insoluble (ettringita – $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), aunque en ocasiones mencionan Escobar et al. (1984), se forma un hidrato de aluminato tricálcico metaestable producido por la reacción de la ettringita con un contenido de sulfato presente previamente. Del mismo modo, el autor indica que el contenido de yeso debe ser controlado, ya que un exceso en este compuesto produce la expansión y el rompimiento consecuente de la pasta de cemento fraguada (endurecida) y es el causante del fenómeno conocido como falso fraguado. De acuerdo con Kumar Chatteree (2018), el fenómeno del falso fraguado se caracteriza por un endurecimiento prematuro de la pasta sin una excesiva liberación de calor y es el resultado de la cristalización del yeso en la fase líquida de la pasta supersaturada con sulfatos por la por disolución excesiva del sulfato de calcio hemihidratado o anhidrita soluble.

La rotura del material en estado endurecido también puede presentarse como resultado de la reacción entre el aluminato de calcio hidratado y sales de sulfato provenientes de fuentes externas la cual ocasiona la formación de ettringita, así como por la reacción entre el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y los sulfatos la cual produce yeso; ambos productos, la ettringita y el yeso, ocasionan la expansión y consecuente desintegración del material (Escobar et al. 1984).

A continuación, se indican algunas impurezas que se consideran nocivas para el concreto y el efecto que los sulfatos tienen sobre este material.

1.1.3. Deterioro del concreto

Al ser el concreto un material que se forma de la reacción química de muchos compuestos, un desequilibrio en las cantidades de estos, así como la presencia de otras sustancias, puede ocasionar reacciones que producen subproductos que pueden llegar a deteriorar el material.

De acuerdo con Escobar et al. (1984), se identifican dos tipos de corrosión en el concreto, el físico, que se refiere al desgaste mecánico del material, y el químico, el cual se encuentra subdividido en aquel que se produce por lixiviación, cambio iónico y separación de las combinaciones fácilmente solubles de la pasta de cemento endurecida, y por la expansión como resultado de la formación de nuevos compuestos.

Finalmente, es importante señalar que de acuerdo con el American Concrete Institute (ACI, 1977), el ataque químico del concreto es en muchas ocasiones el resultado de la exposición del material a sulfatos o ácidos; sin embargo, a continuación, se describirán los materiales y/o compuestos que son conocidos por su efecto nocivo para este material.

1.1.3.1. Materiales perjudiciales

A continuación, se describen algunos elementos o materiales que son perjudiciales para el concreto:

Material fino, limo y arcilla: Los materiales finos, con tamaños iguales o inferiores a los del cemento, aíslan las partículas de este último haciendo que pierda su capacidad aglutinante, ocasionando la pérdida de resistencia y durabilidad.

La arcilla expansiva, por ejemplo, se hincha con el agua y se contrae cuando esta drenada, por ende, su presencia en la mezcla puede producir esfuerzos en el concreto endurecido, que desgastan y deterioran el material.

Impurezas orgánicas: Estas son sustancias provenientes de la descomposición de materiales vegetales o de animales, que se manifiestan en humus o magras orgánicas. Estas sustancias, interfieren en las reacciones químicas de hidratación del cemento, produciendo un retraso del fraguado que a su vez afecta la resistencia y durabilidad del material; además sustancias como las algas pueden afectar la adherencia del cemento a los agregados.

Arena de mar: En algunos países la arena disponible para la producción del concreto es arena de mar, ésta arena contiene altos contenidos de sal, la cual en el concreto reforzado propicia la corrosión del acero. Además, este tipo de arena puede causar manchas o eflorescencias en la superficie de la estructura, también puede contener materia orgánica (conchas) que dificultan su manejabilidad, además la finura del grano demanda mayores cantidades de agua y cemento.

Partículas débiles o inestables: Estas sustancias pueden afectar la resistencia y durabilidad del material, conducen al descascaramiento del concreto.

Azúcar: A concentraciones entre el 0.03% y el 0.15% en peso del cemento, retarda el fraguado de la mezcla, al evaluar la resistencia a la compresión a los 7 días esta se ve reducida, no obstante, al evaluar la resistencia a los 28 días esta puede ser incluso mayor a la resistencia esperada de la mezcla de concreto; lo que significa que los azúcares retardan el desarrollo de la resistencia a edades tempranas. En cambio, concentraciones de azúcares superiores al 0.25% del peso de cemento puede causar fraguado rápido y una reducción significativa de la resistencia a la compresión a los 28 días (Carrasco, 2013).

1.1.3.2. Efecto de sustancias presentes en el agua de mezcla

Según el informe de la entidad Cemento, concreto y agregados de Australia (2007), entre los compuestos nocivos para este material se encuentran: los aceites, grasas y detergentes, los cuales pueden facilitar el ingreso de aire a la mezcla; los cloruros, aumentan la probabilidad de corroer el acero; el cloruro de calcio y otras sales de calcio pueden acelerar el efecto de fraguado; compuestos como el azúcar, la sal o el zinc, así como otros compuestos orgánicos e inorgánicos tienden a retardar el fraguado de la mezcla (Cement Concrete and Aggregates Australia, 2007).

A continuación, se compilan los efectos que tienen algunas de las sustancias químicas inorgánicas presentes en el agua de mezcla, sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

Carbonato alcalino y bicarbonato: Este tipo de sustancias afectan el tiempo de fraguado del cemento; además en altas concentraciones pueden reducir la resistencia del concreto y propiciar reacciones álcali-agregado (Carrasco, 2013).

Cloruros: su efecto nocivo se debe principalmente a que los iones de cloruro propician la corrosión del acero de refuerzo; no obstante, se ha identificado que estos tienen un efecto mitigante del ataque por sulfatos del concreto, pues retrasa el deterioro producido por este último compuesto (Maes & de Belie, 2014).

Sales de hierro: aunque no afectan la resistencia del concreto, pueden deterioran su aspecto estético (Carrasco, 2013).

Sales inorgánicas: reducen significativamente la resistencia del material y causan altas variaciones en el tiempo de fraguado (Carrasco, 2013).

Sales de magnesio: suelen ser más agresivas en presencia de hidróxido de calcio y sales cálcicas, ya que el calcio conglomerante del cemento es remplazado por magnesio, formando silicato magnésico que es una sustancia gelatinosa insoluble, que debilita la cohesión y causa expansiones (Escobar et al., 1984).

Aceites: reducen la resistencia del concreto, según Carrasco (2013) las concentraciones superiores al 2.5% en peso del cemento del aceite mineral puede reducir hasta un 20% la resistencia del material.

Ácidos: La acidez que resulta de la combinación de dióxido de carbono, ácidos orgánicos e inorgánicos, no promueve la expansión del material, pero si lo debilita progresivamente al remover el material cementante de la mezcla (Reddy Babu et al., 2018).

1.1.3.2.1. Efecto de los sulfatos

Los sulfatos son sustancias inorgánicas que se presentan tanto en aguas naturales como en las aguas residuales; en las primeras las concentraciones del ion sulfato pueden ser hasta de miles de mg/L y se presentan principalmente en forma de sulfato de sodio y sulfato de magnesio (Romero

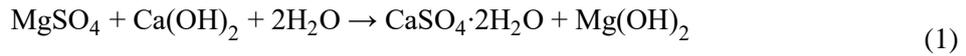
R., 2002); mientras que en las aguas residuales su presencia se debe principalmente a vertimientos industriales con altos contenidos de fertilizantes, pesticidas, jabón, papel, fármacos, productos de la explotación minera, entre otras (Gobierno de las Islas Baleares, s/f). Además, los sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio, en ocasiones se encuentran en estado sólido como rocas o disueltos en aguas subterráneas; en el segundo caso, si el agua se evapora estando cerca de una estructura de concreto, puede depositar compuestos de sulfato u otros agentes nocivos en la superficie del material, incrementando su concentración y causando el deterioro de la estructura (American Concrete Institute – ACI, 1977).

Los sulfatos pueden encontrarse tanto en el agua de mezcla como en el agua de curado del concreto en forma de sales inorgánicas como el sulfato de sodio (Na_2SO_4) y el sulfato de magnesio (MgSO_4). Estas sales son consideradas entre las más dañinas para el concreto, como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar al entrar en contacto con los compuestos de cemento, las cuales pueden ocasionar la expansión, disminución de la resistencia del material y fractura del material (Marchand et al., 2002).

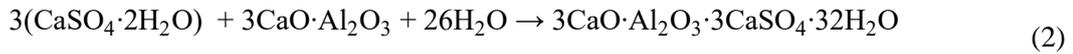
Es importante señalar que en el desarrollo de estas reacciones influyen diversos factores como: la composición química del cemento, la relación agua/cemento, la concentración de sulfatos, la finura del cemento, entre otros (Shanahan & Zayed, 2007).

De acuerdo con Al-Dulaijan et al. (2003), las reacciones químicas pueden tomar dos formas dependiendo del tipo y concentración de los iones de sulfato y la composición del cemento; el primer mecanismo de deterioro por sulfatos, usualmente se manifiesta por la expansión del concreto y su posterior fractura; en el segundo caso, por la pérdida de resistencia y masa, como resultado del debilitamiento de la propiedad cohesiva del cemento hidratado. Es importante señalar que Prasad et al. (2006) consideran que la pérdida de masa, la cual exponen como el descascaramiento de la superficie del material capa a capa, es considerada como una tercera forma de deterioro por la acción de los sulfatos.

Según mencionan Kılınç et al. (2005), las reacciones que tienen lugar dentro de la mezcla y que hacen que el sulfato de magnesio (MgSO_4) sea nocivo para el concreto, es que este reacciona con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formando yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) o brucita, la cual es poco soluble; debido a que estos compuestos se forman a partir del hidróxido de calcio, el pH de la solución disminuye.



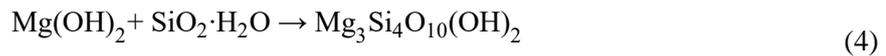
Posteriormente, el yeso formado reacciona con el aluminato tricálcico (C₃A) del cemento, formando sulfoaluminato o ettringita que produce la expansión del volumen.



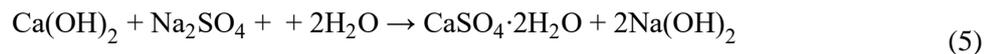
La formación de brucita y ettringita se detiene al endurecerse el cemento, mientras que la formación de yeso continúa contribuyendo a la expansión del material. Además, si las condiciones son propicias el sulfato de magnesio puede reaccionar con el silicato de calcio hidratado (CaO·SiO₂·H₂O), que es un gel cementoso, según la siguiente ecuación:



En consecuencia, se forma gel de sílice el cual tiene una resistencia menor al gel cementoso de silicato de calcio. Se observa además que las concentraciones de yeso y brucita aumentan, razón por la cual el hidróxido de calcio se separa del silicato de calcio hidratado, disminuyendo así la resistencia del material. Adicionalmente, la brucita reacciona con el gel de sílice (Ecuación 4) formando silicato de magnesio hidratado, comúnmente conocido como talco:

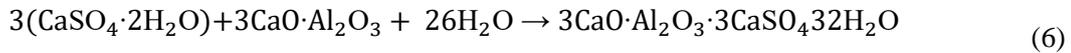


En cuanto al sulfato de sodio, Kılınc et al. (2005) mencionan que, al igual que en el caso anterior, este reacciona inicialmente el Ca(OH)₂ formando yeso (CaSO₄·2H₂O) e hidróxido de sodio (Na(OH)₂), para este caso, a diferencia de la reacción con el sulfato de magnesio, el pH de la solución aumenta y el yeso reacciona con el aluminato de calcio no hidratado formando ettringita tempranamente, sin que este sea destructivo al encontrarse el material en su estado fresco.



La formación de yeso continúa después de que el material se endurece contribuyendo a la expansión del material. Además, el yeso formado en el material endurecido, reacciona con el aluminato de calcio hidratado, el sulfoaluminato de calcio hidratado y aluminato de calcio sin

hidratar, formando más ettringita (Ecuación 6), la cual a diferencia de la primera causa la expansión y fractura del material.



De acuerdo con Godart (2017), la formación tardía de ettringita (FTE), asociada a la reacción expansiva interna producida por los sulfatos, se define como la formación de ettringita en el concreto posterior a su fraguado y sin presentarse ninguna fuente externa de sulfatos; más sí una fuente de humedad constante; por ende, este fenómeno se presenta en estructuras de concreto expuestas al agua o a humedad frecuente (al menos de 90 a 95 % de humedad relativa) y sometidos o que desarrollan altas temperaturas (por encima de los 65° C).

El proceso expansivo de la FTE consiste principalmente en la hinchazón del material, la formación de microgrietas y la reducción de sus propiedades mecánicas; lo anterior ocasiona deformaciones inesperadas y tensiones adicionales en el concreto y su refuerzo que producen importantes daños estructurales de los elementos afectados; un ejemplo de esto son algunos puentes en Francia en los cuales se presentó esta patología y se encontró que la desaceleración en la evolución de las grietas ocurrió 10 años después de registrarse por primera vez su afectación por este fenómeno y en algunos casos ni siquiera se evidenció la desaceleración del daño producido por la FTE después de dicho periodo de tiempo (Godart, 2017), evidenciando la gravedad que supone el desarrollo de este fenómeno para la seguridad y durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado.

Generalmente la resistencia a la compresión es la propiedad mecánica menos afectada por este tipo de reacciones, motivo por el cual no debe ser utilizado como un indicador primario para predecir la respuesta estructural del material; el comportamiento de las estructuras de concreto en su estado límite de servicio es más sensible a los cambios en la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad, que influirán en el agrietamiento y deformaciones que a su vez producen esfuerzos significativamente grandes que no son soportados por el material (Noël et al., 2018).

En relación con lo anterior, otras investigaciones han encontrado que las expansiones y microfracturas inducidas por la FTE puede alcanzar valores hasta del 2% y afectan el módulo de elasticidad del concreto; así mismo, se ha establecido una correlación entre la reducción del módulo dinámico medido por resonancia sónica y la expansión, que puede superar el 10% e incluso el 40% para especímenes cuya expansión alcanzó el 1.7%, así como una reducción del

75% de la resistencia a la compresión definitiva para muestras de concreto que sufrieron expansiones hasta de un 1.6% (Brunetaud et al., 2008).

Es importante señalar que, en la respuesta estructural de los elementos afectados por esta patología, influyen factores como la restricción de la expansión por una carga aplicada, las condiciones del entorno y el refuerzo interno, dado que dichos factores limitan las expansiones que se producen (Noël et al., 2018) y modifican la orientación de las microgrietas resultantes de dicho proceso (Kawabata et al., 2021).

A escala microestructural, cuando la expansión de FTE ocurre sin tensión externa se forman grietas en la pasta de cemento y alrededor de los agregados que pueden causar una modificación anisotrópica de las propiedades mecánicas del material; sin embargo, se desconoce si la orientación de las microfisuras puede cambiar bajo condiciones restrictivas en los elementos evaluados, motivo por el cual la comprensión del efecto de los diversos grados de restricción en la expansión y los patrones de agrietamiento es importante para evaluar el comportamiento estructural del hormigón armado (Kawabata et al., 2021).

En relación con lo anterior, Al-Dulaijan et al. (2003) evidenciaron que la falla de los morteros, elaborados con cemento Tipo I y expuestos a soluciones de sulfato de sodio, se presentó como resultado de la formación de fracturas expansivas comúnmente asociadas a cementos donde la concentración de C_3A es entre moderada y alta, ya que dicho compuesto favorece la formación de ettringita después de endurecido el material, razón por la cual diversos autores señalan la importancia de limitar su contenido en cementos que serán empleados en la elaboración de concretos resistentes a los sulfatos.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, el ataque de los sulfatos se manifiesta mediante la fisuración y descascaramiento del concreto, acompañada de una expansión y/o pérdida de resistencia (Shanahan & Zayed, 2007), lo anterior no implica que las fisuras o daños ocasionados por los sulfatos sea suficiente para causar una falla generalizada por tensión interna en el elemento que ocasione su fractura. Además, según indican Fu et al. (2020) el efecto del sulfato de sodio radica en su influencia sobre la química de hidratación del material, lo que consecuentemente termina por afectar la microestructura del mismo.

Escobar et al., (1984) estudiaron el efecto de la variación del contenido de sulfato de magnesio en el agua de mezcla sobre el concreto endurecido, partiendo de una concentración de 600ppm e

incrementando cada 100ppm hasta alcanzar una concentración de 1200ppm. Para ello mantuvieron constante la relación agua / material cementante (A/C) de la mezcla y tomaron como parámetros de comparación el fraguado y la resistencia a la compresión de cilindros de concreto con 3, 7, 28 y 100 días de edad; encontrando que, para la concentración de sulfatos de 600ppm, la resistencia de los cilindros disminuía en un 10%, mientras que para concentraciones superiores a las 900 ppm el sulfato de magnesio incrementaba la velocidad con la que atacaba el concreto.

En Turquía, Kılınc et al. (2005), estudiaron el efecto de diferentes concentraciones de sulfato de magnesio y sulfato de sodio en el agua de mezcla, sobre el comportamiento mecánico del concreto. Los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión mostraron que el efecto del sulfato de magnesio sobre el concreto era más pronunciado cuando la concentración de sal excede el 6%; mientras que, para el sulfato de sodio, ocurre cuando la concentración excede el 0.5%; adicionalmente, estos autores identificaron que la resistencia de los morteros disminuía a medida que la concentración del sulfato de sodio o magnesio aumentaba.

Zuquan et al. (2015) estudiaron el agrietamiento corrosivo producido por el efecto doble de los cloruros y sulfatos presentes en el agua de mezcla, encontrando que los sulfatos permiten la prolongación del tiempo en el cual inicia el agrietamiento y disminuyen la expansión de las grietas producidas por la acción de los cloruros sobre el concreto.

De igual forma, Onesmus Mulwa et al. (2016), en Kenia, generalizaron un poco más el estudio y propusieron investigar el efecto de los iones de sulfato presentes en el agua de mezcla sobre el desempeño de morteros, encontrando que la resistencia a la compresión de este material se reduce a edades tempranas, se retarda el fraguado de la mezcla y los altos contenidos de sulfato pueden ocasionar la falla del mortero.

En los diferentes tipos de aguas que han sido estudiadas por diversos autores, la concentración de los sulfatos no supera los 1000 mg/L, tal y como se puede apreciar en la Tabla 1. Cabe resaltar, que el contenido de sulfatos permitido en el agua de mezcla depende del contenido de sulfatos de los agregados y el cemento, ya que el factor crítico es la cantidad total de este compuesto en el concreto (Rivera L, 2011).

En los materiales cementantes, la concentración de los iones de sodio, junto con los de potasio y calcio, cumple un importante papel en el desarrollo de la eflorescencia ya que reaccionan con los iones de calcio formando hidróxidos; particularmente el sodio es un ion muy móvil y en el caso

del concreto producido a partir de cemento con escoria activada, migra a la superficie y se forma la eflorescencia blanca de carbonato de sodio (Kurdowski, 2014).

En presencia de temperatura y/o humedad relativa cíclica, el sulfato de sodio (Na_2SO_4) puede alternar fácilmente entre formas hidratadas (mirabilita) y no hidratadas (nardita), con cambios asociados en su volumen de aproximadamente 315 %; este cambio de volumen repetido da como resultado la fatiga del material, que sumada a la presión por cristalización de la sal en los poros provoca el descascaramiento de la superficie del concreto (Nehdi & Hayek, 2005). La mirabilita ($\text{Na}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) se presenta en forma de capas delgadas debajo de la superficie de concreto y luego en la superficie de las microfisuras generadas debido a la transición de sulfato de sodio anhidro en mirabilita en el caso de la absorción de humedad por el concreto, porque la mirabilita tiene mayor volumen específico (Kurdowski, 2014).

Además, es importante señalar que el efecto de los sulfatos es altamente nocivo en condiciones anaerobias donde el entorno es favorable para el desarrollo de bacterias reductoras de sulfato, las cuales transforman el ion sulfato en ácido sulfhídrico (H_2S), compuesto gaseoso soluble en concentraciones entre 3000 y 4000 mg/L, que produce malos olores, es tóxico y cuya subsecuente oxidación forma ácido sulfúrico - H_2SO_4 (Romero R., 2002). Este último compuesto, es un ácido fuerte que ataca y deteriora el concreto; este fenómeno y mecanismo de corrosión del material en estudio, fue asociado por primera vez a las tuberías de alcantarillado en el año de 1950 (Thornton, 1978).

Finalmente, en su investigación, Thornton (1978) indica que el mecanismo de corrosión del concreto por ácido sulfúrico consiste en la descomposición de los compuestos de calcio, silicato y aluminatos de la pasta de cemento; además, sugiere que para contrarrestar su efecto, será necesario garantizar una buena ventilación de las estructuras que presenten indicios de este tipo de corrosión, esto con el fin de evitar las condiciones anaerobias del entorno y por ende la acción de las bacterias reductoras.

1.1.3.2.2. Eflorescencia

La eflorescencia se refiere al transporte de componentes solubles a la superficie externa de un material poroso, como concretos, morteros, ladrillos y cerámicas, sobre la cual ocurre la evaporación del agua y la cristalización de compuestos solubles de la solución (Kurdowski, 2014). De acuerdo con Morillas et al. (2015) este fenómeno tiene lugar cuando el agua alcanza la

sobresaturación y las características termodinámicas del medio son adecuadas para la formación de un núcleo cristalino, que también puede ocurrir dentro de la estructura porosa de los materiales.

Por otro lado, los cambios mineralógicos y químicos que se originan pueden inducir cambios estructurales al promover grietas y desintegraciones, como resultado de las presiones perjudiciales ocasionadas por la cristalización de los minerales en los poros del concreto (Nehdi & Hayek, 2005); de allí que la permeabilidad del concreto cumple un rol decisivo en este fenómeno, pues de esta propiedad depende el transporte de soluciones con iones agresivos que afectan principalmente la durabilidad de las estructuras localizadas en ambientes severos (Yu et al., 2018). En concordancia con lo anterior, Tang et al. (2021) indican que, una forma posible de suprimir eficazmente la eflorescencia es potenciar la impermeabilidad de la matriz, es decir al disminuir la ruta de las sales solubles para migrar a la superficie.

Como se mencionó anteriormente, las condiciones termodinámicas son de gran importancia en el desarrollo de este fenómeno ya que en presencia de un frente de secado, por ejemplo, cuando el agua puede evaporarse de la superficie del concreto, donde la tasa de evaporación es baja, se produce la sedimentación de sales en la superficie, gracias también a los fenómenos capilares que permiten el transporte de líquido desde la parte interna del material o a través de la absorción (Nehdi & Hayek, 2005).

Resumiendo, la eflorescencia es un fenómeno químico que puede contribuir al deterioro del concreto o mortero y cuya incidencia en el deterioro está relacionado tanto con las características del cemento como del ambiente.

1.2. El agua en las mezclas de concreto

Como se mencionó anteriormente, el agua es una de las materias primas en la producción del concreto, además ésta participa en otras etapas de la fabricación del material, en las cuales su presencia es fundamental para el desarrollo de algunas propiedades del concreto; por ende, el agua se puede discriminar en: agua de mezclado y agua de curado.

Agua de mezclado: es el agua que se emplea en la producción del concreto con el fin de hidratar el cemento y activar su propiedad aglutinante, “el agua de mezclado forma aproximadamente el 15% del volumen total del concreto. De donde un 5% sirve para hidratar el cemento y el 10% lubrica el concreto siendo responsable de su manejabilidad” (Matallana Rodríguez, 2006).

Agua de curado: es el agua que se emplea para garantizar la hidratación total del cemento, permitiendo así que se desarrolle adecuadamente la resistencia del concreto. La temperatura del agua de curado afecta la pasta de cemento en términos de su porosidad y microestructura; así como en el proceso mismo de hidratación de la pasta, encontrando que a mayor temperatura se presenta una hidratación temprana del cemento, mayor porosidad y menor calor de hidratación (Escalante-Garcia & Sharp, 2004).

La escasez del recurso hídrico, problemática acrecentada por los efectos del cambio climático, la contaminación y el uso indiscriminado de los recursos naturales han propiciado el desarrollo de investigaciones que promueven el uso de aguas residuales, dentro de las cuales se encuentran las aguas residuales domésticas tratadas y sin tratar, aguas grises, aguas de lavado y aguas de lavado mezcladas con barro de la operación de una planta de producción de concreto, las aguas de lluvia, entre otras, como agua de mezcla en la producción de concreto.

Por consiguiente, en la siguiente sección se pretende presentar algunas de las investigaciones desarrolladas sobre este tema y las conclusiones a las que han llegado en cada una de ellas.

1.2.1. Aguas negras e industriales

Algunos autores han estudiado el efecto que tienen las aguas negras, así como las que contienen desechos industriales, encontrando que las primeras permiten obtener concretos con resistencias entre el 83% y 102% de la mezcla control. Para las aguas con desechos industriales, concluyen que su calidad es variable pero que tan solo aquellas provenientes de fábricas de pinturas, curtiembres y aguas ácidas, no permitieron obtener resultados satisfactorios para ser empleadas en las mezclas; el resto de las aguas ensayadas correspondientes a residuales domésticas presentaron una resistencia alrededor del 85% de la mezcla control (Cement Concrete and Aggregates Australia, 2007).

1.2.2. Aguas grises

Las aguas grises son aguas residuales domésticas provenientes de las descargas de la cocina, duchas, lavamanos, lavaderos y lavadoras; fueron estudiadas por Peche et al., (2014), quienes indican que estas aguas representan aproximadamente el 75% del agua residual producida en los hogares y son relativamente poco contaminadas.

En las muestras de agua que se emplearon en dicho estudio, encontraron sustancias químicas que se consideran perjudiciales para el concreto, tales como cloruros, grasas aceites y sulfatos, en concentraciones dentro del rango permisible indicado en diferentes códigos o normas de diseño. Los autores concluyen que, emplear este tipo de aguas reduce el tiempo de fraguado inicial y final, aunque esta reducción se encontraba dentro de los límites permisibles para este tipo de ensayo; así mismo, atribuyen que el incremento de la resistencia a la compresión en los especímenes en los cuales se emplearon aguas grises, se debe a que presentan una mayor alcalinidad (entre 100 y 104 mg/L) en comparación con el agua potable (71 mg/L) (Peché et al., 2014).

1.2.3. Aguas tratadas, clarificadas o parcialmente recicladas

Al-Jabri et al. (2011) estudiaron el efecto de las aguas residuales provenientes de tres estaciones de lavado de carros sobre el concreto de alta resistencia y concluyeron que sustancias como los cloruros, sulfatos, sólidos suspendidos, entre otros que componían el agua se encontraban dentro de los límites establecidos en la ASTM T26-79 1996 y que podía ser empleada satisfactoriamente como agua de mezcla en el concreto. Estos autores encontraron que al emplear 50% de agua potable y 50% de agua residual la resistencia a la compresión era comparable con la resistencia del espécimen construido con agua 100% potable, mientras que para las demás concentraciones, 25% y 100% de agua residual, se obtenía una ligera disminución.

La investigación realizada por Al-Mashaqbeh et al. (2016) empleó aguas grises crudas y tratadas mediante un proceso de filtración, como agua de mezcla en la producción de concreto, encontrando que el tiempo de fraguado era entre 20 y 25 minutos mayor al de la mezcla control; en cuanto a la resistencia a la compresión a la edad de 7 días resulta ser un poco mayor a la del testigo; no obstante para edades posteriores, únicamente el agua tratada presenta leves diferencias con la mezcla realizada con agua destilada.

1.3. Normatividad sobre el agua de mezcla

El agua de mezcla es un elemento fundamental en la producción de concreto, dado que incide en la manejabilidad, resistencia y durabilidad de este material, pero además porque se debe considerar que su calidad puede influir negativamente en la salud y seguridad de las personas que la manipulan (Cement Concrete and Aggregates Australia, 2007). Es por esta razón que existen normas que indican las características del agua para considerarla apropiada para la producción de concreto, estas normas indican que el agua potable es apropiada para la producción de este

material e indica las consideraciones y sustancias que se deben limitar al usar otras fuentes de agua, con el fin de garantizar que la mezcla, al finalizar el periodo de curado, cuente con las características deseadas.

Es necesario mencionar que la acidez o alcalinidad del agua es un parámetro determinante en la aceptación de su uso, este parámetro se evalúa por medio del pH, el cual varía entre un rango de valores de 0 a 14, donde 7 indica que el agua es neutra, por debajo de 7 se considera que el agua es ácida, mientras que por encima de 7 indica que es un agua alcalina; por esta razón se considera que las aguas con un pH entre 4.5 y 8.5 son aceptadas para emplearse como aguas de mezcla (VDT – Virginia Transportation Department, 2015). A grandes rasgos Carrasco (2013) indica que, si el agua no tiene ningún olor, color, sabor, no es gaseosa o genera espuma cuando se agita, no hay razón para suponer que puede ser perjudicial para el concreto. No obstante, incluso el agua potable puede considerarse como no apta para emplearse como agua de mezcla cuando tiene altas concentraciones de sodio o potasio, ya que estos compuestos pueden propiciar la reacción álcali-agregado que consiste en la expansión del material y su consecuente fisuración (Kucche et al., 2015).

A continuación, se pretende listar e indicar las normas que existen a nivel nacional e internacional referentes a la calidad del agua de mezcla.

1.3.1. IS 456

La norma IS-456 (2000), es el “Código Práctico de Concreto Simple y Reforzado” empleado en India, en él se indica que el agua empleada en la mezcla y el curado del concreto debe estar limpia y libre de cantidades dañinas de aceites, ácidos, álcalis, sales, azúcar, material orgánico entre otras sustancias que pueden deteriorar el concreto o el acero.

Esta norma indica que, aunque no se recomienda el uso de agua de mar en la producción o curado del concreto, en caso de no haber otra alternativa se permite emplear esta agua en concreto simple, indicando las posibles desventajas y precauciones que se deben considerar, incluyendo el uso de una adecuada cantidad de cemento.

Entre las sustancias que limita esta normatividad se encuentran: los sólidos orgánicos, sólidos inorgánicos, sulfatos, cloruros y sólidos suspendidos; la concentración máxima que permite de estas sustancias se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, IS-456

Sustancia	Concentración máxima (mg/L)
Sólidos orgánicos	200
Sólidos inorgánicos	1000
Sulfatos (como SO ₃)	400
Cloruros (como Cl)	2000 ¹
Sólidos Suspendidos	2000

Fuente: IS-456, 2000.

Adicionalmente, el estándar hindú indica que el agua que puede ser empleada en la elaboración de la mezcla, también puede ser usada en el proceso de curado del material siempre y cuando no contenga ninguna sustancia que manche o cause depósitos antiestéticos en la superficie del concreto.

1.3.2. AS 1379 -2007

La norma AS1379 -2007 de Australia establece los “requisitos mínimos para los materiales, plantas y equipos utilizados en el suministro de concreto; la producción y entrega de concreto en estado plástico; cómo tomar muestras y realizar ensayos para determinar si el concreto cumple con las propiedades especificadas para su estado plástico y endurecido”.

¹ Para concreto reforzado se recomienda 500 mg/L.

Según esta norma, el agua reciclada del lavado de las mezcladoras de concreto puede emplearse como agua de mezcla si se almacena de tal forma que prevenga la contaminación con materia dañina para el concreto y si su calidad es aceptable según los criterios definidos dentro de la norma con relación a concentración de sustancias perjudiciales y los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y fraguado (Cement Concrete and Aggregates Australia, 2007).

1.3.3. EN 1008-2002

La EN 1008-2002 es la especificación europea sobre el “Agua de mezcla para el concreto: especificaciones sobre muestreo, ensayo y evaluación de la idoneidad del agua, incluyendo el agua recuperada de los procesos en la industria concretera, como el agua de mezcla para el concreto”.

Según esta norma se puede efectuar una inspección preliminar a las aguas que se desean emplear en la producción del concreto. En esta inspección se evalúan: las grasas y aceites, los detergentes, el color, materia suspendida, olor, ácidos y materia orgánica. Adicionalmente, esta norma indica la concentración de sustancias químicas que se deben controlar, tal y como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, EN1008-2002

Sustancia	Concentración máxima (mg/L)
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto pretensado	500
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto pretensado	1000
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto pretensado	4500
Sulfatos (como SO ₄ ⁻²)	2000
Álcali (óxido de sodio)	1500
Sólidos suspendidos	2000
Azúcar	100
Fosfatos (como P ₂ O ₅)	100
Nitratos (como NO ₃ ⁻¹)	500
Plomo (como Pb ⁺²)	100
Zinc (como Zn ⁺²)	100

Fuente: (Bsi – British Standards, 2002)

De acuerdo con esta norma, los especímenes elaborados con el agua que se pretende emplear no deben tener un tiempo de fraguado inferior a 1 hora; de igual forma el tiempo de fraguado final no deberá exceder las 12 horas, en ninguno de los dos casos el tiempo de fraguado debe diferir más del 25% del tiempo de fraguado inicial y final obtenido de especímenes elaborados con agua destilada.

Esta norma es equivalente e idéntica a las especificaciones: BS EN 1008:2002 (Estándar Británico), DIN EN 1008:2002 (Instituto Alemán de Normalización), UNE EN 1008:2002 (Normalización Española).

1.3.4. ASTM C1602

La ASTM – C1602 es la norma estadounidense que brinda “Especificaciones sobre el agua de mezcla empleada en la producción de concreto hidráulico”, en ella se definen las fuentes de agua y la frecuencia con la que se deben realizar los muestreos para definir y monitorear la calidad individual o combinada que se desea emplear en las mezclas.

Al igual que en las demás normas presentadas, se permite el uso de agua potable en la mezcla sin necesidad de realizar ningún tipo de ensayo; mientras que, otras fuentes de agua o aquellas provenientes de los procesos de producción de este material pueden emplearse en cualquier proporción siempre y cuando cumplan las disposiciones que la norma presenta, entre las cuales se destaca: el desempeño del concreto (ver Tabla 4) y las concentraciones máximas permisibles de sustancias dañinas en el agua de mezcla (ver Tabla 5).

Tabla 4. Requerimientos del desempeño del concreto para el agua de mezcla, ASTM C1602

Parámetro	Límite
Resistencia a la compresión, porcentaje (%) min control a 7 días	90
Tiempo de fraguado, desviación de control, h mínimo	1:00 Inicial
	1:30 Final

Fuente: Tabla 1- ASTM C1602, 2005

La comparación de los valores presentes en la Tabla 4 se debe realizar entre la mezcla realizada con el agua que se desea emplear y la mezcla realizada con agua 100% potable o destilada. Además, para el ensayo de resistencia a la compresión, los resultados deben basarse en los resultados obtenidos de al menos dos especímenes realizados de una muestra compuesta testeados mediante el ensayo estandarizado.

Tabla 5. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, ASTM C1602

Sustancia	Concentración máxima (ppm)
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto pretensado	500
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto reforzado	1000
Sulfatos (como SO ₄ ⁻²)	3000
Álcali (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	600
Sólidos totales	50000

Fuente: Tabla 2 – ASTM C1602, 2005

1.3.5. IRAM 1601

La norma del Instituto Argentino de Normalización y Certificación, IRAM 1601, brinda especificaciones sobre el “Agua para morteros y hormigones de cemento”. En ella se establece la aptitud del agua para ser empleada en las mezclas dependiendo de su origen, indica por ejemplo que las aguas residuales domésticas no son aptas para emplearse en la producción de concreto, excepto que se le realice algún tratamiento previo a su uso.

La norma indica también las consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de tomar las muestras del agua que se desean evaluar. Los ensayos para la evaluación del agua se dividen en dos grandes grupos, los ensayos físicos y los químicos. En los primeros, los ensayos físicos, se debe evaluar el tiempo de fraguado del cemento y la resistencia a la compresión de la mezcla (ver Tabla 6); en cuanto a los ensayos químicos, se debe evaluar si la concentración de sustancias perjudiciales en el agua (ver Tabla 7).

Tabla 6. Requisitos físicos, IRAM 1601

Ensayo	Concentración máxima (ppm)
Tiempo de Fraguado	Inicial: mínimo 45 minutos
	Final: máximo 12 horas
	Comparación con testigo: $\pm 25\%$
Resistencia a la compresión	A 7 días, máximo 10% de reducción de la resistencia de las probetas fabricadas con el agua de prueba, en comparación con la resistencia obtenida en probetas fabricadas con agua destilada.

Fuente: Carrasco, 2013

Tabla 7. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, IRAM 1601

Sustancia	Concentración máxima (mg/L)
Residuo sólido, agua recuperada de la industria del concreto	50000
Residuo sólido, agua de otros orígenes	5000
Materia orgánica expresada en oxígeno consumido	3
pH (*mínimo)	4*
Sulfatos (como SO_4^{-2})	2000
Cloruros (como Cl^-) en concreto simple	4500
Cloruros (como Cl^-) en concreto reforzado	1000
Cloruros (como Cl^-) en concreto pretensado	500
Hierro	1
Álcali ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$)	1500

Fuente: Carrasco, 2013

1.3.6. NMX C-122

Esta norma mexicana establece los valores máximos de diferentes sustancias en el agua a emplear en la producción del concreto:

Tabla 8. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, NMX C-122

Sustancia	Concentración máxima (ppm), para cementos ricos en calcio
Sólidos en suspensión en aguas naturales	2000
Sólidos en suspensión en aguas recicladas	35000
Cloruros en concreto reforzado	1000
Sulfato como SO_4^{-2}	3500
Magnesio como Mg^{+2}	150
Carbonatos como CO_3	600
Bióxido de carbono disuelto como CO_2	3
Álcalis totales como Na^+	450
Total de impurezas en solución	4000
Grasas y aceites	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150
pH mínimo	6.5

Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2002

1.3.7. NTC 3459

En Colombia, el “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente” (NSR-10), en su Título C, “diseñado con base en el comentario homólogo del Reglamento ACI 318-08” (AIS – Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010); presenta los requisitos mínimos de diseño y construcción de elementos de concreto estructural de cualquier estructura construida según las exigencias de la NSR-10.

Según dicho reglamento, en el Título C, sección C3.4, el agua empleada en las mezclas de concreto debe cumplir con las disposiciones de la norma NTC 3459; ésta última tiene como finalidad establecer, por medio de ensayos, si un agua es apta para ser empleada en la elaboración de concreto; no obstante, los ensayos que en ella se encuentran “no proporcionan información respecto a la durabilidad del concreto a largo plazo” (NTC-3459, 2001). Entre los requisitos generales, se establece que las aguas que contengan impurezas o sustancias que produzcan olor, color o sabor en el agua no deben ser empleadas en la producción del concreto, a menos que exista información de que no perjudica la calidad del material.

Esta norma permite emplear el agua de lavado de las mezcladoras o zonas de almacenamiento de las materias primas del concreto, siempre y cuando no se encuentren contaminadas por efluentes industriales o de minas, ni con depósitos de minerales, entre otros.

En cuanto a los requisitos químicos del agua la norma NTC 3459 establece que, se debe desconfiar de las aguas que contengan impurezas orgánicas como algas de color verde o café, así como de los altos contenidos de azúcar; las aguas con estas características deben ser ensayadas antes de su uso, toda vez que pueden retardar el fraguado de la mezcla. Para las impurezas inorgánicas, la norma indica los límites permisibles de su concentración en las aguas que se desean emplear (ver Tabla 9).

Tabla 9. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, NTC3459

Sustancia	Concentración máxima (mg/L)
Concentración total de iones comunes	2000
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto pretensado	500
Cloruros (como Cl ⁻) en concreto reforzado	1000
Sulfatos (como SO ₄ ⁻²)	3000
Sulfatos (como SO ₃)	1000
	* 4% masa del cemento
Álcali (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	600
Álcali total combinado	1000
Sólidos totales	50 000

Fuente: NTC-3459, 2001

Entre los “*iones comunes*” se encuentran: el calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato y carbonato.

Con respecto a los requisitos físicos del concreto, se indica que los resultados obtenidos mediante los ensayos de la NTC 118, deben cumplir las siguientes condiciones:

- **Tiempo de fraguado:** La diferencia entre el tiempo de fraguado inicial de muestras elaboradas con agua testigo (agua destilada) y agua de ensayo (la que se desea emplear en la mezcla) no debe diferir en más de 30 minutos.
- **Resistencia a la compresión:** El promedio de la resistencia a la compresión a los 7 días, de cubos de concreto elaborados con agua de ensayo, debe ser mayor o igual al 90% de la resistencia promedio de los cubos de concreto elaborados con agua testigo evaluados a la misma edad. En relación con este parámetro, se establecen los escenarios que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 10. Concentraciones límite de sustancias en el agua de mezcla, NTC 3459

Resistencia cubos con agua de ensayo en comparación con cubos con agua testigo (%)	Observación
≥ 90	El agua de ensayo se puede emplear como agua de mezcla en la producción del concreto.
90 – 80	Modificar la proporción de la mezcla. Realizar nuevamente el ensayo para la nueva dosificación
< 80	El agua de ensayo no se puede emplear en la producción de concreto. Conseguir fuente alternativa.

Fuente: NTC-3459, 2001

De acuerdo con la información presentada anteriormente, se observa que el estándar hindú (IS 456) es el único que limita el contenido de sulfatos en términos de sulfitos (SO_3^{-2}), mientras que las demás normas establecen un valor máximo permisible en términos del anión SO_4^{-2} ; en la tabla que se presenta a continuación se registran los valores máximos permisible para este compuesto en las diferentes normatividades consultadas:

Tabla 11. Compilación de los valores máximos permisibles para los sulfatos en el agua de mezcla en diferentes normas

Norma	Concentración de sulfatos como SO_4^{-2}(mg/L)
EN 1008-2022	2,000
ASTM C1602	3,000
IRAM 1601	2,000
NMX C-122-1982	3,500
NTC 3459	3,000

Fuente: El Autor, 2022

La Tabla 11 permite concluir que hay un relativo consenso entre las normas que regulan la concentración máxima permitida para el contenido de sulfatos en el agua de mezcla de los concretos, presentándose un límite inferior de 2,000 mg/L (IRAM 1601 y EN 11008) y otro superior de 3,500 mg/L (NMX C122), dentro de los cuales, se evidencia que entre las normas consultadas, la europea y la de argentina son más restrictivas; existe una postura más flexible en la norma mexicana y un punto intermedio establecido por la normatividad estadounidense.

2. Metodología de investigación

El desarrollo de este trabajo investigativo requirió la realización de ensayos experimentales que permitieran evaluar el efecto de los sulfatos presentes en el agua de mezcla sobre algunas

propiedades físicas y mecánicas del concreto, en conformidad con lo establecido en la NTC 3459; por ende, se evaluó el tiempo de fraguado del cemento, la resistencia a la compresión de cubos de 5 cm de lado y la expansión en barras de 2.5 cm x 2.5 cm x 28.5 cm, elaborados con mortero como lo solicita la NTC 220.

En total se estudió el efecto de diecisiete (17) concentraciones de sulfato de sodio, las cuales presentaban incrementos variables de 150, 250, 500 y 5000 mg/L (ver Tabla 12) hasta alcanzar una concentración de sulfatos muy por encima del límite máximo permitido por la norma colombiana para el ion sulfato en el agua de mezcla de los concretos (3000 mg/L). La Mezcla 1, corresponde a la mezcla elaborada con agua testigo (agua destilada) con base en la cual se evaluaron y compararon los resultados obtenidos en los ensayos de las demás concentraciones.

Tabla 12. Concentraciones de sulfato evaluadas

Mezcla de concreto	Concentración de sulfatos (mg/L)
1	0
2	150
3	300
4	450
5	600
6	750
7	1,000
8	1,500
9	2,000
10	2,500
11	3,000
12	5,000
13	10,000
14	15,000
15	20,000
16	25,000
17	30,000

Fuente: El Autor, 2022

Dado que la norma que regula la calidad de agua para los concretos (NTC 3459) indica que los ensayos para su evaluación se deben realizar en probetas cúbicas de mortero, es importante señalar que este corresponde a un material aglutinante producto de la mezcla de cemento, agua y arena empleada para mantener los componentes juntos y que es menos resistente y duradero que el concreto. Además, se ha establecido que la resistencia del concreto endurecido se rige por la resistencia del mortero que rellena los huecos entre las partículas de árido grueso siempre que el volumen de árido grueso no sea excesivamente elevado y que todos los demás factores relacionados con la mezcla permanezcan constantes (Maroof & Hasan, 2016).

En relación con lo anterior, Luís et al. (2005) encontraron que la relación entre la resistencia a compresión de probetas cúbicas de concreto y probetas de mortero se puede expresar mediante una ecuación lineal, con un coeficiente de regresión de 96,38%. Además, para las mezclas ensayadas, los resultados obtenidos demostraron que: las resistencias a la compresión de probetas cúbicas de concreto son aproximadamente 3% más altas a las obtenidas en probetas de mortero, lo que demuestra que las muestras de mortero se pueden utilizar para estimar la resistencia a la compresión del concreto correspondiente.

2.1. Materiales

En este capítulo se realizará una breve descripción de los principales materiales empleados en el desarrollo de la parte experimental del presente documento.

2.1.1. Cemento

El cemento empleado para la elaboración de los cubos y barras de mortero fue Cemento Argos de “Uso General”, cuya consistencia normal se obtuvo para una cantidad de agua del 27.5% del peso de cemento seco.

2.1.2. Arena

Se empleó arena de río que pasa el tamiz número 16, en el siguiente registro fotográfico se observa el material retenido en el tamiz No. 16.



Figura 3. Arena, material retenido en tamiz No. 16

Fuente: El Autor, 2022

En las siguientes fotografías se aprecia el material empleado en las mezclas, es decir aquel que pasa el tamiz No. 16.



Figura 4. Arena empleada en las mezclas de morteros
Fuente: El Autor, 2022

2.1.3. Agua

En las mezclas se emplearon aguas sulfatadas sintéticas, elaboradas a partir de la dilución de un reactivo de sulfato de sodio en agua destilada; este reactivo se seleccionó al considerar que, de acuerdo con los hallazgos de Kılınç et al. (2005), los compuestos formados por la reacción del sulfato de sodio con el cemento hidratado favorecen la formación de ettringita después de endurecido el material, y que para este estudio a concentraciones menores presentó un efecto más nocivo que el producido por el sulfato de magnesio.

El reactivo empleado corresponde al sulfato de sodio anhidro grado analítico de la marca Merck, cuyas características se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13. Características del reactivo de sulfato de sodio anhidro

Característica	Descripción
Fórmula química	Na ₂ SO ₄
Masa Molar	142.04 g
Pureza	99%

Fuente: El Autor, 2022

El proceso llevado a cabo para la preparación de las aguas consistió en determinar mediante estequiometría, la cantidad de reactivo que sería necesario emplear para obtener la concentración deseada en 1.25 litros de solución, para posteriormente pesar dicha cantidad de reactivo y mezclarlo con el agua destilada hasta observar su completa dilución. A continuación, se presenta el registro fotográfico de la preparación de una de las diluciones.



Figura 5. Pesado del reactivo
Fuente: El Autor, 2022



Figura 6. Preparación de solución de sulfatos (agua)
Fuente: El Autor, 2022

2.2. Tiempo de fraguado

El primer ensayo que se realizó para evaluar el efecto del contenido de sulfatos en el agua de mezcla del concreto es el ensayo de tiempo de fraguado inicial. Este ensayo se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la NTC 118 (ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 1998), según la cual, se deben mezclar “650 g de cemento con el porcentaje de agua de amasado requerido para la consistencia normal, siguiendo el procedimiento descrito en la NTC 110”. La consistencia normal de la pasta de cemento, según la NTC 110, se obtiene cuando el émbolo del aparato de Vicat penetra $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ en la superficie original 30 segundos después de haber sido soltado. Por consiguiente, para encontrar dicha consistencia se realizaron varios ensayos con diferentes cantidades de agua hasta obtener los siguientes resultados:

Tabla 14. Consistencia normal

Material	Cantidad
Masa de cemento (g)	500
Agua empleada (mL)	137.5
Penetración (mm)	9
Agua Requerida (% peso cemento seco)	27.5

Fuente: El Autor, 2022

Como se puede observar la penetración de la aguja de Vicat para un contenido de agua de 137.5 mL resulta ser de 9 mm, indicando que la mezcla presenta una consistencia normal, y que para obtenerla se requerirá un 27.5% de agua medida en peso del cemento seco.

Por otra parte, el tiempo de fraguado inicial se mide 30 minutos después del moldeo, tiempo en el cual la muestra es colocada en la cámara húmeda, el ensayo consiste en medir la penetración de la aguja de Vicat de 1 mm en la pasta de cemento en intervalos de 15 minutos hasta que se obtiene una penetración de 25 mm o menos (ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 1998).

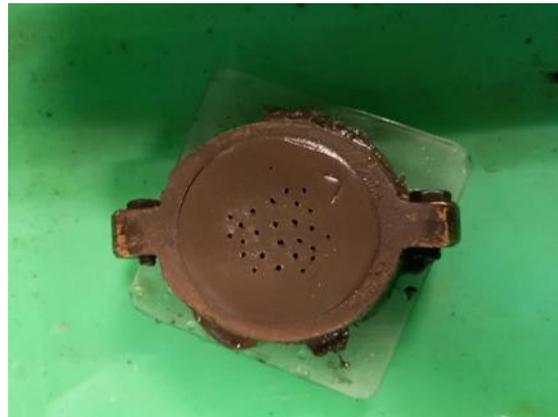


Figura 7. Ensayo tiempo de fraguado inicial

Fuente: El Autor, 2022

El tiempo de fraguado inicial se estima mediante interpolación de los valores empleando la siguiente expresión:

$$\left[\left(\frac{t_i - t_s}{p_s - p_i} \right) \times (p_s - 25) \right] + t_s \quad (7)$$

Donde,

t_i (min): Tiempo en minutos de la primera penetración inferior a 25 mm.

t_s (min): Tiempo en minutos de la última penetración superior a 25 mm.

p_i (mm): Lectura de la penetración en el tiempo t_i .

p_s (mm): Lectura de la penetración en el tiempo t_s .

2.3. Resistencia a la compresión

Este es otro de los ensayos exigidos por la NTC 3459 para determinar si el agua que se desea emplear en la mezcla de concreto es apropiada para este fin. El ensayo consiste en evaluar la resistencia a la compresión de cubos de mortero de 50mm de lado siguiendo la metodología descrita en la NTC 220, en la cual se establece que el mortero a emplear debe contener 2.75 partes de arena por una parte de cemento, medidas en proporción de masa; en cuanto a la cantidad de agua que debe ser empleada en la mezcla, indica que es aquella que permite obtener una fluidez de 110 ± 5 en 25 golpes con la mesa de flujo siguiendo la metodología de la NTC 111 (ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 1997^a). Para este último ensayo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 15. Fluidez del mortero

Material	Cantidad
Masa de cemento (g)	500
Agua empleada (mL)	325
Diámetros de la muestra	
Diámetro 1 (mm)	217
Diámetro 2 (mm)	212
Diámetro 3 (mm)	212
Diámetro 4 (mm)	216

Fuente: El Autor, 2022

La fluidez, se mide como el incremento del diámetro promedio de la muestra, expresado como un porcentaje del diámetro de la base mayor del molde según la siguiente fórmula (ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 1997^a):

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio} - A}{A} \times 100\% \quad (8)$$

Donde,

A = Diámetro real del molde (mm)

Mediante la aplicación de la anterior ecuación se obtiene una fluidez de 114.2% la cual se encuentra dentro del rango permitido para este ensayo, además la cantidad de agua requerida para la obtención de dicha fluidez corresponde al 65% del peso del cemento seco. En consecuencia, para cada una de las mezclas de mortero elaboradas se empleó una cantidad de agua igual al 65% del peso del cemento empleado en la mezcla.



Figura 8. Mezcla del mortero
Fuente: El Autor, 2022

En total se construyeron 12 cubos de mortero para cada una de las diecisiete (17) concentraciones evaluadas, para un total de 204 cubos; algunos de los cubos elaborados se muestran en el siguiente registro fotográfico:



Figura 9. Cubos de mortero
Fuente: El Autor, 2022

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó en cuatro (4) edades diferentes (7, 14, 28, 92 días), para cada una de las cuales se ensayaron tres (3) especímenes.



Figura 10. Ensayo de resistencia a la compresión
Fuente: El Autor, 2022

De igual forma, es necesario indicar que para cada una de las concentraciones evaluadas fue necesario realizar dos (2) mezclas de mortero con la dosificación que se presenta en la Tabla 16, la cual se encuentra en concordancia con las relaciones de dosificación estipuladas por la NTC 220 y los resultados del ensayo de fluidez (NTC 111).

Tabla 16. Dosificación mezcla de mortero

Material	Cantidad (g)	Relación peso cemento seco
Cemento	617.40	-
Arena	1,697.85	2.75
Agua	401.31	0.65

Fuente: El Autor, 2022

2.4. Expansión en barras

De acuerdo con la literatura, los sulfatos contenidos en el agua de mezcla contribuyen a la expansión del material, incluso una vez este ha alcanzado su estado endurecido; no obstante, este efecto ha sido muy poco estudiado por los autores consultados quienes se limitan a evaluar el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión. En consecuencia, como parte del estudio de esta propuesta de investigación, se llevó a cabo el ensayo para determinar la expansión potencial de morteros por la acción de sulfatos contenidos en su mezcla, tomando como guía lo establecido en la NTC 397.



Figura 11. Ensayo de expansión en barras de mortero
Fuente: El Autor, 2022

En total se construyeron 45 barras de concreto, garantizando que siempre hubiese dos (2) barras por cada concentración a evaluar. Según lo descrito en la norma, las dimensiones de las barras deben ser de 25 mm x 25 mm x 285 mm y la longitud inicial será la medida tomada 24 horas después de elaborada la mezcla (ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, 1997b). La longitud final para ensayo de las barras se midió nuevamente a los 7, 14, 28 y 92 días de construidas; no obstante, para algunas concentraciones se tomaron medidas a mayores edades, con el objetivo de conocer el comportamiento del efecto de los sulfatos a lo largo del tiempo.

3. Resultados y contribución

En este capítulo se darán a conocer los resultados de los ensayos llevados a cabo durante la etapa experimental del trabajo de grado, así como el correspondiente análisis de dichos resultados.

3.1. Tiempo de fraguado

Como se mencionó con anterioridad, la cantidad de agua empleada para la formación de la pasta de cemento corresponde al 27.5% del peso del cemento seco, valor para el cual se obtuvo la consistencia normal del material. Este valor se encuentra dentro del rango del 23% al 33%. Para el cual, según Matallana Rodríguez (2006), usualmente se obtiene la consistencia normal del cemento hidráulico.

Durante la ejecución de este ensayo, se observó que para todas las mezclas el endurecimiento empezó a evidenciarse entre 1 y 2 horas después de que el agua entró en contacto con el cemento; además, fue posible identificar que la pasta elaborada con agua testigo, concentración de 0 mg/L de sulfatos, fue la que tardó más tiempo en presentar un endurecimiento medible mediante la penetración de la aguja de Vicat; lo anterior concuerda con los hallazgos de Li et al. (2021) quienes indican que la incorporación de sulfato de sodio tuvo un efecto acelerante en la hidratación de las pastas de cemento a las cuales se les había añadido previamente una semilla silicato de calcio hidratado y policarboxilato (C-S-Hs-PCE), el cual se atribuye a la reacción química entre el hidróxido de calcio (CH) y el sulfato de sodio, cuyas reacciones consecuentes forman cristales de ettringita rápidamente ocasionando que el fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento se acelere. A continuación, se presentan los resultados de los tiempos de fraguado inicial para las diferentes concentraciones evaluadas:

Tabla 17. Resultados ensayo tiempo de fraguado inicial

No.	Concentración de sulfatos (mg/L)	Tiempo de Fraguado inicial (min)
1	0	172.79
2	150	151.36
3	300	167.27
4	450	145.66
5	600	175.33
6	750	144.39
7	1,000	164.21
8	1,500	165.88
9	2,000	160.58
10	2,500	159.14
11	3,000	158.27
12	5,000	158.07
13	10,000	164.00

No.	Concentración de sulfatos (mg/L)	Tiempo de Fraguado inicial (min)
14	15,000	142.63
15	20,000	145.83
16	25,000	138.85
17	30,000	118.96

Fuente: El Autor, 2022

En cuanto a los resultados del ensayo, se observa que no es posible establecer una relación entre la concentración de sulfatos y el tiempo del fraguado inicial. No obstante, es posible indicar que, a excepción de la pasta elaborada con el agua de 600 mg/L de concentración de sulfatos, todas las mezclas se encontraron por debajo del tiempo de fraguado de la mezcla testigo, lo que permite inferir que los sulfatos contribuyen a que la pasta de cemento pierda rápidamente su plasticidad, lo que desfavorece su posibilidad de aplicación en obras masivas o donde el concreto deba ser transportado durante largos periodos de tiempo. En la figura 12, se presentan los resultados de los tiempos de fraguado para las diferentes concentraciones evaluadas, indicando los límites de tiempo, superior e inferior, para los cuales la NTC 3459 considera que el agua es apta para emplearse en las mezclas de concreto:

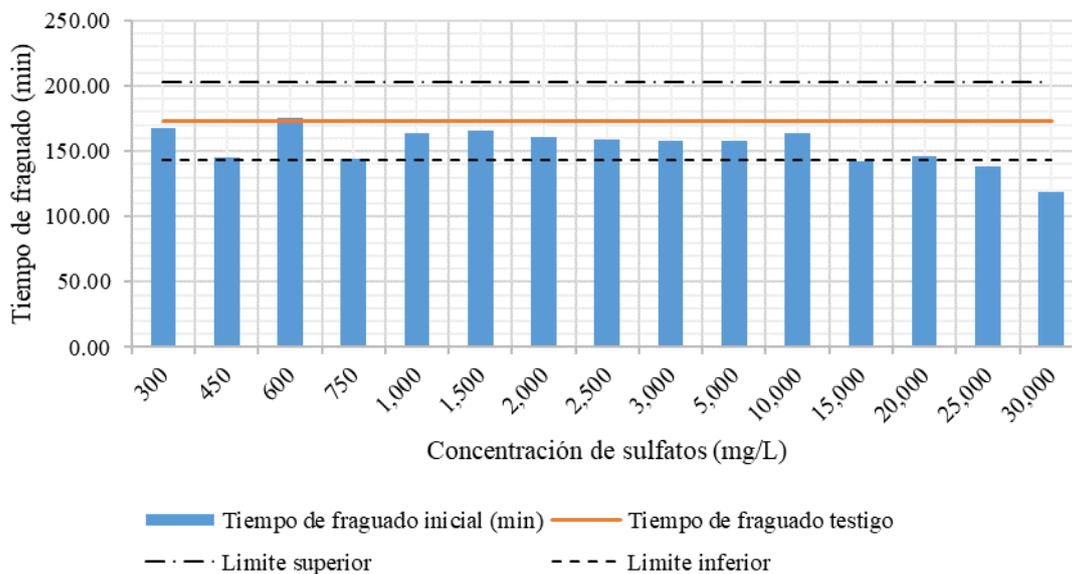


Figura 12. Resultados Ensayo Tiempo de Fraguado Inicial

Fuente: El Autor, 2022

De igual forma, en relación con las exigencias de la NTC 3459, se encuentra que aquellas aguas en las cuales la concentración de sulfatos superaba los 15,000 mg/L, a excepción del agua de 20,000 mg/L, el tiempo de fraguado inicial difieren en más de 30 minutos del tiempo de la pasta testigo, lo que implica que no es posible emplear aguas con concentraciones iguales o superiores a ese valor para la elaboración del concreto estructural.

3.2. Resistencia a la compresión

En la siguiente tabla se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a diferentes edades para cada una de las concentraciones de sulfato evaluadas:

Tabla 18. Resultados ensayo de resistencia a la compresión

No.	Concentración de sulfatos (mg/L)	Tiempo del ensayo (días)			
		7	14	28	92
		Resistencia (Mpa)			
1	0	14.60	18.30	20.40	28.70
2	150	15.20	18.60	18.30	27.60
3	300	15.50	18.40	22.70	24.90
4	450	15.50	19.60	22.40	25.40
5	600	15.70	18.40	19.90	22.30
6	750	15.00	18.90	19.80	25.10
7	1000	15.80	19.60	22.00	25.60
8	1500	15.10	19.00	21.50	25.00
9	2000	15.50	19.30	21.80	26.40
10	2500	16.40	17.70	21.50	25.20
11	3000	17.20	20.30	21.90	25.80
12	5000	15.10	22.30	22.60	24.90
13	10000	18.20	21.30	23.70	22.90
14	15000	18.30	19.40	22.80	21.80
15	20000	17.20	20.60	21.90	27.00
16	25000	18.80	20.60	24.10	25.90
17	30000	17.30	18.50	23.10	25.00

Fuente: El Autor, 2022

Es posible apreciar que por lo general las mezclas de mortero incrementaron su resistencia a lo largo del tiempo; sin embargo, se presenta un comportamiento atípico para las mezclas elaboradas con las aguas de concentraciones de sulfatos de 150, 10.000 y 15.000 mg/L, para las cuales hay una disminución de la misma, en el caso de la concentración de 150 mg/L se presentó una pérdida de resistencia para la edad de 28 días la cual se recuperó a la edad de 92 días dando como resultado que para esta última edad el valor de resistencia fuera muy cercano al obtenido mediante la mezcla testigo; en cambio para las concentraciones de 10,000 mg/L y 15,000 mg/L la reducción de resistencia ocurrió a los 92 días.

Así mismo, al comparar la resistencia obtenida por cada una de las mezclas y en cada una de las edades con el valor de resistencia de la mezcla testigo, se evidencia que por lo general, para las edades de 7, 14 y 28 días, la mayoría de los morteros preparados con las aguas sulfatadas presentaron valores de resistencia mayores; para la edad de 7 días, este incremento fue hasta de un 29% (concentración 25,000 mg/L) superior al del testigo; sin embargo, es necesario resaltar

que con el paso del tiempo este incremento disminuyó, de tal forma que, para las edades de 14 y 28 días, a pesar de que hay concentraciones con mayores resistencias al valor obtenido para la mezcla testigo, estos no superaron un incremento del 22%. De igual forma, para estas edades (7,14 y 28 días) y en aquellos casos en que se presentaron valores de resistencia inferiores al de la mezcla testigo, estos no se encontraron por debajo del 90% de dicho valor, lo que, de acuerdo con la NTC 3459 que emplea como parámetro de referencia la resistencia a la compresión de cubos de mortero a los 7 días, hace que las aguas ensayadas sean aptas para la producción de concreto.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días para cada una de las concentraciones evaluadas, comparando los resultados con los de la mezcla testigo en las mismas edades:

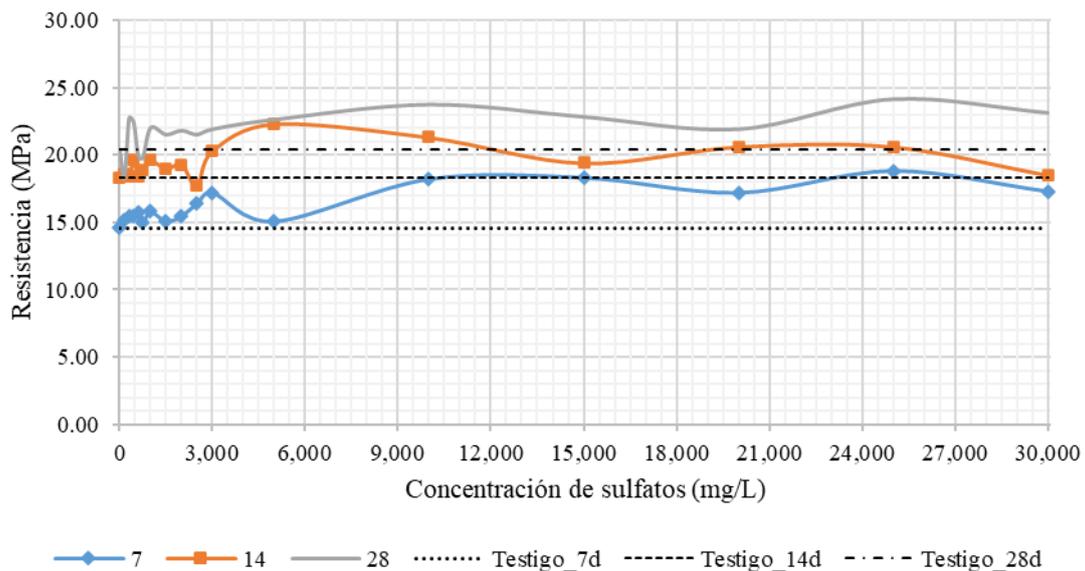


Figura 13. Resultados resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días
Fuente: El Autor, 2022

Al evaluar la resistencia a una edad de 92 días, se encuentra que ninguna de las mezclas presento resistencias mayores a las de la mezcla testigo y en su mayoría fueron inferiores al 90% del valor del testigo para la misma edad, lo anterior permite inferir que el efecto de los sulfatos sobre el material no es inmediato, sino que como se mencionó anteriormente se desarrolla a lo largo del tiempo, adicionalmente se infiere que en el caso de las aguas sulfatadas la calificación de que el agua sea apta o no para la elaboración de las mezclas no puede estar determinada únicamente por el valor de resistencia a edades tempranas como lo sugiere la norma. A continuación, se presentan

los resultados obtenidos para la resistencia a la compresión a los 92 días para cada una de las concentraciones evaluadas, comparando los resultados con los de la mezcla testigo:

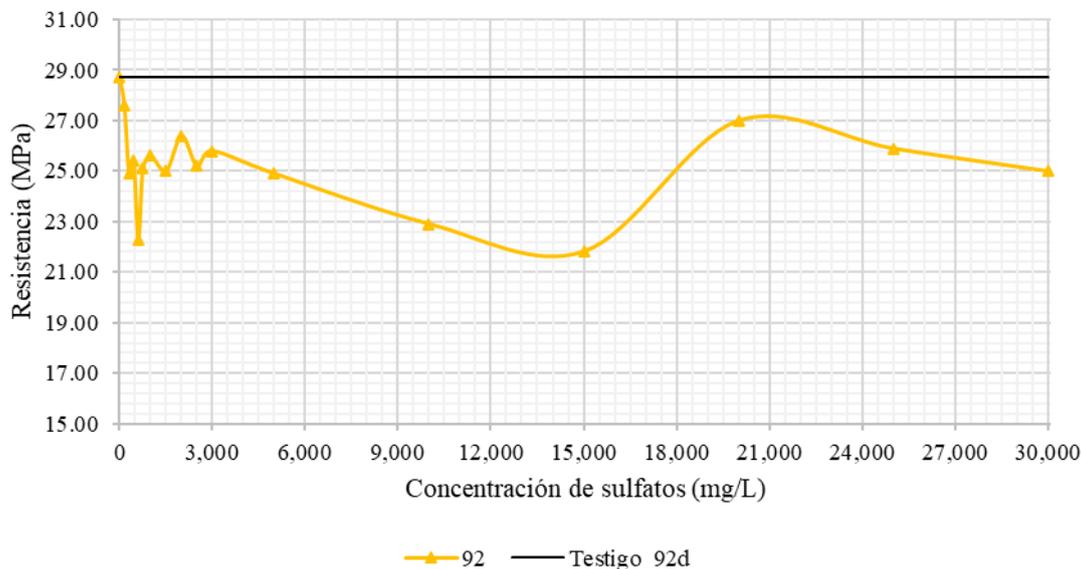


Figura 14. Resultados resistencia a la compresión a los 92 días
Fuente: El Autor, 2022

Dada la variabilidad de los resultados obtenidos en el ensayo, no es posible establecer una relación directa entre el contenido de sulfatos del agua de mezcla y sus efectos sobre la resistencia del material como si lo han plasmado otros autores en sus trabajos; no obstante, es notoria la afectación de este compuesto sobre el material ya que a pesar de que se evidenció un incremento de la resistencia en las primeras edades, se observó que con el paso del tiempo esta propiedad se vio afectada, circunstancia que se reflejó en los resultados obtenidos a los 92 días.

En concordancia con el análisis anterior, se procede a evaluar la tasa de ganancia de resistencia, para ello se dividen las concentraciones estudiadas en tres (3) grandes grupos, en el primero se encontrarán las concentraciones de 150 mg/L a 1,000 mg/L, en el segundo las de 1,500 mg/L a 10,000 mg/L y el tercero las de 15,000 mg/L a 30,000 mg/L; cada uno de estos grupos se compararán con los resultados obtenidos para la mezcla testigo.

En el primer grupo de concentraciones estudiado se evidencia que el crecimiento inicial de la resistencia es muy similar los primeros 7 días para todas las mezclas; no obstante y a pesar de que la concentración de 150 mg/L presenta resistencias iniciales inferiores a las de la mezcla testigo, su tendencia de crecimiento posterior a los 28 días es muy similar a esta última (ambas rectas son casi paralelas). En cuanto a las demás concentraciones se observa que la tendencia de ganancia

de resistencia se presenta a tasas menores que la tasa de crecimiento de la de la mezcla que no contiene sulfatos (0 mg/L).

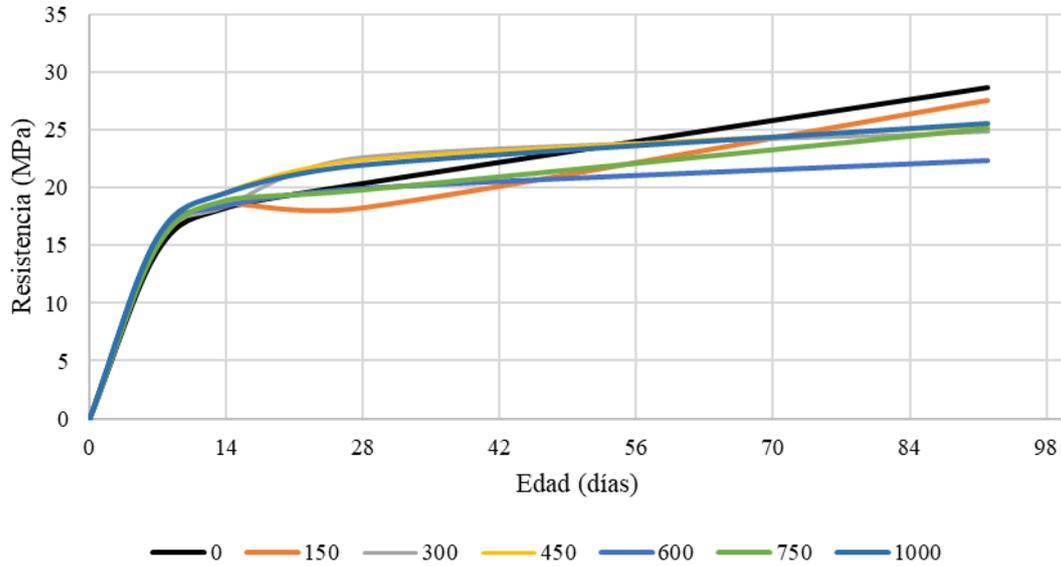


Figura 15. Desarrollo de la resistencia para concentraciones entre 0 - 1,000 mg/L
Fuente: El Autor, 2022

En el segundo grupo se observa un comportamiento muy similar al del grupo anterior no obstante, la ganancia de resistencia inicial resulta desarrollarse mucho más rápido que para las concentraciones inferiores a los 1,000 mg/L (la pendiente es mayor), sin embargo posterior a la edad de 14 días, los especímenes ganan muy poca resistencia de tal forma que para la concentración de 10,000 mg/L la pendiente de la curva resulta ser negativa, lo que significa que en vez de ganar resistencia para dicha concentración hay una pérdida de la misma y para edades superiores a los 28 días.

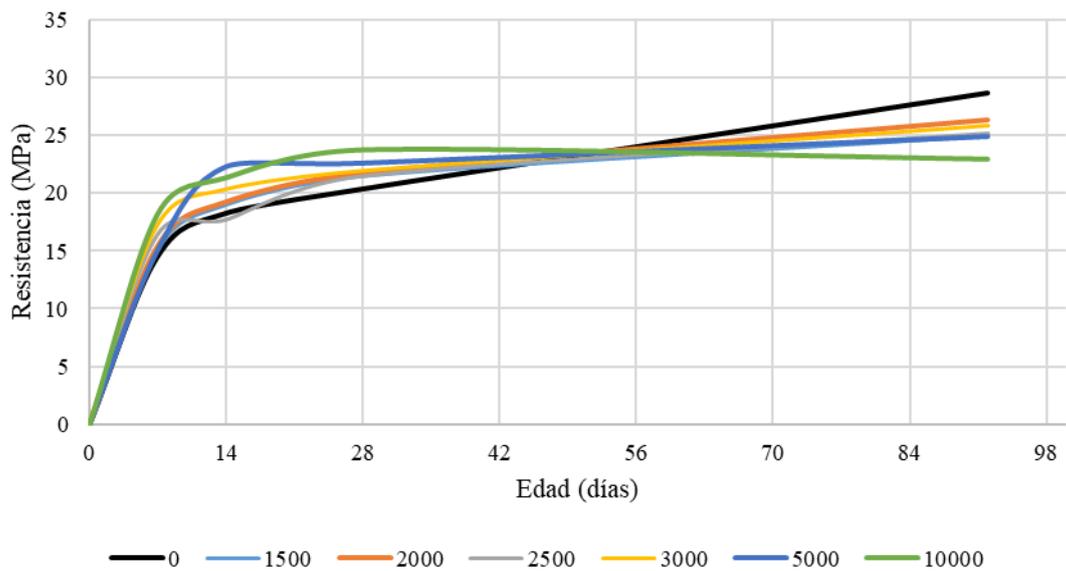


Figura 16. Desarrollo de la resistencia para concentraciones entre 1,500 - 10,000 mg/L
Fuente: El Autor, 2022

El comportamiento de las concentraciones evaluadas en el tercer grupo, se diferencia del grupo anterior en que el crecimiento inicial de la resistencia es mucho más rápido, además para la mayoría de las concentraciones de este grupo se presentó una disminución de resistencia a los 14 días que fue recuperada en edades posteriores. Finalmente, se aprecia que la ganancia de resistencia posterior a esta edad es positiva y sus valores de resistencia se acercan más a los valores obtenidos para el testigo, a pesar de que continúan siendo inferiores a este.

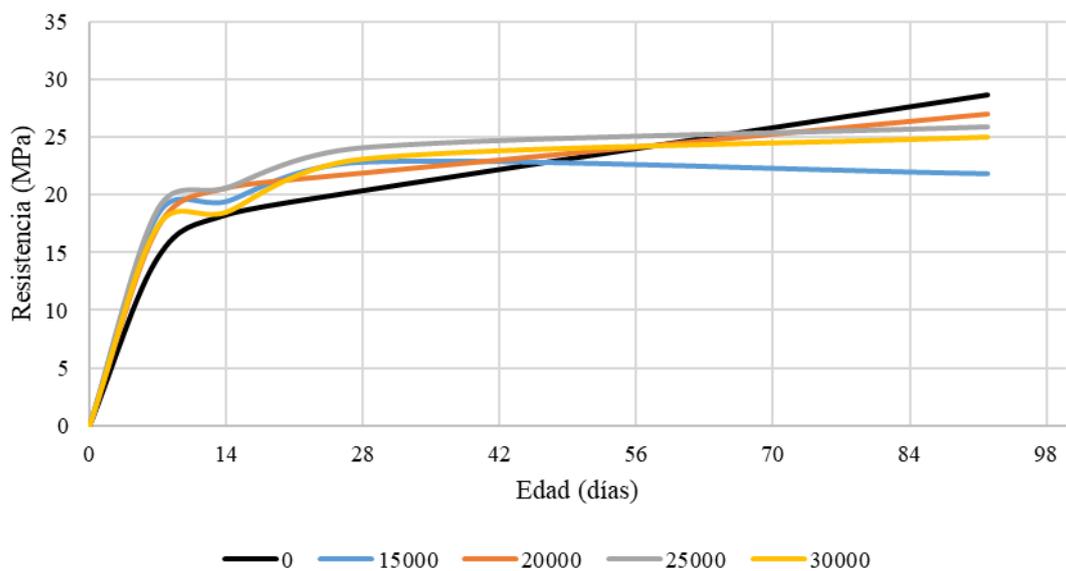


Figura 17. Desarrollo de la resistencia para concentraciones entre 15,000 - 30,000 mg/L
Fuente: El Autor, 2022

Con el objetivo de estudiar en mayor detalle el proceso de desarrollo de la resistencia de cada una de las mezclas elaboradas, y empleando como referencia los valores de desarrollo de resistencia presentados para el concreto en la Tabla 19, se realizó para cada una de las mezclas estudiadas la relación entre el valor de resistencia en cada edad y el valor de resistencia obtenido a los 28 días, esta última corresponde a la edad para la cual en teoría se ha desarrollado el 100% de la resistencia y que se adopta como el valor máximo que puede alcanzar el material. Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 19. Desarrollo porcentual de la resistencia para cada mezcla, con base al valor obtenido a los 28 días.

Concentración de sulfatos (mg/L)	Tiempo del ensayo (días)			
	7	14	28	92
0	72%	90%	100%	141%
150	83%	102%	100%	151%
300	68%	81%	100%	110%
450	69%	88%	100%	113%
600	79%	92%	100%	112%
750	76%	95%	100%	127%
1000	72%	89%	100%	116%
1500	70%	88%	100%	116%
2000	71%	89%	100%	121%
2500	76%	82%	100%	117%
3000	79%	93%	100%	118%
5000	67%	99%	100%	110%
10000	77%	90%	100%	97%
15000	80%	85%	100%	96%
20000	79%	94%	100%	123%
25000	78%	85%	100%	107%
30000	75%	80%	100%	108%

Fuente: El Autor, 2022

En la siguiente figura se presentan los resultados obtenidos la edad de 7 días, de acuerdo con la literatura para esta edad la resistencia del concreto, con respecto a su resistencia a los 28 días, suele encontrarse dentro de un valor del 70%, de acuerdo con los valores obtenidos y salvo por algunas excepciones, la adición de sulfato de sodio al agua de mezcla favorece o contribuye a que a edades tempranas la resistencia se desarrolle más rápidamente lo cual es un reflejo directo y concordante con los resultados obtenidos en el ensayo de fraguado. A continuación, se realiza una representación gráfica del desarrollo de la resistencia para cada una de las concentraciones evaluadas a la edad de 7 días:

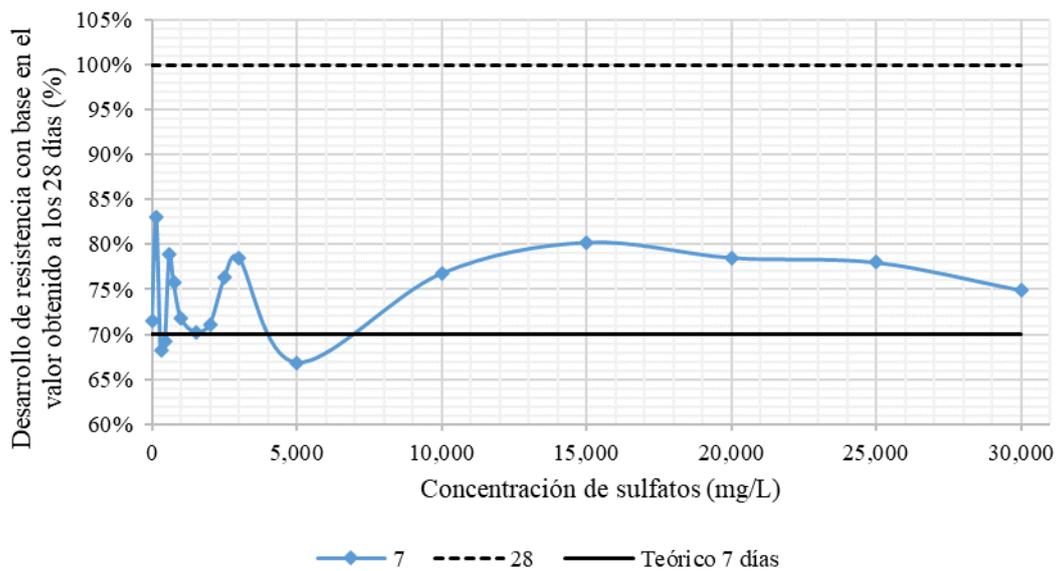


Figura 18. Desarrollo porcentual de la resistencia a la edad de 7 días
 Fuente: El Autor, 2022

A los 14 días, se encontró que se había desarrollado más del 80% de la resistencia del material e inclusive hasta el 100% de la resistencia que se presentaría a los 28 días, como es el caso de mezclas de 150 y 5,000 mg/L de sulfatos. No obstante, para la mayoría de las concentraciones inferiores a los 1,500 mg/L o superiores a los 15,000 mg/L las mezclas no desarrollaron el valor de resistencia teórico esperado correspondiente al 90% de la resistencia obtenida a los 28 días, motivo por el cual sus resultados se encuentran por debajo de la línea negra (Teórico 14 días) en la Figura 19.

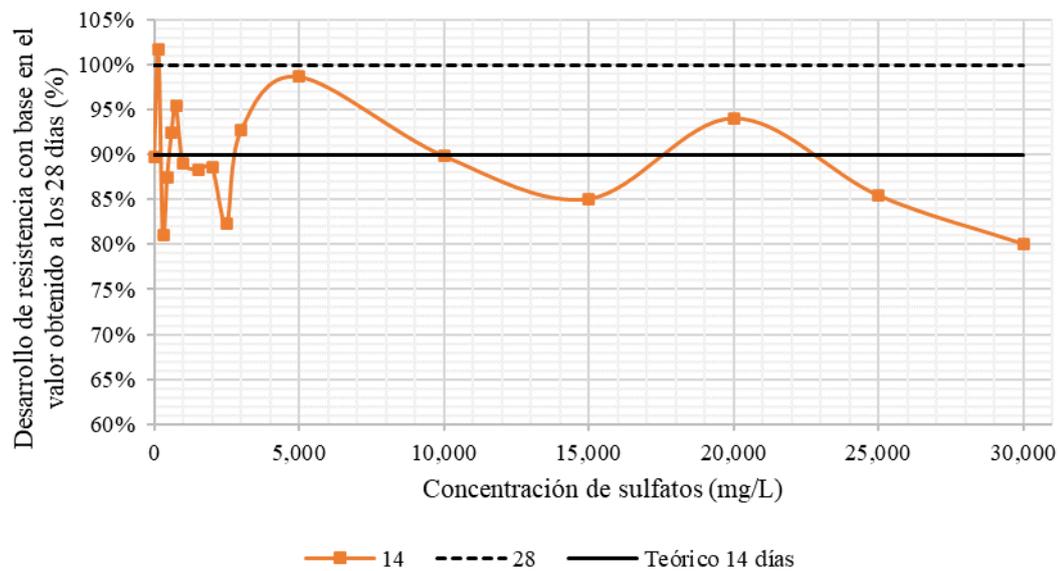


Figura 19. Desarrollo porcentual de la resistencia a la edad de 14 días
Fuente: El Autor, 2022

Para la resistencia presentada a los 92 días, en cada una de las mezclas y en comparación con el valor obtenido a los 28 días, se evidencia que tan solo las mezclas de 10,000 y 15,000 mg/L presentaron un valor inferior a la resistencia presentada a los 28 días. Para este caso, la mayoría de las mezclas elaboradas presentaron una resistencia inferior al valor teórico esperado, lo que concuerda con los análisis realizados con anterioridad y en los cuales se mencionó que la tendencia de ganancia de resistencia se presenta a tasas menores que la tasa de crecimiento de la de la mezcla testigo.

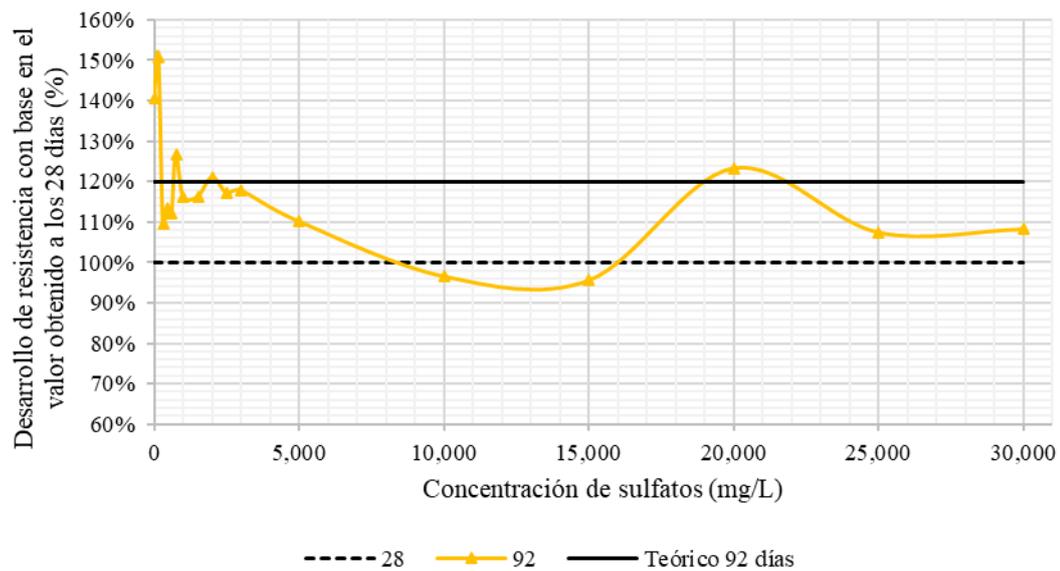


Figura 20. Desarrollo porcentual de la resistencia a la edad de 92 días
Fuente: El Autor, 2022

Para la edad de 92 días la mezcla testigo presentó un incremento hasta del 40% de la resistencia presentada a los 28 días; sin embargo, las demás mezclas presentaron valores de incremento promedio inferiores al 13%, así mismo, se observa que el valor del incremento se reducía a medida que incrementaba la cantidad de sulfatos y se asemejaba cada vez más al valor de resistencia presentado a los 28 días.

Por lo general y salvo algunas excepciones, se evidencia un efecto negativo en el desarrollo de la resistencia a medida que se incrementan la concentración de sulfatos; además es importante resaltar que este proceso se encuentra directamente relacionada con el agua empleada en su elaboración, ya que depende directamente de la hidratación del cemento.

Hallazgos similares fueron encontrados por Yu et al. (2018), quienes evaluaron el comportamiento del mortero ante diferentes condiciones de exposición frente al ataque de sulfatos, encontrando que los especímenes sumergidos en una solución de sulfato de sodio (NaSO_4) al 5% fueron los que presentaron un mayor deterioro de su resistencia, a pesar de que a edades tempranas observaron que se obtenían valores de resistencia superiores a los de los especímenes sumergidos en agua potable, alcanzando un valor máximo a los 120 días y posteriormente presentando una abrupta disminución de dicho valor en edades posteriores; lo anterior, lo atribuyeron a que los productos de reacción primarios (el yeso y la ettringita) llenaron los poros y compactaron la microestructura, lo que resultó en un incremento de la resistencia a la compresión; pero luego, excedieron la capacidad de poros ocasionando una tensión expansiva que al superar la resistencia a la tracción del mortero, produjo el desarrollo de microfisuras, que junto

con el debilitamiento de la cohesión del material producto de la lixiviación y el consumo de los productos de hidratación, ocasionaron el deterioro de la resistencia.

En consecuencia y considerando lo expuesto en la sección *1.1.3.2.1 Efecto de los sulfatos*, se puede suponer que un proceso similar ocurre cuando los sulfatos se presentan dentro del agua de mezcla; sin embargo, al afectar directamente el proceso de hidratación del cemento, sus efectos sobre el material son perceptibles a edades anteriores a los 120 días.

3.3. Expansión en barras

Durante el desarrollo de esta investigación, se construyeron y midieron un total de 45 barras; no obstante, dentro del análisis que se presenta a continuación, se descartan las barras elaboradas para la concentración de 450mg/L, dada la variabilidad de los resultados. Para las demás mezclas, los resultados que se presentan a continuación:

Tabla 20. Resultados ensayo de expansión

Concentración de sulfatos (mg/L)	Espécimen			
	7	14	28	92
0	0.008%	0.011%	0.009%	0.008%
150	0.011%	0.015%	0.008%	0.008%
300	0.010%	0.005%	0.006%	0.001%
600	0.011%	0.013%	0.008%	0.014%
750	0.015%	0.015%	0.009%	0.015%
1,000	0.013%	0.011%	0.011%	0.012%
1,500	0.015%	0.012%	0.013%	0.014%
2,000	0.015%	0.011%	0.015%	0.014%
2,500	0.017%	0.014%	0.011%	0.012%
3,000	0.006%	0.009%	0.010%	0.006%
5,000	0.007%	0.013%	0.016%	0.013%
10,000	0.013%	0.014%	0.015%	0.015%
15,000	0.015%	0.013%	0.015%	0.014%
20,000	0.014%	0.018%	0.011%	0.015%
25,000	0.015%	0.019%	0.013%	0.017%
30,000	0.021%	0.020%	0.017%	0.018%

Fuente: El Autor, 2022

Los valores de expansión se encontraron entre el 0.001% y 0.021% los cuales se presentaron para las concentraciones de 300 mg/L a la edad de 92 días y 30, 000mg/L a la edad de 92 días, respectivamente. Los resultados presentados para este ensayo se muestran a continuación:

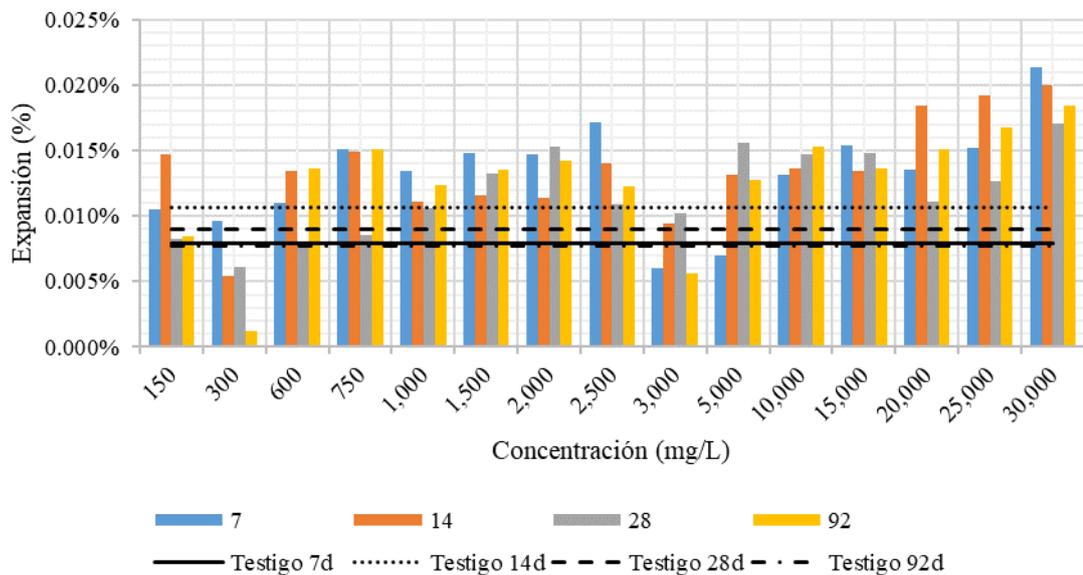


Figura 21. Resultados ensayo de expansión

Fuente: El Autor, 2022

Como se observa en la figura anterior, la mezcla testigo presentó una expansión importante a la edad de 14 días la cual fue un 35% mayor al valor presentado a los 7 días; sin embargo, con el paso del tiempo hubo una contracción del material hasta que el valor de expansión obtenido a la edad de 92 días fue un 2% inferior al del valor reportado a los 7 días.

En relación con lo anterior es posible indicar que los resultados de este ensayo permiten evidenciar que el material sufre un proceso de expansión y contracción a largo del tiempo, no obstante, la mezcla elaborada con una solución de concentración de 10,000 mg/L de sulfatos fue la única que presentó un incremento paulatino de la expansión con el paso del tiempo.

Al evaluar la expansión presentada a los 7 días (véase la Figura 22), se observa que las mezclas entre los rangos de concentración de 300 mg/L a 2,500 mg/L y 20,000 mg/L a 30,000 mg/L y salvo algunas excepciones, presentaron un incremento progresivo de la expansión a medida que incrementa la concentración de sulfatos; además se identifica que a excepción de las mezclas elaboradas con aguas de concentraciones de 3,000 mg/L y 5,000 mg/L presentaron una expansión entre un 22% (300 mg/L) y 171% (30,000 mg/L) mayor a la de la mezcla testigo.

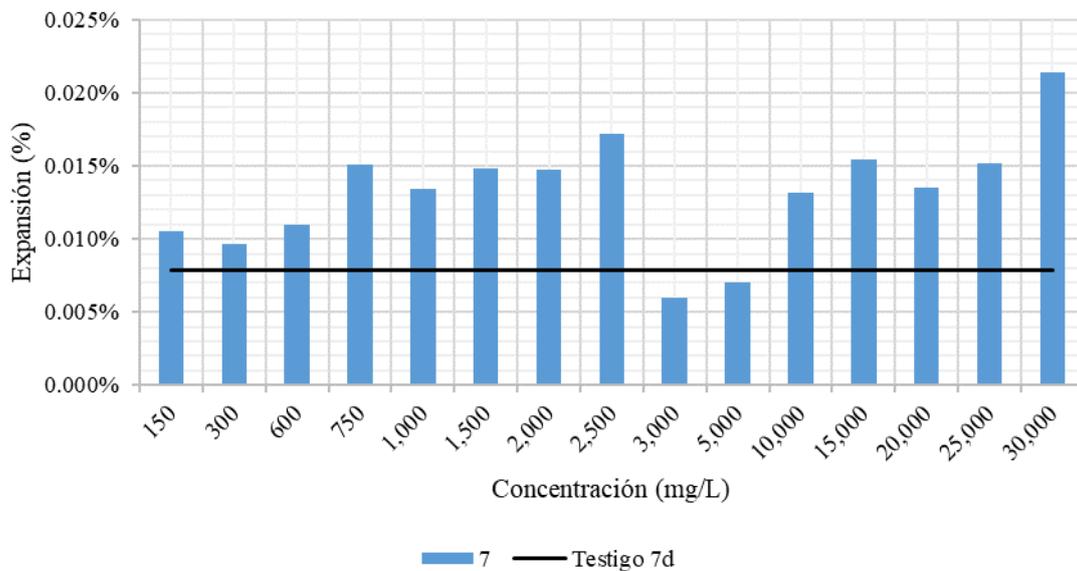


Figura 22. Resultados ensayo de expansión a los 7 días
 Fuente: El Autor, 2022

En relación con la expansión presentada a los 14 días (véase la Figura 23), se encuentra que en comparación con el caso anterior y por lo general las mezclas presentaron una contracción o un valor de expansión inferior al presentado en los 7 primeros días, para esta edad las mezclas presentaron una expansión entre un 4% (1,000 mg/L) y 90% (30,000 mg/L) mayor a la de la mezcla testigo; además para mezclas con concentraciones inferiores a los 3,000 mg/L no es clara la relación entre la expansión y la concentración de sulfatos que si se observa para concentraciones mayores a dicho valor.

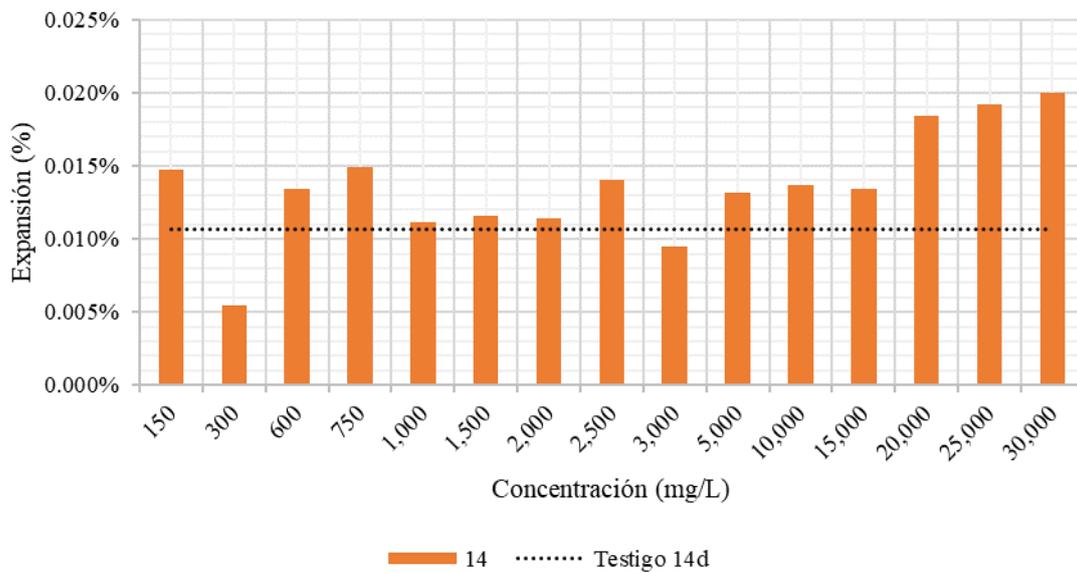


Figura 23. Resultados ensayo de expansión a los 14 días
Fuente: El Autor, 2022

A los 28 días (véase la Figura 24), se presenta un comportamiento muy similar al de los 14 días, encontrando que las mezclas presentaron una expansión entre un 14% (3,000 mg/L) y 90% (30,000 mg/L) mayor a la de la mezcla testigo; no obstante, para esta edad se observa que las mezclas con concentraciones inferiores 1,000 mg/L la expansión fue hasta de un 31% un inferior a la del testigo; así mismo y a diferencia del caso anterior, se observa que entre las concentraciones de 300 mg/L a 2,000 mg/L hay un incremento progresivo de la expansión de los especímenes a medida que incrementa la concentración de sulfatos que no es evidente para mezclas con concentraciones superiores del compuesto.

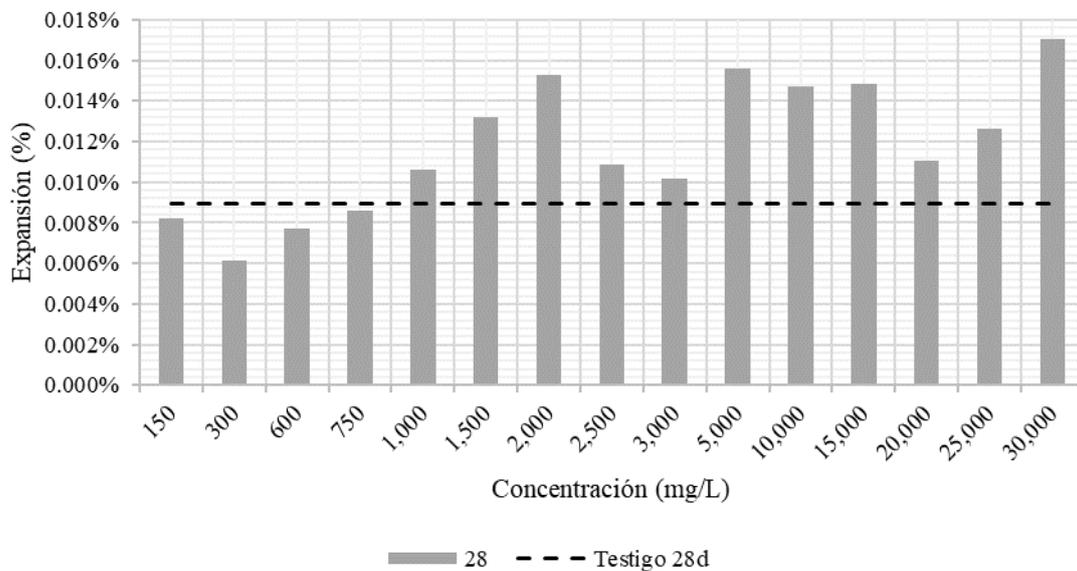


Figura 24. Resultados ensayo de expansión a los 28 días
Fuente: El Autor, 2022

Finalmente, a los 92 días (véase la Figura 25) se observa que, con excepción de las mezclas de 300 mg/L y 3,000 mg/L, todas las demás presentaron valores de expansión entre un 9% (150 mg/L) y 139% (30,000 mg/L) superiores a los de la mezcla testigo, pero con un incremento máximo inferior al presentado a los 7 días; de igual forma se observa que hay una relación entre la concentración de sulfatos en el agua de mezcla y el valor de la expansión presentado entre las concentraciones de 5,000 mg/L y 30,000 mg/L.

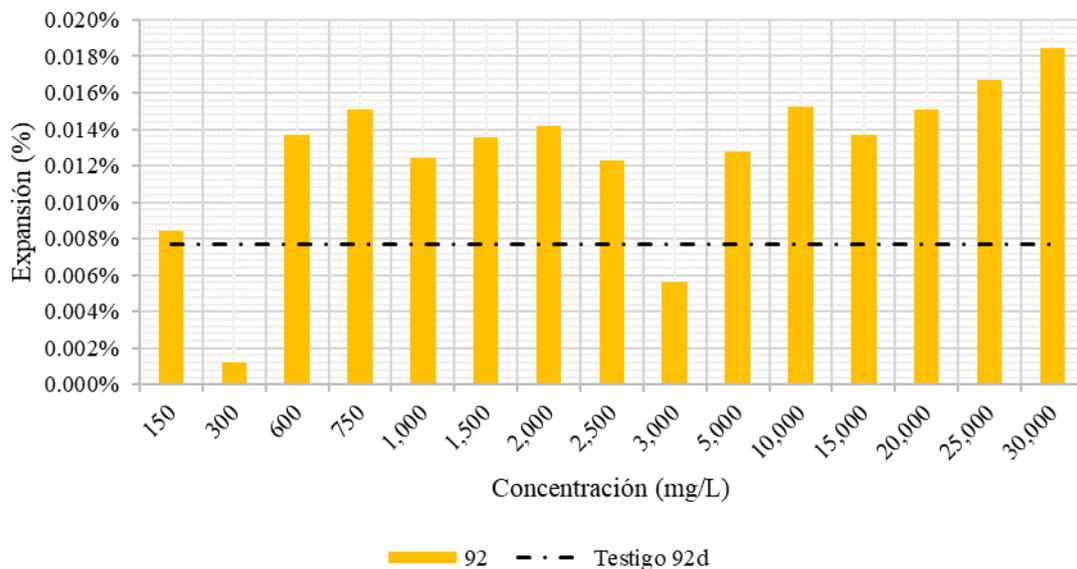


Figura 25. Resultados ensayo de expansión a los 92 días
Fuente: El Autor, 2022

Dado que los efectos del sulfato de sodio se encuentran asociados a la formación tardía de ettringita, patología cuyos efectos deben medirse principalmente a partir de los cambios en la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad (Noël et al., 2018), así como considerando condiciones restrictivas en los especímenes (Kawabata et al., 2021), se recomienda que el estudio de las expansiones producidas por los sulfatos sean evaluadas en estructuras a escala que representen elementos y condiciones de servicio más acordes con la realidad.

3.4. Efecto de los sulfatos evidenciados en los especímenes

Los efectos de los sulfatos presentes en el agua de mezcla empiezan a ser visualmente notorios a partir de la concentración de 10,000 mg/L, dado que, en los elementos construidos, se observa mayor porosidad (véase la Figura 26. , desprendimiento de material (véase la Figura 27. y eflorescencia (véase la Figura 28.), se considera que este último fenómeno se encuentra directamente asociado con la exudación, evento en el cual parte del agua de la mezcla se eleva a la superficie expuesta del material durante el proceso de fraguado y endurecimiento de la mezcla.



Figura 26. Porosidad en los especímenes. Concentración 10,000 mg/L (derecha) y 15,000 mg/L (izquierda)
Fuente: El Autor, 2022



Figura 27. Desprendimiento de material. Concentración 10,000 mg/L (izquierda) y 20,000 mg/L (derecha)
Fuente: El Autor, 2022



Figura 28. Eflorescencia. Concentración 20,000 mg/L (derecha) y 30,000 mg/L (izquierda)
Fuente: El Autor, 2022

4. Conclusiones y recomendaciones

Del ensayo de fraguado y de acuerdo con lo especificado en la NTC 3459, se concluye que las aguas con concentraciones de sulfato de sodio iguales o superiores a los 15,000 mg/L no son aptas para la producción de concreto dado que el endurecimiento del material ocurrió más de treinta minutos antes que el de la mezcla testigo, lo que implicaría una pérdida en la manejabilidad del material y afectando sus aplicaciones en obra como resultado de su rápido endurecimiento.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se encuentra que a edades previas a los 28 días el valor de resistencia para las mezclas elaboradas con aguas sulfatadas suele ser significativamente mayor al de la mezcla testigo; no obstante, para la edad de 92 días se presenta una influencia negativa de los sulfatos sobre la evolución de la resistencia del material.

Los especímenes presentaron un proceso oscilatorio entre la expansión y contracción del material a lo largo del tiempo que contribuyó con su deterioro y afectó los resultados del ensayo de resistencia; lo anterior se atribuye a que las mayores expansiones se presentaron para las edades de los 7 y 92 días, en el primer caso y como lo expresaron otros autores dicha expansión puede contribuir al llenado de los poros y es lo que ocasiona que para esta edad se presenten mayores resistencias; mientras que en el segundo caso, las expansiones presentadas y contracciones anteriores (presentadas a las edades de 14 y 28 días) estarían produciendo microfisuras internas en los especímenes que debilitan la cohesión del material y en consecuencia la resistencia a la compresión resulta ser menor a la del testigo.

Los efectos de los sulfatos presentes en el agua de mezcla empiezan a ser visualmente notorios a partir de la concentración de 10,000 mg/L, para la cual se empieza a evidenciar mayor porosidad, desprendimiento de material y el fenómeno de eflorescencia en los elementos construidos. Sin embargo, el efecto nocivo comienza con concentraciones sensiblemente menores, aunque éste no sea visible.

Dada la variabilidad de los resultados presentados en los ensayos realizados, no es posible sugerir una concentración de sulfatos que se considere apropiada para la elaboración de concretos. De igual forma, se recomienda realizar una mayor cantidad de especímenes con el fin de obtener datos más representativos del efecto de los sulfatos sobre el material, así como evaluar otros tipos de cemento dado que actualmente la industria del cemento ha incluido una gran variedad de adiciones cuyo comportamiento en presencia de aguas con sulfatos no ha sido estudiado; además,

se sugiere elaborar una única mezcla para la construcción de los especímenes de mortero y que las investigaciones a desarrollar se concentren en estudiar los efectos de las reacciones expansivas producidas por los sulfatos y su relación con los esfuerzos de tensión internos a los que se somete el material.

Se recomienda que para determinar si un agua es apta para la elaboración del concreto a partir del ensayo de resistencia a la compresión, las normas soliciten que se realice el ensayo en edades posteriores a los 28 días, ya que, por lo general, sin importar la concentración de sulfatos evaluada, se encontró que a la edad de 92 días la resistencia a la compresión era inferior al 90% de la resistencia de la mezcla testigo para la misma edad. Además, se sugiere que para la evaluación de la calidad del agua de mezcla las normas deberían exigir la realización del ensayo de expansión, ya que como se mencionó anteriormente es el parámetro que determina en gran medida y debido a la fragilidad del concreto a los esfuerzos de tensión, el daño producido por las reacciones expansivas sobre el material.

Dado que los efectos del sulfato de sodio se encuentran asociados a la formación tardía de ettringita, patología cuyos efectos deben medirse principalmente a partir de los cambios en la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad (Noël et al., 2018), así como considerando condiciones restrictivas en los especímenes (Kawabata et al., 2021), se recomienda que el estudio de las expansiones producidas por los sulfatos sean evaluadas en estructuras a escala que representen elementos, conexiones y condiciones de apoyo más acordes con las condiciones de servicio en las que se utilizará el material.

De acuerdo con las evidencias encontradas en la literatura no se recomienda emplear aguas sulfatadas cuando estas presentan o propician condiciones anaerobias que favorezcan el desarrollo de bacterias reductoras de este compuesto o cuando la estructura se encuentre en entornos donde se propicien las condiciones donde los sulfatos puedan ser reducidos y produzcan compuestos altamente nocivos para el material.

5. Bibliografía

- AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). NSR10 Titulo C: Concreto estructural. En *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10* (p. 590).
- Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Sharif, A. M., Shameem, M., & Ibrahim, M. (2003). Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5 SPEC), 429–437. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00083-5)
- Ali, M., Khan, I., & Hossain, M. (2008). Chemical Analysis of Ordinary Portland Cement of Bangladesh. *Chemical Engineering Research Bulletin*, 12(0). <https://doi.org/10.3329/ceerb.v12i0.1491>
- Al-Jabri, K. S., AL-Saidy, A. H., Taha, R., & AL-Kemyani, A. J. (2011). Effect of using Wastewater on the Properties of High Strength Concrete. *Procedia Engineering*, 14, 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.046>
- Al-Mashaqbeh, O. A., Ghrair, A. M., Farfoura, M., Sarireh, M. K., Al-Kouz, N., & Megdal, S. B. (2016). Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1519–1525. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.11.005>
- American Concrete Institute - ACI. (1977). Chapter 2: Aggressive chemical exposure. *American Concrete Institute* .
- ASTM C1602. (2005). Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. En *Annual Book of ASTM Standards* (Issue C).
- Bediako, M., & Amankwah, E. O. (2015). Analysis of Chemical Composition of Portland Cement in Ghana: A Key to Understand the Behavior of Cement. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2015/349401>
- Bedoya-Montoya, C. M., & Medina-Restrepo. (2016). El concreto elaborado con aguas lluvia como aporte ambiental desde la construcción. *REVISTA FACULTAD DE INGENIERÍA*, 25(41), 31. <https://doi.org/10.19053/01211129.4135>
- Brunetaud, X., Divet, L., & Damidot, D. (2008). Impact of unrestrained Delayed Ettringite Formation-induced expansion on concrete mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 38(11), 1343–1348. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2008.05.005>
- BSi - British Standards. (2002). BS EN 1008:2022 - Mixing water for concrete. Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete. En *BSI Standards*

- Publication* (Vol. 3, Issue December, p. 22). British Standards.
<http://shop.bsigroup.com/en/ProductDetail/?pid=000000000019990036>
- Carrasco, F. (2013). Agua para morteros y hormigones. *Tecnología Del Hormigón*, 1–19.
- Cement Concrete and Aggregates Australia. (2007). *Use of Recycled Water in Concrete Production* (Issue August). [https://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library Documents/CCAA Reports/RecycledWater.pdf](https://www.ccaa.com.au/imis_prod/documents/Library/Documents/CCAA Reports/RecycledWater.pdf)
- Escalante-Garcia, J. I., & Sharp, J. H. (2004). The chemical composition and microstructure of hydration products in blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 967–976.
<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.02.036>
- Escobar, J. E., Ovalle, L. A., Rodriguez, C. A., & Salazar, H. R. (1984). Efectos de la calidad del agua en la resistencia del concreto. *Ingeniería e Investigación*, ISSN 0120-5609, N°. 9, 1984, Págs. 29-34, 9, 29–34. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4902873>
- Fu, J., Jones, A. M., Bligh, M. W., Holt, C., Keyte, L. M., Moghaddam, F., Foster, S. J., & Waite, T. D. (2020). Mechanisms of enhancement in early hydration by sodium sulfate in a slag-cement blend – Insights from pore solution chemistry. *Cement and Concrete Research*, 135.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106110>
- Ghraid, A. M., & Al-Mashaqbeh, O. (2016). Domestic wastewater reuse in concrete using bench-scale testing and full-scale implementation. *Water (Switzerland)*, 8(9).
<https://doi.org/10.3390/w8090366>
- Ghraid, A. M., Al-Mashaqbeh, O. A., Sarireh, M. K., Al-Kouz, N., Farfoura, M., & Megdal, S. B. (2018). Influence of grey water on physical and mechanical properties of mortar and concrete mixes. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1519–1525.
<https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2016.11.005>
- Gobierno de las Islas Baleares. (s/f). *Salud ambiental-Sulfatos*. Govern Illes Balearn, Direcció General de Salut Pública y Participación. Recuperado el 9 de febrero de 2021, a partir de <https://www.caib.es/sites/salutambiental/es/sulfatos-26202/>
- Godart, B. (2017). Pathology, assessment and treatment of structures affected by delayed ettringite formation. *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*, 27(3), 362–369.
<https://doi.org/10.2749/101686617X14881932436771>
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. (1997a). *Ingeniería Civil Y Arquitectura. Método Para Determinar La Fluidéz De Morteros De Cemento Hidráulico*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones.
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. (1997b). NTC 397: Método de ensayo para determinar la expansión potencial de morteros de cemento portland

- expuestos a la acción de sulfatos. En *NTC 397*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones.
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones. (1998). *NTC 118: Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones (ICONTEC).
- IS-456. (2000). *Plain and Reinforced Concrete - Code of Practice* (p. 114). Bureau of Indian Standards (BIS). <https://issuu.com/vmpndy/docs/is.456.2000>
- Kawabata, Y., Ueda, N., Miura, T., & Multon, S. (2021). The influence of restraint on the expansion of concrete due to delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Composites*, *121*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104062>
- Kılınç, K., Uyan, M., & Arıöz, Ö. (2005). *Effects of Sulfates on Strength of Portland Cement Mortars*. <https://direct.sci-hub.tw/www.onepetro.org/b56e7e6312b5de248d6188676c4ec909/www.onepetro.org@conferencepaperisopei05426.pdf#view=FitH>
- Kucche, K. J., Jamkar, S. S., & Sadgir, P. A. (2015). Quality of Water for Making Concrete: A Review of Literature. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *5*(1), 1–10. <http://www.ijsrp.org/research-paper-0115/ijsrp-p3720.pdf>
- Kumar Chatteree, A. (2018). *Cement Production Technology: Principles and Practice*. Taylor & Francis Group, LLC.
- Kurdowski, W. (2014). Cement and concrete chemistry. En *Cement and Concrete Chemistry* (Vol. 9789400779457). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Li, H., Xue, Z., Liang, G., Wu, K., Dong, B., & Wang, W. (2021). Effect of C-S-Hs-PCE and sodium sulfate on the hydration kinetics and mechanical properties of cement paste. *Construction and Building Materials*, *266*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121096>
- Luís, J., Aguiar, B., Jalali, S., & Jalali, S. (2005). *Estimating compressive strength of concrete by mortar testing*. <https://www.researchgate.net/publication/277096385>
- Maes, M., & de Belie, N. (2014). Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. *Cement and Concrete Composites*, *53*, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.013>
- Marchand, J., Samson, E., Maltais, Y., & Beaudoin, J. J. (2002). Theoretical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, *24*, 317–329. www.elsevier.com/locate/cemconcomp

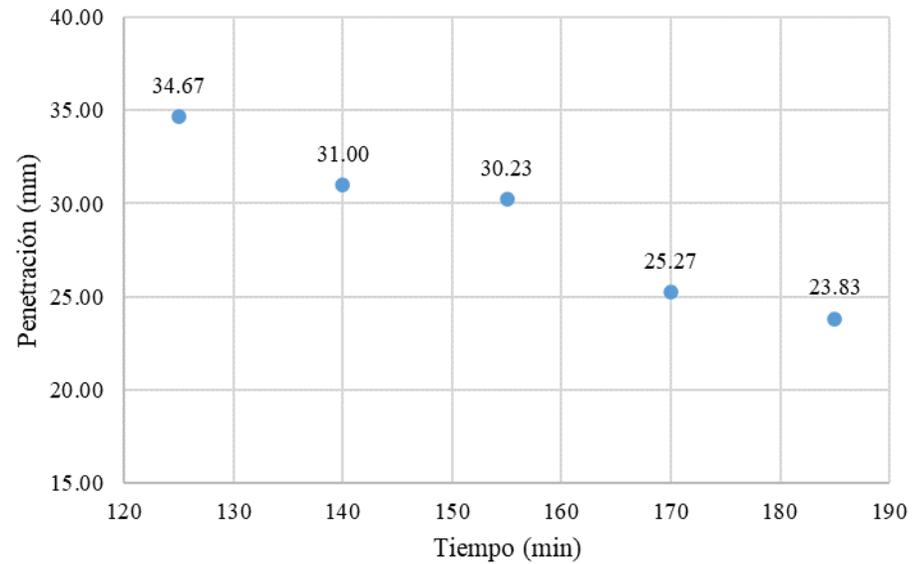
- Maroof, R., & Hasan, H. M. (2016). *Relationship between properties of cement mortar with that of concrete mix A Study of Aromatic Hydrocarbons Levels of Some Waters and Sediments at Al-Gabal Allakhder Coast Regions View project Containing View project*. <https://www.researchgate.net/publication/332766435>
- Matallana Rodríguez, R. (2006). *Fundamentos de concreto aplicados a la construcción* (Instituto Colombiano de Prooductores de Cemento (ICPC), Ed.). Editorial Piloto S.A.
- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, *1*(1), 69–76. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- Morillas, H., Maguregui, M., Trebolazabala, J., & Madariaga, J. M. (2015). Nature and origin of white efflorescence on bricks, artificial stones, and joint mortars of modern houses evaluated by portable Raman spectroscopy and laboratory analyses. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *136*(PB), 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2014.10.006>
- Nehdi, M., & Hayek, M. (2005). Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity. *Cement and Concrete Research*, *35*(4), 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.032>
- Noël, M., Sanchez, L., & Tawil, D. (2018). Structural implications of internal swelling reactions in concrete: Review and research needs. *Magazine of Concrete Research*, *70*(20), 1052–1063. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00383>
- NTC-3459. (2001). NTC-3459 Agua para la elaboracion de concreto. *Incontec*.
- Onesmus Mulwa, M., Karanja, J., & Jackson Wachira, M. (2016). Effect of sulphate ions in mixing water on cement mortar performance. *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)*, *9*(1), 11–15. <https://doi.org/10.9790/5736-09111115>
- Peche, R. T., Jamkar, S. S., & Sadgir, P. S. (2014). Grey Water-A Potential Source of Water for Construction. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, *12*, 2278–1684. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/ICAET-2014/ce/volume-3/3.pdf>
- Prasad, J., Jain, D. K., & Ahuja, A. K. (2006). FACTORS INFLUENCING THE SULPHATE RESISTANCE OF CEMENT CONCRETE AND MORTAR. En *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)* (Vol. 7, Issue 3). www.SID.ir
- Reddy Babu, G., Madhusudana Reddy, B., & Venkata Ramana, N. (2018). Quality of mixing water in cement concrete "a review. *Materials Today: Proceedings*, *5*(1), 1313–1320. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.216>

- Rivera L, G. a. (2011). *Capítulo 3 agua de mezcla 3. 1.* 77–82. <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/geanrilo/docs/FIC y GEOTEC SEM 2 de 2010/Tecnologia del Concreto - PDF ver. 2009/Cap. 03 - Agua de mezcla.pdf>
- Romero R., J. A. (2002). Calidad del Agua. En Escuela Colombiana de Ingeniería (Ed.), *Calidad del Agua* (Primera).
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). Materiales para Concreto Hidráulico. En *CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES* (pp. 1–7).
- Shanahan, N., & Zayed, A. (2007). Cement composition and sulfate attack. Part I. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 618–623. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.12.004>
- Tang, D., Yang, C., Li, X., Zhu, X., Yang, K., & Yu, L. (2021). Mitigation of efflorescence of alkali-activated slag mortars by incorporating calcium hydroxide. *Construction and Building Materials*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123873>
- Thornton, H. T. J. (1978). Acid Attack of Concrete Caused by Sulfur Bacteria Action. *ACI Journal*, 75–59.
- VDT - Virginia Transportation Department. (2015). *Chapter 1: Components Of Concrete* (Vol. 37, Issue 176 2). Virginia Transportation Department. https://www.virginiadot.org/VDOT/Business/asset_upload_file313_3529.pdf
- Yu, X. tong, Chen, D., Feng, J. rui, Zhang, Y., & Liao, Y. di. (2018). Behavior of mortar exposed to different exposure conditions of sulfate attack. *Ocean Engineering*, 157, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.017>
- Zuquan, J., Song, G., Xia, Z., & Li, Y. (2015). Corrosive Crack and its 3D Defects Identification of Reinforced Concrete Subjected to Coupled Effect of Chloride Ions and Sulfate Ions. En *Int. J. Electrochem. Sci* (Vol. 10). www.electrochemsci.org

ANEXO 1. TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL

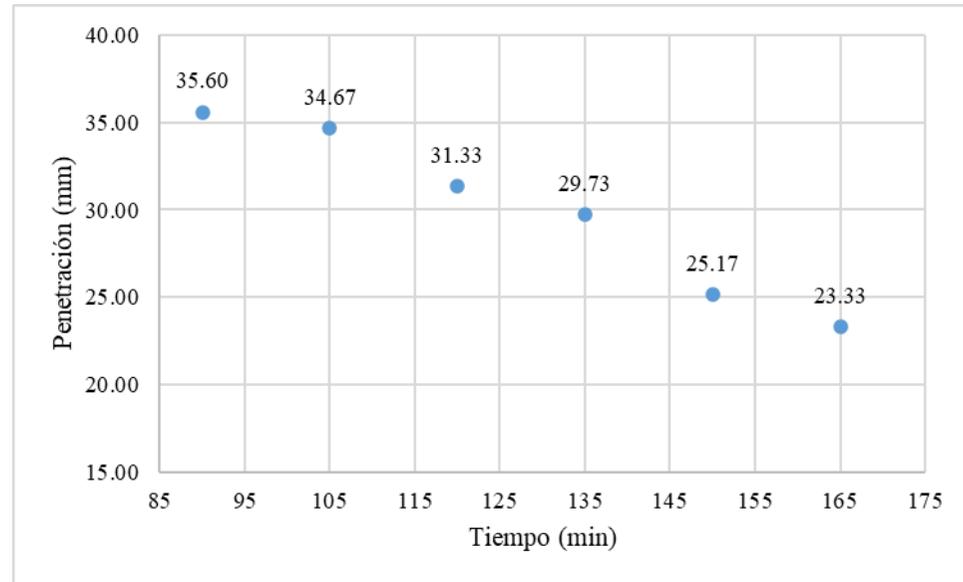
A continuación, se presentan las lecturas tomadas que permitieron definir el tiempo de fraguado inicial de las pastas de cemento elaboradas con cada una de las aguas sintéticas estudiadas.

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
125	37	36	31	34.67
140	31	32	30	31.00
155	29.5	30	31.2	30.23
170	25	24.8	26	25.27
185	23	26	22.5	23.83



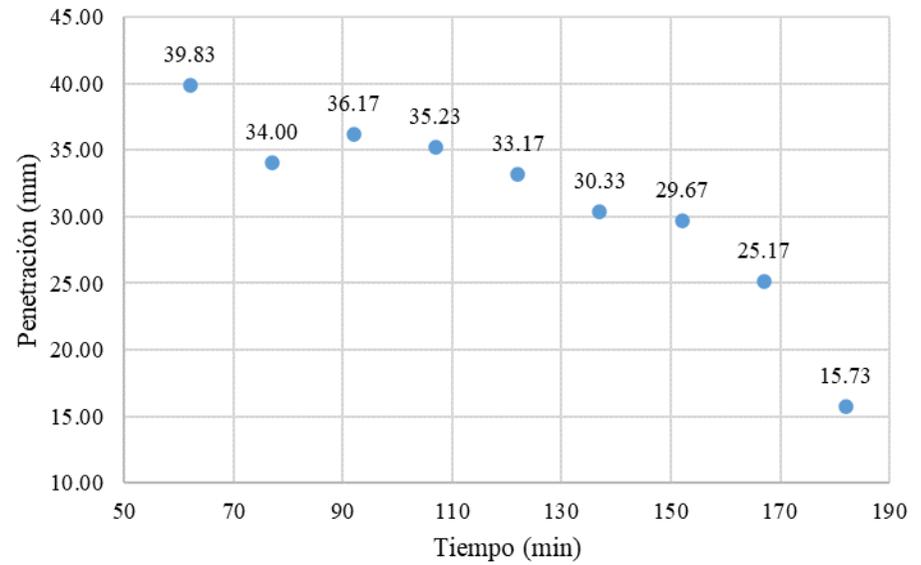
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 0 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
90	35	32.8	39	35.60
105	33	33	38	34.67
120	33	31	30	31.33
135	31.2	29.2	28.8	29.73
150	26	23.5	26	25.17
165	21.5	23.5	25	23.33



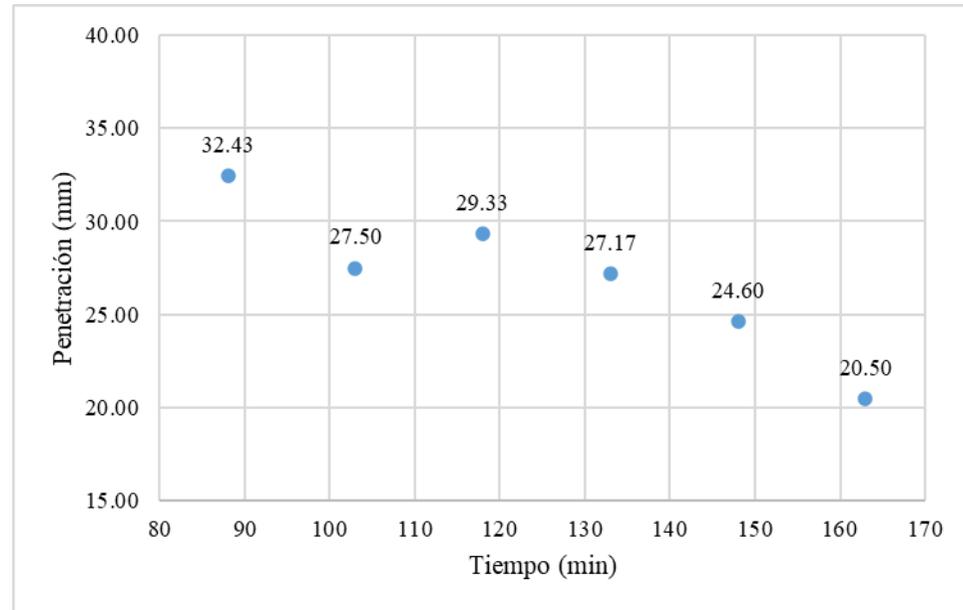
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 150 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
62	40	40	39.5	39.83
77	39	33	30	34.00
92	38	39	31.5	36.17
107	30.2	38	37.5	35.23
122	32	35.5	32	33.17
137	31	32.5	27.5	30.33
152	29	29	31	29.67
167	25	26	24.5	25.17
182	19.5	16.5	11.2	15.73



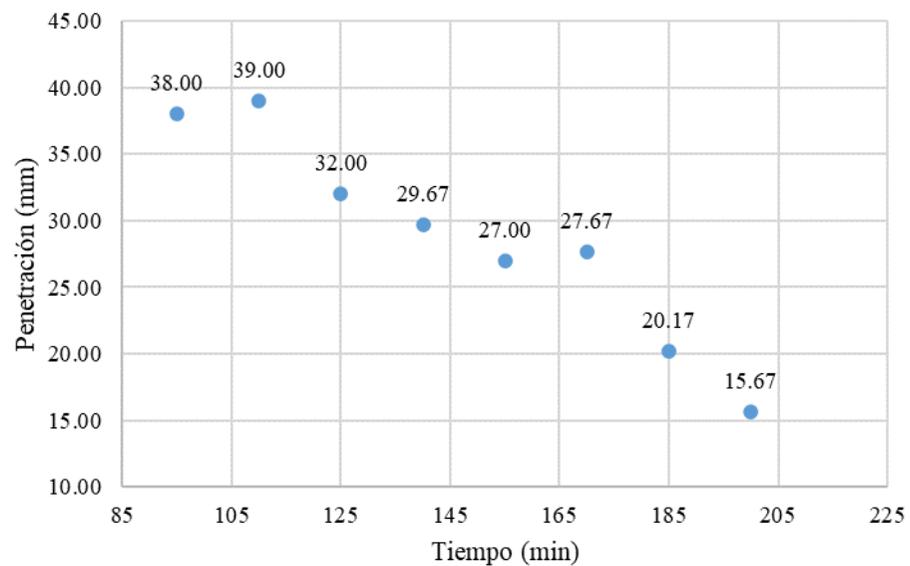
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 300 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
88	34.3	30	33	32.43
103	25.5	30	27	27.50
118	29	24	35	29.33
133	30	26.5	25	27.17
148	28	23.8	22	24.60
163	19	21	21.5	20.50



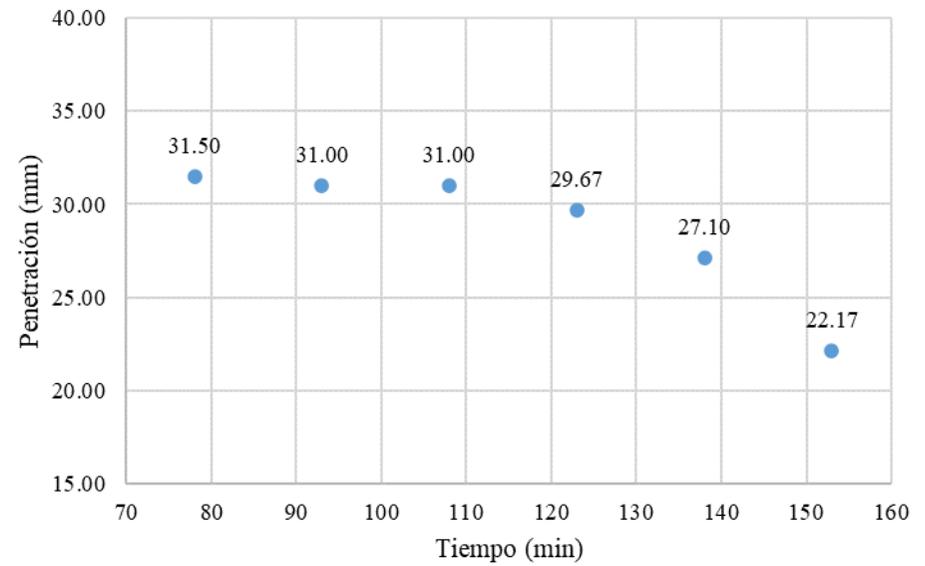
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 450 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
95	37	39	38	38.00
110	39	40	38	39.00
125	36	31	29	32.00
140	30	31	28	29.67
155	25	28	28	27.00
170	29	28	26	27.67
185	21	21	18.5	20.17
200	15	17	15	15.67



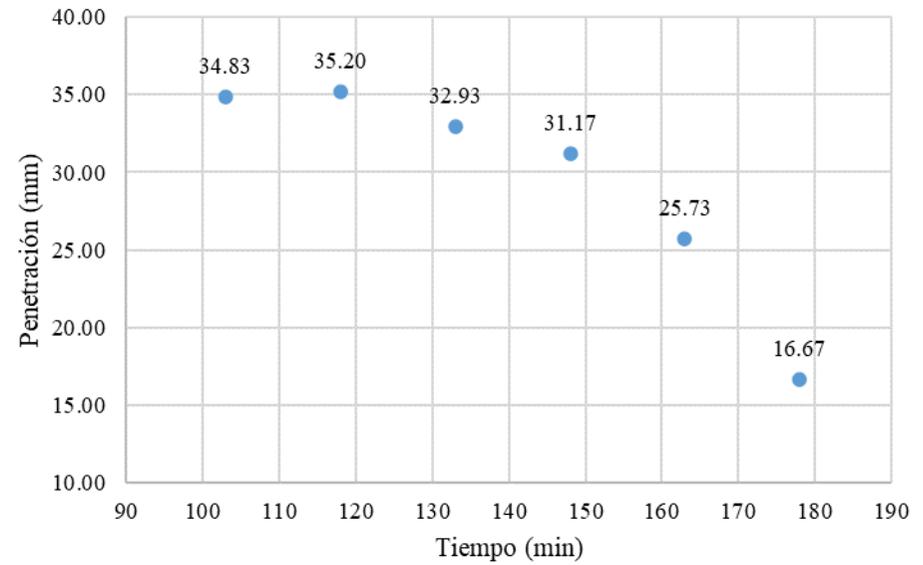
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 600 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
78	33	27	34.5	31.50
93	28	35	30	31.00
108	28	34	31	31.00
123	29	28	32	29.67
138	25	28	28.3	27.10
153	22	24	20.5	22.17



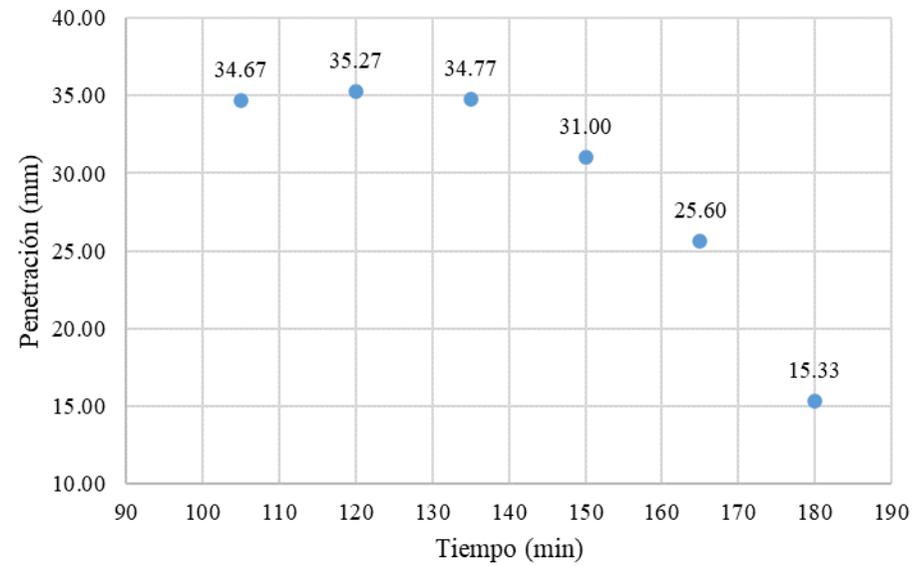
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 750 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
103	32	35	37.5	34.83
118	35.6	34.5	35.5	35.20
133	31	32.8	35	32.93
148	31	30.5	32	31.17
163	24.2	26.5	26.5	25.73
178	24	12	14	16.67



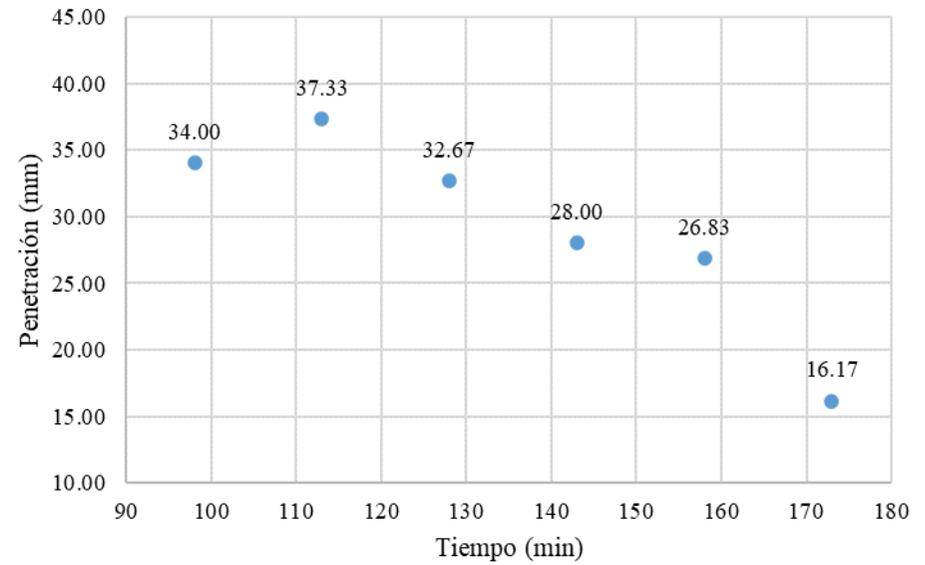
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 1000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
105	34	36.5	33.5	34.67
120	37	34	34.8	35.27
135	36.8	32	35.5	34.77
150	28	33	32	31.00
165	24	26	26.8	25.60
180	19	15	12	15.33



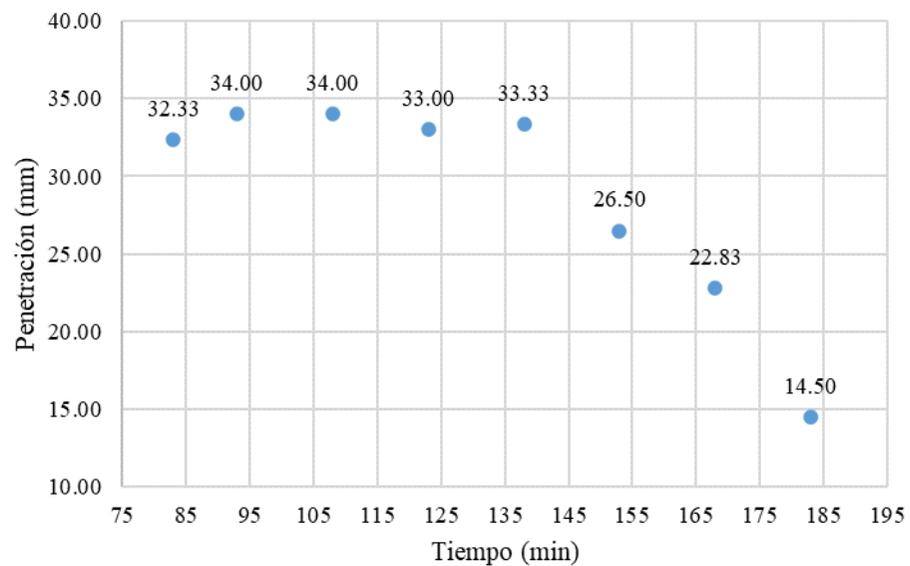
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 1500 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
98	37.5	35	29.5	34.00
113	38	38	36	37.33
128	32.5	29	36.5	32.67
143	28	27.5	28.5	28.00
158	26	28	26.5	26.83
173	20	13	15.5	16.17



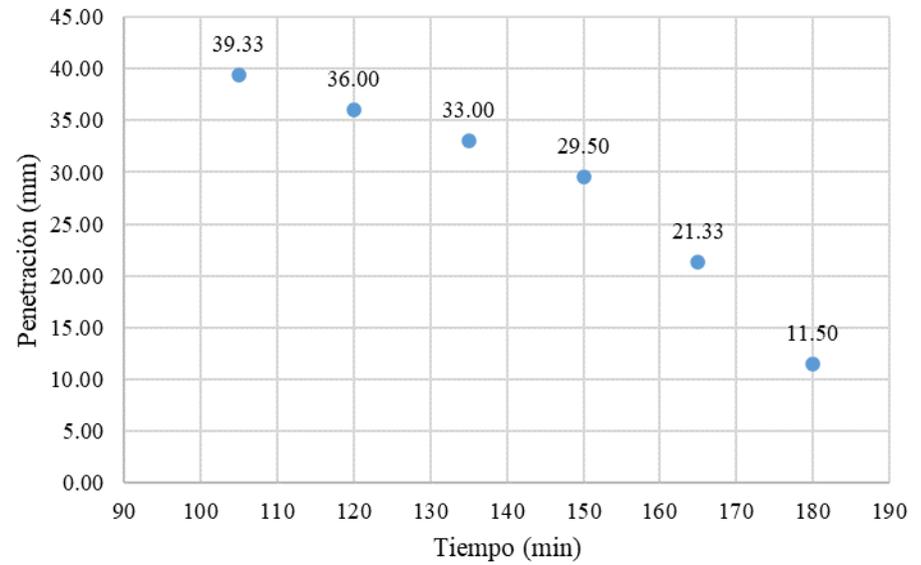
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 2000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
83	32	33	32	32.33
93	37	27	38	34.00
108	31.5	32.5	38	34.00
123	32	34	33	33.00
138	35	32	33	33.33
153	29.5	22	28	26.50
168	23.5	21	24	22.83
183	13.5	18	12	14.50



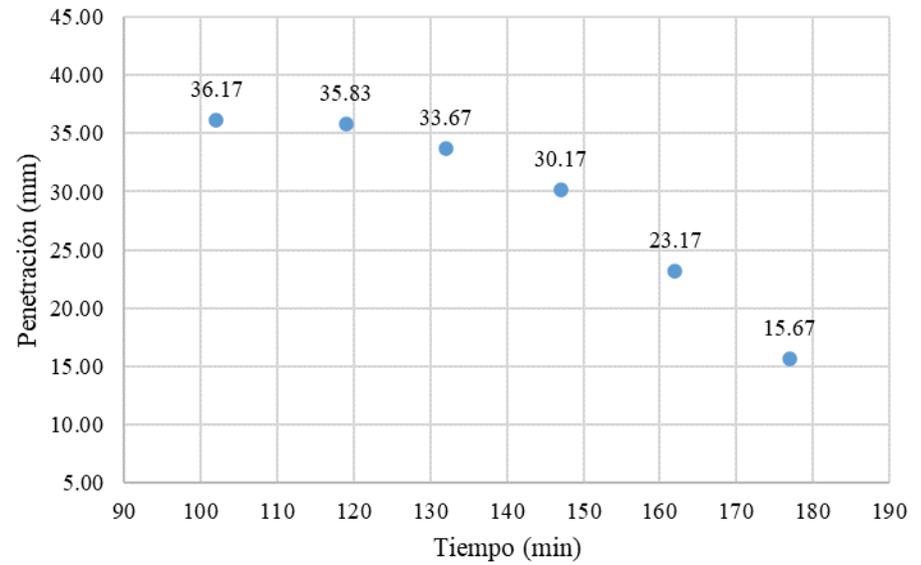
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 2500 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
105	40	39	39	39.33
120	38	37	33	36.00
135	33	33	33	33.00
150	32.5	29	27	29.50
165	23	21	20	21.33
180	11.5	13.5	9.5	11.50



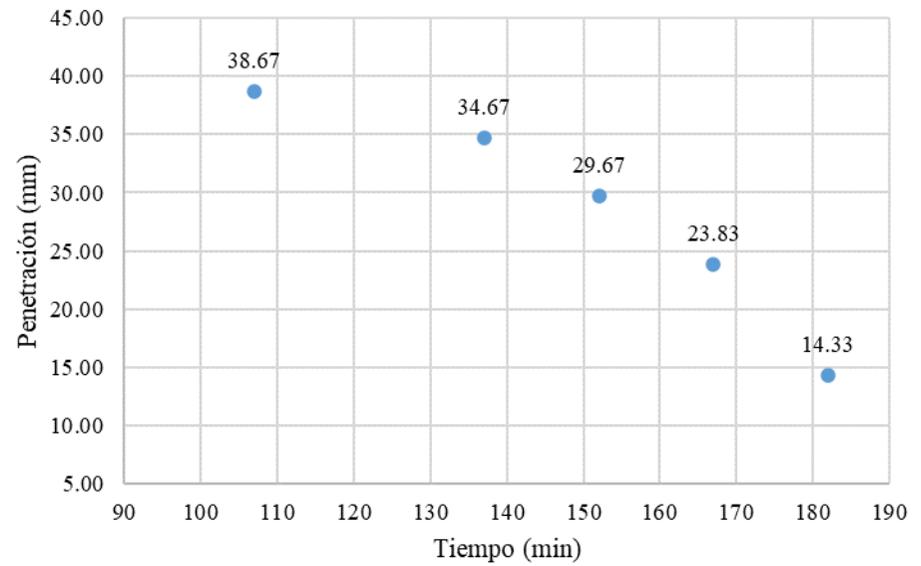
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 3000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
57	39	40	40	39.67
72	39	39	40	39.33
87	39	39	38.5	38.83
102	37.5	33.5	37.5	36.17
119	37.5	36	34	35.83
132	33.5	33	34.5	33.67
147	30	29	31.5	30.17
162	23	24.5	22	23.17
177	15	16.5	15.5	15.67



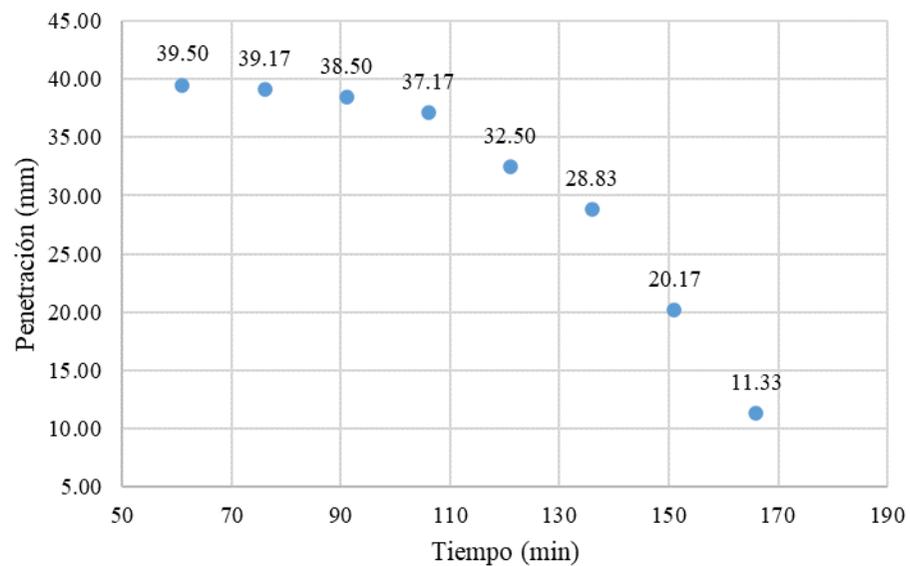
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 5000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
107	40	38	38	38.67
137	34.5	34.5	35	34.67
152	31.5	29.5	28	29.67
167	23	24	24.5	23.83
182	14	14.5	14.5	14.33



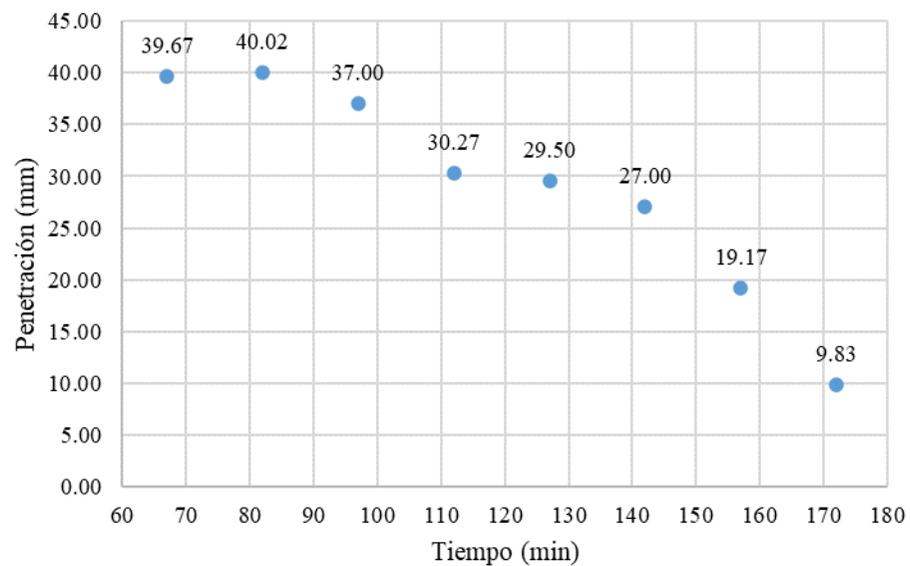
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 10000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
61	40	39	39.5	39.50
76	39	39	39.5	39.17
91	38.5	38.5	38.5	38.50
106	37	36.5	38	37.17
121	32.5	32.5	32.5	32.50
136	31	29	26.5	28.83
151	22.5	17.5	20.5	20.17
166	12.5	11.5	10	11.33



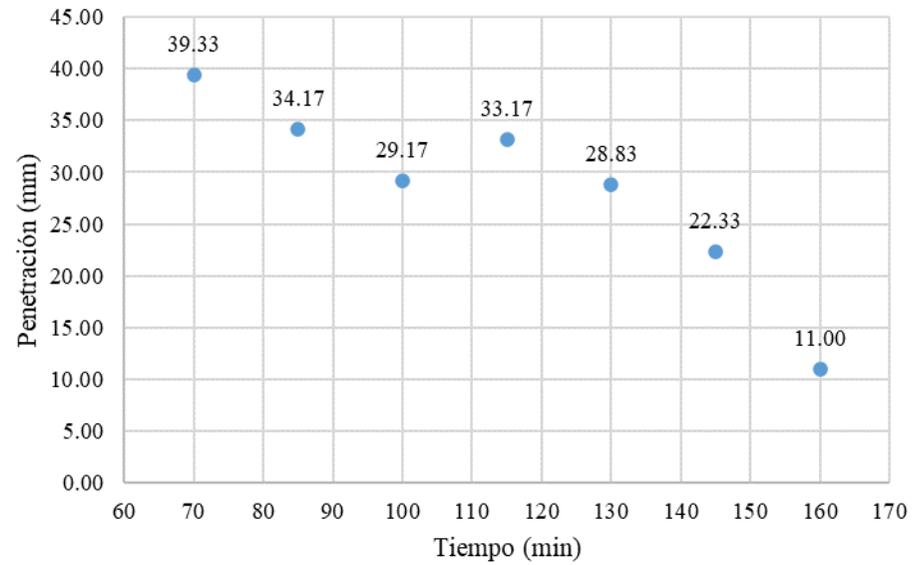
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 15000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
67	39	39	41	39.67
82	40	40.05	40	40.02
97	40	38	33	37.00
112	32.5	29.8	28.5	30.27
127	29	31	28.5	29.50
142	27.5	27	26.5	27.00
157	19	20	18.5	19.17
172	10	8.5	11	9.83



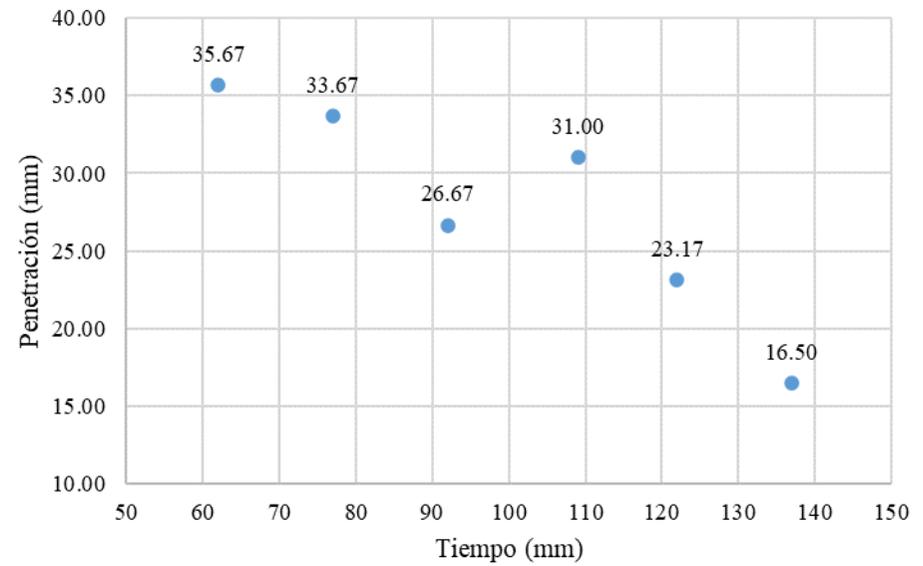
Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 20000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
70	39	41	38	39.33
85	34.5	33.5	34.5	34.17
100	28	30.5	29	29.17
115	34.5	31.5	33.5	33.17
130	28.5	28	30	28.83
145	23	20.5	23.5	22.33
160	11.5	10	11.5	11.00



Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 25000 mg/L

Tiempo inicial (min)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	Promedio (mm)
62	37	36	34	35.67
77	36	32	33	33.67
92	22	28	30	26.67
109	33	29	31	31.00
122	22	20	27.5	23.17
137	20	15.5	14	16.50



Resultados ensayo de fraguado inicial, concentración de 30000 mg/L

ANEXO 2. RESULTADOS ENSAYO DE RESISTENCIA

A continuación, se presentan los datos de los especímenes ensayados y los resultados obtenidos para cada uno; además se indica cuales fueron descartados al momento de estimar la resistencia promedio para cada una de las edades evaluadas.

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	4.96	5.13	3556	2544.48	34884.36	13.7	OK
	5.08	5.08	4148	2580.64	40691.88	15.8	OK
	5.12	5.02	3736	2570.24	36650.16	14.3	OK
14	5	5.1	4852	2550	47598.12	18.7	OK
	5.03	5.06	4542	2545.18	44557.02	17.5	OK
	5.04	4.96	4798	2499.84	47068.38	18.8	OK
28	5.01	4.97	4849	2489.97	47568.69	19.1	OK
	5.08	5.08	5396	2580.64	52934.76	20.5	OK
	5	5.07	5558	2535	54523.98	21.5	OK
99	4.93	4.94	5726	2435.42	56172.06	23.1	Descartar
	5.05	5.05	7406	2550.25	72652.86	28.5	OK
	5.07	4.94	7362	2504.58	72221.22	28.8	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 0 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.04	5.01	3950	2525.04	38749.5	15.3	OK
	5.09	5.04	3698	2565.36	36277.38	14.1	OK
	4.96	5.03	4104	2494.88	40260.24	16.1	OK
14	5.03	5.09	4742	2560.27	46519.02	18.2	OK
	4.97	5.17	5000	2569.49	49050	19.1	OK
	5.02	4.98	4124	2499.96	40456.44	16.2	Descartar
28	5.1	4.94	4502	2519.4	44164.62	17.5	OK
	5	5.08	4768	2540	46774.08	18.4	OK
	5.01	5.1	4928	2555.1	48343.68	18.9	OK
99	5.1	5	7150	2550	70141.5	27.5	OK
	5.12	5.04	7264	2580.48	71259.84	27.6	OK
	5.19	4.97	6182	2579.43	60645.42	23.5	Descartar

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 150 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.04	5.02	4118	2530.08	40397.58	16.0	OK
	4.93	5	4012	2465	39357.72	16.0	OK
	5	5.03	3710	2515	36395.1	14.5	OK
14	5.07	5.08	4936	2575.56	48422.16	18.8	OK
	5	4.97	4334	2485	42516.54	17.1	OK
	4.93	5.18	5038	2553.74	49422.78	19.4	OK
28	5.02	4.97	5552	2494.94	54465.12	21.8	OK
	5.02	5.05	6110	2535.1	59939.1	23.6	OK
	4.93	5.1	5806	2514.3	56956.86	22.7	OK
92	4.97	5	6586	2485	64608.66	26.0	OK
	4.95	5.02	6356	2484.9	62352.36	25.1	OK
	5.1	5	6134	2550	60174.54	23.6	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 300 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.1	5.01	4060	2555.1	39828.6	15.6	OK
	5.01	5.15	4076	2580.15	39985.56	15.5	OK
	5.05	5.05	3408	2550.25	33432.48	13.1	Descartar
14	5.12	4.98	5110	2549.76	50129.1	19.7	OK
	5.13	5.02	4272	2575.26	41908.32	16.3	Descartar
	5.04	5.07	5082	2555.28	49854.42	19.5	OK
28	5.13	5.03	6076	2580.39	59605.56	23.1	OK
	5.06	5.05	5714	2555.3	56054.34	21.9	OK
	5.04	5	5718	2520	56093.58	22.3	OK
92	5.09	5.03	6662	2560.27	65354.22	25.5	OK
	5.01	5.05	6322	2530.05	62018.82	24.5	OK
	5.09	5	6820	2545	66904.2	26.3	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 450 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	4.94	5.05	3956	2494.7	38808.36	15.6	OK
	5.02	4.95	3026	2484.9	29685.06	11.9	Descartar
	5.03	4.97	4042	2499.91	39652.02	15.9	OK
14	5.1	5.07	5078	2585.7	49815.18	19.3	OK
	5	5.02	4728	2510	46381.68	18.5	OK
	5.06	5.02	4528	2540.12	44419.68	17.5	OK
27	5.06	5.03	4808	2545.18	47166.48	18.5	OK
	4.95	5.1	3594	2524.5	35257.14	14.0	Descartar
	4.95	5.05	5440	2499.75	53366.4	21.3	OK
92	5.09	4.98	5956	2534.82	58428.36	23.1	OK
	4.97	5.02	5662	2494.94	55544.22	22.3	OK
	5.1	4.98	5622	2539.8	55151.82	21.7	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 600 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5	5.09	3344	2545	32804.64	12.9	Descartar
	5.03	5.15	3958	2590.45	38827.98	15.0	OK
	5.07	5.03	3928	2550.21	38533.68	15.1	OK
14	5.12	5.04	4674	2580.48	45851.94	17.8	OK
	5.02	5.13	5264	2575.26	51639.84	20.1	OK
	5	5.16	4966	2580	48716.46	18.9	OK
27	5.02	5.08	5230	2550.16	51306.3	20.1	OK
	5	5.09	5128	2545	50305.68	19.8	OK
	5.04	5.02	5052	2530.08	49560.12	19.6	OK
92	5.13	5.01	6444	2570.13	63215.64	24.6	OK
	5.03	5.08	6652	2555.24	65256.12	25.5	OK
	5.03	5.02	7474	2525.06	73319.94	29.0	Descartar

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 750 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.1	5.08	3872	2590.8	37984.32	14.7	OK
	5.07	5.1	4214	2585.7	41339.34	16.0	OK
	5.08	5.1	4390	2590.8	43065.9	16.6	OK
14	5.06	5.02	5248	2540.12	51482.88	20.3	OK
	5.12	5.01	5202	2565.12	51031.62	19.9	OK
	5.04	5.03	4778	2535.12	46872.18	18.5	OK
28	4.93	5.1	5514	2514.3	54092.34	21.5	OK
	5.05	5.08	5548	2565.4	54425.88	21.2	OK
	5	5.15	6094	2575	59782.14	23.2	OK

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
92	5.04	5.02	6664	2530.08	65373.84	25.8	OK
	5.04	4.99	6512	2514.96	63882.72	25.4	OK
	5.08	4.98	7638	2529.84	74928.78	29.6	Descartar

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 1,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	4.95	5.05	3812	2499.75	37395.72	15.0	OK
	5.03	5.08	4102	2555.24	40240.62	15.7	OK
	5.02	5.01	3732	2515.02	36610.92	14.6	OK
14	5.02	5	4952	2510	48579.12	19.4	OK
	5.1	4.93	4786	2514.3	46950.66	18.7	OK
	5.01	4.98	4802	2494.98	47107.62	18.9	OK
28	4.96	5.08	5914	2519.68	58016.34	23.0	OK
	4.92	5	5360	2460	52581.6	21.4	OK
	4.97	5.03	5086	2499.91	49893.66	20.0	OK
92	5.05	4.96	6656	2504.8	65295.36	26.1	OK
	5	5	6504	2500	63804.24	25.5	OK
	4.93	5	5850	2465	57388.5	23.3	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 1,500 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.13	5.07	3934	2600.91	38592.54	14.8	OK
	5.1	5.07	4114	2585.7	40358.34	15.6	OK
	5.03	5.07	4182	2550.21	41025.42	16.1	OK
14	5.08	4.95	5114	2514.6	50168.34	20.0	OK
	5.15	5.03	0	2590.45	0	0.0	Descartar
	4.97	5.09	4786	2529.73	46950.66	18.6	OK
28	5.15	4.97	5530	2559.55	54249.3	21.2	OK
	5.05	5.01	5560	2530.05	54543.6	21.6	OK
	5.1	4.99	5852	2544.9	57408.12	22.6	OK
89	5.14	5	5040	2570	49442.4	19.2	Descartar
	5.1	5	6892	2550	67610.52	26.5	OK
	5.1	5	6836	2550	67061.16	26.3	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 2,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.06	5	4216	2530	41358.96	16.3	OK
	5	4.98	4062	2490	39848.22	16.0	OK
	5.03	5.03	4310	2530.09	42281.1	16.7	OK
14	4.95	5.06	4578	2504.7	44910.18	17.9	OK
	4.9	4.96	5430	2430.4	53268.3	21.9	Descartar
	5.04	4.98	4480	2509.92	43948.8	17.5	OK
28	4.98	5.03	5188	2504.94	50894.28	20.3	OK
	5.01	4.96	5768	2484.96	56584.08	22.8	OK
	5.1	4.95	4072	2524.5	39946.32	15.8	Descartar
89	5.14	5	6610	2570	64844.1	25.2	OK
	5	5.03	7712	2515	75654.72	30.1	Descartar
	5.04	5.025	6498	2532.6	63745.38	25.2	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 2,500 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.15	4.92	3856	2533.8	37827.36	14.9	Descartar
	5.09	5.1	4640	2595.9	45518.4	17.5	OK
	4.95	5.05	4314	2499.75	42320.34	16.9	OK

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
14	4.98	5.04	5442	2509.92	53386.02	21.3	OK
	5.07	4.95	5182	2509.65	50835.42	20.3	OK
	5.1	5	5046	2550	49501.26	19.4	OK
28	5	5.02	5374	2510	52718.94	21.0	OK
	5	5.05	1937.5	2525	19006.875	7.5	Descartar
	5.08	4.96	5856	2519.68	57447.36	22.8	OK
91	5.06	5.07	6748	2565.42	66197.88	25.8	OK
	5.05	5.05	6696	2550.25	65687.76	25.8	OK
	5	5.05	7692	2525	75458.52	29.9	Descartar

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 3,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.075	5.065	3744	2570.4875	36728.64	14.3	OK
	5.02	5.1	4236	2560.2	41555.16	16.2	OK
	5.08	5.04	3838	2560.32	37650.78	14.7	OK
14	5.14	5.1	6048	2621.4	59330.88	22.6	OK
	4.97	5.03	5604	2499.91	54975.24	22.0	OK
	5.11	5.08	5050	2595.88	49540.5	19.1	Descartar
28	5.07	5.05	6202	2560.35	60841.62	23.8	OK
	5.03	5.07	5940	2550.21	58271.4	22.8	OK
	5.1	5.13	5620	2616.3	55132.2	21.1	OK
91	5.07	5.12	6554	2595.84	64294.74	24.8	OK
	5.06	5.13	6872	2595.78	67414.32	26.0	OK
	5.03	5.06	6190	2545.18	60723.9	23.9	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 5,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.04	5.04	4810	2540.16	47186.1	18.6	OK
	5.16	5.11	4202	2636.76	41221.62	15.6	Descartar
	5.04	5.03	4592	2535.12	45047.52	17.8	OK
14	5.06	5.06	5914	2560.36	58016.34	22.7	OK
	5.06	5.2	5242	2631.2	51424.02	19.5	OK
	5.04	5.1	5660	2570.4	55524.6	21.6	OK
28	5.1	5.05	6450	2575.5	63274.5	24.6	OK
	5.03	5.01	6144	2520.03	60272.64	23.9	OK
	5.04	5.1	5926	2570.4	58134.06	22.6	OK
91	5.11	5.05	5548	2580.55	54425.88	21.1	OK
	5.08	5.1	6152	2590.8	60351.12	23.3	OK
	5.04	5.04	6268	2540.16	61489.08	24.2	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 10,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.04	5	4706	2520	46165.86	18.3	OK
	5.035	4.96	4592	2497.36	45047.52	18.0	OK
	5.09	5	4848	2545	47558.88	18.7	OK
14	5.03	5.06	4792	2545.18	47009.52	18.5	OK
	5.04	5.1	5324	2570.4	52228.44	20.3	OK
	5.03	5.06	4370	2545.18	42869.7	16.8	Descartar
28	5.04	5.1	6032	2570.4	59173.92	23.0	OK
	5.07	5.02	5664	2545.14	55563.84	21.8	OK
	4.97	5.03	6030	2499.91	59154.3	23.7	OK
91	5.12	5.025	6064	2572.8	59487.84	23.1	OK
	5.02	4.97	5216	2494.94	51168.96	20.5	OK
	5	5.07	7146	2535	70102.26	27.7	Descartar

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 15000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	4.96	5.06	4544	2509.76	44576.64	17.8	OK
	5.1	5	4120	2550	40417.2	15.8	OK
	5.1	5.02	4718	2560.2	46283.58	18.1	OK
14	4.97	5.06	5270	2514.82	51698.7	20.6	OK
	5.07	5.06	5378	2565.42	52758.18	20.6	OK
	5.1	5.03	5410	2565.3	53072.1	20.7	OK
28	5.02	5.01	5352	2515.02	52503.12	20.9	OK
	5.01	5.12	6172	2565.12	60547.32	23.6	OK
	5	5.04	5462	2520	53582.22	21.3	OK
91	5.12	5.05	7598	2585.6	74536.38	28.8	OK
	5.04	4.95	6360	2494.8	62391.6	25.0	OK
	4.98	5.12	7022	2549.76	68885.82	27.0	OK

Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 20,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.02	5.11	4824	2565.22	47323.44	18.4	OK
	5.06	5.07	3230	2565.42	31686.3	12.4	Descartar
	5.06	5.08	5002	2570.48	49069.62	19.1	OK
14	5.1	5.05	5432	2575.5	53287.92	20.7	OK
	5.1	5.02	5012	2560.2	49167.72	19.2	OK
	4.99	5.09	5684	2539.91	55760.04	22.0	OK
28	5	5.06	5838	2530	57270.78	22.6	OK
	5.02	5.06	6526	2540.12	64020.06	25.2	OK
	5.09	5	6330	2545	62097.3	24.4	OK
91	5.08	5.02	6444	2550.16	63215.64	24.8	OK
	5.06	5.06	7128	2560.36	69925.68	27.3	OK
	5.09	5.07	6766	2580.63	66374.46	25.7	OK

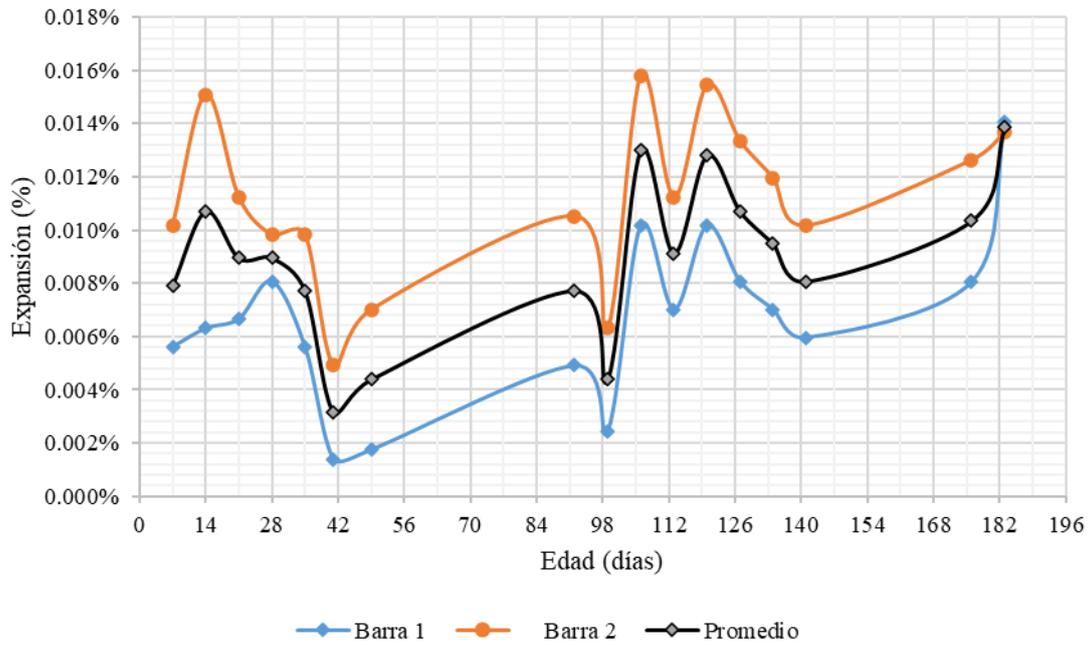
Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 25,000 mg/L

Edad	L 1 (cm)	L2 (cm)	Fuerza (kgf)	Área (mm2)	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	CH_1
7	5.12	5.05	3448	2585.6	33824.88	13.1	Descartar
	5.07	4.98	4532	2524.86	44458.92	17.6	OK
	5	5	4314	2500	42320.34	16.9	OK
14	5.1	5.03	4902	2565.3	48088.62	18.7	OK
	5	5.07	4928	2535	48343.68	19.1	OK
	4.95	5.17	4600	2559.15	45126	17.6	OK
28	5.16	5.09	6202	2626.44	60841.62	23.2	OK
	5.11	4.96	5656	2534.56	55485.36	21.9	OK
	5.01	5.03	6244	2520.03	61253.64	24.3	OK
92	5.06	4.99	6420	2524.94	62980.2	24.9	OK
	5.08	5.02	6096	2550.16	59801.76	23.5	OK
	5.1	4.96	6882	2529.6	67512.42	26.7	OK

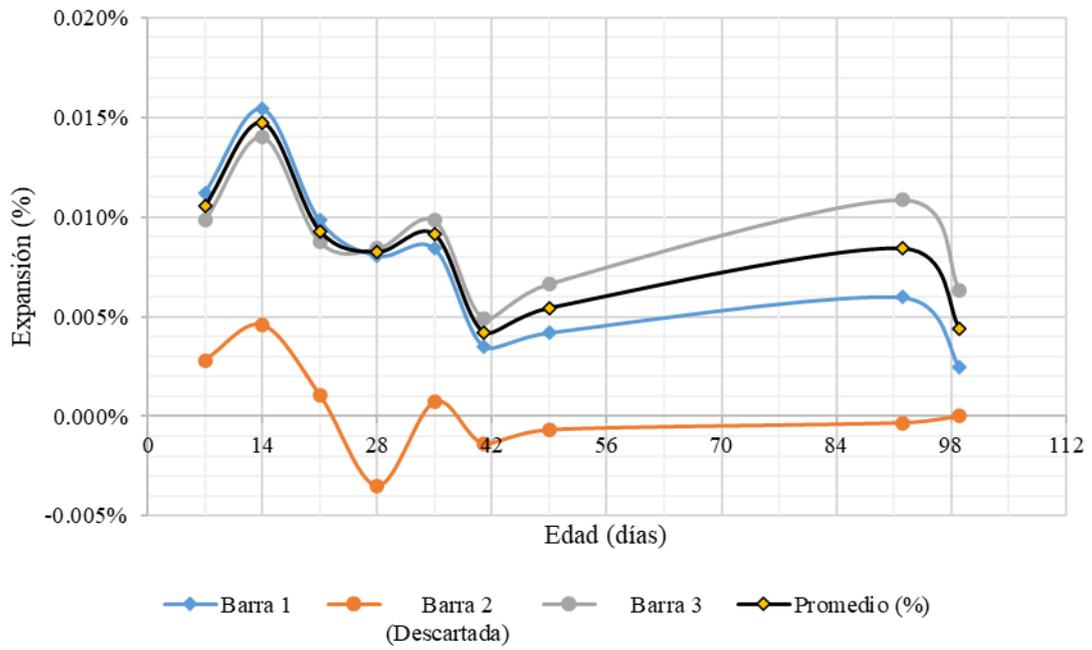
Resultados ensayo de resistencia a la compresión, concentración de 30,000 mg/L

ANEXO 3. RESULTADOS ENSAYO DE EXPANSIÓN

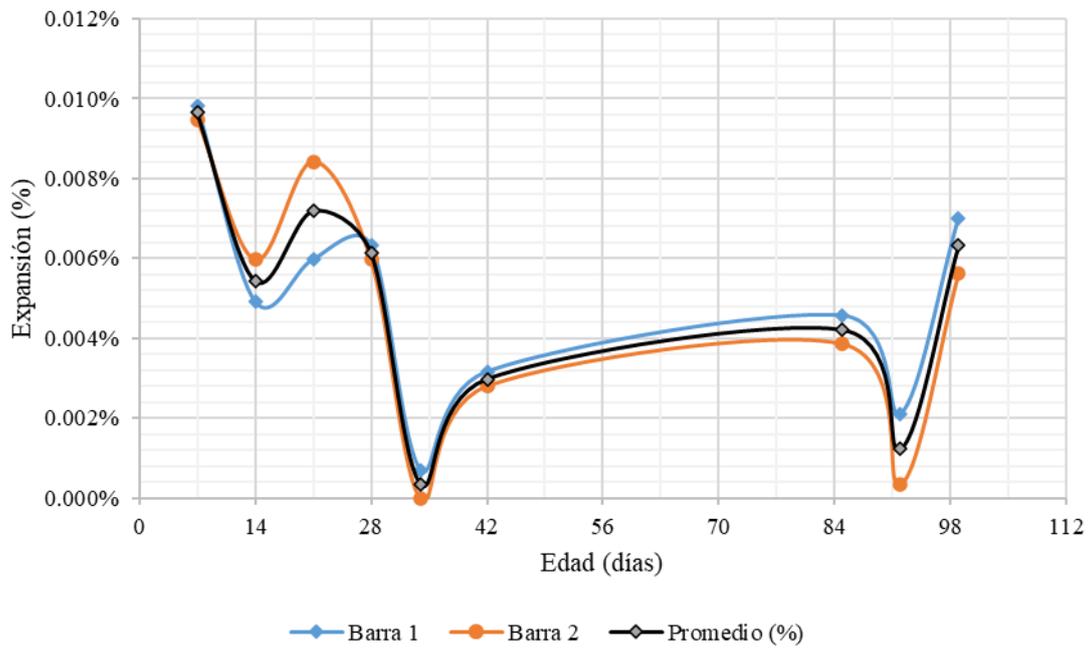
A continuación, se presentan los gráficos de los resultados de este ensayo, en ellos se presentan las expansiones obtenidas para cada una de las barras ensayadas en cada concentración evaluada, se indicará cual o cuales de ellas no fueron consideradas en la estimación de la expansión promedio y finalmente se indicará la expansión promedio obtenida para cada concentración.



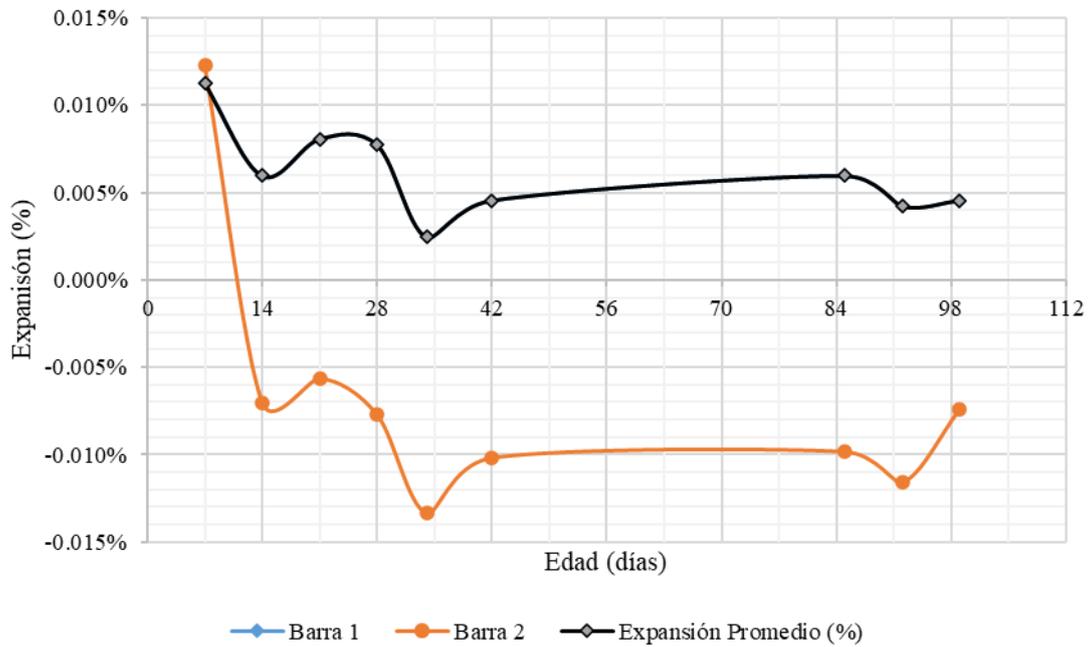
Resultados ensayo de expansión, concentración de 0 mg/L



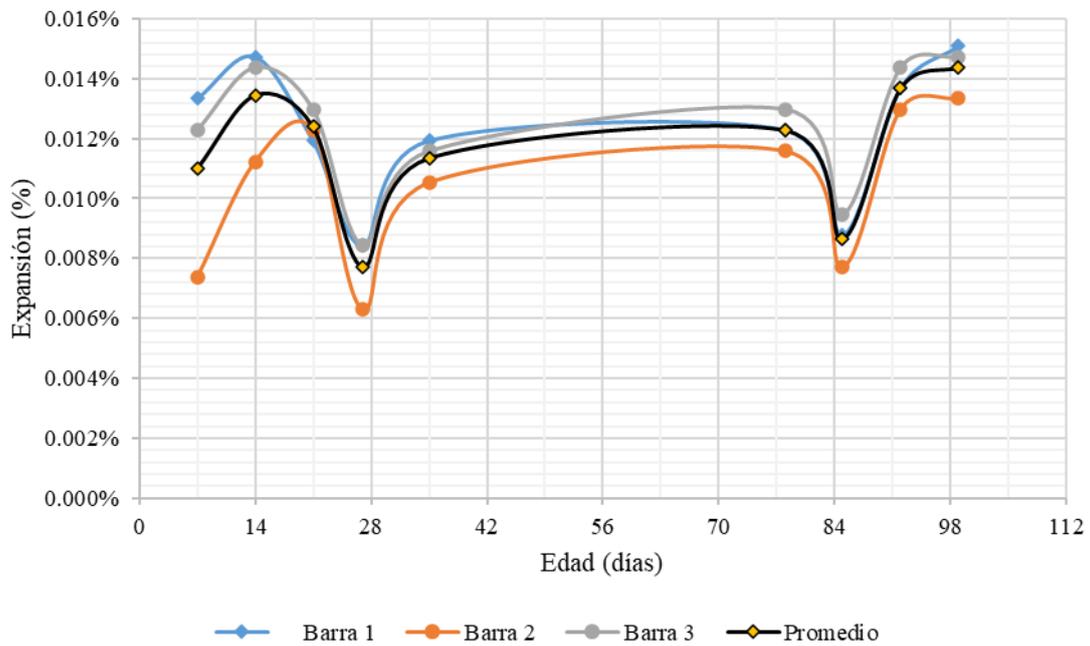
Resultados ensayo de expansión, concentración de 150 mg/L



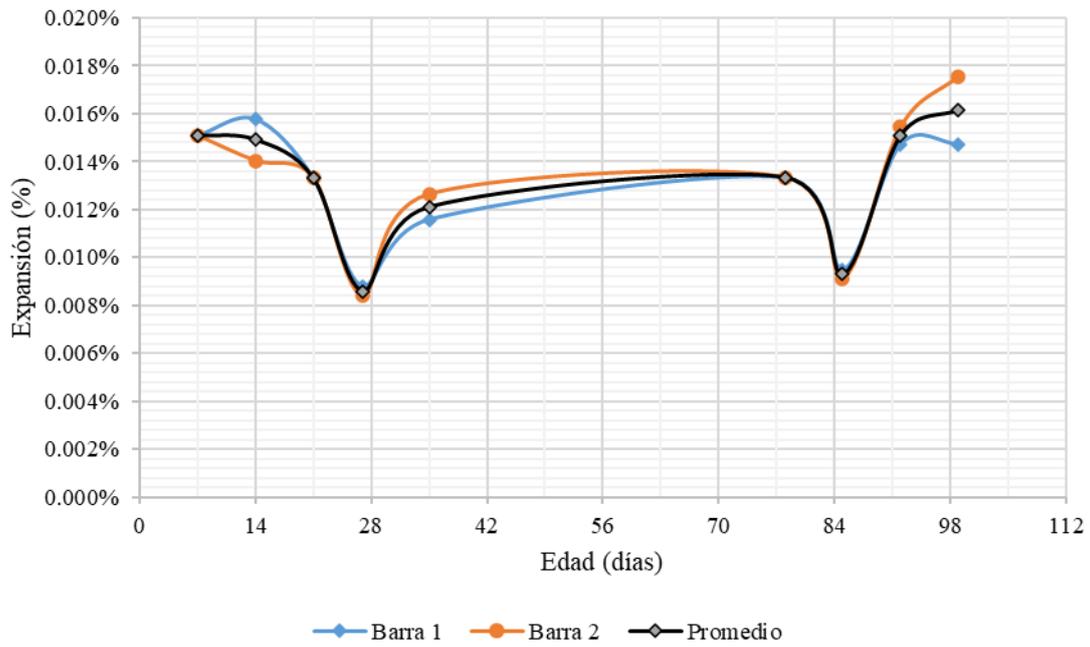
Resultados ensayo de expansión, concentración de 300 mg/L



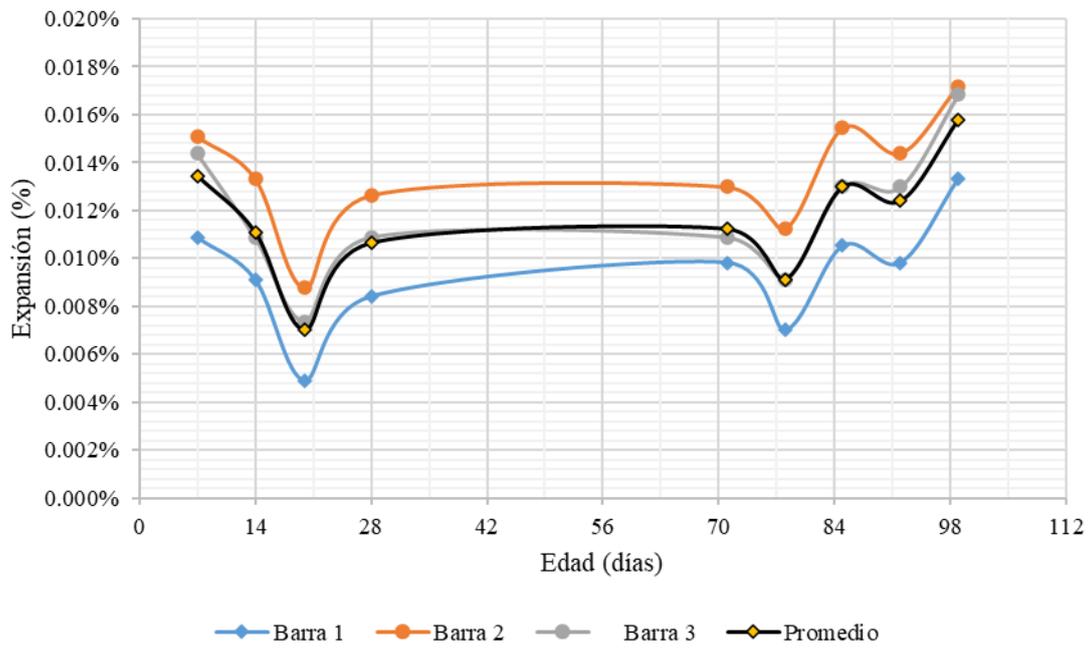
Resultados ensayo de expansión, concentración de 450 mg/L



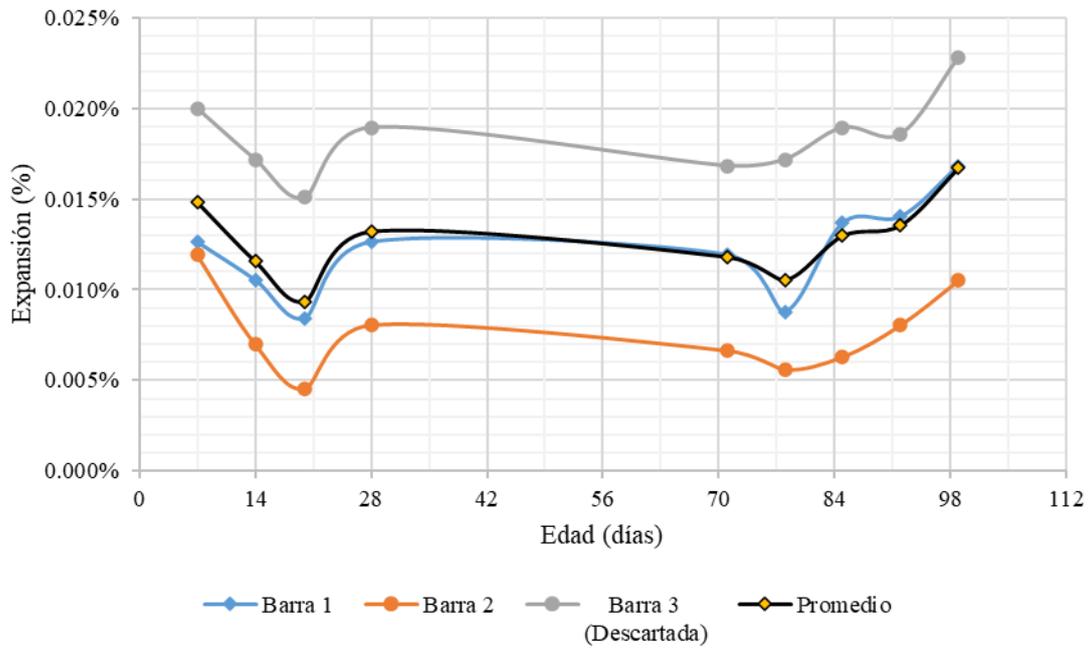
Resultados ensayo de expansión, concentración de 600 mg/L



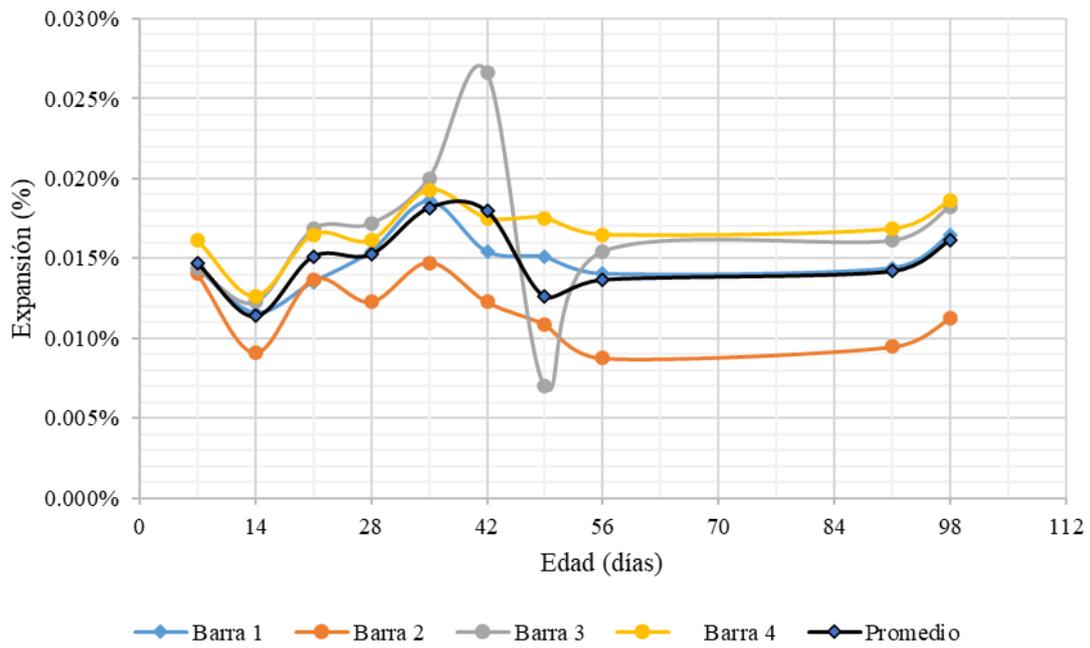
Resultados ensayo de expansión, concentración de 750 mg/L



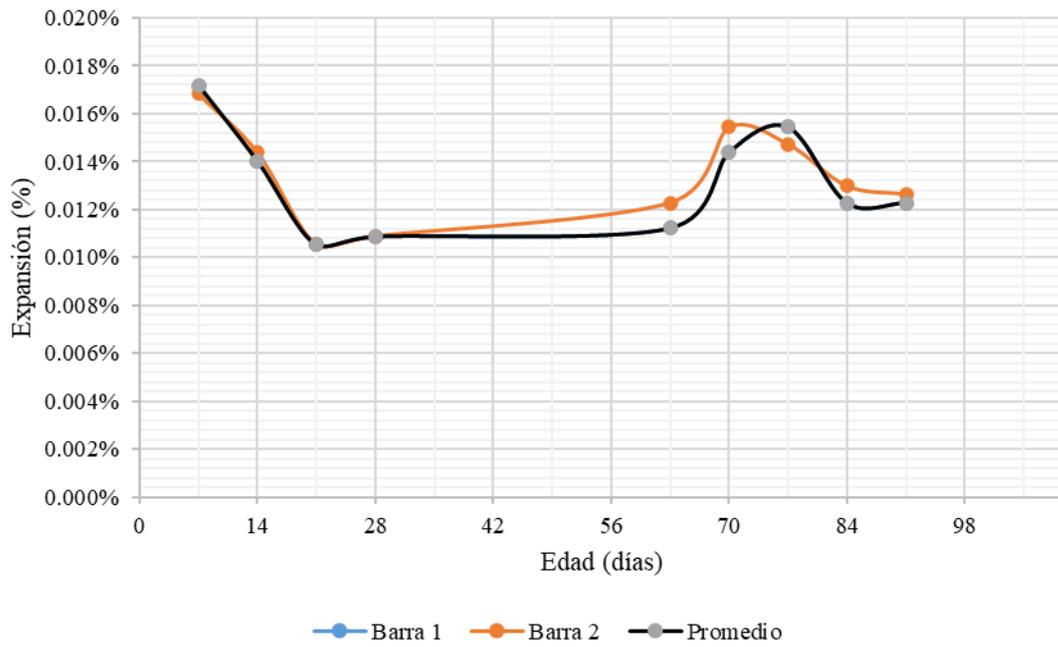
Resultados ensayo de expansión, concentración de 1,000 mg/L



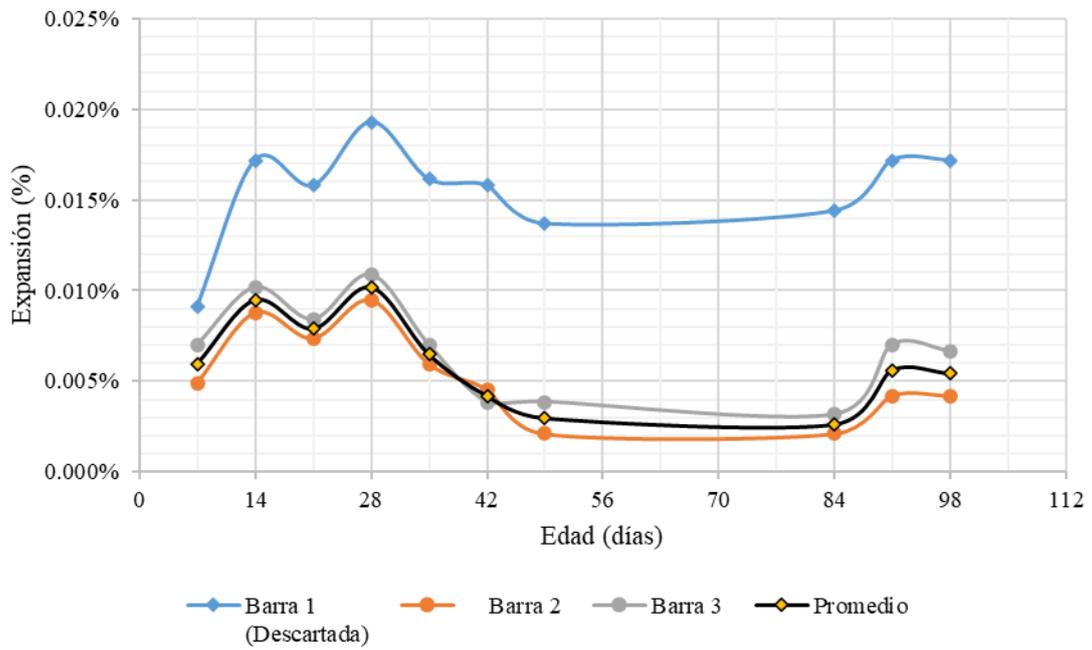
Resultados ensayo de expansión, concentración de 1,500 mg/L



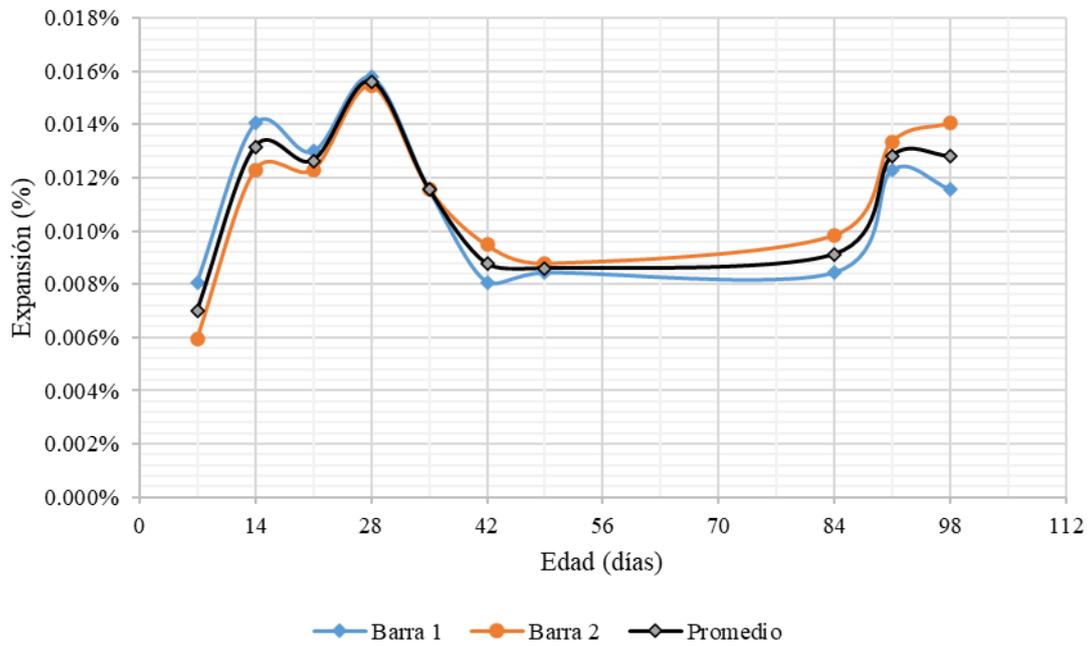
Resultados ensayo de expansión, concentración de 2,000 mg/L



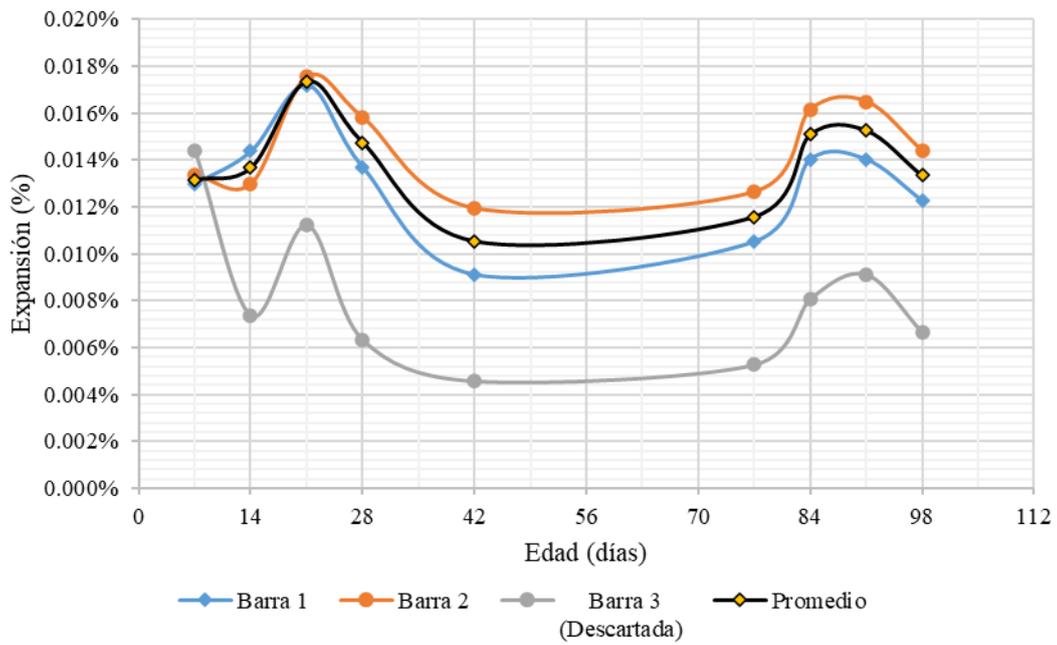
Resultados ensayo de expansión, concentración de 2,500 mg/L



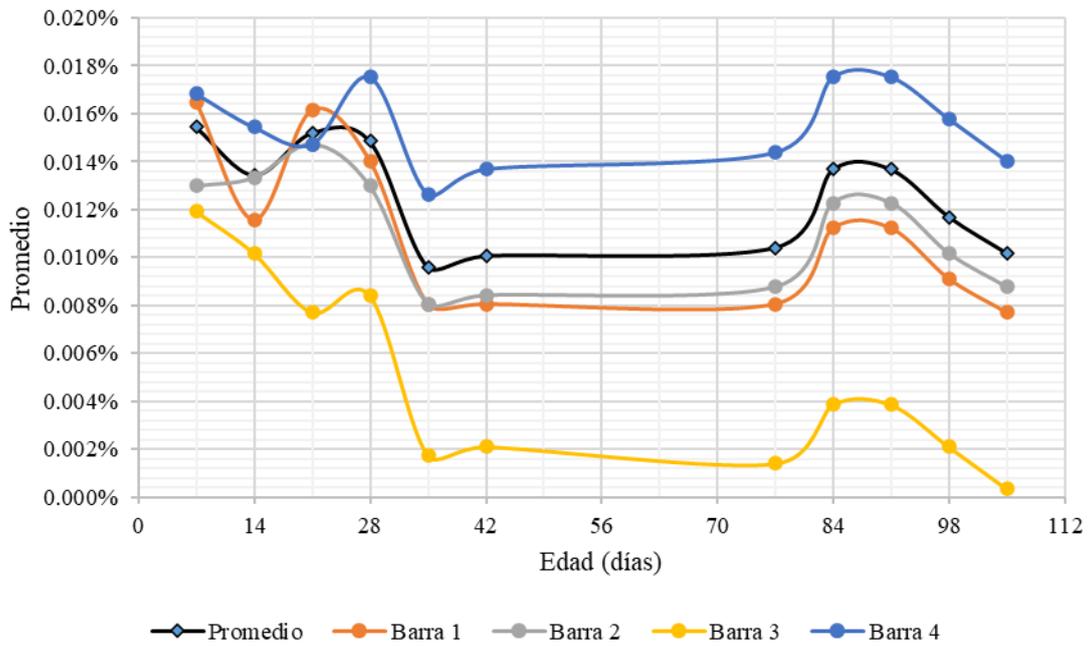
Resultados ensayo de expansión, concentración de 3,000 mg/L



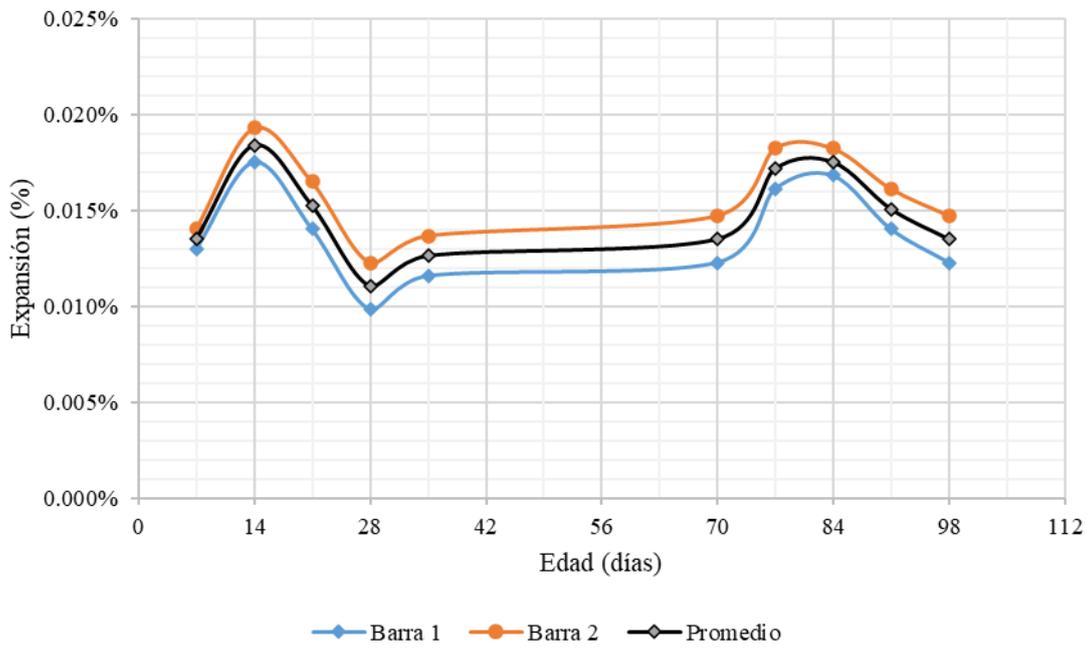
Resultados ensayo de expansión, concentración de 5,000 mg/L



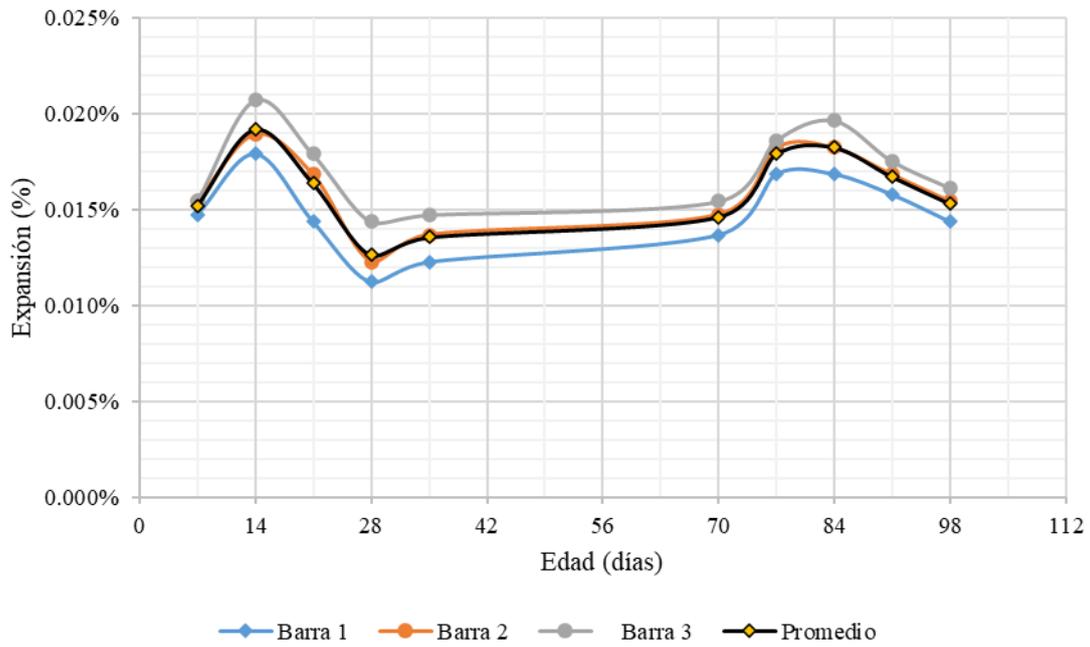
Resultados ensayo de expansión, concentración de 10,000 mg/L



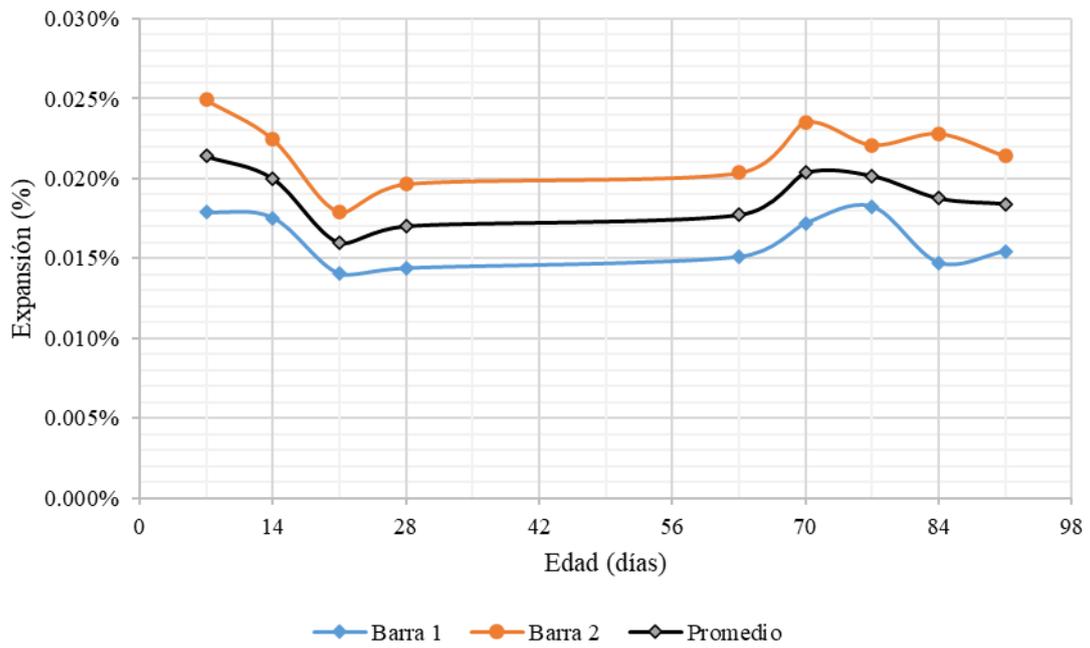
Resultados ensayo de expansión, concentración de 15,000 mg/L



Resultados ensayo de expansión, concentración de 20,000 mg/L



Resultados ensayo de expansión, concentración de 25,000 mg/L



Resultados ensayo de expansión, concentración de 30,000 mg/L