

DETERMINACIÓN DE CRITERIOS DE CALIDAD DE LECHADAS DE CEMENTO HIDRÁULICO  
ELABORADAS CON DIFERENTES DOSIFICACIONES PARA DUCTOS DE CONCRETO  
PRESFORZADO.

TRABAJO DIRIGIDO  
ÉNFASIS EN ESTRUCTURAS

PRESENTADO POR  
YUDY ADRIANA SALAMANCA CALDERÓN

DIRIGIDO POR  
ING. DANIEL SEBASTIÁN CORCHO RAMÍREZ

BOGOTA, D.C. 18 DE DICIEMBRE 2023

## Tabla de contenido

|  |    |
|--|----|
| Introducción .....                                 | 5  |
| 1.1. Antecedentes .....                            | 6  |
| 1.2. Objetivos .....                               | 8  |
| General .....                                      | 8  |
| Específicos .....                                  | 8  |
| 1.3. Contenido .....                               | 8  |
| 1.4. Marco teórico .....                           | 9  |
| Patologías en los ductos de acero presforzado..... | 10 |
| Diseño, elaboración y ensayos de las lechadas..... | 15 |
| 3.1. Diseño de mezclas .....                       | 15 |
| 3.2. Elaboración de mezclas .....                  | 17 |
| 3.3. Ensayos de las mezclas.....                   | 20 |
| 3.4. Resultados de ensayos.....                    | 26 |
| Análisis de criterios de calidad .....             | 36 |
| Bibliografía .....                                 | 47 |
| Anexos.....  | 48 |
| Anexo 1.....                                       | 48 |
| Anexo 2.....                                       | 60 |

## Tabla de ilustraciones

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1. Sistema pretensado. Fuente: <a href="https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images">https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images</a> .....  | 5  |
| Ilustración 2. Cubos de mortero para ensayos de compresión. Fuente: Propia .....  | 9  |
| Ilustración 3.Reacción catódica y anódica. Fuente: <a href="http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Chemical/imgche/corrosion.png">http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Chemical/imgche/corrosion.png</a> .....      | 12 |
| Ilustración 4.Puente Morandi en el 2012. Fuente:<br><a href="https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Genova_ponte_Morandi.jpg">https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Genova_ponte_Morandi.jpg</a> ..... | 13 |
| Ilustración 5. Colapso del viaducto de Morandi en Génova. Fuente:<br><a href="https://hdl.handle.net/11311/1102902">https://hdl.handle.net/11311/1102902</a> .....  | 14 |
| Ilustración 6. Instrumentos para la elaboración de mezcla. Fuente: Propia .....   | 18 |
| Ilustración 7. Tamizaje y pesado del cemento. Fuente: Propia .....  | 18 |
| Ilustración 8. Adición de cemento, agua y reposo de la unión. Fuente: Propia .....  | 19 |
| Ilustración 9. Retiro de los grumos de las paredes. Fuente: Propia.....   | 19 |
| Ilustración 10. Mezcla a velocidad alto. Fuente: Propia .....   | 20 |
| Ilustración 11. Ensayo de fluidez. Fuente: Propia .....   | 21 |
| Ilustración 12. Toma de lecturas de la lechada. Fuente: Propia .....  | 22 |
| Ilustración 13. Medición del volumen del agua de purga. Fuente: Propia .....  | 23 |
| Ilustración 14. Cubos para el ensayo de compresión.....   | 23 |
| Ilustración 15. Elaboración de cubos. Fuente: Propia.....   | 24 |
| Ilustración 16. Cubos en proceso de curado. Fuente: Propia .....  | 25 |
| Ilustración 17. Proceso de falla en la máquina de compresión. Fuente: Propia.....   | 25 |
| Ilustración 18. Gráfica de ensayo de fluidez. Fuente: Propia.....   | 37 |
| Ilustración 19. Relación entre el porcentaje de contracción en función del porcentaje de plastificante. Fuente: Propia .....  | 40 |
| Ilustración 20. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.45. Fuente: Propia .....   | 41 |
| Ilustración 21.Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.40. Fuente: Propia .....  | 42 |
| Ilustración 22. Falla de ensayo 19. Con relación A/C 0.35 a los 28 días. Fuente: Propia.....  | 42 |
| Ilustración 23. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.35. Fuente: Propia .....   | 43 |
| Ilustración 24.Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.30. Fuente: Propia .....  | 44 |
| Ilustración 25. Falla de ensayo 21. Con relación A/C 0.30 a los 28 días. Fuente: Propia.....  | 44 |
| Ilustración 26. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.40 con adición de arena. Fuente: Propia.....   | 45 |

## Tabla de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Cronograma de elaboración de mezclas y sus respectivos ensayos. Fuente: Propia.....                   | 16 |
| Tabla 2. Cantidad de mezclas por cada relación. Fuente: Propia .....   | 16 |
| Tabla 3. volúmenes requeridos para los ensayos. Fuente: Propia.....  | 17 |
| Tabla 4. Diseño de mezclas .....   | 26 |
| Tabla 5. Resultados de ensayo de fluidez. Fuente: Propia.....  | 28 |
| Tabla 6. Resultados de ensayo de exudación. Fuente: Propia .....   | 30 |
| Tabla 7. Resultados de ensayo de contracción y expansión. Fuente: Propia .....                                 | 32 |
| Tabla 8. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.45. Fuente: Propia .....                          | 33 |
| Tabla 9. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.40. Fuente: Propia .....                          | 34 |
| Tabla 10. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.35. Fuente: Propia .....                         | 34 |
| Tabla 11. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.30. Fuente: Propia .....                         | 35 |
| Tabla 12. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.40 con adición de arena. Fuente:<br>Propia ..... | 35 |
| Tabla 13. Ensayos que no cumplieron con el criterio de exudación .....   | 39 |

## Introducción

En Colombia, un país en pleno proceso de desarrollo se hace indispensable la implementación de proyectos de gran magnitud con el objetivo de optimizar los desplazamientos, impulsar la economía y disminuir los índices de pobreza. Estas iniciativas estratégicas demandan una infraestructura sólida, en donde se requieren construcción de gran envergadura. Este tipo de estructuras se encuentran sometidas a una serie de solicitaciones de gran magnitud, y que, debido a algunos criterios de diseño es necesario uso de cables de presfuerzo. El uso de estos cables de presfuerzo permiten garantizar una mayor capacidad de carga, una durabilidad prolongada, una resistencia excepcional, una reducción notable de las deflexiones y un rendimiento óptimo y eficiente en las construcciones, ya sean puentes, edificios, estructuras de contención o elementos prefabricados.

El proceso de diseño y construcción de estructuras pretensadas involucra un análisis detallado de cargas, materiales y la preparación del sitio, seguido de ello se lleva a cabo la instalación de los ductos, luego se insertan los torones dentro de los ductos y se procesa a tensorlos con ayuda de un gato en los extremos, posterior a ello se procede a inyectar los ductos con una lechada que debe cumplir ciertas características especificadas en el artículo 631 de INVIAS. Atendiendo la necesidad de generar una cobertura por medio de una lechada adecuada que garantice la integridad y la durabilidad de las estructuras pretensadas, se hace necesario realizar un estudio que detalle las patologías más comunes en los cables de presfuerzo y con base en esto se diseñarán lechadas que cumplan con los requerimientos establecidos en las normas vigentes, con el objetivo de prolongar la durabilidad de la estructura, optimizar su mantenimiento y mejorar la calidad de construcción en proyectos futuros.

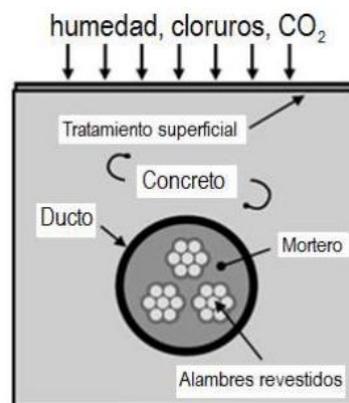


Ilustración 1. Sistema pretensado. Fuente:  
<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images>.

Los cables utilizados en la construcción de estructuras pretensadas tienen alta resistencia, sin embargo, presenta algunas deficiencias en cuanto a su comportamiento como lo es una baja ductilidad y, además, se le suma una alta susceptibilidad a la corrosión, que ocurre cuando los cables están expuestos a la humedad, a sustancias químicas corrosivas o a condiciones ambientales adversas, lo que resultará en la corrosión de los alambres de acero que forman los cables, debilitando su capacidad estructural. Otra de las problemáticas asociadas a estos aceros son el desgaste y la pérdida de fuerza o tensión debido al flujo plástico del concreto y relajación de los cables debido al tensionamiento constante de estos cables.

Por último, hacemos hincapié en que el tema de la corrosión y su efecto en la capacidad estructural representan desafíos significativos para el rendimiento de las estructuras. La aplicación de lechada se presenta como una medida crucial para mitigar estos problemas. A pesar de su importancia, la falta de recomendaciones específicas en los diseños de lechada y la ausencia de una guía de diseño estandarizada complican la implementación efectiva de esta solución, es por ello por lo que se destaca la necesidad de establecer pautas claras y específicas para el diseño de lechada, a fin de garantizar la durabilidad y eficiencia de las estructuras frente a la corrosión y sus consecuencias en la capacidad estructural.

### 1.1. Antecedentes

El uso del acero en estructuras de concreto ha cobrado gran importancia debido a sus propiedades mecánicas y su capacidad para resistir esfuerzos de tracción. El concreto, por sí solo, tiene una resistencia a la compresión mucho mayor que a la tracción (McKenzie, 2004). Sin embargo, el acero tiene una alta resistencia tanto a la tracción como a la compresión, lo que lo convierte en un material ideal para complementar al concreto y mejorar la resistencia total de la estructura.

En Colombia, los tipos de acero estructural usados en la industria de la construcción se clasifican dependiendo el uso típico del acero, la forma en que se fabrica y el esfuerzo a la fluencia (Matallana), esta clasificación se basa en los estándares internacionales de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales "ASTM" y son los siguientes: A36, A529, A572, A242, A588, A852 y A514. Cabe aclarar que esta clasificación también está relacionada con la composición química del acero, a esto nos referimos con el porcentaje de manganeso, silicio, cobre y principalmente de carbono; es aquí donde abarcamos el uso del acero denominado al carbón, que se caracteriza por tener como máximo el 1.7% de carbono en su composición.

Del mismo modo encontramos un acero denominado acero de presfuerzo donde generalmente el contenido de carbono varía entre 0.15% y 0.60%, este tipo de acero es utilizado en estructuras de concreto armado que requieren una resistencia a la tracción más alta que el acero convencional, aumento de la capacidad de carga de la estructura y mayor durabilidad a la estructura; Este tipo de acero consiste en el uso de cables de acero de alta resistencia de siete alambres, alambre de acero de alta resistencia, o barras de alta resistencia (INVIAS, 2007).

Por otro lado, se ha evidenciado en los últimos años el aumento de problemas relacionados con la corrosión en las estructuras que contienen acero de refuerzo (ACI, 2002), la exposición a condiciones ambientales adversas, como la humedad, puede ocasionar dichos problemas, lo que conlleva a una disminución en su resistencia mecánica. Esta corrosión genera varios efectos negativos en el comportamiento entre el acero y el concreto, uno de ellos se debe al incremento del volumen del acero debido a la expansión ocasionada por el óxido de hierro, que generan fisuras en el concreto. Del mismo modo esta corrosión puede generar disminución en la adherencia entre el acero y el concreto.

Generalmente los aceros de alta resistencia se componen de aleaciones con el manganeso, cromo, níquel, y bajo contenido de carbono. (AceroPedia, s.f.), estos elementos otorgan propiedades de resistencia y tenacidad, pero también generan una mayor susceptibilidad a la corrosión, esto debido a que reaccionan con el oxígeno y otros elementos presentes en el entorno y debilitan la capa protectora del acero de presfuerzo.

Para garantizar que los cables de presfuerzo no sufran de dicha patología y que mantengan sus condiciones de diseño se deben proteger mediante el llenado de los ductos con una mezcla de cemento y agua; estas mezclas en algunas ocasiones contienen agregados finos de tamaños máximos y mínimos definidos, así como también la utilización de aditivos que mejoren su comportamiento o propiedades mecánicas específicas, la cual debe ser diseñada según las especificaciones que se requieran en cada caso. Es aquí donde cobra importancia este trabajo dirigido puesto se pretende determinar los criterios de calidad de diferentes lechadas para ductos de concreto presforzado, teniendo en cuenta, la variación de sus componentes (relación agua/cemento, porcentaje de uso del plastificante y utilización de agregado fino).

Por último, el diseño adecuado de mezclas de lechada para llenado de ductos de concreto presforzado es fundamental para garantizar la integridad, seguridad y durabilidad de las estructuras presforzadas. La lechada protege y ancla los cables

presforzados, mejora el comportamiento estructural y asegura el cumplimiento de estándares de calidad y especificaciones técnicas, lo que resulta en construcciones más seguras y confiables en ingeniería civil.

## 1.2. Objetivos

### General

Determinar los criterios de calidad de lechadas de cemento hidráulico elaboradas con diferentes dosificaciones.

### Específicos

- ❖ Realizar un diagnóstico de las patologías que presentan los cables de acero de alta resistencia para concreto presforzado.
- ❖ Elaborar diferentes mezclas de lechadas para llenado de ductos de concreto presforzado, variando sus materiales y dosificaciones.
- ❖ Evaluar los criterios de calidad exigidos por el artículo 631 de las normas y especificaciones de diseño del INVIAS, de diferentes lechadas para ductos de concreto presforzado, elaboradas con diferentes materiales.

## 1.3. Contenido

Este documento se encuentra estructurado en cuatro capítulos en los cuales se abordará el tema de los criterios de calidad en la elaboración de lechadas para el uso en ductos de concreto presforzado. Iniciaremos en el primer capítulo con una breve introducción estableciendo los antecedentes, objetivos, el contenido del documento y el marco teórico.

Posterior a ello en el capítulo 2, se recopilarán datos de investigaciones y estudios ya realizados con respecto a las patologías más comunes presentadas en los aceros de prefuerzo como base en el establecimiento de los criterios de calidad.

En el tercer capítulo, con base en las normas y especificaciones del Invias 2012 y el libro de prácticas de laboratorio de materiales para obras de la ingeniería civil (Marfa Carolina Molano Camargo, 2017), se especificará el procedimiento para realizar mezclas de lechadas para llenado de ductos de concreto presforzado, variando las dosificaciones en cuanto a la relación agua cemento y plastificante, conjuntamente se ensayarán cada una de las mezclas anteriormente mencionadas.

Y por último en el capítulo 4 se evalúan y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de los ensayos por medio de un análisis profundo para determinar los criterios de calidad de lechadas de cemento en los ductos de concreto presforzado.



*Ilustración 2. Cubos de mortero para ensayos de compresión.  
Fuente: Propia*

#### 1.4. Marco teórico

El uso de terminologías como acero de alta resistencia, lechadas, variación en la relación agua cemento, fluidez, fraguado, contracción, expansión, compresión y exudación; son conceptos básicos necesarios para comprender la importancia de los aceros de alta resistencia en el desarrollo de estructuras más seguras y eficientes.

**Acero de alta resistencia**, es un tipo de acero que se caracteriza por tener propiedades mecánicas superiores a las del acero convencional. Este tipo de acero tiene una mayor resistencia a la tracción, lo que significa que puede soportar cargas más pesadas sin deformarse o romperse. Se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones en la industria, desde la construcción de edificios y puentes hasta la fabricación de vehículos y maquinaria pesada. Su uso permite reducir el peso de las estructuras y aumentar su resistencia, lo que resulta en diseños más eficientes y seguros.

**Lechada de cemento**, es un material utilizado en la construcción que consiste en una mezcla de cemento y agua, con la opción de añadir aditivos para mejorar sus propiedades. Esta mezcla tiene una consistencia parecida a la de una pasta fluida, lo cual permite su fácil aplicación sobre diferentes superficies.

La **Relación agua-cemento**, es una medida que se utiliza en el ámbito de la construcción para determinar la cantidad de agua necesaria para la hidratación del cemento en una mezcla de concreto. Es una relación inversa, es decir, a mayor cantidad de agua, menor será la resistencia final del concreto.

La importancia de controlar adecuadamente la relación agua-cemento radica en que afecta directamente las propiedades del concreto endurecido, como la resistencia, la durabilidad y la trabajabilidad. Una relación agua-cemento adecuada es fundamental para obtener un concreto de buena calidad y rendimiento.

La **fluidez** es la capacidad del material para fluir sin resistencia y llenar eficientemente los espacios entre las partículas, sin requerir una gran cantidad de vibración o compactación externa.

El **fraguado** es el proceso mediante el cual el cemento se solidifica y adquiere sus propiedades de resistencia. Durante el fraguado, el cemento pasa de un estado líquido a uno sólido.

La **contracción** es el fenómeno que ocurre cuando el cemento se seca y se reduce de volumen. Esta contracción puede causar grietas en las superficies donde se utiliza el cemento.

La **expansión** es el proceso contrario a la contracción, donde el cemento aumenta de volumen. Esto puede ocurrir debido a la absorción de agua o a reacciones químicas internas. La expansión puede también causar grietas y deformaciones en las estructuras de cemento.

La **compresión** se refiere a la resistencia del cemento a ser comprimido o presionado. Esta propiedad es esencial en estructuras que deben soportar cargas pesadas, ya que garantiza que el cemento no se rompa o colapse bajo presiones elevadas.

La **exudación** es un fenómeno que se produce durante el fraguado del cemento, en el cual el agua contenida en la mezcla de cemento y agua se separa y sube a la superficie. Esto puede causar problemas de acabado en las superficies de cemento, ya que deja manchas y una textura irregular.

## Patologías en los ductos de acero presforzado

En esta parte del capítulo se relacionarán las investigaciones y estudios realizados por varios autores que tratan las patologías presentadas en los aceros pretensados y el efecto negativo que estos fenómenos indeseados generan en la vida útil de la estructura, con ello nos referimos a un impacto en la durabilidad, capacidad de carga y resistencia de los diferentes tipos de estructuras.

A lo largo del tiempo se han realizado estudios que desmienten la teoría de que el acero pretensado no sufría de corrosión gracias a la inexistencia de fisuras por el pretensado, sin embargo, no es correcto afirmar esta conclusión ya que los tendones pretensados tienen un área de sección transversal relativamente pequeña bajo tensiones muy altas, siendo más susceptible a la posibilidad de volverse quebradizos (Podolny, 1992). Del mismo modo las estructuras en concreto pretensado tienden a tener menos grietas, pero las fallas estructurales son más graves, ya que, en este sentido, estamos hablando de fallas súbitas ocasionado por la reducción considerable de su capacidad de carga debido a la disminución del área de la sección transversal de los cordones pretensados corroídos (Li et al., 2011).

Dentro de las patologías presentadas en los aceros pretensados, se encuentra la corrosión, que es el deterioro de los cables de acero de alta resistencia debido a una reacción química o electroquímica ocasionada por la exposición a la humedad, agentes corrosivos como la lluvia, el agua salada, los productos químicos o la contaminación del aire.

En la propagación de la corrosión en las estructuras de concreto pretensado surgen dos tipos de reacciones electroquímicas, una llamada reacción catódica, se genera cuando hay una diferencia en el potencial electroquímico entre diferentes áreas del acero, esto puede deberse a diferentes concentraciones de oxígeno, pH o presencia de otros iones en el ambiente circundante. En este proceso, los iones de hierro positivos se reducen para formar hidróxido de hierro.

Por otro lado, la reacción anódica surge por la presencia de agua o humedad, en este caso los átomos de hierro en el acero se oxidan y pierden electrones, formando iones de hierro positivos que reaccionan con los electrones y el oxígeno del agua para formar hidróxido de hierro.

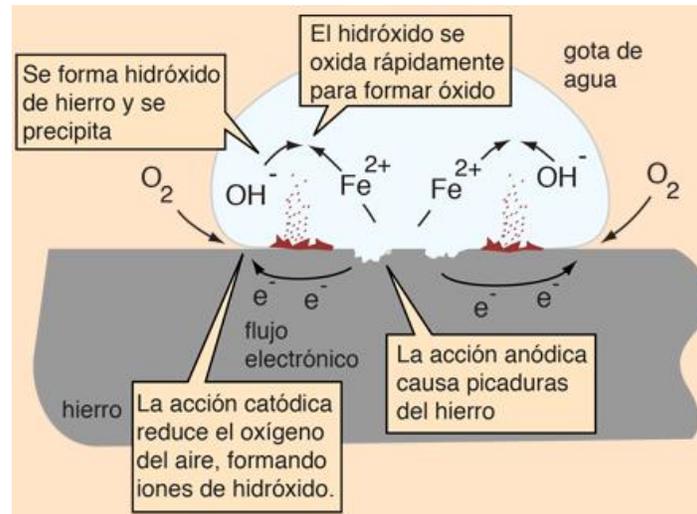


Ilustración 3. Reacción catódica y anódica.

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Chemical/imgche/corrosion.png>

A continuación, se presentarán algunos tipos de corrosión que afectan los aceros pretensados, entre ellos encontramos la corrosión uniforme, localizada, bajo tensión y otros.

### Corrosión uniforme

Es un tipo de corrosión en el cual la pérdida de metal ocurre de manera uniforme en toda la superficie expuesta del material formando una película continua, es reconocible fácilmente y ocurre cuando el acero sin protección se expone al medio ambiente (Podolny, 1992).

### Corrosión localizada

La corrosión localizada es un tipo de corrosión en el cual la pérdida de metal ocurre de forma localizada en áreas específicas de la superficie del material, lo que puede generar una falla repentina y frágil. (Podolny, 1992). Algunos ejemplos de esta son la corrosión por picaduras, la corrosión por fisuras y la corrosión por intergranularidad.

Dentro de las corrosiones mencionadas anteriormente la más frecuente y con mayor tasa de incidencia es la corrosión por picadura, en esta se producen puntos de concentraciones de tensiones en un pequeño volumen del material ocasionando falla en la estructura en poco tiempo, esta surge por la acumulación de agentes oxidantes y un incremento del PH del medio (Salazar, 2015).

## Corrosión bajo tensión

También conocida como SCC es un tipo de corrosión que produce agrietamiento como resultado de la combinación de un ambiente corrosivo y tensiones de tracción, lo que produce una discontinuidad o grietas en la superficie del metal. Este tipo de corrosión puede causar daños graves, ya que suele propagarse rápidamente y puede resultar en una falla frágil (Podolny, 1992).

## Fragilización por hidrógeno

El agrietamiento por fragilidad por hidrógeno del acero bajo tensión ocurre cuando el hidrógeno atómico penetra en la estructura metálica, donde se recombina en moléculas de hidrógeno, produciendo una presión interna en el metal (Podolny, 1992).

Hay otros tipos de corrosión como lo son por fricción ocasionada por el desgaste de la superficie en la que predomina la reacción química, por otro lado, tenemos la corrosión por grietas generada por la aparición de grietas debido al contacto entre el acero pretensado con otro cuerpo impermeable y por último la corrosión por corrientes parasitas como resultado de fugas eléctricas o por no proporcionar un aislamiento eléctrico positivo y permanente.

## Antecedentes

Uno de los antecedentes más conocidos de estructuras afectadas por la oxidación del refuerzo es el caso del puente de Morandi, en el puerto italiano de Génova. El 14 de agosto de 2018, una sección de este puente colapsó debido a un alto grado de oxidación de los cables de pretensado (Villani, 2019), resultando en la muerte de 43 personas. La corrosión acelerada del refuerzo en el puente, causada por ataques de agentes químicos y la falta de mantenimiento adecuado, fueron las principales causas del colapso. Y el 28 de junio de 2019 los restos del puente fueron demolidos para dar paso a la reconstrucción de un nuevo puente.



Ilustración 4. Puente Morandi en el 2012. Fuente: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Genova\\_ponte\\_Morandi.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Genova_ponte_Morandi.jpg)



Ilustración 5. Colapso del viaducto de Morandi en Génova. Fuente: <https://hdl.handle.net/11311/1102902>

Además, de la gran cantidad de consecuencias a nivel social y económico, que se generan debido al colapso de una estructura de gran importancia como los puentes, debemos tener presente que la demolición de estructuras antes de su vida útil proyectada genera un impacto ambiental muy significativo.

En el caso específico de Colombia se generan 22 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) (Castro, 2018) al año, que contribuyen a una disposición inadecuada de los mismos generando un impacto negativo en los ecosistemas, la biodiversidad y consigo contaminación de los suelos y el aire.

Esta afectación ambiental, no solo se presenta debido a la demolición o pérdida de funcionamiento de la estructura, sino que esta afectación debería tenerse en cuenta desde las etapas de producción de cada uno de los materiales utilizados en la construcción. viéndolo desde este punto de vista, es importante evaluar la afectación que trae al medio ambiente la industria cementera, que es parte fundamental en la construcción, ya que esta genera un alto porcentaje de los gases efecto invernadero. La producción de cemento requiere la calcinación de caliza, lo que libera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global.

Teniendo en cuenta lo anterior podemos concluir que se deben tener unos factores mínimos que contribuyan a mantener la integridad del acero de presfuerzo dentro de los ductos de concreto presfuerzo; esto es posible lograrlo por medio de un diseño adecuado de la lechada de cemento que impida el ingreso de agua o agentes corrosivos. Y con ello evitaremos situaciones como las que se presentaron en el puente de Morandi y reduciremos el impacto ambiental que se podría generar en una demolición o en un colapso.

## Diseño, elaboración y ensayos de las lechadas

La elaboración de mezclas de lechadas desempeña un papel fundamental en esta investigación, ya que se tiene como objetivo principal desarrollar una combinación específica de materiales que cumpla con los requisitos técnicos establecidos en el artículo 631-13 de las normas y especificaciones 2012 de INVIAS, necesarios para garantizar la integridad y durabilidad de estos sistemas de construcción especializados.

La calidad de la lechada debe cumplir con lo establecido en el numeral 631.5.2.2. de la norma mencionada anteriormente:

- La lechada deberá tener la máxima consistencia que sea compatible con la inyectabilidad. El valor de la **fluidez**, expresado por el tiempo que tarda en salir un litro de lechada (1 l) por el cono de Marsh, estará comprendido entre diecisiete y veinticinco segundos (17 s - 25 s).
- El valor de la **exudación**, medido en probeta cilíndrica, herméticamente cerrada, de diez centímetros (10 cm) de diámetro y diez centímetros (10 cm) de altura, no será superior al dos por ciento (2 %) a las tres (3) horas.
- La reducción de volumen o **contracción**, medida sobre la misma probeta, no será superior al dos por ciento (2 %). En cuanto a la expansión eventual, que se presenta cuando se utilizan aditivos destinados para tal fin, no podrá exceder del diez por ciento (10 %).
- La **resistencia a compresión** de la pasta no será inferior a treinta megapascales (30 MPa) o trescientos kilogramos por centímetro cuadrado (300 kg/cm<sup>2</sup>), a los veintiocho (28) días.

### 3.1. Diseño de mezclas

Para realizar un análisis y proponer los criterios de calidad de las lechadas de cemento para ductos de concreto presforzado es necesario realizar diferentes mezclas, en las que se modificara la relación agua-cemento, la dosificación del aditivo y por último la adición de arena. Es importante determinar la proporción entre el cemento, el agua y el aditivo en cada caso para cumplir con los criterios establecidos el artículo 631-13 de las normas y especificaciones 2012 de INVIAS. Para la realización de las mezclas de lechada de cemento hidráulico, necesarias para abordar los objetivos planteados en el documento, se planteó la realización de 3 mezclas por día, variando en cada una sus componentes. A continuación, se muestra el cronograma de actividades que se desarrollaron para el proyecto de investigación:

Tabla 1. Cronograma de elaboración de mezclas y sus respectivos ensayos. Fuente: Propia

| Descripción                   | Septiembre |   |   |   |   | Octubre |   |   |   |   | Noviembre |   |   |   |   |
|-------------------------------|------------|---|---|---|---|---------|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|
|                               | 1          | 2 | 3 | 4 | 5 | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <b>Elaboración de mezclas</b> |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Relación A/C 0.45             |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Relación A/C 0.40             |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Relación A/C 0.35             |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Relación A/C 0.30             |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Relación A/C 0.40 + Arena     |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| <b>Ensayos de mezclas</b>     |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Fluidez                       |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Exudación                     |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Contracción                   |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |
| Resistencia                   |            |   |   |   |   |         |   |   |   |   |           |   |   |   |   |

La determinación de la relación agua/cemento en el diseño es esencial para el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de la lechada. La variación de estas relaciones tiene como objetivo principal la evaluación experimental de aspectos claves como la fluidez, exudación, contracción y resistencia a la compresión de la mezcla. Por otro lado, la adición se busca que las partículas se distribuyan de manera óptima para mejorar la cohesión general de la mezcla, lo que a su vez incide positivamente en la resistencia y durabilidad de la lechada. En conjunto, la manipulación de estas variables contribuye a afinar las propiedades de la lechada, ajustándolas a los requisitos técnicos establecidos en el artículo 631-13 de las normas y especificaciones 2012 de INVIAS para optimizar el desempeño final de la lechada.

Las mezclas que se realizaron por cada relación se relacionan en la siguiente tabla

Tabla 2. Cantidad de mezclas por cada relación. Fuente: Propia

| Relación A/C | No de mezclas |
|--------------|---------------|
| 0.45         | 8             |
| 0.40         | 6             |
| 0.35         | 5             |
| 0.30         | 3             |
| 0.40 + arena | 3             |

Luego de establecer el cronograma de elaboración de mezclas se valida cual es el volumen requerido para realizar los ensayos de fluidez, exudación y compresión, como se muestra a continuación:

Tabla 3. volúmenes requeridos para los ensayos. Fuente: Propia

| Volumen de Mezcla             |      |
|-------------------------------|------|
| Exudación (mL)                | 800  |
| Fluidez (mL)                  | 1000 |
| Compresión                    |      |
| # Cubos                       | 9    |
| Vol. x cubo (mL)              | 125  |
| Vol. 9 Cubos (mL)             | 1125 |
| Vol. Total (mL)               | 1925 |
| Desperdicio                   | 15%  |
| Vol. Total + Desperdicio (mL) | 2214 |

Donde:

$$VT = V_{\text{exudación}} + V_{\text{compresión}}$$

$$VT = 800 \text{ ml} + 1125 \text{ ml}$$

El volumen de fluidez no se tiene en cuenta en el cálculo de volumen total requerido, debido se inicia con el ensayo de fluidez y este mismo volumen es usado para el ensayo de compresión (se funden 3 cubos por mezcla).

### 3.2. Elaboración de mezclas

Para la elaboración de las mezclas se tiene como documento de referencia el libro de Prácticas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil de las ingenieras Marfa Carolina Molano Camargo y Nancy Torres Castellanos, específicamente el capítulo 5. "Ensayos en el mortero".

Por otra parte, los materiales para la lechada son los siguientes:

- Cemento uso estructural Argos, este nos proporciona altas resistencias a edades iniciales y finales, es importante validar que este no puede contener aglomeraciones de material, en este caso se utiliza el tamiz N°16 para retenerlos.
- Agua, deberá ser limpia, libre de aceites, tierra, materia orgánica, azúcar, sedimentos, sales, álcalis, ácidos y cualquier otra sustancia que pueda afectar la calidad, resistencia y/o durabilidad de las obras (INVIAS, 2012).

- Plastificante Plastol 7000 Toxement, lo utilizamos para proveerle al mortero mayor manejabilidad, plasticidad e incrementar la resistencia a edades tempranas.
- Arena de rio, esta debe pasar en su totalidad el tamiz N°30 y no debe contener partículas que pasen el tamiz N° 200.

Los instrumentos para la realización de la mezcla son los siguientes:

- Mezcladora
- Recipiente de mezcla
- Paleta mezcladora
- Espátula
- Tamiz N°16, 30 y 200



Ilustración 6. Instrumentos para la elaboración de mezcla. Fuente: Propia

El procedimiento es el siguiente:

1. Se pesa la cantidad de cemento, agua y/o aditivo requerido para cada mezcla.



Ilustración 7. Tamizaje y pesado del cemento. Fuente: Propia

2. Se humedece el recipiente de mezcla y la paleta mezcladora

3. Se agrega el cemento al recipiente y luego se agrega el agua, luego se esperan 60 segundos mientras el agua es absorbida por el cemento. En caso de agregarle plastificante este debe ser agregado y mezclado previamente con el agua.



*Ilustración 8. Adición de cemento, agua y reposo de la unión. Fuente: Propia*

4. Se inicia el mezclado entre el cemento y el agua por 10 segundos a velocidad baja y luego por 50 segundos a velocidad alta.
5. Se detiene la mezcladora y retiran los grumos del fondo y de las paredes con ayuda de la espátula.



*Ilustración 9. Retiro de los grumos de las paredes. Fuente: Propia*

6. Se enciende nuevamente la mezcladora y se completa el mezclado con una velocidad alta por 180 segundos más.

Dentro de la especificación de las normas invias ya mencionada, se estable que el tiempo mínimo de mezclado no puede ser menor de 4 minutos, con el objetivo de obtener una mezcla uniforme.



*Ilustración 10. Mezcla a velocidad alto. Fuente: Propia*

### 3.3. Ensayos de las mezclas

Por medio de los ensayos de fluidez, exudación, contracción, fraguado y la resistencia a compresión se determinará si la lechada cumple con los requerimientos establecidos en las normas Invias, a continuación, se hablará de cada uno de los ensayos.

#### **Ensayo de fluidez**

En cuanto a la fluidez se determina en cada una de las mezclas para validar que la lechada tenga la capacidad de desplazarse de manera uniforme y sin problema alguno, con esto nos referimos que en momento en el que la mezcla sea inyectada en los ductos de concreto presforzado no queden espacios vacíos y se tenga del mismo modo una manejabilidad optima.

Este ensayo consta de pasar la lechada previamente mezclada por el cono Marsh, el tiempo de salida de la lechada está comprendido en la norma entre 17 a 25 s para 1 litro de lechada, con el fin de que cumpla con la calidad de la lechada.

Los materiales e instrumentos son los siguientes:

- Cono Marsh
- Lechada previamente mezclada
- Vaso de precipitado de 1000 ml
- Cronometro

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Humedecer las paredes del cono previamente.
2. Tapar el orificio de salida del cono y verter lentamente (para no inducir burbujas de aire dentro del cono) la lechada dentro del cono Marsh hasta donde lo indique la graduación de este.

3. Simultáneamente tomar el tiempo con el cronometro desde que inicie la salida de la lechada hasta que complete 1 litro de lechada medida en el vaso de precipitado.



Ilustración 11. Ensayo de fluidez. Fuente: Propia

Es importante en este ensayo que el cono este verticalmente como se evidencia en la ilustración 9, y el tiempo de salida se debe indicar en intervalos de 0.5 s.

### Ensayo de exudación

La exudación del mismo modo se determina en cada mezcla con el fin conocer el volumen de agua separada de la lechada en estado fresco, que asciende a la superficie de la mezcla. Dentro de la norma, la exudación no debe ser superior al 2% medido en un periodo de tres horas.

Los materiales e instrumentos son los siguientes:

- Lechada previamente mezclada
- Vaso de precipitado de 1000 ml
- Cronometro

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Graduar el vaso de precipitado indicando el volumen de 800 ml.
2. Humedecer las paredes del vaso de precipitado previamente.
3. Verter la mezcla en el vaso de precipitado hasta los 800 ml.
4. Visualmente tomar lecturas de la superficie de la lechada y del agua exudada.

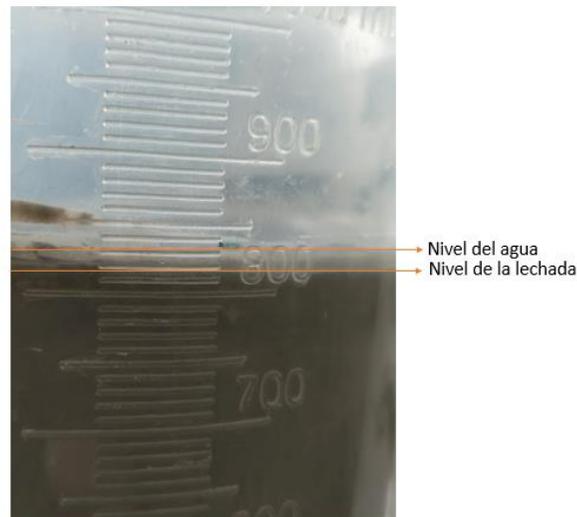


Ilustración 12. Toma de lecturas de la lechada. Fuente: Propia

5. Realizar lecturas del nivel del agua y de la lechada durante la primera hora cada 15 minutos, y luego cada hora hasta completar 3 horas de lecturas.

### Ensayo de contracción

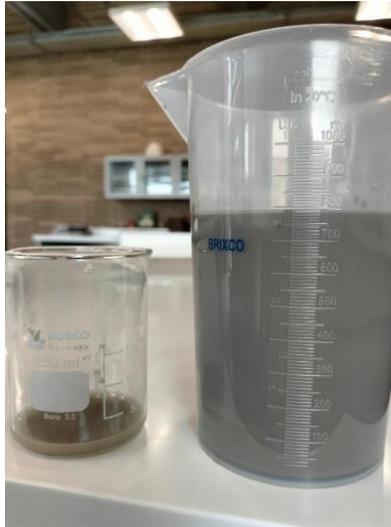
La contracción o expansión se determinan en cada mezcla con el fin evaluar la capacidad de la lechada para resistir la contracción o el encogimiento durante el fraguado y secado de esta. Dentro de la norma, la contracción no debe ser superior al 2% y cuando se hace uso de aditivos la expansión no puede ser superior al 10%.

Los materiales e instrumentos son los siguientes:

- Lechada previamente mezclada
- Vaso de precipitado de 1000 ml
- Pipeta

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Luego de finalizar el ensayo de exudación se pipetea el agua de purga presente en la mezcla y se toma la lectura del volumen final.



*Ilustración 13. Medición del volumen del agua de purga. Fuente: Propia*

### **Resistencia a compresión**

La resistencia a la compresión es una propiedad importante de cuantificar cuando la lechada ya está en estado endurecido, debido a que nos indica la resistencia de la lechada a fallar bajo una carga externa aplicada axialmente.

En este ensayo se usarán cubos de 500 mm de lado, con el fin de fallarlos en un periodo de 3,7 y 28 días. Cada mezcla contará con 3 cubos en cada edad de ensayo, es decir que por mezcla se realizaran 9 cubos.



*Ilustración 14. Cubos para el ensayo de compresión.*

Los materiales e instrumentos son los siguientes:

- Lechada previamente mezclada
- Recipiente de mezcla
- Moldes cúbicos

- Espátula
- Máquina de ensayos para evaluar la resistencia a la compresión
- Tasa plástica de almacenamiento
- Agua
- Calibrador o pie de rey

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Engrasar los moldes cúbicos con aceite mineral previamente al llenado con mezcla.
2. Verter la mezcla en cuatro capas dentro de los moldes cúbicos, asegurarse de que el llenado sea uniforme.
3. Para eliminar burbujas de aire atrapadas se compactan las capas por medio de un vibrado manual de los moldes, debido a que la mezcla es muy fluida no se utiliza el compactador.
4. Se enrasa la superficie de los cubos con ayuda de la espátula.



*Ilustración 15. Elaboración de cubos. Fuente: Propia*

5. Pasadas 24 horas se realiza el desencofrado de los cubos, se deben retirar con cuidado de los moldes para evitar que se desportillen los cubos.
6. Se marcan los cubos con el numero de la mezcla.
7. Se inicia el proceso de curado por medio del almacenamiento de los cubos desde el desencofrado hasta el día del ensayo en la máquina de compresión.
8. Se retiran los cubos del tanque de almacenamiento.



Ilustración 16. Cubos en proceso de curado. Fuente: Propia

9. Se toman las dimensiones de la cara que va a recibir la carga a compresión (con ayuda del calibrador), esto con el fin de determinar el área de la cara.
10. Se fallan los cubos en la máquina de compresión y se toma la lectura de la carga en kg.



Ilustración 17. Proceso de falla en la máquina de compresión. Fuente: Propia

### 3.4. Resultados de ensayos.

A continuación, se resume el programa experimental planteado para el proyecto de investigación, en el cual se tuvo en cuenta una variación en la relación agua/cemento, el porcentaje de utilización del plastificante y la evaluación de las propiedades de lechadas agregando arena:

Tabla 4. Diseño de mezclas

|    | Relación A/C | Cemento (kg) | Agua (kg) | Plastificante (gr) | Arena (Kg) |
|----|--------------|--------------|-----------|--------------------|------------|
| 1  | 0.45         | 2.90         | 1.305     |                    | -          |
| 2  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 23.20              | -          |
| 3  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 17.40              | -          |
| 4  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 11.60              | -          |
| 5  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 5.80               | -          |
| 6  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 3.48               | -          |
| 7  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 2.32               | -          |
| 8  | 0.45         | 2.90         | 1.305     | 1.16               | -          |
| 9  | 0.40         | 3.10         | 1.240     | 0.00               | -          |
| 10 | 0.40         | 3.10         | 1.240     | 1.24               | -          |
| 11 | 0.40         | 3.10         | 1.240     | 2.48               | -          |
| 12 | 0.40         | 3.10         | 1.240     | 3.72               | -          |
| 13 | 0.40         | 3.10         | 1.240     | 6.20               | -          |
| 14 | 0.40         | 3.10         | 1.240     | 7.44               | -          |
| 15 | 0.35         | 3.30         | 1.155     | 0.00               | -          |
| 16 | 0.35         | 3.30         | 1.155     | 6.60               | -          |
| 17 | 0.35         | 3.30         | 1.155     | 13.20              | -          |
| 18 | 0.35         | 3.30         | 1.155     | 9.27               | -          |
| 19 | 0.35         | 3.30         | 1.155     | 7.92               | -          |
| 20 | 0.30         | 3.50         | 1.050     | 0.00               | -          |
| 21 | 0.30         | 3.50         | 1.050     | 14.00              | -          |
| 22 | 0.30         | 3.50         | 1.050     | 28.00              | -          |
| 23 | 0.40         | 2.74         | 1.102     | -                  | 0.547      |
| 24 | 0.40         | 2.61         | 1.056     | -                  | 0.783      |
| 25 | 0.40         | 2.88         | 1.153     | -                  | 0.287      |

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de fluidez, exudación, contracción y compresión para cada una de las mezclas.

## Fluidez

La siguiente tabla presenta los resultados del ensayo fluidez incluyendo la relación de agua/cemento de cada mezcla, junto con el porcentaje de plastificante Plastol 7000 y el tiempo en segundos de la salida de la mezcla por el cono Marsh hasta completar 1 litro de lechada, y por último la verificación si cumple o no con los criterios establecidos en el artículo 631 de Invias.

Dentro de las 25 mezclas realizadas, se establecieron 4 diferentes tipos de relaciones de agua cemento empezando con 0.45, 0.40, 0.35 y 0.30. Respecto a estas últimas dos relaciones, no fue posible determinar su fluidez, ya que, la consistencia de esta impedía el paso a través del cono Marsh; es importante resaltar que para este caso no se utilizó el plastificante. La causa principal por la cual no fue posible determinar la fluidez de estas lechadas es debido al aumento de la cantidad de cemento y la disminución en la cantidad de agua. Se agregó plastificante que varía entre el 0.04% hasta el 0.80% del peso del cemento, sin embargo, la recomendación del fabricante "Toxement" nos indica que la dosificación debe variar en dosis de 0.15% a 0.8% del peso del cemento.

Tabla 5. Resultados de ensayo de fluidez. Fuente: Propia

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| Casa del cemento   | Argos  |                          |
| Tipo de cemento  | Uso estructural  |                          |

Ensayo de fluidez

|                       |      |      |
|-----------------------|------|------|
| Volumen de la muestra | 1000 | [mL] |
|-----------------------|------|------|

| Ensayo | Fecha      | Hora     | Relación A/C | Plastificante | Tiempo          | Cumple    |
|--------|------------|----------|--------------|---------------|-----------------|-----------|
| N°     | d/m/a      | mm/ss    | [ml]         | %             | [s]             | S/N       |
| 1      | 04/09/2023 | 10:00 am | 0.45         | 0.00%         | 59.68           | No cumple |
| 2      | 12/09/2023 | 02:35 pm | 0.45         | 0.80%         | 8.49            | No cumple |
| 3      | 12/09/2023 | 02:52 pm | 0.45         | 0.60%         | 9.41            | No cumple |
| 4      | 12/09/2023 | 03:30 pm | 0.45         | 0.40%         | 9.75            | No cumple |
| 5      | 18/09/2023 | 09:30 pm | 0.45         | 0.20%         | 10.46           | No cumple |
| 6      | 18/09/2023 | 10:05 am | 0.45         | 0.12%         | 13.48           | No cumple |
| 7      | 18/09/2023 | 10:30 am | 0.45         | 0.08%         | 12.34           | No cumple |
| 8      | 19/09/2023 | 02:07 pm | 0.45         | 0.04%         | 14.85           | No cumple |
| 9      | 19/09/2023 | 02:35 pm | 0.40         | 0.00%         | 86.24           | No cumple |
| 10     | 19/09/2023 | 03:00 pm | 0.40         | 0.04%         | 52.09           | No cumple |
| 11     | 25/09/2023 | 09:40 am | 0.40         | 0.08%         | 45.16           | No cumple |
| 12     | 25/09/2023 | 10:15 am | 0.40         | 0.12%         | 29.82           | No cumple |
| 13     | 25/09/2023 | 10:35 am | 0.40         | 0.20%         | 19.45           | Cumple    |
| 14     | 26/09/2023 | 03:10 pm | 0.40         | 0.24%         | 13.50           | No cumple |
| 15     | 26/09/2023 | 03:30 pm | 0.35         | 0.00%         | No se determino | No cumple |
| 16     | 26/09/2023 | 03:50 pm | 0.35         | 0.20%         | 117.24          | No cumple |
| 17     | 03/10/2023 | 02:40 pm | 0.35         | 0.40%         | 16.29           | No cumple |
| 18     | 03/10/2023 | 03:10 pm | 0.35         | 0.28%         | 19.74           | Cumple    |
| 19     | 03/10/2023 | 03:45 pm | 0.35         | 0.24%         | 49.89           | No cumple |
| 20     | 17/10/2023 | 02:40 pm | 0.30         | 0.00%         | No se determino | No cumple |
| 21     | 17/10/2023 | 02:50 pm | 0.30         | 0.40%         | 114.66          | No cumple |
| 22     | 17/10/2023 | 03:10 pm | 0.30         | 0.80%         | 32.67           | No cumple |
| 23     | 30/10/2023 | 12:25 pm | 0.40         | -             | 47.26           | No cumple |
| 24     | 30/10/2023 | 01:20 pm | 0.40         | -             | 70.25           | No cumple |
| 25     | 30/10/2023 | 01:50 pm | 0.40         | -             | 45.55           | No cumple |

## Exudación

La siguiente tabla presenta los resultados del ensayo de exudación a las tres horas, incluyendo la relación agua/cemento, la cantidad de plastificante utilizado, el volumen de exudación final y el porcentaje correspondiente. Estos datos son esenciales para evaluar la capacidad de la lechada para liberar agua durante el proceso de fraguado. La importancia radica en que la exudación puede afectar la calidad del concreto y su resistencia final. El cumplimiento de los requisitos establecidos en el artículo 631 de Invias indica la idoneidad de la mezcla, mientras que las desviaciones señalan posibles ajustes necesarios en la proporción del agua, el cemento o del plastificante. Cabe aclarar que en el anexo 1. se pueden validar las lecturas por intervalos realizadas cada 15 minutos durante la primera hora, y luego lecturas a las dos y tres horas.



## Contracción

La siguiente tabla presenta información detallada sobre el ensayo de contracción, incluyendo la fecha de cada prueba, la relación agua/cemento, el porcentaje de plastificante utilizado, el volumen de agua de purga y el porcentaje de contracción resultante. Esta información es crucial para evaluar la capacidad de la lechada para contraerse durante el proceso de fraguado. La contracción puede afectar directamente la durabilidad y estabilidad del concreto final. El cumplimiento o incumplimiento de los requisitos establecidos en el artículo 631 de Invias en cuanto a la contracción proporciona información valiosa sobre la calidad de la mezcla y ayuda a determinar si son necesarios ajustes en la proporción del agua, el cemento o del plastificante.

En el ensayo de contracción o expansión eventual se presenta el volumen de exudación tomada con la pipeta graduada que corresponde al volumen de agua de purga decantada, calculada de la siguiente manera.

$$\% \text{ de contracción} = \frac{V_w}{V_1} * 100$$

Donde,

$V_w$ , es el volumen de agua de purga decantada

$V_1$ , es el volumen inicial de lechada

El ensayo número 22, diseñado con una relación de 0.3 y un 0.8% de plastificante en relación con el peso del cemento, presenta una anomalía en comparación con las demás mezclas. En este caso particular, no fue posible determinar el porcentaje de contracción, ya que no se observó exudación de agua. Sin embargo, la mezcla mantiene su fluidez sin haber experimentado endurecimiento. Podemos describir esta situación como una "retardo de fraguado". En este contexto, se puede inferir que el plastificante pudo haber retardado el proceso de endurecimiento de la lechada, permitiendo que la mezcla conserve su fluidez de manera temporal antes de alcanzar una fase más rígida y resistente.

Tabla 7. Resultados de ensayo de contracción y expansión. Fuente: Propia

| <br>UNIVERSIDAD |            | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado |               |                          | Norma y especificaciones  |           |
|--|------------|--|---------------|--------------------------|---------------------------|-----------|
|  |            |  |               |                          | Art. 631 de INVIAS        |           |
| Casa del cemento   |            | Argos  |               |                          |                           |           |
| Tipo de cemento  |            | Uso estructural  |               |                          |                           |           |
| Ensayo de contracción  |            |  |               |                          |                           |           |
| Volumen de la lechada  |            | 800  | [ml]          |                          |                           |           |
| Ensayo   | Fecha      | Relación A/C   | Plastificante | Volumen de agua de purga | Porcentaje de contracción | Cumple    |
| N°   | d/m/a      | [ml]   | %             | [ml]                     | %                         | S/N       |
| 1  | 04/09/2023 | 0.45   | 0.00%         | 9.5                      | 1.2%                      | Cumple    |
| 2  | 12/09/2023 | 0.45   | 0.80%         | 350.0                    | 43.8%                     | No cumple |
| 3  | 12/09/2023 | 0.45   | 0.60%         | 330.0                    | 41.3%                     | No cumple |
| 4  | 12/09/2023 | 0.45   | 0.40%         | 290.0                    | 36.3%                     | No cumple |
| 5  | 18/09/2023 | 0.45   | 0.20%         | 10.5                     | 1.3%                      | Cumple    |
| 6  | 18/09/2023 | 0.45   | 0.12%         | 14.0                     | 1.8%                      | Cumple    |
| 7  | 18/09/2023 | 0.45   | 0.08%         | 15.6                     | 2.0%                      | Cumple    |
| 8  | 19/09/2023 | 0.45   | 0.04%         | 14.2                     | 1.8%                      | Cumple    |
| 9  | 19/09/2023 | 0.40   | 0.00%         | 3.8                      | 0.5%                      | Cumple    |
| 10   | 19/09/2023 | 0.40   | 0.04%         | 5.1                      | 0.6%                      | Cumple    |
| 11   | 25/09/2023 | 0.40   | 0.08%         | 8.5                      | 1.1%                      | Cumple    |
| 12   | 25/09/2023 | 0.40   | 0.12%         | 9.8                      | 1.2%                      | Cumple    |
| 13   | 25/09/2023 | 0.40   | 0.20%         | 3.4                      | 0.4%                      | Cumple    |
| 14   | 26/09/2023 | 0.40   | 0.24%         | 9.2                      | 1.2%                      | Cumple    |
| 15   | 26/09/2023 | 0.35   | 0.00%         | 0.0                      | 0.0%                      | Cumple    |
| 16   | 26/09/2023 | 0.35   | 0.20%         | 4.2                      | 0.5%                      | Cumple    |
| 17   | 03/10/2023 | 0.35   | 0.40%         | 3.9                      | 0.5%                      | Cumple    |
| 18   | 03/10/2023 | 0.35   | 0.28%         | 0.0                      | 0.0%                      | Cumple    |
| 19   | 03/10/2023 | 0.35   | 0.24%         | 3.7                      | 0.5%                      | Cumple    |
| 20   | 17/10/2023 | 0.30   | 0.00%         | 0.0                      | 0.0%                      | Cumple    |
| 21   | 17/10/2023 | 0.30   | 0.40%         | 0.0                      | 0.0%                      | Cumple    |
| 22   | 17/10/2023 | 0.30   | 0.80%         | No se determino          |                           |           |
| 23   | 30/10/2023 | 0.40   | -             | 10.2                     | 1.3%                      | Cumple    |
| 24   | 30/10/2023 | 0.40   | -             | 3.4                      | 0.4%                      | Cumple    |
| 25   | 30/10/2023 | 0.40   | -             | 5.7                      | 0.7%                      | Cumple    |

## Compresión

Y finalmente la siguiente tabla proporciona un resumen de los resultados del ensayo de compresión para mezclas con una relación agua/cemento de 0.45, 0.40, 0.35, 0.30 y 0.40 con la adición de arena. Se muestra la evolución del esfuerzo en megapascales (MPa) en diferentes días de curado (0, 3, 7 y 28 días). Estos datos son cruciales para evaluar la resistencia a la compresión de las mezclas de concreto bajo condiciones específicas de proporciones de agua y cemento, así como niveles variables de plastificante y el cambio con la adición de arena bajo solo la relación 0.40 de agua/cemento. La información es esencial para entender cómo estas variables afectan la resistencia mecánica de la lechada en diferentes etapas de curado.

La información presentada en la tabla corresponde a promedios obtenidos a partir de tres cubos realizados en condiciones similares. Cada valor refleja la media de los resultados individuales de esfuerzo en megapascales en distintos días de curado para mezclas con diferentes relaciones de agua/cemento y diferentes porcentajes de plastificante. Y los datos de cada uno de los cubos con sus respectivas áreas y esfuerzos se adjuntan al final del documento en el anexo 2.

Tabla 8. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.45. Fuente: Propia

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| Casa del cemento   | Argos  |                          |
| Tipo de cemento  | Uso estructural  |                          |

### Ensayo de compresión resumen de relación A/C 0.45

| Ensayo: | 1     | 8     | 7     | 6     | 5     | 4     | 3     | 2     |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| % Plast | 0.00% | 0.04% | 0.08% | 0.12% | 0.20% | 0.40% | 0.60% | 0.80% |

| Días | Esfuerzo |       |       |       |       |       |       |       |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | [MPa]    |       |       |       |       |       |       |       |
| 0    | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 3    | 32.18    | 37.83 | 44.08 | 42.69 | 47.16 | 42.59 | 72.37 | 73.72 |
| 7    | 34.67    | 50.06 | 52.85 | 38.78 | 48.98 | 55.41 | 59.89 | 84.21 |
| 28   | 52.99    | 64.77 | 53.67 | 52.05 | 64.77 | 59.58 | 74.46 | 84.75 |

Tabla 9. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.40. Fuente: Propia

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| <b>Casa del cemento</b>  | Argos  |                          |
| <b>Tipo de cemento</b>   | Uso estructural  |                          |

**Ensayo de compresión resumen de relación A/C 0.40**

|         |      |       |       |       |       |       |
|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ensayo: | 9    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    |
| % Plast | 0.0% | 0.04% | 0.08% | 0.12% | 0.20% | 0.24% |

| Días | Esfuerzo |       |       |       |       |       |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | [MPa]    |       |       |       |       |       |
| 0    | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 7    | 48.36    | 56.02 | 46.94 | 60.92 | 61.60 | 61.09 |
| 14   | 60.02    | 64.01 | 61.02 | 65.38 | 68.06 | 60.90 |
| 28   | 63.17    | 52.91 | 58.51 | 76.42 | 63.52 | 65.79 |

Tabla 10. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.35. Fuente: Propia

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| <b>Casa del cemento</b>  | Argos  |                          |
| <b>Tipo de cemento</b>   | Uso estructural  |                          |

**Ensayo de compresión resumen de relación A/C 0.35**

|         |       |       |       |       |       |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ensayo: | 15    | 16    | 19    | 18    | 17    |
| % Plast | 0.00% | 0.20% | 0.24% | 0.28% | 0.40% |

| Días | Esfuerzo |       |       |       |       |
|------|----------|-------|-------|-------|-------|
|      | [MPa]    |       |       |       |       |
| 0    | 0        | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 7    | 63.63    | 67.68 | 72.48 | 66.79 | 76.78 |
| 15   | 56.58    | 82.79 | 82.36 | 75.16 | 90.61 |
| 29   | 69.92    | 71.48 | 79.59 | 83.82 | 94.50 |

Tabla 11. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.30. Fuente: Propia

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| Casa del cemento   | Argos  |                          |
| Tipo de cemento  | Uso estructural  |                          |

Ensayo de compresión resumen de relación A/C 0.30

|               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| Ensayo: 20    | Ensayo: 21    | Ensayo: 22    |
| % Plast 0.00% | % Plast 0.40% | % Plast 0.80% |

| Días | Esfuerzo (MPa)* | Días | Esfuerzo (MPa)* | Días | Esfuerzo (MPa)* |
|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|
| 0    | 0               | 0    | 0               | 0    | 0               |
| 7    | 58.30           | 7    | 69.50           | 7    | 72.91           |
| 14   | 75.14           | 14   | 100.98          | 14   | 91.75           |
| 28   | 65.35           | 28   | 91.73           | 28   | 81.50           |

Tabla 12. Resumen de ensayo de compresión para relación A/C 0.40 con adición de arena. Fuente: Propia

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| Casa del cemento   | Argos  |                          |
| Tipo de cemento  | Uso estructural  |                          |

Ensayo de compresión resumen de relación A/C 0.40 con adición de arena

|            |              |              |              |
|------------|--------------|--------------|--------------|
| Ensayo: 9  | Ensayo: 25   | Ensayo: 23   | Ensayo: 25   |
| Arena 0.0% | Arena 10.00% | Arena 20.00% | Arena 10.00% |

| Días | Esfuerzo (MPa)* |
|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|
| 0    | 0               | 0    | 0               | 0    | 0               | 0    | 0               |
| 7    | 48.36           | 7    | 49.95           | 7    | 47.29           | 7    | 55.19           |
| 14   | 60.02           | 14   | 62.57           | 14   | 63.99           | 14   | 56.61           |
| 28   | 63.17           | 29   | 71.81           | 28   | 62.93           | 29   | 76.96           |

## Análisis de criterios de calidad

El análisis de los criterios de calidad en una lechada para ductos de concreto presforzado es de vital importancia para garantizar la durabilidad y resistencia de la estructura. Para esto, es necesario que estas lechadas cumplan con ciertos estándares de calidad para asegurar un desempeño óptimo. En el caso de esta investigación y en este capítulo se pretende analizar cada una de las mezclas realizadas y validar aquellas que cumplen con los requisitos establecidos en el artículo 631 de las normas Invias.

Considerando las recomendaciones del fabricante del plastificante Plastol, que sugiere dosificaciones en un rango del 0.15% al 0.8% con respecto al peso del cemento, es esencial resaltar que algunos ensayos se llevaron a cabo con una dosificación por debajo de la recomendada. No obstante, estos experimentos se realizaron con propósitos exploratorios para validar la influencia de las relaciones agua-cemento con dicho porcentaje. En consecuencia, a esto, se optó por no analizar estas muestras debido a la presencia de datos anómalos podrían acarrear desviaciones significativas que pueden resultar en efectos no deseados en las propiedades y comportamiento de la mezcla.

### **Fluidez**

Con el fin de mantener la coherencia y la integridad en el análisis de resultados, se ha decidido excluir las mezclas anteriormente mencionadas de las próximas gráficas y del análisis. Esta exclusión permitirá centrar el análisis en aquellas mezclas que se encuentran dentro del rango recomendado por el fabricante, en el que se evidencia comportamientos más consistentes y alineados con los objetivos del estudio.

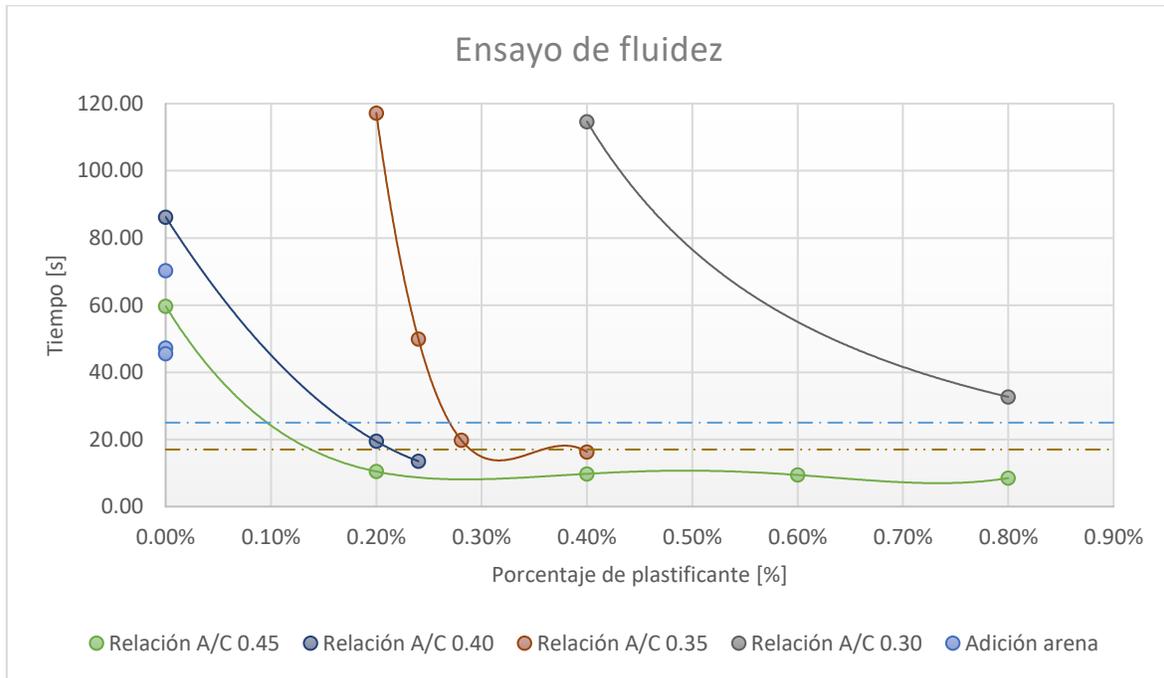


Ilustración 18. Gráfica de ensayo de fluidez. Fuente: Propia

Teniendo en cuenta la ilustración 18. se puede observar que ninguna mezcla independientemente su relación cumplió con el criterio de fluidez, por ello se decidió agregarle plastificante lo que permitió que este tiempo se redujera considerablemente en cada una de las relaciones de agua/cemento. Por otra parte, las únicas mezclas que cumplieron con los límites establecidos en el artículo 631 del INVIAS fueron las relaciones 0.40 con un 0.20% de plastificante y 0.35 con un 0.28% de plastificante. A continuación, se detallará con más precisión cada relación frente al ensayo de fluidez.

Con una relación agua cemento de 0.45, no presenta una manejabilidad adecuada, teniendo en cuenta los requisitos establecidos en el artículo 631 del INVIAS, ya que, el tiempo necesario para la salida de un litro de lechada con esta relación agua/cemento es 59.7 segundos, sin embargo, la utilización del plastificante permitió que este tiempo se redujera considerablemente. Como puede observarse en la línea de tendencia para las diferentes mezclas de esta relación agua cemento, se puede afirmar que, el aumento en el uso del plastificante no representa un cambio en la fluidez de la mezcla debido a que la curva tiende a tener un comportamiento asintótico por debajo de los límites. Por otra parte, se observa que, de acuerdo con esta línea de tendencia el porcentaje adecuado de plastificante se encuentra entre 0.10% y 0.12%, sin embargo, es importante resaltar que, de acuerdo con el fabricante, no se recomienda el uso de este por fuera del rango de 0.15% y 0.8%; esto se

reafirma a nivel experimental, ya que, las mezclas con bajos contenidos de plastificante (<0.15%) presentaban resultados inadecuados.

Por otra parte, con la relación agua cemento de 0.40 sin la adición de plastificante el tiempo necesario para la salida de un litro de lechada fue de 62.1 segundos, sin embargo, al agregar 0.20% de plastificante el tiempo se redujo a 19.45 segundos, permitiendo que la mezcla cumpliera con los límites establecidos. Por otra parte, al agregarle 0.24% de plastificante el tiempo ya no cumplió el criterio de fluidez, lo que nos lleva a concluir de acuerdo con esta línea de tendencia que el porcentaje adecuado de plastificante se encuentra entre 0.17% y 0.21%.

En la relación agua cemento de 0.35 no pudo ser determinado el tiempo de salida porque la mezcla no paso por el cono Marsh, sin embargo, con el uso de 0.28% el tiempo se redujo a 19.74 segundos, permitiendo que la mezcla estuviera dentro de los límites establecidos, acuerdo con esta línea de tendencia el porcentaje adecuado de plastificante para esta relación se encuentra entre 0.27% y 0.35%.

Por último, con una relación agua cemento de 0.30 y con respecto al porcentaje máximo de plastificante no es suficiente para que la lechada cumpla con los límites, es decir que el porcentaje adecuado de plastificante se encuentra entre 0.90% y 0.95%, sin embargo, se podrían presentar resultados inadecuados.

En resumen, podemos concluir que para las relaciones agua-cemento evaluadas, agregar plastificante mejora la fluidez de la lechada. Sin embargo, hay un límite en cuanto al porcentaje óptimo de plastificante que podemos encontrar en las recomendaciones del proveedor, a partir del cual la fluidez puede disminuir nuevamente. Esto destaca la importancia de encontrar el equilibrio adecuado en la dosificación del plastificante en cada relación agua-cemento para lograr la fluidez establecida en el artículo 631 del invias.

### **Exudación**

El análisis del ensayo de exudación de los criterios de calidad en una lechada para ductos de concreto presforzado es de vital importancia para garantizar la eficiencia y durabilidad del ducto. Este ensayo permite evaluar la capacidad de la lechada para retener agua y evitar la segregación de sus componentes durante el proceso de colocación y fraguado.

De acuerdo con el artículo del INVIAS el valor de este parámetro no puede exceder el 2%, a partir de una inspección visual. El criterio de exudación lo cumplieron 19 de las 25 mezclas, es pertinente aclarar que 4 de ellas no se relacionan debido a que se excluyeron del análisis por fines experimentales.

Tabla 13. Ensayos que no cumplieron con el criterio de exudación

| Ensayo | Relación agua cemento | Plastificante | Porcentaje de exudación final |
|--------|-----------------------|---------------|-------------------------------|
| N°     | [ml]                  | %             | %                             |
| 2      | 0.45                  | 0.80%         | 6.9%                          |
| 3      | 0.45                  | 0.60%         | 2.5%                          |

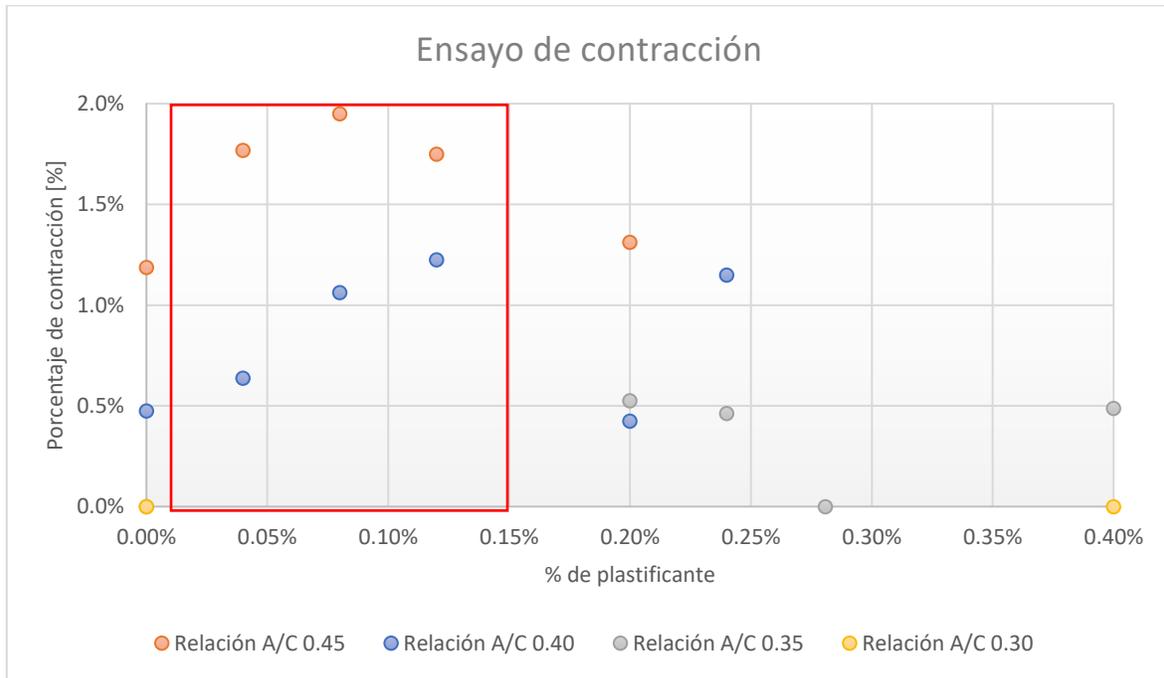
Los resultados señalan claramente que en una relación agua-cemento de 0.45, no se aconseja emplear dosificaciones elevadas de plastificante. Este fenómeno se atribuye a la presencia de partículas de agua libre, las cuales el cemento no puede absorber eficazmente, provocando un exceso de exudación en la mezcla. En consecuencia, se concluye que mantener una dosificación controlada de plastificante es crucial en estas circunstancias para evitar problemas de exudación y garantizar la calidad deseada en la mezcla de concreto, el resto de las mezclas cumplen con el criterio de exudación, es decir que no es relevante el porcentaje de plastificante frente al criterio de exudación.

Finalmente, un adecuado control de exudación asegura que la lechada llenará correctamente todos los espacios dentro del ducto, proporcionando una adecuada adherencia a la estructura y evitando posibles problemas de calidad como grietas, porosidad y pérdida de resistencia.

### Contracción

El criterio de contracción consiste en que esta no puede exceder el 2% sin agregarle aditivos o el 10% cuando se usan plastificante, con respecto a los resultados de la contracción que es la comprobación del volumen verdadero de agua de purga se puede determinar que las únicas mezclas que no cumplieron fueron las mezclas de la relación 0.45 con un 0.80%, 0.60% y 0.40% de plastificante y la relación 0.30 con un 0.80% de plastificante, en cuanto a las observaciones de estas, durante las 3 primeras horas de lectura luego del mezclado no habían empezado su proceso de fraguado es decir que la mezcla estaba completamente líquida y por ende no pudieron ser desencofradas al siguiente día, es decir que tampoco cumplieron con el criterio de reabsorción del agua a las 24 horas.

Excluyendo estas 4 mezclas se obtiene el siguiente comportamiento en cuanto al volumen de agua de purga o agua exudada en función del porcentaje de plastificante en cada mezcla.



*Ilustración 19. Relación entre el porcentaje de contracción en función del porcentaje de plastificante. Fuente: Propia*

La anterior grafica nos indica que las 4 relaciones agua/cemento tienden a cumplir el comportamiento de una curva parabólica convexa, es decir que podemos inferir que cada relación cumple con un punto en el cual se tiene el mayor % de contracción, sin embargo, es importante aclarar que este comportamiento se presenta en los porcentajes de plastificantes menores al 0.15 es decir por fuera del rango establecido por el proveedor.

El análisis del ensayo de contracción o eventual expansión de los criterios de calidad en una lechada para ductos de concreto presforzado, es de vital importancia para evitar que se generen fisuras o grietas y que puedan comprometer la resistencia y durabilidad, se requiere una contracción mínima para garantizar la calidad y vida útil de los ductos de concreto, es decir que una de las mezclas más óptimas que cumplen con la premisa anterior son la relación 0.40 con un 0.20% de plastificante y un 0.04% de contracción y la relación 0.35 con un 0.28% de plastificante y un 0.00% de contracción.

### Compresión

Este ensayo permite determinar la capacidad de la lechada para soportar cargas de compresión y resistir deformaciones bajo estas condiciones. La información obtenida del análisis ayuda a detectar posibles defectos y áreas de debilidad en el concreto, lo que permite tomar las medidas apropiadas para corregirlos y garantizar la integridad estructural y funcionalidad a largo plazo del sistema de ductos de concreto presforzado. Verificando en

general las 25 mezclas se observa un aumento en la resistencia a la compresión a medida que aumenta el porcentaje de plastificante, a continuación, se analizan las relaciones agua-cemento por aparte para tener un análisis más amplio.

A continuación, se presentan las gráficas y el análisis de cada una de las 4 relaciones.

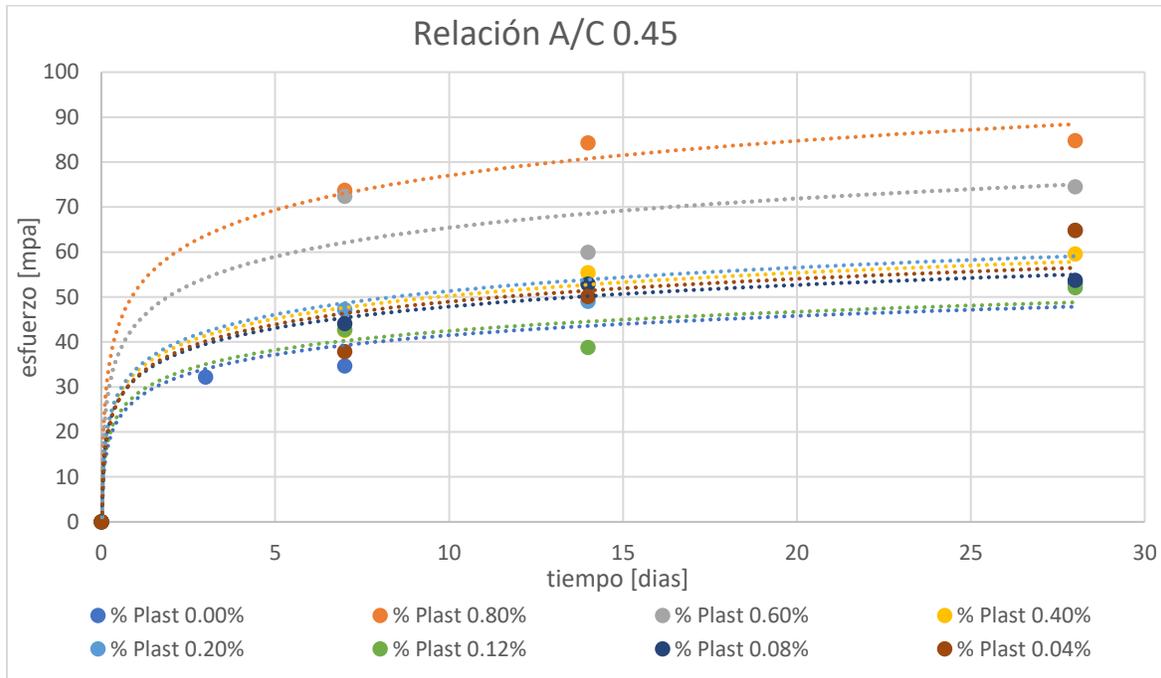


Ilustración 20. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.45. Fuente: Propia

En la relación 0.45 se encuentra el efecto mencionado anteriormente excepto en el caso de los ensayos número 3 y 6 con un 0.60% y un 0.12% de plastificante. En estos ensayos, la resistencia a la compresión disminuye a los 14 días y vuelve a aumentar a los 28 días, en comparación con los ensayos con menos plastificante. Esta anomalía se puede atribuir en el ensayo 6 a que el porcentaje de plastificante está fuera de los límites recomendados por el fabricante.

Para el ensayo número 2, que utiliza un 0.08% de plastificante (corresponde al mayor porcentaje máximo permitido por el fabricante), se alcanza la mayor resistencia a la compresión en los cuatro intervalos de tiempo medidos. Esto sugiere que un mayor porcentaje de plastificante puede mejorar la resistencia a la compresión de las mezclas de lechada de cemento y agua.

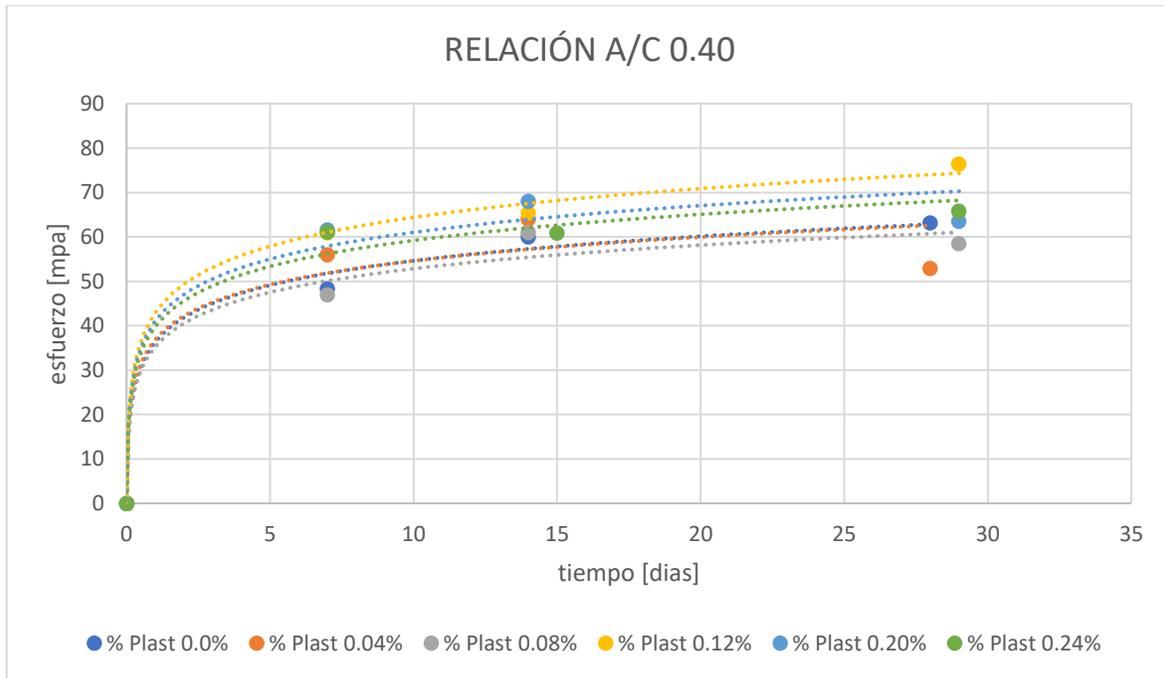
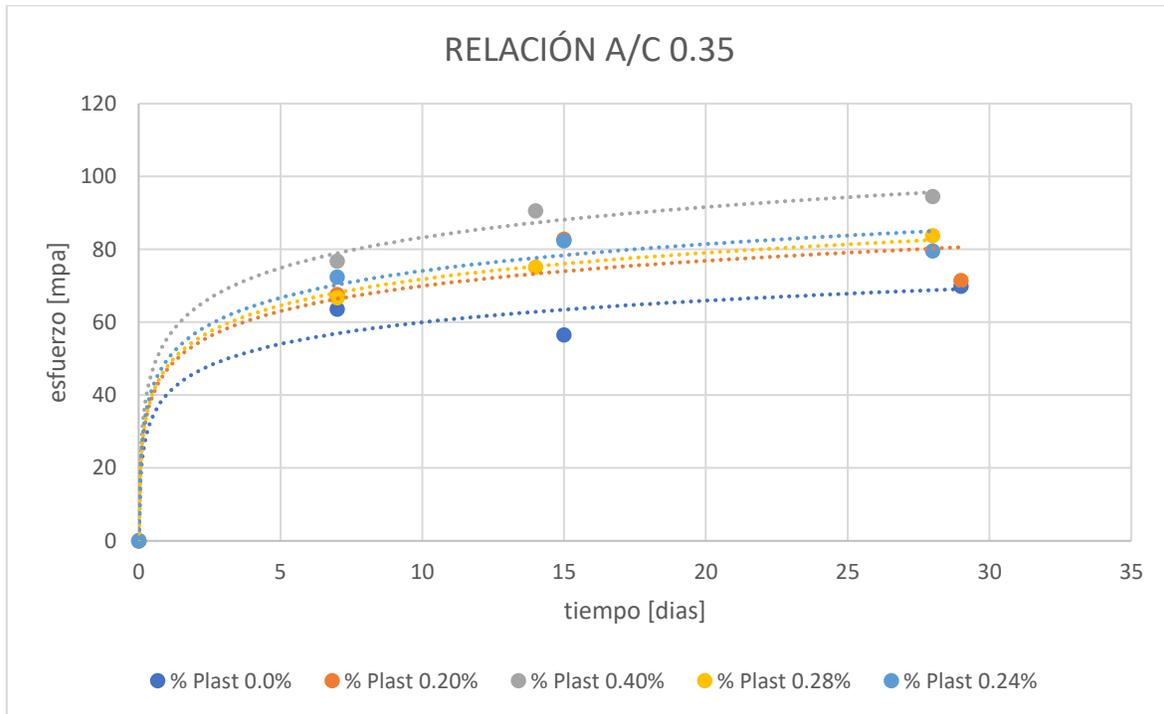


Ilustración 21. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.40. Fuente: Propia

En la relación 0.40, el caso de los ensayos número 10 y 11 con un 0.04% y un 0.08% de plastificante la resistencia a la compresión disminuye a los 28 días en comparación a los 14 días. Esta anomalía se puede atribuir a que el porcentaje de plastificante está fuera de los límites recomendados por el fabricante. Y en los ensayos número 13 y 14 con un 0.20% y un 0.24% de plastificante la resistencia a la compresión disminuye en comparación a los periodos de ensayo anterior.



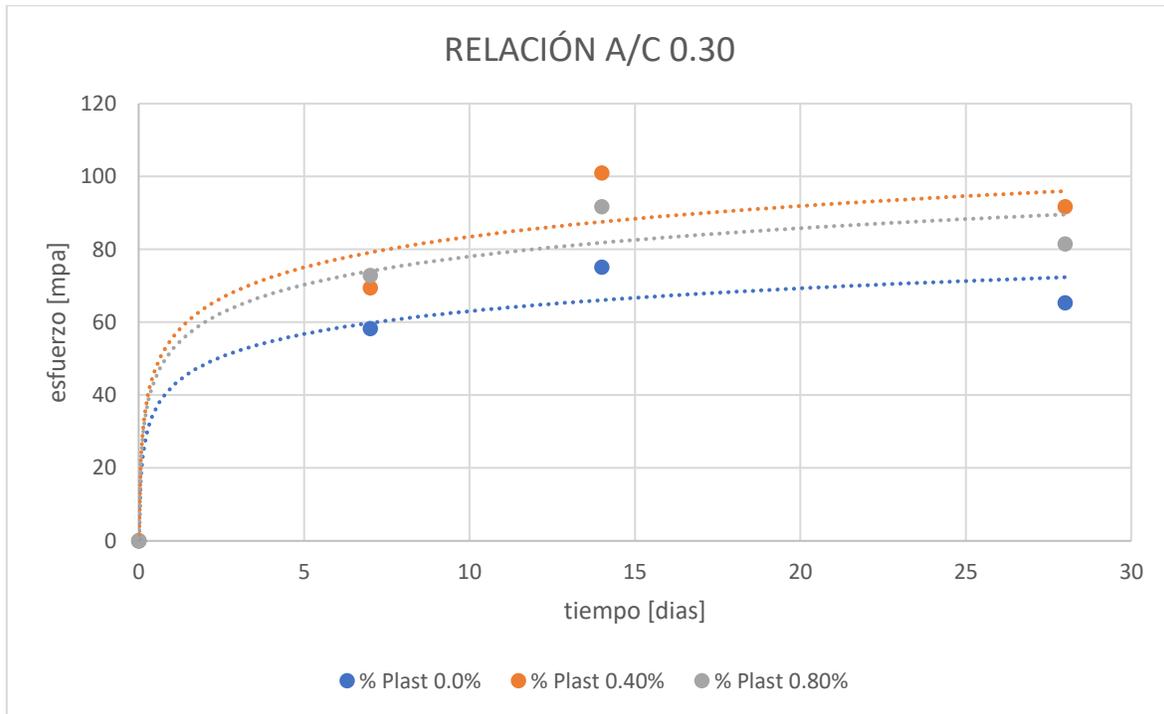
Ilustración 22. Falla de ensayo 19. Con relación A/C 0.35 a los 28 días. Fuente: Propia.



*Ilustración 23. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.35. Fuente: Propia*

En la relación 0.35, se presentan las mismas anomalías que en las relaciones anteriores, es decir que la resistencia a la compresión disminuye en comparación a los periodos ensayados anteriormente, esto sucede en el ensayo 15, 16 y 19 con las siguientes dosificaciones de plastificantes 0%, 0.20% y 0.24% respectivamente.

Anteriormente se planteaba que la reducción en la compresión se atribuía a que el porcentaje de plastificante estaba fuera de los límites recomendados por el fabricante sin embargo, esto también sucede en la mezcla 15 la cual no tiene adición de Plastol, por ende una posible causa de esta anomalía es que en el momento de la vaciado de la mezcla en los cubos estuvo en reposo por unos 5 minutos aproximadamente y en las recomendaciones de las lechadas inyectadas según el artículo 631 de Invias es que esta lechada al momento de la inyección debe ser permanentemente agitada.



*Ilustración 24. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.30. Fuente: Propia*

En la relación 0.30, se presentan las mismas anomalías que en las relaciones anteriores, es decir que la resistencia a la compresión disminuye a los 28 días en comparación a los 14 días, esto sucede en el ensayo 20, 21 y 22 con las siguientes dosificaciones de plastificantes 0%, 0.40% y 0.80% respectivamente.



*Ilustración 25. Falla de ensayo 21. Con relación A/C 0.30 a los 28 días. Fuente: Propia.*

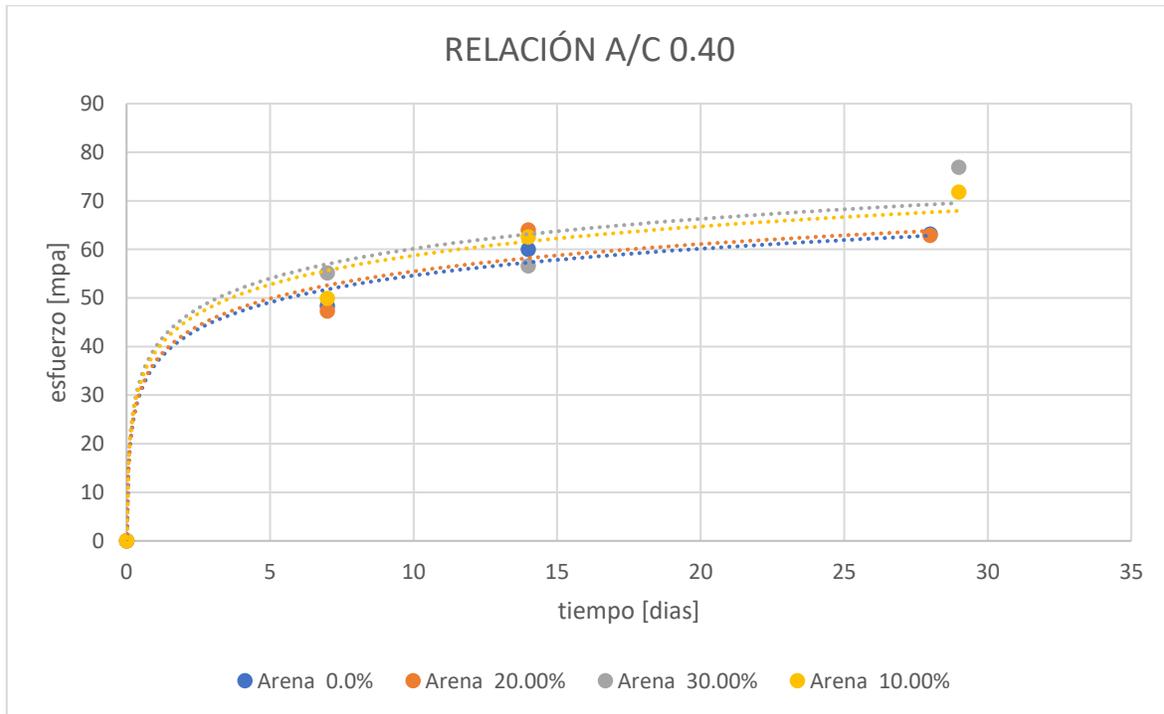


Ilustración 26. Gráfica de esfuerzo en función del tiempo para la relación A/C 0.40 con adición de arena. Fuente: Propia

En cuanto este último ensayo buscábamos mejorar la cohesión general de la mezcla en la relación 0.40 mediante la adición de arena, con el objetivo de optimizar la resistencia y durabilidad de la lechada. La distribución óptima de partículas tuvo un impacto positivo, evidenciado en la ilustración 24, donde se observa que la mayor resistencia se alcanzó en la mezcla que contenía un 30% de arena (76.96 MPa) a los 28 días, en comparación con la mezcla sin arena (63.17 MPa). Este hallazgo indica un aumento de resistencia del 14% con un 20% de arena y del 21% con un 30% de arena añadida a la mezcla.

En conclusión, el porcentaje de plastificante parece tener una influencia en la resistencia a la compresión de las mezclas de lechadas de cemento y agua, es decir que todas las mezclas cumplen con lo establecido en el artículo 631 del Invias que nos indica que la resistencia debe ser mayor a 30 MPa a los 28 días, en cuanto al tiempo de curado, se observa que la resistencia a la compresión generalmente aumenta a medida que pasa el tiempo, sin embargo, se encuentra que en la mayoría de las mezclas se reduce la resistencia a los 21 días o a los 14 días con respecto al periodo anterior ensayado por ello se recomienda tener un mayor control debido estas anomalías presentadas, que pueden deberse a fallas en la fundida, en el curado o fallas en el ensayo de los cubos.

En resumen, tras evaluar los cuatro criterios con el empleo de cemento Argos estructural, se recomienda utilizar las relaciones 0.40 con un 0.20% de plastificante y 0.35 con un 0.28% de plastificante. Estas combinaciones cumplen con los estándares de calidad establecidos por el artículo 631 del INVIAS. Además, se concluye que no es necesario utilizar cemento estructural, ya que todas las mezclas satisfacen el criterio de resistencia a la compresión. Esto sugiere la posibilidad de emplear cemento de uso general, lo que podría reducir costos, aunque se recomienda realizar verificaciones experimentales para respaldar esta decisión.

La investigación llevada a cabo reviste una importancia crucial en el ámbito de los criterios de calidad aplicados a las lechadas utilizadas en los ductos de concretos presforzados. Los hallazgos proporcionan conocimientos valiosos sobre la influencia de la relación agua/cemento y el contenido de plastificante en propiedades clave como la resistencia, durabilidad y fluidez de las lechadas. Estos resultados no solo contribuyen al conocimiento actual sobre la formulación de lechadas, sino que también ofrecen una base sólida para mejorar las prácticas de diseño y aplicación en la industria de la construcción.

En este contexto, invitamos al lector a considerar futuras investigaciones que expandan este estudio mediante la adición de arena a cada una de las relaciones de agua/cemento con el fin de explorar cómo la inclusión de arena afecta las propiedades mecánicas y de trabajabilidad y así poder brindar una comprensión más completa y precisa, proporcionando información valiosa para la mejora continua de las lechadas en aplicaciones específicas de ductos de concretos presforzados.

## Bibliografía

- AceroPedia. (s.f.). *Acero de alta resistencia*. Obtenido de <https://aceropedia.com/tipos-de-acero/acero-de-alta-resistencia/>
- ACI. (2002). *Reported Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. Boston: ACI Committee 222.
- Camargo, M. C. (2017). *Prácticas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Castro, F. M. (2018). *Formulación de un plan de gestión para el uso de agregados de concreto reciclado en concretos hidráulicos para una empresa constructora en la ciudad de Bogotá*. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/ce033d63-f674-48f5-b1c6-a5d26a00c219>
- INVIAS. (2012). ARTÍCULO 631 – 13. En *LECHADA PARA DUCTOS DE CONCRETO PRESFORZADO*. Obtenido de *LECHADA PARA DUCTOS DE CONCRETO PRESFORZADO*.
- Marfa Carolina Molano Camargo, N. T. (2017). *Prácticas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil*. Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Matallana, I. R. (s.f.). *Materiales para ingeniería civil*. Bogotá .
- McKenzie, W. (2004). *Design of Structural Elements*. Londres, Reino Unido : Palgrave Macmillan.
- Villani, P. (01 de 01 de 2019). *Politecnico di Milano*. Obtenido de El puente de Morandi colapsado en el puerto italiano de Génova: dinámica y causas: <https://hdl.handle.net/11311/1102902>

## Anexos

### Anexo 1

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| Casa del cemento   | Argos  |                          |
| Tipo de cemento  | Uso estructural  |                          |

### Ensayo de exudación

|                 |    |     |      |
|-----------------|----|-----|------|
| Volumen inicial | V1 | 800 | [ml] |
|-----------------|----|-----|------|

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 04/09/2023 |
| Ensayo N° | 1          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.00% |

| Medición | Tiempo    | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|-----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t [horas] | V2 [ml]                 | Vg [ml]                    | - %                      | - %                        | - %                 |
| 0        | 10:05:00  | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 10:20:00  | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 2        | 10:35:00  | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 3        | 10:50:00  | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |
| 4        | 11:05:00  | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |
| 5        | 12:05:00  | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |
| 6        | 13:05:00  | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 12/09/2023 |
| Ensayo N° | 2          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.80% |

| Medición | Tiempo | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|--------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
|----------|--------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|

| N° | t        | V2   | Vg   | -    | -   | -    |
|----|----------|------|------|------|-----|------|
|    | [horas]  | [ml] | [ml] | %    | %   | %    |
| 0  | 02:35:00 | 800  | 800  | 0.0  | 0.0 | 0.0  |
| 1  | 02:50:00 | 800  | 782  | -2.3 | 2.3 | 0.0  |
| 2  | 03:05:00 | 800  | 780  | -2.5 | 2.5 | 0.0  |
| 3  | 03:20:00 | 798  | 765  | -4.4 | 4.1 | -0.3 |
| 4  | 03:35:00 | 798  | 760  | -5.0 | 4.8 | -0.3 |
| 5  | 04:35:00 | 798  | 750  | -6.3 | 6.0 | -0.3 |
| 6  | 05:35:00 | 795  | 740  | -7.5 | 6.9 | -0.6 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 12/09/2023 |
| Ensayo N° | 3          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.60% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:00:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:15:00 | 798                     | 790                        | -1.3                     | 1.0                        | -0.3                |
| 2        | 03:30:00 | 798                     | 790                        | -1.3                     | 1.0                        | -0.3                |
| 3        | 03:45:00 | 798                     | 785                        | -1.9                     | 1.6                        | -0.3                |
| 4        | 04:00:00 | 798                     | 780                        | -2.5                     | 2.3                        | -0.3                |
| 5        | 05:00:00 | 798                     | 778                        | -2.8                     | 2.5                        | -0.3                |
| 6        | 06:00:00 | 798                     | 778                        | -2.8                     | 2.5                        | -0.3                |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 12/09/2023 |
| Ensayo N° | 4          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.40% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:30:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:45:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |

|   |          |     |     |      |     |     |
|---|----------|-----|-----|------|-----|-----|
| 2 | 04:00:00 | 800 | 798 | -0.3 | 0.3 | 0.0 |
| 3 | 04:15:00 | 800 | 795 | -0.6 | 0.6 | 0.0 |
| 4 | 04:30:00 | 800 | 792 | -1.0 | 1.0 | 0.0 |
| 5 | 05:30:00 | 800 | 791 | -1.1 | 1.1 | 0.0 |
| 6 | 06:30:00 | 800 | 791 | -1.1 | 1.1 | 0.0 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 18/09/2023 |
| Ensayo N° | 5          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.20% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 09:30:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 09:45:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 2        | 10:00:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 3        | 10:15:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 10:30:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 5        | 11:30:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 6        | 12:30:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 18/09/2023 |
| Ensayo N° | 6          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.12% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 10:05:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 10:20:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 2        | 10:35:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 3        | 10:50:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 4        | 11:05:00 | 800                     | 793                        | -0.9                     | 0.9                        | 0.0                 |
| 5        | 12:05:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |

|   |          |     |     |      |     |     |
|---|----------|-----|-----|------|-----|-----|
| 6 | 13:05:00 | 800 | 786 | -1.8 | 1.8 | 0.0 |
|---|----------|-----|-----|------|-----|-----|

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 18/09/2023 |
| Ensayo N° | 7          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.08% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 10:30:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 10:45:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 2        | 11:00:00 | 800                     | 797                        | -0.4                     | 0.4                        | 0.0                 |
| 3        | 11:15:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 4        | 11:30:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 5        | 12:30:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 6        | 13:30:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 19/09/2023 |
| Ensayo N° | 8          |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.45  |
| % Plastificante | 0.04% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 02:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 02:25:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 2        | 02:40:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 3        | 02:55:00 | 800                     | 792                        | -1.0                     | 1.0                        | 0.0                 |
| 4        | 03:10:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 5        | 04:10:00 | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |
| 6        | 05:10:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |

|        |            |
|--------|------------|
| Fecha: | 19/09/2023 |
|--------|------------|

|              |      |
|--------------|------|
| Relación A/C | 0.40 |
|--------------|------|

|           |   |
|-----------|---|
| Ensayo N° | 9 |
|-----------|---|

|                 |       |
|-----------------|-------|
| % Plastificante | 0.00% |
|-----------------|-------|

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 02:35:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 02:50:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 03:05:00 | 800                     | 797                        | -0.4                     | 0.4                        | 0.0                 |
| 3        | 03:20:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 4        | 03:35:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 5        | 04:35:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 6        | 05:35:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 19/09/2023 |
| Ensayo N° | 10         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.40  |
| % Plastificante | 0.04% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:00:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:15:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 03:30:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 3        | 03:45:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 4        | 04:00:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 5        | 05:00:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 6        | 06:00:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 25/09/2023 |
| Ensayo N° | 11         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.40  |
| % Plastificante | 0.08% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 09:40:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 09:55:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 2        | 10:10:00 | 800                     | 793                        | -0.9                     | 0.9                        | 0.0                 |
| 3        | 10:25:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 4        | 10:40:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 5        | 11:40:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 6        | 12:40:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 25/09/2023 |
| Ensayo N° | 12         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.40  |
| % Plastificante | 0.12% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 10:15:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 10:30:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 2        | 10:45:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 3        | 11:00:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 4        | 11:15:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 5        | 12:15:00 | 800                     | 770                        | -3.8                     | 3.8                        | 0.0                 |
| 6        | 01:15:00 | 800                     | 770                        | -3.8                     | 3.8                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 25/09/2023 |
| Ensayo N° | 13         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.40  |
| % Plastificante | 0.20% |

| Medición | Tiempo | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|--------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t      | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |

|   | [horas]  | [ml] | [ml] | %    | %   | %   |
|---|----------|------|------|------|-----|-----|
| 0 | 10:35:00 | 800  | 800  | 0.0  | 0.0 | 0.0 |
| 1 | 10:50:00 | 800  | 800  | 0.0  | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 11:05:00 | 800  | 799  | -0.1 | 0.1 | 0.0 |
| 3 | 11:20:00 | 800  | 798  | -0.3 | 0.3 | 0.0 |
| 4 | 11:35:00 | 800  | 798  | -0.3 | 0.3 | 0.0 |
| 5 | 12:35:00 | 800  | 795  | -0.6 | 0.6 | 0.0 |
| 6 | 01:35:00 | 800  | 795  | -0.6 | 0.6 | 0.0 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 26/09/2023 |
| Ensayo N° | 14         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.40  |
| % Plastificante | 0.24% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:25:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 2        | 03:40:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 3        | 03:55:00 | 800                     | 793                        | -0.9                     | 0.9                        | 0.0                 |
| 4        | 04:10:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 5        | 05:10:00 | 800                     | 788                        | -1.5                     | 1.5                        | 0.0                 |
| 6        | 06:10:00 | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 26/09/2023 |
| Ensayo N° | 15         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.35  |
| % Plastificante | 0.00% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:30:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:45:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 04:00:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |

|   |          |     |     |      |     |     |
|---|----------|-----|-----|------|-----|-----|
| 3 | 04:15:00 | 800 | 799 | -0.1 | 0.1 | 0.0 |
| 4 | 04:30:00 | 800 | 798 | -0.3 | 0.3 | 0.0 |
| 5 | 05:30:00 | 800 | 799 | -0.1 | 0.1 | 0.0 |
| 6 | 06:30:00 | 800 | 799 | -0.1 | 0.1 | 0.0 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 26/09/2023 |
| Ensayo N° | 16         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.35  |
| % Plastificante | 0.20% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:55:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 04:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 04:25:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 3        | 04:40:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 04:55:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 5        | 05:55:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 6        | 06:55:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 03/10/2023 |
| Ensayo N° | 17         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.35  |
| % Plastificante | 0.40% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 02:40:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 02:55:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 03:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 3        | 03:25:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 03:40:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 5        | 04:40:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 6        | 05:40:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 03/10/2023 |
| Ensayo N° | 18         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.35  |
| % Plastificante | 0.28% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:25:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 03:40:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 3        | 03:55:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 04:10:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 5        | 05:10:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 6        | 06:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |

|                          |    |   |      |
|--------------------------|----|---|------|
| Volumen de agua de purga | Vw | 0 | [ml] |
| Compresión final         | -  | 0 | %    |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 03/10/2023 |
| Ensayo N° | 19         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.35  |
| % Plastificante | 0.24% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:45:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 04:00:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 04:15:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 3        | 04:30:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 04:45:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 5        | 05:45:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 6        | 06:45:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |

|                          |    |        |      |
|--------------------------|----|--------|------|
| Volumen de agua de purga | Vw | 3.7    | [ml] |
| Compresión final         | -  | 0.4625 | %    |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 17/10/2023 |
| Ensayo N° | 20         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.30  |
| % Plastificante | 0.00% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 02:40:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 02:55:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 03:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 3        | 03:25:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 4        | 03:40:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 5        | 04:40:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 6        | 05:40:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 17/10/2023 |
| Ensayo N° | 21         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.30  |
| % Plastificante | 0.40% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 02:50:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:05:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 03:20:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 3        | 03:35:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 03:50:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 5        | 04:50:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 6        | 05:50:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 17/10/2023 |
| Ensayo N° | 22         |

|                 |       |
|-----------------|-------|
| Relación A/C    | 0.30  |
| % Plastificante | 0.80% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 03:10:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 03:25:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 2        | 03:40:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 3        | 03:55:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 4        | 04:10:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 5        | 05:10:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 6        | 06:10:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 30/10/2023 |
| Ensayo N° | 23         |

|              |       |
|--------------|-------|
| Relación A/C | 0.40  |
| Arena        | 0.20% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 12:25:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 12:40:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 2        | 12:55:00 | 800                     | 785                        | -1.9                     | 1.9                        | 0.0                 |
| 3        | 01:10:00 | 800                     | 780                        | -2.5                     | 2.5                        | 0.0                 |
| 4        | 01:25:00 | 800                     | 775                        | -3.1                     | 3.1                        | 0.0                 |
| 5        | 02:25:00 | 800                     | 770                        | -3.8                     | 3.8                        | 0.0                 |
| 6        | 03:25:00 | 800                     | 770                        | -3.8                     | 3.8                        | 0.0                 |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 30/10/2023 |
| Ensayo N° | 24         |

|              |       |
|--------------|-------|
| Relación A/C | 0.40  |
| Arena        | 0.30% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 01:20:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 01:35:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 01:50:00 | 800                     | 798                        | -0.3                     | 0.3                        | 0.0                 |
| 3        | 02:05:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 4        | 02:20:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 5        | 03:20:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 6        | 04:20:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |

|                          |    |      |      |
|--------------------------|----|------|------|
| Volumen de agua de purga | Vw | 3.36 | [ml] |
| Compresión final         | -  | 0.42 | %    |

|           |            |
|-----------|------------|
| Fecha:    | 30/10/2023 |
| Ensayo N° | 25         |

|              |       |
|--------------|-------|
| Relación A/C | 0.40  |
| Arena        | 0.10% |

| Medición | Tiempo   | Volumen superficie agua | Volumen superficie lechada | Expansión por intervalos | Contracción por intervalos | Expansión combinada |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| N°       | t        | V2                      | Vg                         | -                        | -                          | -                   |
|          | [horas]  | [ml]                    | [ml]                       | %                        | %                          | %                   |
| 0        | 01:50:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 1        | 02:05:00 | 800                     | 800                        | 0.0                      | 0.0                        | 0.0                 |
| 2        | 02:20:00 | 800                     | 799                        | -0.1                     | 0.1                        | 0.0                 |
| 3        | 02:35:00 | 800                     | 795                        | -0.6                     | 0.6                        | 0.0                 |
| 4        | 02:50:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 5        | 03:50:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |
| 6        | 04:50:00 | 800                     | 790                        | -1.3                     | 1.3                        | 0.0                 |

## Anexo 2.

|  |  |                          |
|--|--|--------------------------|
| <br>UNIVERSIDAD | Plantilla de control de calidad en lechadas para ductos de concreto preesforzado | Norma y especificaciones |
|  |  | Art. 631 de INVIAS       |
| Casa del cemento   | Argos  |                          |
| Tipo de cemento  | Uso estructural  |                          |

### Ensayo de compresión

|           |           |               |
|-----------|-----------|---------------|
| Ensayo: 1 | A/C: 0.45 | % Plas: 0.00% |
|-----------|-----------|---------------|

| N° | Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|----|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|    |              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 0  | 04-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 1  | 07-sep       | 3    | 50.95       | 50.53   | 8,042         | 30.65              |
| 2  | 07-sep       | 3    | 50.87       | 50.70   | 8,280         | 31.50              |
| 3  | 07-sep       | 3    | 48.55       | 49.87   | 8,488         | 34.39              |
| 4  | 11-sep       | 7    | 50.38       | 48.65   | 6,986         | 27.96              |
| 5  | 11-sep       | 7    | 50.17       | 49.57   | 9,860         | 38.90              |
| 6  | 11-sep       | 7    | 49.59       | 49.16   | 9,234         | 37.16              |
| 7  | 02-oct       | 28   | 49.63       | 50.40   | 13,358        | 52.39              |
| 8  | 02-oct       | 28   | 49.65       | 50.25   | 16,418        | 64.56              |
| 9  | 02-oct       | 28   | 48.60       | 50.35   | 10,480        | 42.01              |

|           |           |                 |
|-----------|-----------|-----------------|
| Ensayo: 2 | A/C: 0.45 | % Plas: 100.00% |
|-----------|-----------|-----------------|

|           |           |                |
|-----------|-----------|----------------|
| Ensayo: 3 | A/C: 0.45 | % Plas: 75.00% |
|-----------|-----------|----------------|

|           |           |                |
|-----------|-----------|----------------|
| Ensayo: 4 | A/C: 0.45 | % Plas: 50.00% |
|-----------|-----------|----------------|

| N° | Fecha | Días | Dimensiones | Carga | Esfuerzo |
|----|-------|------|-------------|-------|----------|
|----|-------|------|-------------|-------|----------|

| Fecha | Días | Dimensiones | Carga | Esfuerzo |
|-------|------|-------------|-------|----------|
|-------|------|-------------|-------|----------|

| Fecha | Días | Dimensiones | Carga | Esfuerzo |
|-------|------|-------------|-------|----------|
|-------|------|-------------|-------|----------|

|   | d-m    |    | b     | h     | (kg)  | (MPa)* |
|---|--------|----|-------|-------|-------|--------|
|   |        |    | mm    | mm    |       |        |
| 0 | 12-sep | 0  | 50.00 | 50.00 | 0     | 0.00   |
| 1 | 19-sep | 7  | 41.50 | 50.20 | 14062 | 66.22  |
| 2 | 19-sep | 7  | 41.32 | 49.93 | 18380 | 87.40  |
| 3 | 19-sep | 7  | 41.50 | 50.22 | 14348 | 67.54  |
| 4 | 26-sep | 14 | 40.07 | 50.00 | 18030 | 88.28  |
| 5 | 26-sep | 14 | 40.08 | 50.02 | 15396 | 75.34  |
| 6 | 26-sep | 14 | 40.18 | 50.00 | 18230 | 89.02  |
| 7 | 10-oct | 28 | 41.75 | 50.10 | 18840 | 88.36  |
| 8 | 10-oct | 28 | 40.90 | 50.25 | 17620 | 84.10  |
| 9 | 10-oct | 28 | 40.70 | 50.45 | 17116 | 81.77  |

|        | d-m |  | b     | h     | (kg)  | (MPa)* |
|--------|-----|--|-------|-------|-------|--------|
|        |     |  | mm    | mm    |       |        |
| 12-sep | 0   |  | 50.00 | 50.00 | 0     | 0.00   |
| 19-sep | 7   |  | 43.20 | 50.07 | 16022 | 72.67  |
| 19-sep | 7   |  | 43.83 | 50.22 | 15160 | 67.56  |
| 19-sep | 7   |  | 43.17 | 50.20 | 16980 | 76.87  |
| 26-sep | 14  |  | 42.78 | 50.07 | 10452 | 47.87  |
| 26-sep | 14  |  | 43.02 | 49.93 | 14294 | 65.28  |
| 26-sep | 14  |  | 43.35 | 50.17 | 14746 | 66.52  |
| 10-oct | 28  |  | 43.40 | 50.40 | 16756 | 75.15  |
| 10-oct | 28  |  | 43.25 | 50.20 | 16772 | 75.78  |
| 10-oct | 28  |  | 43.85 | 50.25 | 16270 | 72.44  |

|        | d-m |  | b     | h     | (kg)  | (MPa)* |
|--------|-----|--|-------|-------|-------|--------|
|        |     |  | mm    | mm    |       |        |
| 12-sep | 0   |  | 50.00 | 50.00 | 0     | 0.00   |
| 19-sep | 7   |  | 49.95 | 51.17 | 10334 | 39.67  |
| 19-sep | 7   |  | 48.80 | 49.83 | 12010 | 48.45  |
| 19-sep | 7   |  | 49.95 | 50.20 | 10140 | 39.67  |
| 26-sep | 14  |  | 50.02 | 50.15 | 14228 | 55.65  |
| 26-sep | 14  |  | 50.37 | 49.93 | 12352 | 48.18  |
| 26-sep | 14  |  | 49.77 | 49.97 | 15820 | 62.41  |
| 10-oct | 28  |  | 50.30 | 50.85 | 16960 | 65.05  |
| 10-oct | 28  |  | 50.45 | 51.00 | 15100 | 57.57  |
| 10-oct | 28  |  | 50.15 | 50.55 | 14506 | 56.13  |

Ensayo: 5    A/C: 0.45    % Plas: 25.00%

Ensayo: 6    A/C: 0.45    % Plas: 15.00%

Ensayo: 7    A/C: 0.45    % Plas: 10.00%

| Medición | Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga | Esfuerzo |
|----------|--------|------|-------------|-------|-------|----------|
|          |        |      | b           | h     |       |          |
| N°       | d-m    |      | mm          | mm    | (kg)  | (MPa)*   |
| 0        | 18-sep | 0    | 50.00       | 50.00 | 0     | 0.00     |
| 1        | 25-sep | 7    | 49.67       | 50.33 | 10422 | 40.90    |
| 2        | 25-sep | 7    | 50.23       | 50.10 | 12006 | 46.80    |
| 3        | 25-sep | 7    | 50.40       | 49.57 | 13694 | 53.77    |
| 4        | 02-oct | 14   | 50.15       | 50.20 | 10600 | 41.30    |
| 5        | 02-oct | 14   | 50.28       | 50.20 | 13986 | 54.36    |
| 6        | 02-oct | 14   | 50.50       | 49.25 | 13000 | 51.28    |

| Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga | Esfuerzo |
|--------|------|-------------|-------|-------|----------|
|        |      | b           | h     |       |          |
| d-m    |      | mm          | mm    | (kg)  | (MPa)*   |
| 18-sep | 0    | 50.00       | 50.00 | 0     | 0.00     |
| 25-sep | 7    | 50.40       | 50.20 | 12468 | 48.34    |
| 25-sep | 7    | 50.25       | 50.18 | 11356 | 44.18    |
| 25-sep | 7    | 50.37       | 50.23 | 9170  | 35.56    |
| 02-oct | 14   | 50.45       | 50.40 | 9518  | 36.72    |
| 02-oct | 14   | 50.35       | 50.35 | 10830 | 41.91    |
| 02-oct | 14   | 50.35       | 50.30 | 9738  | 37.72    |

| Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga | Esfuerzo |
|--------|------|-------------|-------|-------|----------|
|        |      | b           | h     |       |          |
| d-m    |      | mm          | mm    | (kg)  | (MPa)*   |
| 18-sep | 0    | 50.00       | 50.00 | 0     | 0.00     |
| 25-sep | 7    | 50.53       | 50.33 | 10954 | 42.25    |
| 25-sep | 7    | 50.20       | 50.17 | 10770 | 41.95    |
| 25-sep | 7    | 49.87       | 49.70 | 12140 | 48.05    |
| 02-oct | 14   | 50.35       | 50.45 | 14128 | 54.56    |
| 02-oct | 14   | 50.35       | 50.25 | 14412 | 55.88    |
| 02-oct | 14   | 50.45       | 50.45 | 12482 | 48.11    |

|   |        |    |       |       |       |       |        |    |       |       |       |       |        |    |       |       |       |       |
|---|--------|----|-------|-------|-------|-------|--------|----|-------|-------|-------|-------|--------|----|-------|-------|-------|-------|
| 7 | 16-oct | 28 | 50.45 | 49.95 | 16218 | 63.13 | 16-oct | 28 | 50.41 | 50.40 | 13266 | 51.23 | 16-oct | 28 | 50.30 | 50.65 | 15642 | 60.23 |
| 8 | 16-oct | 28 | 50.55 | 49.65 | 15046 | 58.81 | 16-oct | 28 | 50.45 | 50.51 | 13832 | 53.25 | 16-oct | 28 | 50.30 | 50.40 | 13152 | 50.89 |
| 9 | 16-oct | 28 | 50.25 | 50.05 | 18550 | 72.36 | 16-oct | 28 | 50.31 | 50.55 | 13392 | 51.66 | 16-oct | 28 | 50.10 | 50.30 | 12814 | 49.88 |

Ensayo: 8    A/C: 0.45    % Plas: 5.00%

Ensayo: 9    A/C: 0.40    % Plas: 0.00%

Ensayo: 10    A/C: 0.40    % Plas: 5.00%

| N° | Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|----|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|    |              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 0  | 19-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 1  | 26-sep       | 7    | 50.67       | 49.92   | 8316          | 32.26              |
| 2  | 26-sep       | 7    | 50.08       | 49.93   | 10382         | 40.73              |
| 3  | 26-sep       | 7    | 50.18       | 49.60   | 10278         | 40.51              |
| 4  | 03-oct       | 14   | 50.00       | 49.00   | 13416         | 53.72              |
| 5  | 03-oct       | 14   | 49.45       | 49.75   | 14162         | 56.47              |
| 6  | 03-oct       | 14   | 50.25       | 50.05   | 10252         | 39.99              |
| 7  | 17-oct       | 28   | 50.40       | 50.35   | 17480         | 67.57              |
| 8  | 17-oct       | 28   | 50.40       | 50.45   | 15690         | 60.53              |
| 9  | 17-oct       | 28   | 50.55       | 50.55   | 17248         | 66.22              |

| Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 19-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 26-sep       | 7    | 50.30       | 50.12   | 11562         | 44.99              |
| 26-sep       | 7    | 50.12       | 50.15   | 11894         | 46.42              |
| 26-sep       | 7    | 49.88       | 49.82   | 13590         | 53.65              |
| 03-oct       | 14   | 50.01       | 50.23   | 16450         | 64.25              |
| 03-oct       | 14   | 49.80       | 50.05   | 16582         | 65.26              |
| 03-oct       | 14   | 50.10       | 49.68   | 12824         | 50.55              |
| 17-oct       | 28   | 50.20       | 50.30   | 16690         | 64.84              |
| 17-oct       | 28   | 50.15       | 50.20   | 14940         | 58.22              |
| 17-oct       | 28   | 50.45       | 50.50   | 17260         | 66.46              |

| Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 19-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 26-sep       | 7    | 50.12       | 50.22   | 14472         | 56.41              |
| 26-sep       | 7    | 50.32       | 50.27   | 13788         | 53.48              |
| 26-sep       | 7    | 50.25       | 50.02   | 14906         | 58.18              |
| 03-oct       | 14   | 50.25       | 51.45   | 17618         | 66.85              |
| 03-oct       | 14   | 51.45       | 49.98   | 16796         | 64.08              |
| 03-oct       | 14   | 49.98       | 50.83   | 15820         | 61.10              |
| 17-oct       | 28   | 50.35       | 50.45   | 12756         | 49.26              |
| 17-oct       | 28   | 50.45       | 50.45   | 16548         | 63.78              |
| 17-oct       | 28   | 50.40       | 50.25   | 11792         | 45.68              |

Ensayo: 11    A/C: 0.40    % Plas: 10.00%

Ensayo: 12    A/C: 0.40    % Plas: 15.00%

Ensayo: 13    A/C: 0.40    % Plas: 25.00%

| N° | Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|----|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|    |              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 0  | 25-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 1  | 02-oct       | 7    | 50.55       | 50.45   | 12898         | 49.61              |
| 2  | 02-oct       | 7    | 50.15       | 50.10   | 11714         | 45.74              |

| Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 25-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 02-oct       | 7    | 50.00       | 50.05   | 16772         | 65.75              |
| 02-oct       | 7    | 50.28       | 50.25   | 14704         | 57.10              |

| Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 25-sep       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 02-oct       | 7    | 50.30       | 50.17   | 13668         | 53.13              |
| 02-oct       | 7    | 50.36       | 50.35   | 16768         | 64.87              |

|   |        |    |       |       |       |       |        |    |       |       |       |       |        |    |       |       |       |       |
|---|--------|----|-------|-------|-------|-------|--------|----|-------|-------|-------|-------|--------|----|-------|-------|-------|-------|
| 3 | 02-oct | 7  | 50.30 | 50.35 | 11738 | 45.47 | 02-oct | 7  | 50.33 | 50.43 | 15496 | 59.90 | 02-oct | 7  | 50.34 | 50.29 | 17238 | 66.80 |
| 4 | 09-oct | 14 | 50.90 | 49.60 | 12146 | 47.20 | 09-oct | 14 | 50.20 | 49.80 | 16740 | 65.69 | 09-oct | 14 | 51.10 | 50.40 | 17316 | 65.96 |
| 5 | 09-oct | 14 | 50.45 | 50.25 | 17430 | 67.45 | 09-oct | 14 | 50.35 | 50.15 | 18180 | 70.63 | 09-oct | 14 | 50.15 | 50.90 | 18200 | 69.94 |
| 6 | 09-oct | 14 | 50.10 | 50.55 | 17664 | 68.42 | 09-oct | 14 | 50.40 | 51.40 | 15800 | 59.83 | 09-oct | 14 | 51.00 | 50.40 | 17888 | 68.27 |
| 7 | 24-oct | 29 | 50.00 | 50.08 | 16578 | 64.95 | 24-oct | 29 | 50.25 | 50.13 | 20630 | 80.35 | 24-oct | 29 | 50.50 | 50.10 | 16622 | 64.45 |
| 8 | 24-oct | 29 | 50.60 | 50.23 | 14784 | 57.07 | 24-oct | 29 | 50.55 | 50.05 | 20250 | 78.52 | 24-oct | 29 | 49.68 | 50.10 | 15489 | 61.05 |
| 9 | 24-oct | 29 | 50.05 | 50.30 | 13734 | 53.52 | 24-oct | 29 | 50.55 | 50.08 | 18160 | 70.38 | 24-oct | 29 | 49.85 | 50.15 | 16580 | 65.06 |

Ensayo: 14    A/C: 0.40    % Plas: 30.00%

Ensayo: 15    A/C: 0.35    % Plas: 0.00%

Ensayo: 16    A/C: 0.35    % Plas: 25.00%

| N° | Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|----|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|    |              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 0  | 02-oct       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 1  | 09-oct       | 7    | 49.50       | 50.75   | 15376         | 60.04              |
| 2  | 09-oct       | 7    | 50.10       | 49.45   | 15260         | 60.43              |
| 3  | 09-oct       | 7    | 50.15       | 50.05   | 16072         | 62.82              |
| 4  | 17-oct       | 15   | 50.35       | 50.30   | 16584         | 64.24              |
| 5  | 17-oct       | 15   | 50.06       | 50.30   | 12070         | 47.02              |
| 6  | 17-oct       | 15   | 50.05       | 50.10   | 18260         | 71.44              |
| 7  | 31-oct       | 29   | 50.30       | 50.20   | 15808         | 61.41              |
| 8  | 31-oct       | 29   | 49.95       | 50.15   | 17092         | 66.94              |
| 9  | 31-oct       | 29   | 49.10       | 49.10   | 16964         | 69.03              |

| Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 02-oct       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 09-oct       | 7    | 50.50       | 50.50   | 17000         | 65.39              |
| 09-oct       | 7    | 50.10       | 49.90   | 16452         | 64.56              |
| 09-oct       | 7    | 50.15       | 50.00   | 15576         | 60.94              |
| 17-oct       | 15   | 50.05       | 50.10   | 16758         | 65.56              |
| 17-oct       | 15   | 49.80       | 50.15   | 11732         | 46.08              |
| 17-oct       | 15   | 50.25       | 50.05   | 14896         | 58.10              |
| 31-oct       | 29   | 50.10       | 50.30   | 19290         | 75.09              |
| 31-oct       | 29   | 50.25       | 50.15   | 14346         | 55.85              |
| 31-oct       | 29   | 50.25       | 50.10   | 20230         | 78.83              |

| Fecha<br>d-m | Días | Dimensiones |         | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------------|------|-------------|---------|---------------|--------------------|
|              |      | b<br>mm     | h<br>mm |               |                    |
| 02-oct       | 0    | 50.00       | 50.00   | 0             | 0.00               |
| 09-oct       | 7    | 50.70       | 50.65   | 18370         | 70.18              |
| 09-oct       | 7    | 50.50       | 50.40   | 14992         | 57.78              |
| 09-oct       | 7    | 50.05       | 50.10   | 19190         | 75.08              |
| 17-oct       | 15   | 50.30       | 50.15   | 22690         | 88.24              |
| 17-oct       | 15   | 50.30       | 50.35   | 20790         | 80.53              |
| 17-oct       | 15   | 50.30       | 50.05   | 20430         | 79.61              |
| 31-oct       | 29   | 50.60       | 50.25   | 22560         | 87.04              |
| 31-oct       | 29   | 50.10       | 50.00   | 17860         | 69.94              |
| 31-oct       | 29   | 50.25       | 50.40   | 14830         | 57.44              |

Ensayo: 17    A/C: 0.35    % Plas: 50.00%

Ensayo: 18    A/C: 0.35    % Plas: 35.10%

Ensayo: 19    A/C: 0.35    % Plas: 30.00%

| N° | Fecha | Días | Dimensiones |   | Carga | Esfuerzo |
|----|-------|------|-------------|---|-------|----------|
|    |       |      | b           | h |       |          |

| Fecha | Días | Dimensiones |   | Carga | Esfuerzo |
|-------|------|-------------|---|-------|----------|
|       |      | b           | h |       |          |

| Fecha | Días | Dimensiones |   | Carga | Esfuerzo |
|-------|------|-------------|---|-------|----------|
|       |      | b           | h |       |          |

|   | d-m    |    | mm    | mm    | (kg)  | (MPa)* |
|---|--------|----|-------|-------|-------|--------|
| 0 | 03-oct | 0  | 50.00 | 50.00 | 0     | 0.00   |
| 1 | 10-oct | 7  | 50.00 | 50.10 | 20020 | 78.40  |
| 2 | 10-oct | 7  | 49.75 | 49.90 | 18650 | 73.70  |
| 3 | 10-oct | 7  | 50.15 | 50.25 | 20100 | 78.25  |
| 4 | 17-oct | 14 | 49.75 | 50.30 | 24500 | 96.04  |
| 5 | 17-oct | 14 | 50.35 | 50.20 | 21500 | 83.45  |
| 6 | 17-oct | 14 | 50.75 | 50.35 | 24050 | 92.33  |
| 7 | 31-oct | 28 | 50.45 | 50.20 | 23720 | 91.88  |
| 8 | 31-oct | 28 | 50.25 | 50.60 | 25830 | 99.66  |
| 9 | 31-oct | 28 | 50.30 | 50.35 | 23740 | 91.96  |

|        | d-m |    | mm    | mm    | (kg)  | (MPa)* |
|--------|-----|----|-------|-------|-------|--------|
| 03-oct | 0   | 0  | 50.00 | 50.00 | 0     | 0.00   |
| 10-oct | 7   | 7  | 49.65 | 50.25 | 17900 | 70.38  |
| 10-oct | 7   | 7  | 49.95 | 50.40 | 17194 | 67.00  |
| 10-oct | 7   | 7  | 49.80 | 50.10 | 16020 | 62.99  |
| 17-oct | 14  | 14 | 50.15 | 50.30 | 23930 | 93.06  |
| 17-oct | 14  | 14 | 49.90 | 49.95 | 21760 | 85.64  |
| 17-oct | 14  | 14 | 50.40 | 50.35 | 12098 | 46.77  |
| 31-oct | 28  | 28 | 49.70 | 50.35 | 17860 | 70.02  |
| 31-oct | 28  | 28 | 49.95 | 50.25 | 23210 | 90.71  |
| 31-oct | 28  | 28 | 49.45 | 50.20 | 22960 | 90.73  |

|        | d-m |    | mm    | mm    | (kg)  | (MPa)* |
|--------|-----|----|-------|-------|-------|--------|
| 03-oct | 0   | 0  | 50.00 | 50.00 | 0     | 0.00   |
| 10-oct | 7   | 7  | 50.05 | 50.00 | 16410 | 64.33  |
| 10-oct | 7   | 7  | 50.10 | 50.15 | 18420 | 71.92  |
| 10-oct | 7   | 7  | 49.10 | 50.21 | 20400 | 81.18  |
| 18-oct | 15  | 15 | 50.35 | 50.40 | 21050 | 81.38  |
| 18-oct | 15  | 15 | 50.65 | 50.90 | 22320 | 84.93  |
| 18-oct | 15  | 15 | 49.75 | 50.10 | 20520 | 80.76  |
| 31-oct | 28  | 28 | 49.95 | 50.45 | 23400 | 91.09  |
| 31-oct | 28  | 28 | 49.85 | 50.40 | 17770 | 69.38  |
| 31-oct | 28  | 28 | 49.40 | 50.30 | 19830 | 78.29  |

Ensayo: 20    A/C: 0.30    % Plas: 0.00%

Ensayo: 21    A/C: 0.30    % Plas: 50.00%

Ensayo: 22    A/C: 0.30    % Plas: 100.00%

| N° | Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga  | Esfuerzo |
|----|--------|------|-------------|-------|--------|----------|
|    |        |      | b           | h     |        |          |
|    | d-m    | mm   | mm          | (kg)  | (MPa)* |          |
| 0  | 17-oct | 0    | 50.00       | 50.00 | 0      | 0.00     |
| 1  | 24-oct | 7    | 50.25       | 49.85 | 15444  | 60.48    |
| 2  | 24-oct | 7    | 50.05       | 50.20 | 15408  | 60.16    |
| 3  | 24-oct | 7    | 50.40       | 49.95 | 13926  | 54.27    |
| 4  | 31-oct | 14   | 50.02       | 49.80 | 17600  | 69.32    |
| 5  | 31-oct | 14   | 50.00       | 50.35 | 20850  | 81.25    |
| 6  | 31-oct | 14   | 49.65       | 50.70 | 19210  | 74.86    |
| 7  | 14-nov | 28   | 51.00       | 50.15 | 14846  | 56.94    |
| 8  | 14-nov | 28   | 51.60       | 50.30 | 19670  | 74.35    |
| 9  | 14-nov | 28   | 51.40       | 50.30 | 17068  | 64.76    |

| Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga | Esfuerzo |
|--------|------|-------------|-------|-------|----------|
|        |      | b           | h     |       |          |
|        | d-m  | mm          | mm    | (kg)  | (MPa)*   |
| 17-oct | 0    | 50.00       | 50.00 | 0     | 0.00     |
| 24-oct | 7    | 49.95       | 50.90 | 19620 | 75.70    |
| 24-oct | 7    | 49.80       | 49.65 | 21380 | 84.83    |
| 24-oct | 7    | 50.55       | 49.95 | 12348 | 47.97    |
| 31-oct | 14   | 49.80       | 50.00 | 26080 | 102.75   |
| 31-oct | 14   | 49.80       | 49.85 | 27310 | 107.92   |
| 31-oct | 14   | 50.01       | 49.76 | 23410 | 92.29    |
| 14-nov | 28   | 50.50       | 50.05 | 22080 | 85.70    |
| 14-nov | 28   | 49.39       | 50.25 | 20780 | 82.14    |
| 14-nov | 28   | 50.52       | 50.05 | 27670 | 107.35   |

| Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga | Esfuerzo |
|--------|------|-------------|-------|-------|----------|
|        |      | b           | h     |       |          |
|        | d-m  | mm          | mm    | (kg)  | (MPa)*   |
| 17-oct | 0    | 50.00       | 50.00 | 0     | 0.00     |
| 24-oct | 7    | 50.20       | 50.10 | 15248 | 59.48    |
| 24-oct | 7    | 50.15       | 49.95 | 19050 | 74.60    |
| 24-oct | 7    | 49.55       | 50.05 | 21400 | 84.65    |
| 31-oct | 14   | 49.35       | 49.85 | 20530 | 81.87    |
| 31-oct | 14   | 49.90       | 50.10 | 25780 | 101.16   |
| 31-oct | 14   | 49.80       | 49.70 | 23270 | 92.23    |
| 14-nov | 28   | 49.95       | 50.30 | 20850 | 81.41    |
| 14-nov | 28   | 49.90       | 50.40 | 21180 | 82.62    |
| 14-nov | 28   | 49.81       | 50.35 | 20570 | 80.46    |

Ensayo: 23    A/C: 0.40    % Arena 20%

Ensayo: 24    A/C: 0.40    % Arena 30%

Ensayo: 25    A/C: 0.40    % Arena 10%

| N° | Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|----|--------|------|-------------|-------|---------------|--------------------|
|    |        |      | b           | h     |               |                    |
|    | d-m    | mm   | mm          |       |               |                    |
| 0  | 30-oct | 0    | 50.00       | 50.00 | 0             | 0.00               |
| 1  | 07-nov | 8    | 50.40       | 50.25 | 14042         | 54.39              |
| 2  | 07-nov | 8    | 50.50       | 50.25 | 8296          | 32.07              |
| 3  | 07-nov | 8    | 50.50       | 49.95 | 14248         | 55.41              |
| 4  | 14-nov | 15   | 49.70       | 50.45 | 16038         | 62.75              |
| 5  | 14-nov | 15   | 50.05       | 50.40 | 16246         | 63.18              |
| 6  | 14-nov | 15   | 50.00       | 50.45 | 16984         | 66.05              |
| 7  | 27-nov | 28   | 49.65       | 50.20 | 16396         | 64.53              |
| 8  | 27-nov | 28   | 50.10       | 49.75 | 16788         | 66.07              |
| 9  | 27-nov | 28   | 50.35       | 49.90 | 14898         | 58.17              |

| Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------|------|-------------|-------|---------------|--------------------|
|        |      | b           | h     |               |                    |
|        | d-m  | mm          | mm    |               |                    |
| 30-oct | 0    | 50.00       | 50.00 | 0             | 0.00               |
| 07-nov | 8    | 50.55       | 50.50 | 14622         | 56.19              |
| 07-nov | 8    | 50.85       | 50.15 | 14846         | 57.11              |
| 07-nov | 8    | 50.45       | 50.35 | 13536         | 52.28              |
| 14-nov | 15   | 50.55       | 50.20 | 13770         | 53.23              |
| 14-nov | 15   | 51.24       | 50.35 | 15662         | 59.55              |
| 14-nov | 15   | 50.60       | 50.85 | 14964         | 57.05              |
| 27-nov | 28   | 50.45       | 50.05 | 19070         | 74.09              |
| 27-nov | 28   | 50.00       | 50.05 | 20140         | 78.95              |
| 27-nov | 28   | 49.80       | 49.80 | 19680         | 77.85              |

| Fecha  | Días | Dimensiones |       | Carga<br>(kg) | Esfuerzo<br>(MPa)* |
|--------|------|-------------|-------|---------------|--------------------|
|        |      | b           | h     |               |                    |
|        | d-m  | mm          | mm    |               |                    |
| 30-oct | 0    | 50.00       | 50.00 | 0             | 0.00               |
| 07-nov | 8    | 50.75       | 50.35 | 13510         | 51.87              |
| 07-nov | 8    | 50.60       | 50.50 | 14298         | 54.89              |
| 07-nov | 8    | 49.75       | 50.30 | 10992         | 43.09              |
| 14-nov | 15   | 49.90       | 50.30 | 16072         | 62.82              |
| 14-nov | 15   | 49.95       | 50.30 | 16332         | 63.77              |
| 14-nov | 15   | 50.35       | 50.24 | 15762         | 61.13              |
| 27-nov | 28   | 49.80       | 50.10 | 18940         | 74.47              |
| 27-nov | 28   | 49.90       | 49.95 | 18700         | 73.60              |
| 27-nov | 28   | 50.00       | 50.05 | 17184         | 67.36              |