

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Maikel Méndez Morales, Ing. Alonso Poveda Montoya, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO
ADOLFO
ROJAS
MOYA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA)
Fecha: 2021.02.03 10:22:41 -06'00'

Ing. Gustavo Rojas Moya.
Director

**MAIKEL
MENDEZ
MORALES
(FIRMA)**

Digitally signed by MAIKEL MENDEZ MORALES (FIRMA)
DN:
SERIALNUMBER=CPF-01-0909-0334
, SN=MENDEZ MORALES,
G=MAIKEL, C=CR, O=PERSONA FISICA, OU=CIUDADANO,
CN=MAIKEL MENDEZ MORALES (FIRMA)
Reason: FD
Location: your signing location here
Date: 2021-02-03 09:43:58
Foxit Reader Version: 9.7.0

Ing. Maikel Méndez Morales.
Profesor Lector

ROMMEL LEZING
CUEVAS
KAUFFMANN
(FIRMA)

Firmado digitalmente por ROMMEL LEZING CUEVAS KAUFFMANN (FIRMA)
Fecha: 2021.02.03 10:53:14 -06'00'

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.
Profesor Guía

**WILLIAM
ALONSO
POVEDA
MONTOYA**

Firmado digitalmente por WILLIAM ALONSO POVEDA MONTOYA
Fecha: 2021.02.03 10:42:31 -06'00'

Ing. Alonso Poveda Montoya.
Profesor Observador

Análisis de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos costarricenses

Abstract

Costa Rican hydraulic cements are blended cements, they contain additions as percentage substitution of clinker. Each cement type has additions in different proportions, due to this is important to know the concrete behavior in accordance with hydraulic cement of fabrication. Cements technologies and addition materials' characteristics may change through time, for this reason is necessary the periodic study of concrete's behavior in Costa Rica.

In this study is analyze concrete and hydraulic cement compressive strength, made with five national cements types of three suppliers. Concrete cylinders and mortars cubes were tested at 7, 14, 28, 133, 140 and 147 days. Obtained results were analyzed with a statistic treatment including since descriptive statistic until ANOVA and Tukey tests in order to know significant differences between treatments.

According to results there is evidence that exist significant differences between average strength of some concretes and hydraulic cements from the same strength class. Additionally, all analyzed concretes reach high strength percentages until 147 days, approximately between 40% and 84% more than the design strength ($f'c$), depending on cement type.

Keywords: concrete, hydraulic cement, Blended cements, Costa Rican cements, compressive strength

Resumen

Los cementos hidráulicos costarricenses son adicionados o combinados, por lo que contienen materiales, como adiciones, en sustitución de un porcentaje del clínker. Cada tipo de cemento contiene adiciones en diferente proporción, por ello es importante conocer cuál es el comportamiento de los concretos según el cemento hidráulico con el cual se fabriquen.

Las tecnologías de los cementos hidráulicos y las características de los componentes adicionados pueden variar a lo largo del tiempo, ello hace que sea necesario el estudio periódico del comportamiento del concreto hidráulico a nivel nacional.

En este estudio se analiza la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos, fabricados con cinco tipos de cementos nacionales, correspondientes a tres proveedores. Se fallaron cilindros de concreto y cubos de mortero a los 7, 14, 28, 133, 140 y 147 días. Los resultados obtenidos se analizaron mediante un tratamiento estadístico que incluye desde estadística descriptiva hasta pruebas de ANOVA y Tukey para conocer si existen diferencias entre tratamientos.

Se demostró que existen diferencias significativas de las resistencias promedio entre concretos y cementos hidráulicos de la misma clase de resistencia. Además, se encontró que todos los concretos analizados alcanzan elevados porcentajes de resistencia hasta los 147 días, aproximadamente entre 40% y 84% más de la resistencia de diseño ($f'c$), según el tipo de cemento.

Palabras clave: concreto hidráulico, cemento hidráulico, cementos adicionados, cementos costarricenses, resistencia a la compresión

Análisis de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos costarricenses

ANLLEL RAQUEL ZÚÑIGA COTO

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2020

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio	2
Resumen ejecutivo.....	3
Introducción.....	5
Marco Teórico	7
Metodología	26
Resultados	50
Análisis de los resultados	89
Conclusiones.....	109
Recomendaciones	112
Apéndices	115
Anexos	116
Referencias	118

Prefacio

En Costa Rica la mayoría de los cementos hidráulicos comercializados son combinados o mezclados. Por lo que es importante conocer el comportamiento en términos mecánicos de cada tipo de cemento hidráulico y sus efectos en el concreto y además realizar comparaciones entre diferentes proveedores del mismo tipo de cemento, aspectos que se abarcan en el desarrollo de este proyecto.

Los estudios acerca del comportamiento de estos materiales deben realizarse con periodicidad ya que las tecnologías de los cementos hidráulicos varían con el tiempo, pueden surgir cambios en la normativa nacional INTE C147 (*Cemento Hidráulico. Requisitos*) y además se incorporan nuevos proveedores al mercado; por lo que con este estudio se generó información actualizada acerca del comportamiento de los concretos fabricados con cementos adicionados nacionales

Se generó conocimiento y recomendaciones útiles en términos de los procesos de fabricación de especímenes para estudios de naturaleza similar al presentado.

El desarrollo de este proyecto surge con el objetivo principal de analizar el comportamiento en compresión de concretos y cementos hidráulicos, abarcando la mayoría de los cementos que se comercializan actualmente a nivel nacional y siendo estos de tres proveedores. Además, el estudio no se limita a edades tempranas y de diseño (28 días) sino que se analiza la resistencia a compresión de cada tipo de concreto y cemento hidráulico hasta los 147 días, con el propósito de conocer los porcentajes de ganancia de resistencia en comparación con f'_c y con lo obtenido a los 28 días.

Agradezco en primer lugar a Dios todopoderoso por guiar mis pasos y permitirme culminar esta etapa de mis estudios. A mis padres Patricia Coto y Bernal Zúñiga, por enseñarme a hacer cada proyecto en mi vida como si fuera para Dios y por su esfuerzo para darnos el estudio a mí y a mis hermanos. A ellos, Moni y Sebas por estar siempre a mi lado. A Valery Rodríguez, mi mejor amiga, por toda su ayuda en cada paso que he dado. A Mauricio Fuentes por ser mi apoyo incondicional durante estos años de estudio. A mi profesor guía Rommel Cuevas, por sus consejos, colaboración y guía durante este proyecto. A los profesores Maikel Méndez y José Andrés Araya por su orientación en el campo de la Estadística. A los técnicos del Laboratorio CIVCO por su incondicional cooperación en el proceso. Y finalmente a mis colaboradores Karen López, Gerson Ramírez, Jean Paul Ramírez, Ricardo Hidalgo, Byron Orozco y Jean Carlo Monge, sin su ayuda no habría sido posible este proyecto.

Resumen ejecutivo

Considerando que, tanto la norma técnica que establece los requisitos del cemento hidráulico que se produce o importa en Costa Rica (INTE C147:2018) como el Reglamento Técnico que regula los cementos hidráulicos utilizados a nivel nacional (RTCR 479:2015), aprueban el uso de cementos adicionados (“blended cements”), es primordial conocer el comportamiento de los concretos que se fabrican con este tipo de cementos. Los cementos hidráulicos tipo *adicionados* son prácticamente los únicos que se comercializan en el país.

El estudio de los concretos debe realizarse de manera periódica, debido a que las características de los materiales utilizados en su fabricación pueden variar a través del tiempo y la fuente de origen también puede cambiar. Además, la tecnología de los cementos hidráulicos avanza con el tiempo en busca de mejoras en el desempeño del material, por lo que probablemente la proporción de materiales utilizados en la fabricación de los cementos está en constante cambio.

El presente estudio analizó concretos y cementos hidráulicos evaluando su comportamiento mecánico en compresión, se buscó abarcar la mayoría de los cementos que se comercializan en Costa Rica. El desarrollo de este proyecto generó información actualizada acerca del comportamiento de los concretos fabricados con cementos adicionados nacionales, la cual es útil para distintas instituciones que a nivel nacional se encargan de evaluar y dar a conocer el uso y desempeño de estos materiales y para el conocimiento de proveedores y constructores nacionales. En términos académicos el proyecto generó recomendaciones útiles para el desarrollo de futuros proyectos de temática similar.

El objetivo principal fue “*Analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos*

costarricenses”, de este se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar los agregados para la elaboración de las mezclas de concreto hidráulico y mortero.
- Diseñar la mezcla de concreto hidráulico y comprobar la resistencia de diseño.
- Determinar la resistencia a la compresión del concreto y mortero hidráulico a edades superiores a 28 días.
- Analizar el comportamiento a la compresión de los especímenes de concreto y cemento hidráulico, por medio de metodología estadística

Para el logro de estos objetivos se realizaron diversas actividades que se describen a continuación.

Para el desarrollo del proyecto, se siguió la normativa ASTM (American Society of Testing and Materials) en su versión vigente en el momento de desarrollar este documento y la INTE C147:2018 como normativa nacional. Asimismo, se siguieron las guías y prácticas del ACI (American Concrete Institute) necesarias en el desarrollo del estudio.

Se seleccionaron los tipos de cementos por utilizar, a los cuales se les designó las siguientes letras como identificación:

- A: MM/B (P-C)-28 (proveedor Fortaleza)
- B: MC/A-AR (proveedor Fortaleza)
- C: MM/B (P-C)-28 (proveedor Cemex)
- D: MP/A-AR (proveedor Cemex)
- E: MM/C (C-P)-28 (proveedor Holcim)

Los ensayos para la caracterización del agregado fino y grueso se realizaron con el fin de obtener los parámetros necesarios para la realización del diseño de mezcla de concreto según el método propuesto por el ACI 211.1-91 (2002) y para comparar las características de los materiales contra la normativa que establece los requisitos mínimos para agregados (ASTM C33-18). Además, se caracterizó la arena de sílice

utilizada en la fabricación de los morteros de cemento hidráulico.

Se fabricaron cinco mezclas de concreto hidráulico y cinco mezclas de mortero de cemento hidráulico, una por cada tipo de cemento utilizado. Para cada mezcla se elaboraron 51 especímenes cilíndricos de 100x200 mm (concreto) y 51 especímenes cúbicos estándar según la ASTM C109-20b (mortero). Estos se fallaron a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días para conocer su cumplimiento con normas y diseños previos. Además, debido a la importancia de conocer cómo se comporta el desarrollo de resistencia del concreto a través del tiempo utilizando cementos adicionados, se realizaron fallas a la compresión a los 133, 140 y 147 días. Los especímenes para cada edad de falla se seleccionaron de manera aleatoria. Cabe destacar que entre mezclas de concreto la variable principal fue el tipo de cemento hidráulico, ya que se mantuvo constante el agregado fino y grueso en todas las mezclas.

Los ensayos antes descritos se llevaron a cabo en el Laboratorio del Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO) del Tecnológico de Costa Rica.

Todos los datos obtenidos fueron analizados mediante un tratamiento estadístico, utilizando los programas Minitab y Excel. El tratamiento estadístico conllevó estadística descriptiva, verificación de la dispersión y valores atípicos de los resultados y verificación de la distribución normal de estos. Además, se establecieron modelos de regresión para cada mezcla y se realizaron pruebas de ANOVA de un factor y pruebas de Tukey, con el fin de establecer las relaciones existentes entre los concretos y morteros fabricados con cada tipo de cemento.

Las comparaciones se realizaron basándose en las adiciones que contienen los cementos hidráulicos, agrupándolos según la clase de resistencia nominal¹.

En cuanto a los resultados obtenidos se tiene que el método de diseño de mezcla utilizado al ser de aproximación produce variabilidad implícita entre mezclas de concreto, además, este método no difiere según el desempeño del cemento hidráulico en estudio.

Se obtuvo que en todos los concretos hidráulicos la resistencia de diseño (f_c) fue sobrepasada, sin embargo, se da un desarrollo de

resistencia diferente entre los tipos de concretos. En algunos concretos, a pesar de estar fabricados con cementos catalogados en la misma clase de resistencia, presentan diferencias significativas en la resistencia promedio, esto según los resultados obtenidos de las pruebas de ANOVA y Tukey.

En relación con los morteros de cemento hidráulico según los resultados obtenidos, ninguno de los cementos analizados cumple con el requisito mínimo de resistencia a la compresión¹. Esto debido probablemente a incumplimientos en la arena de sílice.

El análisis de los estadísticos descriptivos y la dispersión de datos mostró una alta variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión tanto en concretos como en morteros, independientemente del tipo de cemento utilizado. Debido a los hallazgos de variabilidad se desarrollaron algunos instrumentos como: listas de verificación, diagramas de Ishikawa y recomendaciones para mejorar el proceso de fabricación de especímenes, con el objetivo de servir de apoyo para estudios similares al presentado. Además, al obtener alta variabilidad en condiciones de laboratorio, esto genera una voz de alerta acerca del control de calidad que se debe realizar en las construcciones, ya que las condiciones de campo aumentan la probabilidad de obtener resistencias con mayor dispersión.

En el estudio se encontró que los concretos fabricados con cementos modificados mixtos clase 28 pueden llegar a generar hasta los 147 días de 40% a 45% más de resistencia que la de diseño (f_c). Mientras que los concretos de cementos modificados con puzolana clase AR pueden llegar a tener en promedio hasta 45% más resistencia que la de diseño (f_c). Y en los concretos fabricados con cementos modificados con caliza clase AR se desarrolla en promedio hasta 85% más resistencia que la de diseño.

Este hallazgo debe ser tomado en consideración durante el diseño de elementos de concreto estructural, pues las resistencias que el concreto sigue desarrollando posteriormente a los 28 días podrían generar elementos más rígidos que su diseño original, el cual se realiza generalmente con la resistencia de diseño a los 28 días; los elementos más rígidos pueden generar fallas frágiles, las cuales según el CSCR deben evitarse para garantizar un comportamiento dúctil durante solicitaciones sísmicas.

¹ INTE C147:2018

Introducción

Los cementos hidráulicos producidos y comercializados en Costa Rica son combinados o adicionados, por lo que utilizan algunos materiales como adiciones en sustitución de un porcentaje del clínker. Dentro de las adiciones que se pueden utilizar se encuentran la escoria de alto horno, humo de sílice, puzolanas o caliza. En Costa Rica desde el 2005 con la publicación del Reglamento Técnico RTCR 383:2004 es común el uso de adiciones en la fabricación de los cementos hidráulicos que se utilizan en todo el territorio nacional (Solano-Jiménez, 2014). Actualmente, el Reglamento Técnico vigente es el RTCR 479:2015, en este se establecen los requisitos mecánicos, físicos y químicos con que deben cumplir los cementos adicionados a nivel nacional.

Los cementos hidráulicos comercializados en el país se catalogan según diferentes designaciones o tipos según lo que indica la normativa¹, estos se diferencian principalmente por el tipo de adición que contienen y la proporción de esta, así como la proporción de clínker. Al contener componentes adicionados en diferente proporción es importante conocer cuál es el comportamiento de los concretos según el cemento hidráulico con que se fabriquen.

Además, las tecnologías de los cementos hidráulicos pueden variar con los años, así como las características de los materiales utilizados en su manufactura, esto sin afectar la calidad o desempeño del material, pero sí ocasiona que sea necesario el estudio periódico de las características y comportamiento del concreto hidráulico a nivel nacional.

En Costa Rica se han realizado estudios similares, Elizondo Valverde (2013) comprobó la fuerte relación existente entre la resistencia y la relación A/C en los cementos tipo UG y MP-AR (designaciones de la época) obteniendo aumentos de hasta 20% de resistencia a los 56 días, en comparación con lo obtenido a los 28 días.

Asimismo, Carvajal Coto (2016) demostró que los altos porcentajes de adición en los cementos de uso general comercializados en los principales cantones de la provincia de San José, ocasionan una disminución en su densidad y resistencia a la compresión, obteniendo valores menores al mínimo especificado¹. Hernández Mora (2018) determinó que los cementos modificados (*adicionados*) a los 56 días ganan 21% adicional de resistencia que la obtenida a los 28 días y que a edades avanzadas la diferencia de resistencia entre concretos hechos con el mismo cemento y diferentes agregados se estabiliza. Este último hecho también se verificó por Delgado Castro (2018).

El presente estudio analiza concretos y cementos hidráulicos, abarcando la mayoría de los cementos que se comercializan en Costa Rica y evaluando su comportamiento mecánico en compresión. Por ello se planteó el siguiente objetivo general: *“Analizar el comportamiento de la resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos costarricenses”*.

Para el cumplimiento del objetivo se desarrollaron cinco mezclas de concreto fabricadas cada una con un tipo de cemento hidráulico diferente y correspondiente a tres proveedores. De igual manera se fabricaron cinco mezclas de mortero de cemento hidráulico con el objetivo de comprobar la resistencia a la compresión tanto del material aglutinante (cemento) como del concreto y comparar este comportamiento entre materiales homólogos (fabricados con el mismo cemento).

Los agregados pétreos utilizados en las mezclas se caracterizaron con el fin de obtener los parámetros necesarios para realizar el diseño de mezcla según el método del ACI 211.1-91 (2002) y para verificar cumplimiento con normativa².

Por cada tipo de cemento hidráulico utilizado se elaboraron 51 especímenes cilíndricos de 100x200 mm (concreto) y 51 especímenes

¹ INTE C147:2018

² ASTM C33-18

cúbicos (mortero). Estos se fallaron a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días para conocer su cumplimiento con normas y diseños previos. Además, debido a la importancia de conocer cómo se comporta el desarrollo de resistencia a través del tiempo utilizando cementos adicionados, se realizaron fallas a la compresión a los 133, 140 y 147 días.

Todos los datos obtenidos fueron analizados mediante un tratamiento estadístico con el fin de detectar la variabilidad de los datos y la existencia de diferencias significativas entre grupos de estudio, este conllevó estadística descriptiva, verificación de la dispersión y valores atípicos de los resultados, verificación de la distribución normal. Además, se establecieron modelos de regresión para cada mezcla y se realizaron pruebas de ANOVA de un factor y pruebas de Tukey.

Las comparaciones se realizaron basándose en las adiciones que contienen los cementos hidráulicos, agrupándolos según la clase de resistencia nominal que poseen¹.

De acuerdo con el análisis realizado se estableció que existen diferencias significativas entre las resistencias promedio de algunos concretos y cementos hidráulicos clasificados en la misma clase de resistencia. En el estudio se encontró que los concretos fabricados con cementos modificados mixtos clase 28 pueden llegar a generar a edades avanzadas como 147 días de 40% a 45% más de resistencia que la de diseño (f_c). Mientras que los concretos de cementos modificados con puzolana clase AR pueden llegar a tener en promedio hasta 45% más resistencia que la de diseño (f_c). Y en los concretos fabricados con cementos modificados con caliza clase AR pueden desarrollar en promedio hasta 85% más resistencia que la de diseño.

Además, se comprobó que la variabilidad en resultados individuales es independiente del tipo de cemento hidráulico utilizado.

Debido a los hallazgos de variabilidad se presentan algunos instrumentos (listas de verificación, diagramas de Ishikawa, recomendaciones para mejorar el proceso de fabricación de especímenes), con el objetivo de servir de apoyo para estudios similares al presentado.

Los capítulos de Metodología, Resultados y Análisis de Resultados se estructuran de la siguiente forma: primero se presentan los aspectos relacionados con la caracterización de agregados, luego el diseño de mezcla, posteriormente se menciona todo lo relacionado con la fabricación y resultados de los cilindros de concreto, seguido por todo lo relacionado con la fabricación y resultados de los cubos de mortero, se continúa con el tratamiento estadístico primero de concretos y posterior de morteros, para finalizar cada sección se comentan las técnicas complementarias.

¹ INTE C147:2018

Marco Teórico

Cemento hidráulico

El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente molido que, al mezclarse con agua forma una pasta que fragua y endurece debido a la reacción química que se genera con la hidratación. Una vez que ha endurecido conserva su estabilidad y resistencia. Está compuesto principalmente por clínker y sulfato de calcio, también conocido como yeso (INTECO, 2018). Kosmatka & Wilson (2011) indican que:

La reacción química de hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma una capa fibrosa en su superficie que se extiende gradualmente hasta enlazarse con otras capas o se adhiere a sustancias adyacentes. Esta acumulación fibrosa resulta en rigidez progresiva, endurecimiento y desarrollo de resistencia. (p.9)

Esta red de cristales o red fibrosa continúa formándose a través del tiempo mientras aún esté presente el cemento no hidratado y en condiciones favorables de humedad y temperatura.

Cemento hidráulico Portland

Es el cemento hidráulico más básico y puro ya que no tiene materiales adicionales (aditivos), se compone principalmente de silicatos de calcio los cuales favorecen el proceso de ganancia de resistencia.

A manera de resumen los pasos para la manufactura del cemento Portland son:

- Para la obtención del clínker la materia prima suele ser rocas calizas, esquisto, arcillas o mineral de hierro, estos se trituran reduciendo su tamaño hasta 125 mm.

- Luego se vuelve a triturar hasta un tamaño de 20 mm y se almacenan por separado.
- Posteriormente se dosifican de acuerdo con el requerimiento y se vuelven a triturar hasta hacerlas un polvo fino y se mezcla.
- Luego se lleva a la calcinación a unos 1500°C en hornos rotatorios donde las materias primas se transforman químicamente en el clínker.
- Al enfriarse el clínker se muele junto con el yeso para convertirlo en Cemento Portland.

Los cementos Portland son manufacturados para cumplir con las especificaciones de ASTM C150. Esta norma abarca los siguientes tipos de cemento Portland.

Tabla 1. Tipos de Cemento Portland

Tipo	Designación
Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo II (MH)	Moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos
Tipo II (MH)A	Moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

Fuente: Design and Control of Concrete Mixtures, 2011

Cementos hidráulicos combinados o adicionados

Este tipo de cementos hidráulicos son producidos mediante la trituración uniforme y conjunta o por la mezcla de dos o más tipos de materiales finos. Según la "Portland Cement Association" (PCA) los materiales de adición generalmente usados son cemento Portland, cemento de escoria, cenizas volantes, humo de sílice, arcilla calcinada, otros materiales puzolánicos, cal hidratada y combinaciones premezcladas de estos materiales (Kosmatka & Wilson, 2011).

En Costa Rica los cementos hidráulicos más utilizados y producidos son adicionados. Los cementos hidráulicos adicionados deben cumplir con los requerimientos de las normas ASTM C595 (*Especificación Estándar para Cementos Hidráulicos Combinados*) y/o ASTM C1157 (*Especificación Estándar de Desempeño para Cementos Hidráulicos*).

Tabla 2. Tipos de Cementos Hidráulicos aprobados por normativa costarricense

Tipo	Designación
Tipo I	Cemento Portland ordinario
Tipo ME	Cemento hidráulico modificado con escoria de alto horno
Tipo MF	Cemento hidráulico modificado con humo de sílice
Tipo MP	Cemento hidráulico modificado con puzolana, ceniza volante o esquisto
Tipo MC	Cemento hidráulico modificado con caliza
Tipo MM	Cemento hidráulico modificado mixto

Fuente: INTE C147:2018

Componentes de los cementos hidráulicos adicionados

La norma costarricense INTE C147:2018 (anteriormente INTE 06-11-15:2015) especifica cuáles son los componentes que pueden utilizarse en la fabricación de los cementos adicionados, los cuales se detallan a continuación.

Clínker de Cemento Portland

Material hidráulico que debe estar constituido, en al menos dos tercios de su masa, por silicatos de calcio (C_3S y C_2S) y el resto por fases del clínker, conteniendo aluminio, hierro y otros.

Dentro de los compuestos principales del clínker están (Kosmatka & Wilson, 2011):

- Silicato Tricálcico (C_3S): también llamado "Alita", se hidrata y endurece rápidamente y es en gran parte responsable del fraguado y resistencia iniciales de la pasta de cemento hidráulico. En general, la resistencia inicial del concreto de cemento hidráulico es mayor con mayores porcentajes de C_3S .
- Silicato Dicálcico (C_2S): también llamado "Belita", se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran medida al aumento de resistencia a edades superiores a una semana por lo que es responsable de la resistencia final a la pasta de cemento hidráulico.
- Aluminoferrita Tetracálcica (C_4AF): es producto del uso de materias primas de hierro y aluminio para reducir la temperatura durante la fabricación del cemento. Contribuye poco o en ninguna medida al desarrollo de resistencia y es el responsable del característico color gris.
- Aluminato Tricálcico (C_3A) es el que genera más calor de hidratación, da mayor velocidad de fraguado y produce variaciones de volumen del cemento hidráulico.
- Sulfato de Calcio ($CaSO_4$): también llamado yeso, se agrega al cemento en la molienda final para que reacciones con el Aluminato Tricálcico (C_3A) para formar etringita. El sulfato de calcio controla la hidratación del C_3A para que el cemento no fragüe demasiado rápido. Ayuda a controlar la contracción por secado.

Escoria granulada de alto horno

Es el material vítreo formado a partir de escoria fundida producida en altos hornos como subproducto de la producción de hierro utilizado en la fabricación de acero. Según la norma INTE C147 debe estar constituida, en al menos dos

tercios de su masa por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂). El resto de su masa contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) y pequeñas cantidades de otros compuestos.

Materiales puzolánicos

Según Kosmatka & Wilson (2011), los materiales puzolánicos se producen a partir de depósitos minerales naturales, algunos requieren tratamiento térmico para convertirse en material puzolánico y otros como las cenizas volcánicas requieren un procesamiento mínimo. En Costa Rica pueden ser puzolanas naturales, puzolanas naturales calcinadas, cenizas volantes silíceas o cenizas volantes calcáreas y esquistos calcinados.

Las características y composición del material puzolánico deben ser las establecidas en la Tabla 1 de la norma INTE C147:2018, para los cementos tipo MP (Modificado con Puzolana) y MM (Modificado Mixto).

En Norteamérica estos materiales “han sido utilizados para controlar el aumento de calor, mejorar la resistencia al ataque de sulfatos y mitigar la reacción álcali-sílice” (Kosmatka & Wilson, 2011, p.71).

Caliza

El uso de la caliza es beneficioso debido a que cumple una función de relleno, al completar la fracción más fina de la granulometría del cemento sin aumentar la cantidad necesaria de agua, ocasionando una especie de bloqueo de los poros capilares en la matriz (Díaz, Izquierdo, Mejía de Gutiérrez, & Gordillo, 2013).

En Costa Rica la caliza debe cumplir con los requisitos mostrados en la tabla 2 de la norma INTE C147:2018.

Humo de Sílice

El humo de sílice es la sílice no cristalina ultrafina producida en hornos de arco eléctrico como subproducto industrial de metales de silicio y se utiliza en aplicaciones donde se necesita un alto grado impermeabilidad y también en concreto de alta resistencia (Kosmatka & Wilson, 2011). En

Costa Rica las propiedades químicas y físicas del humo de sílice deben ser las establecidas en la norma INTE C279 la cual es equivalente de la ASTM C1240 (Especificación Estándar para Humo de Sílice utilizado en Mezclas Cementantes).

Agregados

Son aquellos materiales inertes, de forma angular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento hidráulico en presencia de agua forman un material compacto que puede ser mortero o concreto (Rivera, 2006). Según lo señalan Kosmatka & Wilson (2011), los agregados constituyen de un 60% a 75% del volumen del concreto y tienen influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido y en la economía de las mezclas.

Agregado grueso

Esta clasificación se da según la granulometría del material, en este caso agregado grueso son aquellas partículas que tienen tamaño superior a 4,75 mm (tamiz N°4). Comúnmente conocido como piedra o roca. Algunas de sus características más importantes y con mayor influencia en las mezclas de concreto hidráulico son: su origen, porcentaje de absorción, granulometría, tamaño máximo, contenido de finos, pérdida por abrasión y la textura superficial (Chan, Solís, & Moreno, 2003; Kosmatka & Wilson, 2011; Xu et al., 2020).

Agregado fino

Agregado fino son aquellas partículas de tamaño inferior a 4,75 mm (tamiz N°4) y no menor de 0,075 mm (tamiz N°200). Comúnmente conocido como arena. Algunas de sus características más importantes y con mayor influencia en las mezclas de concreto hidráulico son: su origen, absorción, granulometría, módulo de finura, cantidad de material más fino que el tamiz N°200 y porcentaje de materia orgánica (Chan et al., 2003; Guerrero Sánchez & Hoyos Muñoz, 2020).

Arena de Sílice

Según la especificación ASTM C778-17 se define como “arena de sílice compuesta casi en su totalidad por granos naturalmente redondeados de cuarzo casi puro, utilizada para preparar morteros en el ensayo de cementos hidráulicos”.

Concreto hidráulico

Es la mezcla entre un conglomerante, una serie de agregados y un agente de reacción. En el caso del concreto hidráulico como tal, el conglomerante corresponde al cemento hidráulico y el agente de reacción es el agua. Los agregados mayormente usados corresponden a agregados pétreos divididos en agregados finos (arena) y gruesos (piedra) (Kosmatka & Wilson, 2011). El concreto hidráulico se compone de dos fases: *la pasta* (cemento, agua y aire) y *los agregados* (finos y gruesos). En la actualidad suele llevar otros componentes como lo son los aditivos químicos, los cuáles se utilizan para mejorar o mantener algunas de las características propias del material según se requiera, ya sea en estado fresco o endurecido.

El desempeño y calidad del concreto dependen de factores como la calidad de los materiales involucrados, el procedimiento seguido para la fabricación de este, la dosificación utilizada (especialmente del agua), la experiencia de los obreros, el tiempo que se tarde entre la fabricación y colocación, las condiciones del tiempo, entre otros.

Es el material más utilizado alrededor del mundo en la industria de la construcción. Se estima que tiene una “producción mundial cercana a los 13000 millones de m³ por año” (Ceballos Arana, 2016).

Resistencia a la compresión del concreto hidráulico

La resistencia a compresión puede definirse como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente se

expresa en kilogramos por centímetros cuadrados (kg/cm²) o megapascales (MPa) a una edad de 28 días (Kosmatka & Wilson, 2011).

Los resultados obtenidos de resistencia a la compresión tienen un alto grado de dependencia de la relación Agua/Cemento (A/C) de hecho son inversamente proporcionales. Conforme se agregue agua, la fluidez de la mezcla aumenta y, por ende, su trabajabilidad, pero disminuye la resistencia debido a varias razones como las que se enumeran a continuación:

- Si hay demasiada agua en la mezcla de concreto, cuando se dé la reacción exotérmica y se libere el calor de hidratación, el agua se evapora y quedan espacios vacíos que se convierten en posibles planos de falla.
- El agua ocupa un volumen dentro de la mezcla, el exceso de esta puede desplazar otros componentes del concreto haciendo la mezcla menos homogénea y se pierden o disminuyen propiedades cementantes.

El concreto expresa su máxima capacidad en la resistencia a la compresión, es por esto que la mayoría de los códigos y normativa lo toma como el parámetro de diseño estructural.

En la figura 1 se pueden observar los patrones de falla que típicamente sufren los especímenes cilíndricos en una prueba de compresión pura.

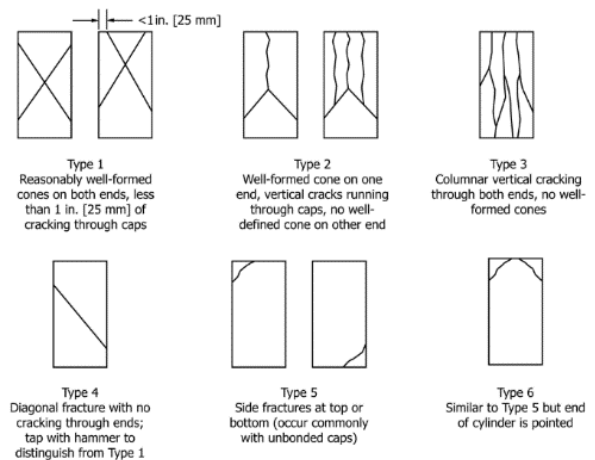


Figura 1. Patrones típicos de falla por resistencia a la compresión

Fuente: ASTM C39-20

F'c

Es la resistencia especificada a la compresión según la norma ASTM C39, en cilindros curados durante 28 días. En el método de diseño de mezcla utilizado, corresponde a la resistencia de diseño. En el caso del Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) define 210 kg/cm² como el mínimo valor permitido para resistencia a la compresión del concreto a 28 días.

F'cr

Es la resistencia a la compresión promedio requerida, la cual idealmente excede la f'c. El código ACI 318 propone algunos factores de mayoración para cuando no se tiene suficiente información histórica y también proporciona ecuaciones para determinar el mínimo f'cr cuando se tiene información histórica. El Instituto del cemento Portland Argentino (2015) afirma que “tal mayoración tiene en cuenta con cierto grado de seguridad los posibles aportes de variabilidad al proceso y de las instancias de control” (p. 4).

Durabilidad del concreto

La calidad del concreto puede evaluarse mediante otros parámetros, igual de importantes que los mecánicos, como lo es la durabilidad “la cual se puede asociar con la vida útil en servicio de una estructura una vez es expuesta a determinadas condiciones o ambientes” (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013). Esto significa que también es importante analizar el ambiente al que estará expuesta la estructura de concreto y así definir las características que debe poseer para su adecuada resistencia a esa exposición.

Algunos de los fenómenos que pueden afectar la durabilidad del concreto son:

- Ciclos de congelamiento y deshielo
- Reacción álcali-agregado
- Carbonatación
- Corrosión de la armadura de refuerzo
- Ataque por sulfatos o cloruros
- Exposición al agua de mar

Diseño de mezcla según ACI 211.1-91 (2002)

El ACI 211.1-91 (reaprobado en 2002) se denomina *Práctica Estándar para la selección de proporciones para concreto normal, pesado y masivo*. Esta práctica describe el procedimiento para concretos de cemento hidráulico fabricados con o sin otros materiales cementantes y adiciones químicas. Los cementos hidráulicos a los que se refiere son los cubiertos por las normas ASTM C150 (cementos Portland) y la ASTM C595 (cementos adicionados).

Cabe destacar que no hace referencia a los cementos cubiertos por la norma ASTM C1157 la cual contiene las equivalencias de los cementos costarricenses. En la sección de *Anexos* se muestra una tabla con las equivalencias de los cementos de producción nacional con los cementos que establece ASTM.

Este método provee una primera aproximación de las proporciones que se pretende verificar mediante lotes de prueba en el laboratorio o en el campo y se ajustan según sea necesario, para producir las características deseadas del concreto hidráulico.

De igual forma, cuando se utilizan aditivos químicos u otros materiales distintos del cemento, el concreto reproporcionado debe verificarse mediante lotes de prueba en el laboratorio o en el campo.

Normativa costarricense

Reglamento Técnico: RTCR 479:2015

El Reglamento Técnico RTCR 479:2015. *Materiales de la Construcción. Cementos Hidráulicos*, tiene como objeto establecer el Procedimiento de Evaluación de la Conformidad para evaluar y controlar la calidad de los cementos hidráulicos producidos localmente o importados. En este se declara que el ECA (Ente Costarricense de Acreditación) es quien debe respaldar la veracidad de los resultados de calidad de los ensayos realizados a los cementos hidráulicos que deseen ser comercializados en Costa Rica. Y

señala que los requisitos químicos y mecánicos deben cumplir con la norma INTE 06-11-15:2015.

INTE C147:2018

INTECO es el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, asociación privada y sin fines de lucro creada en 1987. La Ley N°8279 los reconoce como el Ente Nacional de Normalización, por lo que también en el ámbito de la construcción es el encargado de generar la normativa correspondiente a nivel nacional.

En relación con los cementos hidráulicos esta Institución publicó en 2015 la norma INTE-06-11-15:2015 denominada *Cemento Hidráulico. Especificaciones y Requisitos*, la cual actualmente ha sido sustituida por la versión vigente denominada INTE C147:2018 *Cemento Hidráulico. Requisitos*.

Su objetivo es establecer los parámetros y especificaciones de calidad de los cementos hidráulicos y de los componentes de estos, que normalmente se usan en el territorio nacional, sean producidos localmente o importados. Así como establecer la clasificación de dichos cementos por tipo, con sus respectivas especificaciones. Esta norma no aplica a cementos sulfoaluminados, ni a cementos petroleros. (INTECO, 2018, p.4)

Como se mencionó antes, esta norma cambió su código a INTE C147:2018, la cual corresponde a la versión vigente, sin embargo, ya que el reglamento RTCR 479:2015 menciona el código anterior de esta norma, muchos de los proveedores a nivel nacional continúan utilizando la versión anterior la cual en esencia cumple el mismo objetivo de la designación actual.

La composición típica de los cementos hidráulicos según su tipo, denominación y grado de sustitución se puede observar en la sección de *Anexos*.

Esta norma establece los siguientes requisitos de resistencia a la compresión para los cementos hidráulicos nacionales.

Tabla 3. Resistencia a la Compresión de Cementos Hidráulicos

Clases de resistencia	Resistencia mínima a la compresión (MPa)			
	1 día	3 días	7 días	28 días
17	--	--	7	17
21	--	5	11	21
25	--	11	18	25
28	--	13	20	28
AR (Alta Resistencia Inicial)	12	24	--	*

* La resistencia mínima requerida a los 28 días puede ser acordada entre el proveedor y el comprador

Fuente: INTE C147:2018

Decreto N°10854-MEIC

Este se denomina: *Norma oficial de especificaciones para los agregados finos y gruesos para concretos* y fue establecida en 1979. Actualmente se encuentra derogada por el Decreto Ejecutivo N°37256-MEIC desde el 2012. Sin embargo, a falta del establecimiento de otro Reglamento Técnico para los agregados nacionales, algunos proveedores continúan basándose en estos parámetros para la verificación de sus agregados.

Normativa internacional

A continuación, se muestra la descripción de cada norma del "American Society of Testing and Materials" (ASTM) utilizada a lo largo del desarrollo de este proyecto.

ASTM C150-20

Especificación Estándar para Cemento Portland:

Esta norma cubre los diez tipos de cemento portland que fueron presentados en la tabla 1. Incluye requerimientos físicos y químicos con los que deben cumplir este tipo de cementos hidráulicos.

ASTM C595-20

Especificación Estándar para Cementos Hidráulicos Mezclados:

Se refiere a cementos hidráulicos mezclados para aplicaciones generales y especiales, utilizando escoria, puzolana, piedra caliza o combinaciones de estos con cemento Portland o clínker. Esta especificación prescribe ingredientes, proporciones y algunos requisitos de rendimiento.

ASTM C1157-20

Especificación de Rendimiento Estándar para Cemento Hidráulico:

Cubre cementos hidráulicos para aplicaciones generales y especiales. Esta especificación clasifica los cementos basada en requisitos específicos para uso general, alta resistencia temprana, resistencia al ataque por sulfatos y calor de hidratación. En esta los criterios de rendimiento son físicos y rigen su aceptación.

ASTM C702-18

Práctica Estándar para reducción de muestras de agregado a tamaño de ensayo:

Esta práctica cubre tres métodos para la reducción de muestras grandes de agregado al tamaño apropiado para ensayo. Estas técnicas están destinadas a minimizar las variaciones de las características medidas entre las muestras de ensayo seleccionadas y la muestra grande.

ASTM D75-19

Práctica Estándar para muestreo de agregados:

Esta práctica cubre el muestreo de agregados gruesos y finos, para la investigación preliminar de la fuente potencial de suministro, control del producto en la fuente de suministro, control de las operaciones en el lugar de uso y aceptación o rechazo de los materiales.

ASTM C127-15

Método de ensayo estándar para gravedad específica y absorción del agregado grueso:

Este método cubre la determinación de gravedad específica y absorción de agregados gruesos. La gravedad específica es una cantidad adimensional, se expresa como secado al horno, saturada superficie seca o relativa aparente. Se calcula mediante la inmersión en agua de una muestra de agregado.

ASTM C128-15

Método de ensayo estándar para gravedad específica y absorción del agregado fino:

Este método cubre la determinación de gravedad específica y absorción de agregados finos. La gravedad específica es una cantidad adimensional, se expresa como seca al horno, saturada superficie seca o relativa aparente. Se calcula mediante la inmersión en agua de una muestra de agregado y la aplicación del método gravimétrico o volumétrico.

ASTM C29-17a

Método de ensayo estándar para "peso unitario" y vacíos en el agregado:

Cubre la determinación de la densidad aparente ("peso unitario") de agregado en condición compactada o suelta y los vacíos calculados entre partículas en agregados finos, gruesos o mixtos. Es aplicable a agregados que no exceda los 125 mm de tamaño máximo nominal.

ASTM C117-17

Método de ensayo estándar para materiales más finos que el tamiz 0,075 mm (N°200) en agregado mineral por lavado:

Cubre la determinación por lavado de la cantidad de material más fino que el tamiz 0,075 mm. Las partículas de arcilla y otras se dispersan con el agua de lavado, así como los materiales solubles en agua. Incluye dos procedimientos uno donde sólo se utiliza agua y otro donde se emplea

humectante, se utilizará el Procedimiento A (sólo agua) a menos que se indique lo contrario.

ASTM C136-19

Método de ensayo estándar para análisis por tamizado de agregados finos y gruesos:

Cubre la determinación de la distribución de las partículas del agregado fino o grueso por tamizado. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución del tamaño de partícula con los requisitos de especificación aplicables. Para determinar con precisión el material más fino que el tamiz N°200 este método debe realizarse junto con la prueba C117.

ASTM C131-20

Método de ensayo estándar para la resistencia a degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la Máquina de Los Ángeles:

Cubre el procedimiento para probar agregados gruesos con un tamaño máximo de 37,5 mm o menor.

ASTM C40-20

Método de ensayo estándar para impurezas orgánicas en agregado fino para concreto:

Cubre dos procedimientos para la determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas nocivas en agregados finos que se utilizarán para mortero o concreto de cemento hidráulico. Un procedimiento usa una solución de color estándar y el otro usa un vidrio de color estándar. El valor principal de este método es dar una alerta a cerca de las cantidades perjudiciales de impurezas orgánicas que pueden estar presentes en el agregado.

ASTM C33-18

Especificación estándar para agregados para concreto:

Define los requisitos para la clasificación y la calidad del agregado fino y grueso (que no sea liviano o pesado) para uso en concreto. Puede ser para uso del contratista, proveedor o comprador como parte del documento de compra describiendo el material a suministrar. Esta especificación se considera adecuada para garantizar materiales satisfactorios para la mayoría de concretos. Sin embargo, para condiciones específicas puede ser más o menos restrictiva de lo necesario.

ASTM C778-18

Especificación estándar para Arena Estándar:

Esta especificación cubre la arena estándar para uso en el ensayo de cementos hidráulicos. La arena estándar es arena de sílice, compuesta casi en su totalidad de granos naturalmente redondeados de cuarzo casi puro.

ASTM C230-20

Especificación estándar para mesa de flujo para uso en ensayos de cemento hidráulico:

Esta especificación cubre los requisitos para la mesa de flujo y los aparatos accesorios utilizados en la realización de pruebas de flujo para consistencia de morteros en los ensayos de cemento hidráulico, como por ejemplo el método de ensayo C1437.

ASTM C1437-20

Método de ensayo estándar para flujo del mortero de cemento hidráulico:

Este método de ensayo está destinado a ser utilizado para determinar el flujo de morteros de cemento hidráulico y de morteros que contienen materiales cementantes distintos de los cementos hidráulicos. No es usual que el flujo sea un requerimiento en especificaciones del cemento, se usa comúnmente en ensayos, los cuales

requieren que el mortero tenga un contenido de agua que proporcione un nivel de flujo específico.

ASTM C109-20b

Método de ensayo estándar para resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico (usando especímenes cúbicos de 50 mm):

Este método de prueba proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión del cemento hidráulico y otros morteros y los resultados pueden usarse para determinar cumplimiento con las especificaciones.

ASTM C192-19

Práctica estándar para fabricación y curado de especímenes de concreto en el Laboratorio:

Esta práctica cubre los procedimientos para fabricar y curar especímenes de concreto en el laboratorio bajo control preciso de los materiales y las condiciones de prueba usando concreto que se puede compactar mediante varillado o vibración, según lo indiquen los requerimientos de selección de cada método. Las muestras fabricadas bajo este método se utilizan para Dosificación de la mezcla de concreto del proyecto, evaluación de diferentes mezclas y materiales, correlación con ensayos no destructivos y suministro de muestras para fines de investigación.

ASTM C511-19

Especificación estándar para cuartos de mezclado, gabinetes húmedos, cuartos húmedos y tanques de almacenamiento de agua usados en los ensayos de cemento y concreto hidráulicos:

Los lugares a los que se refiere esta norma (incluidos en el título de esta) se refieren a salas o cuartos donde se preparan muestras de pasta de cemento, mortero o concreto o donde se almacenan los especímenes para su curado y poseen temperatura y humedad relativa son controladas según los requerimientos que se presentan en esta especificación.

ASTM C143-20

Método de ensayo estándar para asentamiento del concreto de cemento hidráulico:

Cubre la determinación del asentamiento del concreto de cemento hidráulico en condiciones de laboratorio y en campo. Este método de ensayo se considera aplicable al concreto plástico que tiene agregado grueso de hasta 37,5 mm. No se considera aplicable a concreto no plástico y no cohesivo.

ASTM C39-20

Método de ensayo estándar para la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto:

Cubre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos como cilindros moldeados y núcleos perforados. Los resultados de este método son usados como base para el control de calidad de dosificación del concreto, mezclado y colocación, determinación de la conformidad con especificaciones, control para la evaluación de la efectividad de aditivos y usos similares.

ASTM C670-15

Práctica estándar para la preparación de declaraciones de precisión y sesgo para métodos de ensayo para materiales de construcción:

La forma y estilo de las normas ASTM requieren que todos los métodos de ensayo contengan declaraciones sobre precisión y sesgo, de un solo operador (repetibilidad) y de múltiples laboratorios (reproducibilidad). Esta práctica se ha desarrollado para satisfacer las necesidades de los comités de ASTM que se ocupan de materiales de construcción.

ASTM E178-16a

Práctica estándar para tratar con observaciones atípicas:

Esta práctica cubre las observaciones atípicas en muestras y cómo probar la significación estadística de los valores atípicos. Una

observación atípica es una extrema en cualquier dirección que parece desviarse marcadamente de la muestra en la que ocurre. Se puede utilizar una prueba estadística para respaldar un juicio de que realmente existe una razón física para un valor atípico. En esta práctica se sugieren varios métodos de pruebas estadísticas que indican si un valor se puede considerar atípico o no.

ASTM C172-17

Práctica estándar para muestreo de mezclas de concreto fresco:

Esta práctica cubre los procedimientos para obtener muestras representativas de concreto fresco tal como se entrega al sitio del proyecto en el cual se realizarán los ensayos para determinar el cumplimiento de los requisitos de calidad de las especificaciones bajo las cuales se suministra el concreto. Incluye el muestreo de mezcladores estacionarios, de pavimentación y de camiones, y de equipos agitadores y no agitadores para transporte del concreto.

Diseño de experimentos

A continuación, se presentan algunas definiciones básicas en el diseño de experimentos, según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2008).

Variables

Características que cambian con el tiempo o para diferentes objetos bajo consideración.

- Variable de respuesta o dependiente: a través de esta variable se conoce el efecto o los resultados de cada prueba experimental. Se denota con la letra *Y*.
- Variable de entrada o independiente: su valor no depende de otras variables, se fija libre y previamente. Se denota con la letra *X*.

Población y Muestra

Población es el conjunto de mediciones de interés para el investigador, es la totalidad de posibles individuos, especímenes objetos o medidas de

interés sobre los que se hace un estudio. Puede ser finita o infinita.

Cuando la población es infinita o muy grande, se estudia mediante *muestras* extraídas en algún punto del proceso. Un reto es lograr que las muestras sean representativas de la población, una forma adecuada para lograr esa representatividad es diseñar un muestreo aleatorio (azar).

Factor de estudio

“Son las variables que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable de respuesta” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

Niveles y tratamiento

Los *niveles* corresponden a los valores que se asignan a cada factor en estudio. Y la combinación de niveles de todos los factores se denomina *tratamiento*.

Diseño aleatorio (azar)

Las corridas o repeticiones del experimento se realizan en orden aleatorio completo. De esta manera, si durante el estudio se hacen en total *N* pruebas, éstas se corren al azar, de manera que los posibles efectos ambientales y temporales se vayan repartiendo equitativamente entre los tratamientos.

Error aleatorio y experimental

Siempre que se realiza un estudio experimental parte de la variabilidad obtenida no se puede explicar por los factores en estudio. El *error aleatorio* corresponde a la variabilidad observada que no se puede explicar por los factores estudiados (resulta del pequeño efecto de los factores no estudiados y del error experimental). El *error experimental* contiene los errores que el experimentador comete durante el planeamiento y ejecución del experimento.

Estadística

Es la “ciencia que trata de la recopilación, organización, presentación, análisis e interpretación de datos numéricos con el fin de tomar decisiones efectivas y pertinentes” (Barreto Villanueva, 2012, p.5). Mediante el análisis de datos permite obtener significados precisos acerca de un fenómeno actual o futuro.

Estadística descriptiva

Corresponde a un conjunto de técnicas numéricas y gráficas que permiten describir, analizar y presentar un grupo de datos recopilados, sin extraer de ellos conclusiones (inferencias) sobre la población a la que pertenecen (Faraldo & Pateiro, 2013).

Granero (2016) afirma que los objetivos de la estadística descriptiva son:

- Obtener un resumen de la información sencillo y conceptualmente significativo
- Facilitar la realización de los posteriores análisis, ya que una adecuada descripción puede contribuir a la formulación de nuevas o complementarias hipótesis.

Estadística inferencial

Son aquellos métodos que permiten hacer estimación de una característica de la población o de toma de decisiones respecto de una población, con base sólo en los resultados obtenidos de una muestra. En otras palabras, busca deducir (inferir) y obtener conclusiones.

Medidas de tendencia central

Corresponde a medidas de posición o localización que indican el valor (es) alrededor del cual se encuentran los datos observados. Dentro de las medidas de tendencia central se encuentran las siguientes (Faraldo & Pateiro, 2013; Menhenhall, Beaver, & Beaver, 2010):

Media aritmética (Promedio):

La media aritmética (media muestral) o promedio de un conjunto de n mediciones es igual a la suma de las mediciones dividida entre n . Se utiliza \bar{x} (x barra) para la media muestral y el símbolo μ para la media poblacional.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Mediana:

La mediana de un conjunto de n mediciones es el valor de x que cae en la posición media cuando las mediciones son ordenadas de menor a mayor. Por lo tanto, la mediana deja el 50% de las observaciones por debajo de su valor y el otro 50% por encima.

La mediana a diferencia de la media es una medida robusta ya que su valor se ve menos afectado por la presencia de datos atípicos. Si los valores de la media y la mediana de una misma muestra difieren entre sí sustancialmente, esto puede indicar la presencia de datos atípicos.

Moda:

Es el valor que se presenta con más frecuencia dentro de un conjunto de datos. Se utiliza generalmente para describir conjuntos grandes de datos. Es posible que una distribución de mediciones tenga más de una moda o puede no haberlas.

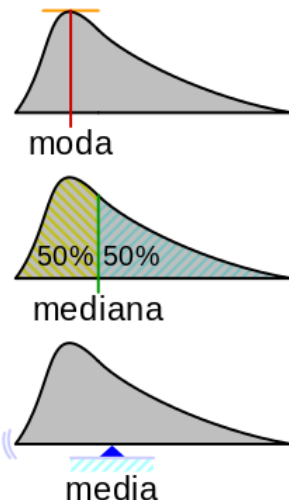


Figura 2. Ejemplo gráfico de medidas de tendencia central
Fuente: Unidad de Apoyo para el Aprendizaje, Universidad Nacional Autónoma de México

Medidas de dispersión o variabilidad

Los conjuntos de datos pueden tener el mismo centro, pero con aspecto diferente por la manera en que los números se dispersan desde el centro. Conocer la dispersión que presentan los datos sirve para obtener una descripción más precisa de estos.

Dentro de las medidas de dispersión se encuentran las siguientes (Faraldo & Pateiro, 2013; Menhenhall et al., 2010):

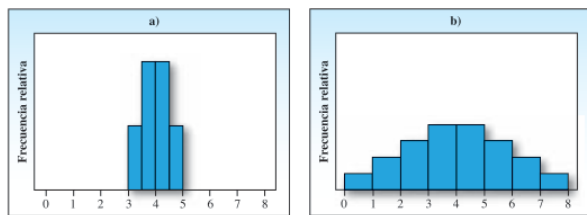


Figura 3. Ejemplo de variabilidad o dispersión de datos con la misma media

Fuente: Introducción a la probabilidad y estadística (Menhenhall et al., 2010)

Rango:

El rango de un conjunto de n mediciones se define como la diferencia entre la medición más grande y la más pequeña.

Varianza:

La varianza de una muestra de n mediciones es la suma de las desviaciones cuadradas de las mediciones alrededor de la media \bar{x} dividida entre $(n-1)$. Está medida en las unidades de los datos al cuadrado por lo que no se puede comparar directamente con las medidas de posición como la media. La varianza muestral se denota con s^2 y está dada por la siguiente ecuación:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Desviación estándar:

La desviación estándar de un conjunto de mediciones es igual a la raíz cuadrada positiva de

la varianza. Esta regresa la medida de variabilidad a las unidades originales de medición.

Coefficiente de variación:

Es una medida de dispersión relativa (no depende de las unidades de los datos), por lo que es adecuada para comparar entre variables, aunque tengan distintas unidades de medida o cuando las variables a pesar de tener la misma magnitud están en escalas distintas.

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

Representación de medidas: Gráficos de Caja (“Boxplot”)

“Los gráficos de caja son de los métodos gráficos más ampliamente utilizados para representar los estadísticos descriptivos de una muestra y visualizar comparaciones” (Denis & Ramírez, 2020). Se utiliza para determinar los valores atípicos de la muestra, la dispersión de los datos, los valores máximos y mínimos, etc.

Para una mejor interpretabilidad de los datos con estos gráficos se recomienda graficarlos con algunas mejoras como: adicionar los puntos de los datos originales (“raw data”) se puede evitar la superposición de estos adicionando un factor de dispersión (en inglés “jitter”). También se pueden adicionar gráficos conjuntos como histogramas, curvas de densidad, gráficos de violín, entre otros.

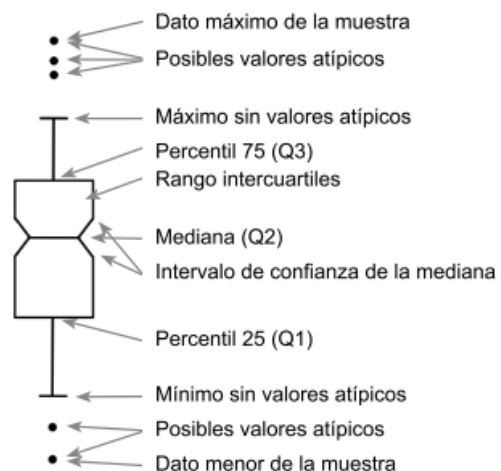


Figura 4. Composición básica de un diagrama de cajas

Fuente: Si una imagen vale más que mil palabras ¿cuánto puede decir un gráfico de cajas? (Denis & Ramírez, 2020)

Análisis de regresión

El análisis de regresión es una técnica usada para modelar la relación entre variables. Se busca establecer como una o más variables dependientes (variable de respuesta) se comportan respecto a una o más variables independientes (variable de pronóstico) (Bouza Herrera, 2018). Es usado para hacer predicciones, determinar la ecuación de regresión o calibrar sistemas.

Regresión lineal

Cuando existe relación lineal entre dos variables cuantitativas se busca un modelo que describa una en función de la otra. El método más utilizado para encontrar esta relación es Mínimos Cuadrados. La recta de regresión se basa en la siguiente expresión:

$$y = a + bx$$

Regresión no lineal

No en todos los casos los modelos lineales son los más adecuados para describir un fenómeno. Cuando esto sucede, los modelos de regresión no lineales pueden llegar a presentar un mejor ajuste de los datos. Las funciones más comunes de encontrar son:

- Polinomiales (cuadráticas o grados mayores)
- Potenciales
- Exponenciales
- Logarítmicas

Coefficiente de determinación

Se define como el porcentaje de la variación total de la variable Y que viene explicada por el modelo. Se denota con R^2 y toma valores entre 0 y 1.

Es un indicador del grado de ajuste de un modelo de regresión. “Un coeficiente de determinación próximo a 1 significa que las estimaciones obtenidas para los coeficientes del modelo de regresión hacen a este capaz de explicar un elevado porcentaje de las variaciones

que experimente la variable dependiente” (Novales, 2010, p.39).

Pruebas de hipótesis

Se definen como: “tomar una decisión acerca del valor de un parámetro, con base en alguna idea preconcebida acerca de cuál podría ser su valor” (Menhenhall et al., 2010, p.298).

Hipótesis nula

Hipótesis que se formula y se cree verdadera *a priori*, es la que se desea testear. Se denota como H_0 .

$$H_0: \mu = \mu_0$$

μ =media

Hipótesis alternativa

Niega la hipótesis nula y se denota por H_1 .

$$H_1: \mu \neq \mu_0 \text{ (prueba de dos colas)}$$

$$H_1: \mu > \mu_0 \text{ (prueba de una cola)}$$

$$H_1: \mu < \mu_0 \text{ (prueba de una cola)}$$

Valor de P y Nivel de significancia

Menhenhall et al. (2010) en el libro *Introducción a la probabilidad y estadística* señalan que el valor de P es el valor más pequeño de α (nivel de significancia) para el cual H_0 se puede rechazar. Mide la fuerza de la evidencia contra H_0 . Si el valor P es menor o igual al nivel de significancia α asignado previamente, entonces la hipótesis nula puede ser rechazada y se informa que los resultados son estadísticamente significativos al nivel α .

Para diferenciar estos conceptos se debe entender que el nivel de significancia es propuesto por el investigador y corresponde al riesgo de errar en la estimación y el valor de P depende de los datos obtenidos y describe qué tan probables o improbables son los resultados suponiendo H_0 verdadera.

Nivel de confianza

El nivel de confianza es la probabilidad de acertar en la estimación que se realiza. Corresponde al porcentaje de intervalos que incluirían el parámetro de población (o muestra) si se toman muestras de la misma población en repetidas ocasiones. Este parámetro puede ser la media.

Por ejemplo, en la siguiente figura la línea negra es la media, los intervalos de confianza en azul contienen el valor de la media y el intervalo en rojo no contiene el valor de la media; un nivel de confianza del 95% indica que 19 de 20 muestras (95%) de la misma población producen intervalos de confianza (barras azules) que incluyen el parámetro de población, en este caso la media (Minitab Inc., 2018).

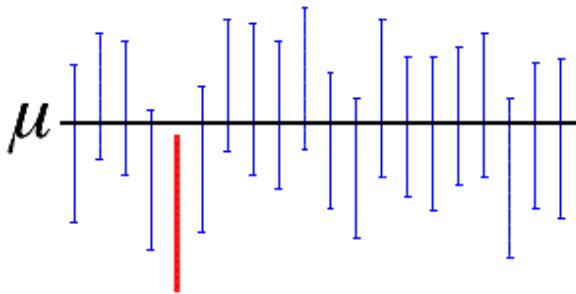


Figura 5. Nivel de confianza 95%
Fuente: Definiciones básicas (Minitab Inc., 2018)

Según (Cazau, 2006) el nivel de confianza tiene sus valores más frecuentes entre 95% y 99%. Este puede ser seleccionado por el investigador según su experiencia y el tipo de estudio, sin embargo, se debe tener en cuenta que un nivel de confianza bajo produce intervalos más estrechos, pero disminuye la probabilidad de que el intervalo incluya la respuesta media.

Intervalos

Intervalos de confianza

El intervalo de confianza se trata de encontrar dos números tales que el parámetro de la media se encuentre entre ellos con una probabilidad de $1-\alpha$. La longitud del intervalo de confianza es una medida de la precisión de la estimación (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

Intervalos de predicción

“Proporciona un rango de valores probables para una respuesta individual” (Minitab Inc., 2018). Los intervalos de predicción siempre son más amplios que los de confianza ya que la incertidumbre asociada depende de posibles valores individuales cada uno con su propia incertidumbre, es decir, se ve afectado por la dispersión de los datos.

Para diferenciar entre ambos intervalos se puede tomar en consideración la siguiente explicación: “Un nivel de confianza de 95% indica que, si se tomaron 100 muestras aleatorias de la población, los intervalos de confianza para aproximadamente 95 de las muestras incluirían la respuesta **media**. De manera similar, el intervalo de predicción indica que se puede estar un 95% seguro de que el intervalo contiene el valor de una nueva **observación individual**” (Minitab Inc., 2018)

Distribución normal

Según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2008), la distribución normal forma parte del grupo de *Distribuciones de probabilidad*, las cuales relacionan el conjunto de valores de X con la probabilidad asociada con cada uno de estos valores. Es decir, la probabilidad de \bar{x} señala qué valores se espera que toma \bar{x} , según los supuestos asumidos.

Las distribuciones de probabilidad pueden tener diferentes formas; sin embargo, la mayoría de los fenómenos observados en la naturaleza poseen *distribución normal o Gaussiana*, la cual está definida por la media y la desviación estándar. La forma estándar de la distribución normal se presenta en la siguiente figura.

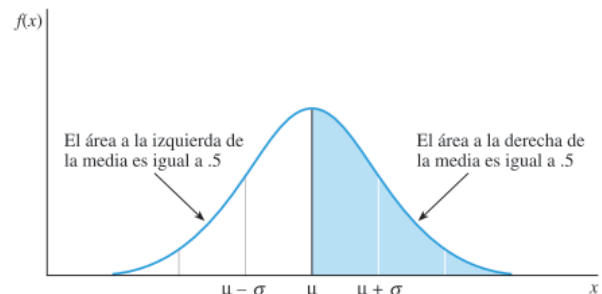


Figura 6. Distribución normal de probabilidad
Fuente: Introducción a la probabilidad y estadística (Menhenhall et al., 2010)

Pruebas de normalidad

Para verificar la normalidad de un grupo de datos se recurre a pruebas de hipótesis para la normalidad. Las hipótesis de estas pruebas corresponden a:

H_0 : Los datos proceden de una distribución normal

H_1 : Los datos no proceden de una distribución normal

A continuación, se describen las pruebas utilizadas en este estudio, según lo señalado por Mohd Razali & Bee Wah (2011):

- **Kolmogorov-Smirnov**: se denota con KS. Se basa en la mayor diferencia vertical entre la distribución hipotética y la empírica.
- **Anderson-Darling**: se denota con AD. Es una modificación de la prueba Cramer-von Mises, se diferencia porque les da más peso a las colas de la distribución. Se encuentra dentro de las pruebas más poderosas.

Datos atípicos

Un dato atípico (“outlier”) es una observación extrema en cualquier dirección, que parece desviarse marcadamente de los demás miembros del conjunto al que pertenece (ASTM, 2016).

Para verificar la existencia de datos atípicos dentro de un grupo se tienen pruebas de hipótesis con los siguientes supuestos:

H_0 : No hay valores atípicos

H_1 : El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

A continuación, se describen las pruebas utilizadas en este estudio:

Prueba de Grubbs

Es un método para detectar valores atípicos propuesto por Frank E. Grubbs alrededor de 1950. Generalmente se utiliza para detectar un solo atípico en un conjunto univariante y con distribución aproximadamente Gaussiana. Sin embargo, con el tiempo se han propuesto variantes para detectar atípicos en un lado y en dos lados del conjunto de datos. Es una prueba robusta, confiable y computacionalmente barata (Urvoy & Autrusseau, 2014).

$$T_{max} = \frac{x_n - \bar{x}}{s} \quad T_{min} = \frac{\bar{x} - x_1}{s}$$

Donde:

x_1 o x_n = valores máximos o mínimos que se sospecha son atípicos

s=desviación estándar del conjunto

\bar{x} = media

Prueba de Dixon

Es un método para detectar valores atípicos propuesto por W. J. Dixon, alrededor de 1950. Se basa en las proporciones de rangos y estadísticos ordenados, puede identificar si las observaciones más grandes y más pequeñas son atípicas, también prueba por separado sólo la observación más grande o sólo la más pequeña, según las siguientes ecuaciones respectivamente (Wang, Caja, & Gómez, 2018):

$$r_{10} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1} \quad r_{10} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$$

$$r_{11} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2} \quad r_{11} = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$$

Prueba de ANOVA

Según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2008), el *Análisis de varianza* (ANOVA) es una técnica cuyo objetivo es probar la hipótesis de igualdad de los tratamientos con respecto de la media de la variable de respuesta.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Las hipótesis anteriores equivalen a:

H_0 : Todas las varianzas son iguales

H_1 : Por lo menos una varianza es diferente

La idea de este método es separar la variación total en las partes que la componen: la variabilidad debida a los tratamientos y la que viene del error aleatorio. Los resultados finales se resumen en la *Tabla de análisis de varianza*.

Requerimientos

Este método tiene suposiciones iniciales, las cuales se pueden tomar como requisitos ya que se deben verificar antes de hacer la prueba para que esta sea válida.

- La variable de respuesta se distribuye normal.
- Las mediciones son independientes entre sí.
- La variable de respuesta tiene varianza constante (los tratamientos poseen varianza similar).

La normalidad de los datos se verifica con las pruebas comentadas anteriormente. La independencia de estos se asegura al aplicar el principio de aleatorización en el experimento, además, para cumplir con este supuesto también es recomendable que todos los tratamientos tengan la misma cantidad de datos.

La varianza constante también se conoce como homocedasticidad, como su nombre lo indica para cumplir este supuesto los tratamientos por comparar deben tener varianzas iguales o casi iguales, es decir, constantes. Se puede verificar mediante alguna de las pruebas de hipótesis que se señalan a continuación:

- F-test (razón de varianzas)
- Levene
- Bartlett
- Brown-Forsyth
- Fligner- Killeen

Prueba de Tukey

Es una prueba de comparaciones múltiples, es necesaria luego de que se rechaza la hipótesis nula en el Análisis de Varianza, ya que esta prueba muestra en detalle cuales tratamientos son diferentes o cuales provocan la diferencia.

Tukey es un método conservador para comparar pares de medias de tratamientos, “consiste en comparar las diferencias entre medias muestrales con el valor crítico” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008, p.76).

Evaluación de los resultados de resistencia a la compresión

ACI 214R-11

Se denomina *Guía para la Evaluación de la resistencia en los resultados de ensayos del concreto*. Esta guía proporciona una introducción a la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto hidráulico. Los conceptos que proporciona son aplicables al ensayo de resistencia a la compresión y otros ensayos como flexión, asentamiento, contenido de aire, módulo de elasticidad entre otros. Es importante mencionar que esta guía asume que los resultados de los ensayos de concreto se ajustan a una distribución normal.

Todos los conceptos mencionados en adelante en este apartado son tomados de la guía ACI 2141R-11.

Variabilidad

Inevitablemente, los resultados de resistencia varían. Las variaciones en la resistencia medida del concreto se originan de dos fuentes:

- Variaciones de lote a lote: pueden ser resultado de cambios en los ingredientes o sus proporciones, cambios en la relación agua/cemento (A/C), mezcla, transporte, colocación y curado.
- Variaciones dentro del lote: se deben principalmente a las diferencias en el muestreo del lote de muestra, preparación de la muestra, curado y procedimientos de ensayo.

Las principales fuentes de variación en la resistencia se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 4. Principales fuentes de variación en la resistencia

Variaciones de lote a lote	Variaciones dentro del lote
Variaciones en características y proporciones de los ingredientes	Muestreo inapropiado del lote de muestra
Cambios en la relación A/C	Variaciones debido a las técnicas de fabricación

Variaciones de lote a lote	Variaciones dentro del lote
Variaciones en el mezclado, transporte y muestreo	Diferencias en el curado
Variaciones en la colocación y compactación	Variaciones en el ensayo de los especímenes
Variaciones en la temperatura y curado del concreto	

Fuente: Adaptado de ACI 214R-11

Variación general

Se puede hablar de un tercer tipo de variación, la cual contiene las variaciones: dentro del lote y de lote a lote. Por lo tanto, cuando se tiene esta variación, las causas de ambas fuentes se combinan durante la fabricación y el curado y se reflejan en los resultados de resistencia.

Distribución de datos

Se asume una distribución normal porque esta es apropiada para la mayoría de los casos cuando la resistencia del concreto no excede los 70 MPa (10000 psi). Una característica matemática de la distribución normal es que el 68.27% de los datos se encuentra dentro de 1 desviación estándar de la media y el 95.45% de los datos está dentro de dos desviaciones estándar, como se ve en la figura siguiente.

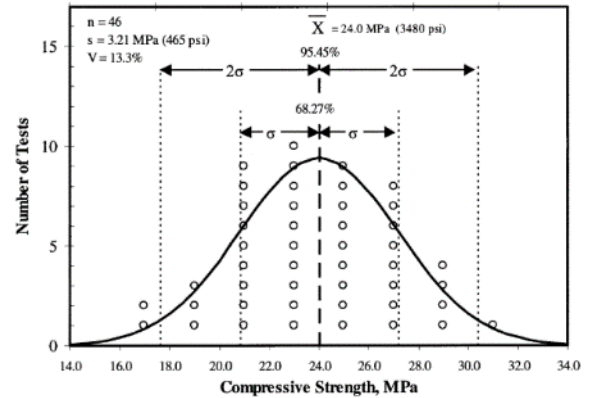


Figura 7. Frecuencia de distribución de los datos de resistencia asumiendo distribución normal

Fuente: ACI 214R-11

Tamaño de muestra n (recomendado)

El resultado de resistencia usado para estimar la desviación estándar o el coeficiente de variación debe representar un grupo de al menos 30 especímenes. Cuando el número de especímenes disponibles es menor a 30, el ACI 318 permite que se determine con 15 especímenes. Cuando se tiene menos de 15 resultados de resistencia, la desviación estándar calculada no es suficientemente confiable.

Estándares de control

Uno de los principales propósitos de la evaluación estadística del concreto es identificar fuentes de variabilidad. Y con esto se pueden determinar pasos apropiados para mantener el control de calidad. La tabla que se muestra a continuación provee un estándar de control apropiado para concretos con $f'c$ hasta 35 MPa (5000 psi) y son aplicables a especímenes que han sido curados durante 28 días.

Tabla 5. Estándar de control para concreto con $f'c \leq 35$ MPa

Clase de operación	Variación general				
	Desviación estándar (MPa)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Campo	<2,8	2,8 a 3,4	3,4 a 4,1	4,1 a 4,8	>4,8
Laboratorio	<1,4	1,4 a 1,7	1,7 a 2,1	2,1 a 2,4	>2,4

Fuente: ACI 214R-11

Antecedentes

En el contexto de estudios previos realizados a nivel nacional donde se estudien los cementos y concretos hidráulicos costarricenses, a continuación, se mencionan algunos de los más recientes.

Elizondo Valverde (2013) desarrolló el proyecto titulado “Resistencia vs. Relación A/C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP-AR)”, en el cual se analizó el comportamiento de la resistencia respecto de las relaciones A/C para dos cementos tipo UG y MP-AR (designaciones de la época) de dos proveedores nacionales, a los 7, 28 y 56 días. Se comprobó que la relación A/C es el elemento determinante en la resistencia última del concreto y con los datos obtenidos se demostró aumentos de hasta un 20% a los 56 días en comparación con lo obtenido a los 28 días.

En el proyecto “Determinación de las curvas características de resistencia a la compresión en función del tiempo para el cemento de uso general comercializado en San José, Costa Rica” de Carvajal Coto (2016) se determinó la resistencia a compresión de tres cementos de uso general (según designación del autor) a las edades de 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 112 días mediante el ensayo de la norma ASTM C109, es decir, en morteros. Según las conclusiones se encontró que algunos de los cementos no cumplieron con el requisito de resistencia a los 28 días. Finalmente estableció que la ecuación para predicción de resistencias de los cementos hidráulicos tiene comportamiento logarítmico, de la forma: $f'_{\text{cemento}} = A * \ln(t) + B$.

Como parte de las evaluaciones luego de la promulgación del reglamento RTCR 479:2015, se realizaron los siguientes proyectos con el fin de verificar el cumplimiento con especificaciones.

Delgado Castro (2018) en su proyecto “Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados” determinó la resistencia a la compresión de concretos hidráulicos fabricados con tres tipos de cementos y realizando comparaciones de la resistencia obtenida con agregados de río y agregados de “tajo”, a los 3, 7, 28 y 56 días. Sus resultados demostraron que el cemento hidráulico con adición de escoria de alto horno tiene ganancia de resistencia significativa después de los 28 días y

la variación de resistencia del concreto no es significativa al emplearse uno u otro tipo de agregados.

De igual forma Hernández Mora (2018) desarrolló el proyecto titulado “Resistencia a compresión simple versus tiempo de curado en especímenes de concreto hidráulico usando cementos modificados”, el cual comparte la misma filosofía y metodología que el antes mencionado, en este se realizó el mismo estudio con otros tres tipos de cemento hidráulico costarricense. Se obtuvo que a los 56 días los concretos ganan hasta 21% adicional de la resistencia obtenida a los 28 días.

El ICCYC (Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto), presentó el informe de resultados de una “Investigación sobre la calidad del concreto hecho en obra en la GAM 2020”. En este se obtuvo que una gran mayoría de los concretos (45%) no cumple con el requisito mínimo de resistencia a 28 días, se indicó la falta de diseño de mezcla en obra y un inadecuado almacenamiento de agregados.

Técnicas complementarias

Listas de verificación

Es una herramienta que ayuda a no olvidar ningún paso necesario para la realización de un procedimiento, seguir un orden establecido y lógico para hacer tareas, controlar el cumplimiento de requisitos o para obtener datos de forma sistemática para ser analizados posteriormente.

Es un método eficaz para reducir el riesgo de error por distracciones o exceso de confianza, ayuda a mejorar la eficacia de un equipo de trabajo, estimula la comunicación y contribuye para disminuir la variabilidad; sin embargo, no son un documento que aplica como normativo (Concha Torre et al., 2020).

Diagrama de Causa-Efecto (Ishikawa)

Se le llama Diagrama de Ishikawa por el ingeniero japonés Kaoru Ishikawa, quien lo introdujo para el análisis de problemas en 1943. Es un método gráfico simple que se usa para realizar un diagnóstico de las posibles causas que provocan ciertos efectos, los cuales podrían ser controlables (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2009). Algunos usos son:

- Analizar las relaciones causa-efecto.
- Facilitar la resolución de problemas, conociendo la raíz de estos y llegando a la solución.
- Promover que los miembros de un equipo de trabajo conozcan las causas de los problemas que se analizan.

Técnica de los cinco porqués

Es una técnica de análisis utilizada para la resolución de problemas, consiste en realizar sucesivamente la pregunta: “¿por qué?” hasta llegar a la raíz del problema que se está analizando. Todo esto con el objetivo de tomar decisiones para solucionar el problema (Pérez Pinza, 2015). Sin embargo, se debe destacar que el número cinco no es una regla, ya que todos los problemas son diferentes y con características únicas, es posible que se encuentre un problema simple que se responde con dos porqués y se llega a su causa raíz o uno tan complejo que requiera seis porqués. Lo importante es no dejar de realizar la pregunta hasta tener seguridad de haber encontrado la causa principal, a la cual se le debe dar solución.

Técnica de las seis M

Es un método utilizado para la construcción de diagramas de Ishikawa. Consiste en agrupar las causas potenciales dentro de seis grupos o ramas principales:

1. Métodos
2. Mano de Obra
3. Materia prima
4. Maquinaria
5. Medición

6. Medio Ambiente

Estos engloban casi a cualquier proceso de industria o servicio, por lo que se espera que la causa del problema analizado tenga relación con alguna o varias de las seis M (Candelaria Cerón, 2017).

Metodología

Para las actividades que lo ameritaron se siguió la normativa de la American Society of Testing and Materials (ASTM) en su versión vigente y las guías y prácticas del American Concrete Institute (ACI) correspondiente. La normativa costarricense homóloga de las ASTM, dictada por el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO) no se utiliza en este documento, debido a que la versión ASTM en qué se basan no siempre es la versión vigente, además no se tiene acceso libre a las normas INTECO, ya que el TEC no cuenta con licencia de esta base de datos, como si la tiene con la normativa ASTM. La única excepción fue con la norma INTE C147:2018, ya que esta es llamada por el Reglamento Nacional RTCR 479:2015.

Se evaluó la resistencia a la compresión en concretos hidráulicos (mediante cilindros) y en cementos hidráulicos (mediante cubos de mortero). Se desarrollaron **cinco mezclas** de concreto hidráulico, cada una definida por un tipo de cemento diferente, con su respectiva marca, manteniendo constantes los agregados, el diseño de mezcla y sin uso de aditivos.

Los cementos utilizados en el proyecto se muestran en la tabla 6. Los proveedores corresponden a: Fortaleza (X), Cemex (Y) y Holcim (Z), y en adelante se referirá a ellos con estas siglas.

Tabla 6. Cementos Hidráulicos en estudio

ID Cemento	Tipo ¹	Proveedor		
		"X"	"Y"	"Z"
A	MM/B (P-C)-28	✓		
B	MC/A-AR	✓		
C	MM/B(P-C)-28		✓	
D	MP/A-AR		✓	
E	MM/C(C-P)-28			✓

¹ Según norma INTE C147:2018

Con el fin de homogenizar las siglas utilizadas a lo largo del documento se decidió nombrar a las mezclas de concreto y las de mortero con la misma sigla de identificación de los cementos hidráulicos con que fueron fabricados. Aclarando siempre a cuál tipo de espécimen se está refiriendo (cilindros o cubos). De este modo las denominaciones son las siguientes:

Tabla 7. Identificación de las mezclas de concreto y mortero

Cemento de fabricación	ID Mezcla de Concreto	ID Mezcla de Mortero
"A": MM/B (P-C)-28	A	A
"B": MC/A-AR	B	B
"C": MM/B(P-C)-28	C	C
"D": MP/A-AR	D	D
"E": MM/C(C-P)-28	E	E

Caracterización de agregados

Se realizaron pruebas a los agregados pétreos utilizados en las mezclas de concreto hidráulico, con el fin de obtener los parámetros requeridos en el desarrollo del diseño de mezcla.

Muestreo de agregados

Se realizó según lo indicado en la norma ASTM D75-19.

En el caso del agregado grueso se muestreó de un apilamiento, este se removió por completo y se homogenizó el material.

En cuanto al agregado fino, este se encontraba guardado en sacos, se removió de estos y se homogenizó en su totalidad.

Durante la homogenización se notó que el material fino contaba con gran cantidad de gruesos por lo que se procedió a realizar una prueba preliminar para conocer la granulometría de este. Los resultados obtenidos mostraron que el material retenido en el tamiz N°4 (4,75 mm) sobrepasaba por mucho el límite establecido¹, se retenía de 15% a 20% de material y se permite máximo 5%. Por esta razón se procesó todo el agregado fino a través del tamiz N°4, aproximadamente 700 kg de arena, con el fin de eliminar la mayor cantidad posible de material que incumplía en este tamiz.

Reducción de muestras

Este ensayo se realizó según lo indicado en la norma ASTM C702-18. El método seleccionado para reducir las muestras fue el método A (divisor mecánico), este se utiliza en el agregado fino cuando está seco al horno (como en este caso) y en el agregado grueso es el método recomendado por la norma.

El divisor mecánico debe tener no menos de ocho aberturas para agregado grueso y no menos de 12 para agregado fino, tal como se observa en la figura 8. El procedimiento fue el siguiente:

- Se pesaron los recipientes que reciben el material y se anotó el dato.
- Se colocó la muestra en la tolva y se distribuyó uniformemente de un extremo al otro, de manera que fluyera cantidades aproximadamente iguales a través de cada ranura.
- La velocidad utilizada permitió que la muestra fluyera libremente hacia los recipientes donde cae el material.
- Se reintrodujo la porción de la muestra de uno de los recipientes al divisor, tantas veces como fue necesario para reducir la muestra al tamaño especificado para el ensayo.
- Una vez obtenidas todas las cantidades necesarias para ensayos, los materiales se secaron en un horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener masa constante.
- Estos materiales se reservaron en bolsas plásticas debidamente selladas con el fin de que no ingresara humedad a las muestras.



Figura 8. Divisores mecánicos para agregado fino y grueso

Lavado de material más fino que el tamiz 0,075 mm (N°200)

Este ensayo se realizó según lo indicado en la norma ASTM C117-17. El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Después de la determinación de la masa constante se colocó la muestra en un recipiente y se agregó agua.
- Se agitó la muestra de manera que se separaran todas las partículas más finas que el tamiz N°200 de las partículas más gruesas y así se llevaba a suspensión el material fino.
- Cuando el material fino estaba en suspensión se vertía el agua de lavado a través de los tamices superpuestos N°16 y N°200 (el más grueso arriba).
- Se agregó agua de nuevo a la muestra de ensayo en el recipiente, se agitó y se vertió lo antes posible.
- Lo anterior se repitió hasta que el agua de lavado estuviera clara.
- Todo el material retenido en los tamices superpuestos se secó a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.

¹ ASTM C33-18



Figura 9. Material antes y después del lavado por el tamiz N°200

La fórmula utilizada para el cálculo de este material es:

$$A = \left(\frac{B - C}{B} \right) * 100$$

Donde:

- A= porcentaje de material más fino que el tamiz de 0,075mm por lavado
- B= masa original seca de la muestra de ensayo (g)
- C= masa seca de la muestra de ensayo lavado (g)

Análisis granulométrico por tamices (agregado grueso y fino)

Este ensayo se realizó según la norma ASTM C136-19, se siguió el procedimiento tanto para el agregado grueso como para el fino:

- Después de obtener la masa constante se realizó el análisis granulométrico.
- Se acomodaron los tamices en orden de tamaño de abertura decreciente, de arriba hacia abajo.
- Se tamizó manualmente por lo que se sostuvo cada tamiz individual con una charola y una tapa ajustada, golpeando el lado opuesto del tamiz bruscamente.
- Se continuó tamizando el tiempo necesario de manera tal que, al final no

más del 1% del material retenido pueda pasar ese tamiz.

- No se forzó ninguna partícula a pasar por una abertura.
- Al final del tamizado se verificó que la masa total del material después de pasar por los tamices no difiriera en más de 0,3% de la masa original que fue colocada.

La fórmula utilizada para el cálculo de este error es:

$$\%Error = \frac{(Peso seco - \sum Peso Ret)}{Peso seco} * 100$$

Donde:

Peso seco= peso seco original colocado en tamices

\sum Peso Ret= suma de los pesos retenidos en los tamices



Figura 10. Tamices utilizados en el análisis granulométrico del agregado fino

Análisis granulométrico por tamices (arena de sílice)

La granulometría de la arena de sílice también fue comprobada con el mismo procedimiento explicado anteriormente, sin embargo, los tamices utilizados para este ensayo fueron los estipulados en la norma ASTM C778-17.

El proveedor seleccionado brindó *dos* tipos de arena de sílice que comercia, con estas dos muestras se realizó la prueba granulométrica con el fin de determinar la más cercana a la especificación.

Densidad aparente (peso unitario) y vacíos en el agregado

Este ensayo se realizó basándose en la norma ASTM C29-17, siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

Determinación del volumen del recipiente:

- Se determinó la masa del plato de acrílico utilizado.
- Se colocó una capa delgada de grasa en el borde superior del recipiente para prevenir una fuga de agua.
- Se llenó el recipiente con agua a temperatura ambiente y se cubrió con el plato de acrílico de manera que se eliminaron las burbujas y el exceso en agua. Se removió el agua de exceso que se desbordó.
- Se determinaron la masa del agua, el plato de acrílico y el recipiente.
- Se midió la temperatura del agua y se determinó su densidad, con esto se fijó el volumen del recipiente.



Figura 11. Materiales utilizados en la calibración del molde de pesos unitarios

Para determinar el peso unitario compactado del agregado cuando el tamaño máximo nominal es 37,5 mm o menos, se utiliza el

método de varillado y para determinar el peso unitario suelto, se emplea el método de paleo.

Ensayo por varillado:

- Se determinó la masa del recipiente.
- Se llenó el recipiente a un tercio, se niveló la superficie con los dedos y se varilló la capa dando 25 golpes con la varilla, distribuyéndolos uniformemente sobre toda la superficie, sin que la varilla toque el fondo.
- Se llenó el recipiente a dos tercios de la capacidad y se repitió el proceso de varillado con 25 golpes.
- Se llenó el recipiente hasta rebosarlo y se varilló de la misma manera anterior.
- Se niveló la superficie con una enrasadora, intentando que quede lisa.
- Se determinó la masa del recipiente y el contenido.



Figura 12. Última capa de varillado en el agregado grueso

Ensayo por paleo:

- Se determinó la masa del recipiente.
- Se llenó el recipiente hasta rebosarlo con ayuda de un cucharón, descargando el agregado desde una altura de máximo 50 mm por encima del borde del recipiente como se muestra en la figura 13.
- Se niveló la superficie con una enrasadora intentando que quedara lo más lisa posible.
- Se determinó la masa del recipiente y el contenido.



Figura 13. Llenado del recipiente por paleo

Las fórmulas utilizadas para los cálculos en este ensayo son:

$$PU = \frac{(G - T)}{V}$$

Donde:

PU= Peso unitario [kg/m³]
 G= Masa del agregado más recipiente [kg]
 T= Masa del recipiente [kg]
 V= Volumen del recipiente [m³]

$$\%Vacíos = \frac{(S * W) - M}{S * W} * 100$$

Donde:

S= Densidad relativa (seca) según ASTM C127 o ASTM C128
 W= Densidad del agua,
 M= Peso unitario del agregado [kg/m³]

Densidad relativa y absorción del agregado grueso

Este ensayo se realizó según lo indicado en la norma ASTM C127-15, siguiendo el procedimiento mostrado a continuación:

- Después de obtener masa constante en la muestra, se dejó enfriar hasta que la temperatura fue manejable.
- Se sumergió en agua a temperatura ambiente por 24±4 h.

- Se sacó la muestra del agua y se rodó por un paño absorbente hasta que desaparecía el brillo del agua (humedad superficial).
- Se midió la masa en aire de la muestra en condición saturada superficie seca (SSS).
- Después se determinó la masa saturada superficie seca sumergida en el contenedor en agua a 23±2°C. Se tuvo el cuidado de remover el aire atrapado antes de determinar la masa.
- Se secó la muestra en el horno hasta masa constante a 110±5°C y se determinó su masa cuando la temperatura era manejable.

Fórmulas utilizadas:

$$Gbs = \frac{A}{B - C}$$

$$Gsss = \frac{B}{B - C}$$

$$Ga = \frac{A}{A - C}$$

$$\%Absorción = \frac{B - A}{A} * 100$$

Donde:

Gbs= Gravedad específica bruta seca
 Gsss= Gravedad específica saturada superficie seca
 Ga= Gravedad específica aparente
 A= Masa seca al horno en el aire (g)
 B= Masa saturada superficie seca en el aire (g)
 C= Masa aparente saturada en el agua (g)



Figura 14. Determinación de la masa SSS sumergida

Densidad relativa y absorción del agregado fino

La realización de este ensayo se basó en la norma ASTM C128-15, siguiendo los pasos a continuación:

Inicio de ensayo:

- Una vez alcanzada la masa constante, se dejó enfriar hasta temperatura manejable.
- Se sumergió en agua a temperatura ambiente por 24 ± 4 h.
- Se decantó el agua con cuidado para evitar la pérdida de finos.
- Se colocó la muestra en un recipiente no absorbente y se agitó constantemente para propiciar su secado homogéneo.
- Se continuó con la realización de humedad superficial.



Figura 15. Secado de la muestra de agregado fino

Humedad superficial:

- Se sostuvo el molde cónico con su diámetro mayor hacia abajo, sobre una superficie lisa y se colocó una porción del de agregado fino parcialmente seco.
- Se apisonó el agregado con 25 golpes dejando que el apisonador cayera por acción de la gravedad.
- Se removió la arena que cayó alrededor del cono y luego este se levantó. Al principio al haber humedad superficial el agregado mantenía la forma del molde.

- Se repitió el proceso hasta que se llegó a notar un ligero asentamiento en el agregado fino, señal de que se llegó a la condición saturada superficie seca (SSS).



Figura 16. Apisonado de la muestra de agregado fino en el molde cónico

Método gravimétrico (picnómetro):

- Se llenó parcialmente el picnómetro con agua. Se introdujo 500 ± 10 g de agregado en condición saturada superficie seca.
- Se llenó con agua adicional hasta un 90% de su capacidad.
- Se agitó el picnómetro manualmente rotando, invirtiendo y girándolo para eliminar las burbujas. Luego se decidió utilizar la bomba de vacío para eliminar más eficientemente las burbujas.
- Se verificó que la temperatura del picnómetro cumpliera con $23 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Se determinó la masa total del picnómetro, la muestra de agregado y el agua.
- Se retiró el agregado fino del picnómetro y se secó en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante y se determinó su masa.
- Finalmente, se determinó la masa del picnómetro lleno hasta su capacidad de calibración con agua a $23 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figura 17. Verificación de la temperatura de la muestra sin burbujas

Las fórmulas utilizadas para los cálculos en este ensayo son:

$$G_{bs} = \frac{A}{B + S - C}$$

$$G_{sss} = \frac{S}{B + S - C}$$

$$G_a = \frac{A}{B + A - C}$$

$$\% \text{Absorción} = \frac{S - A}{A} * 100$$

Donde:

G_{bs}= Gravedad específica bruta seca
 G_{sss}= Gravedad específica saturada superficie seca
 G_a= Gravedad específica aparente
 A= Masa seca al horno (g)
 B= Masa del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración (g)
 C= Masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta la marca de calibración (g)
 S= Masa de la muestra saturada superficie seca (g)

Impurezas orgánicas en agregado fino

Este ensayo se realizó basándose en la norma ASTM C40-20. A continuación, el proceso seguido:

- Se llenó la botella con la muestra de agregado fino hasta el nivel de aproximadamente 130 ml.
- Se agregó la solución de hidróxido de sodio al 3% hasta que el volumen del agregado fino y el líquido después de agitar fuera 200 ml.
- Se tapó la botella, se agitó vigorosamente hasta saturar la muestra y se dejó reposar por 24 horas.
- Se registró el color del líquido y se comparó con el color de la placa orgánica fabricada por Hellge.
- Según lo indicado en norma, el color patrón de comparación para esta placa orgánica es el número 3.



Figura 18. Comparación de la muestra con la placa orgánica.

Abrasión en la máquina de Los Ángeles

Este ensayo se realizó según lo indicado en indicado en la norma ASTM C131-20, siguiendo los pasos mostrados a continuación:

- Se escogió la graduación de la muestra más representativa, en este caso corresponde a la graduación C.
- Se lavó la muestra y luego se secó al horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta llegar a masa constante.
- Se registró la masa de la muestra seca previo al ensayo.
- La muestra de ensayo y la carga de esferas se colocaron en la máquina Los Ángeles y se giró a una velocidad de 30 a 33 rpm, hasta las 500 revoluciones.
- Después se descargó el material y se pasó por los tamices $\frac{1}{4}$ " y N°12.
- Se lavó el material más grueso que el tamiz N°12 y se secó al horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante.
- Se determinó su masa.

La fórmula para el cálculo del % de pérdida es:

$$\% \text{ pérdida} = \frac{C - Y}{C} * 100$$

Donde:

C= Peso inicial (g)

Y= Peso final (g)



Figura 19. Máquina de Los Ángeles

Diseño de mezcla

Se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 6 de la práctica estándar ACI 211.1-91 (reaprobada en 2002), este es "sin lugar a dudas, el método de dosificación más utilizado en todo el mundo, siendo el más adecuado para casi cualquier obra realizada con hormigón" (García Pérez, 2004, p.16).

En Costa Rica esta metodología es utilizada principalmente debido a que las variables de entrada se obtienen de ensayos rutinarios de los agregados, cemento y concreto. Estos ensayos se solicitan como parte del control de calidad en el país y se basan en ASTM y las normas costarricenses INTECO también se basan en ASTM (por ejemplo: asentamiento, contenido de aire, peso unitario, resistencia a la compresión, uso de especímenes cilíndricos).

Se requirió la siguiente información de los agregados utilizados:

- Análisis granulométrico de los agregados fino y grueso
- Peso unitario del agregado grueso
- Gravedades específicas y absorción de ambos agregados
- Gravedades específicas de los cementos en estudio

El porcentaje de humedad en sitio de los agregados se obtuvo de manera independiente para cada mezcla de concreto realizada.

El asentamiento seleccionado fue de aproximadamente 150 mm para cada mezcla de concreto hidráulico, con el fin de tener la trabajabilidad adecuada en el momento de moldear.

Los pasos seguidos con esta metodología de diseño fueron:

1. Selección del asentamiento
2. Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso
3. Estimación del agua de mezcla y contenido de aire
4. Selección de la relación agua/cemento (A/C)
5. Cálculo del contenido de cemento
6. Estimación del contenido de agregado grueso
7. Estimación del contenido de agregado fino
8. Ajuste por humedad de los agregados

Se decidió que la resistencia de diseño (f'_c) seleccionada para cada uno de los diseños de

mezcla fuera de 210 kg/cm² (20,59 MPa), esto porque según lo indicado en el Código Sísmico de Costa Rica (2010, sección 8.1.2) es la “resistencia mínima especificada del concreto en compresión”.

Diseño experimental

Variable en estudio

Se decidió estudiar cinco tipos de cementos hidráulicos de producción y uso a nivel nacional (tres fueron clase 28 y 2 fueron clase AR). Por lo tanto, se realizaron cinco diseños de mezcla. En estos la variable principal fueron los tipos de cemento hidráulico ya que los agregados se mantuvieron constantes.

Selección del tamaño de muestra “N”

En el ACI 318-14 se menciona que:

Un ensayo de resistencia debe ser el promedio de las resistencias de al menos **dos** probetas de 150x300 mm o de al menos **tres** probetas de 100x200 mm, preparadas de la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días o a la edad de ensayo designada para la determinación del f_c. (...) El ensayo de tres en vez de dos cilindros de 100x200 mm, mantiene el nivel de confianza de la resistencia promedio ya que los cilindros de 100x200 mm tienden a tener variabilidades propias de ensayo aproximadamente un 20% mayores que las correspondientes para ensayos de cilindros de 150x300 mm. (sección 26.12)

En este estudio se decidió utilizar moldes cilíndricos de 100x200 mm, estos cumplen con la sección 6.4 de la ASTM C192-19, donde indica que “el diámetro del espécimen cilíndrico será al menos 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso”, además al ser más pequeños y livianos que los moldes estándar (150x300 mm)

son de más fácil manipulación y los especímenes ocupan menos espacio en la cámara húmeda. Por otro lado, el ACI 214R-11 establece que “el registro para estimar la desviación estándar o el coeficiente de variación debe representar un grupo de al menos 30 muestras” (p.8).

Con el fin de determinar una cantidad mínima, se tomó como referencia el archivo de video “Tamaños de Muestras en R” donde Méndez (2020) desarrolla una serie de pruebas de “*Bootstrapping*” con una base de datos reales de ensayos de resistencia a la compresión en vigas y columnas de concreto, estos especímenes no son representativos del estudio que se presenta en este informe, sin embargo, debido a que no se cuenta con una base de datos representativa de la población, esta resulta ser útil como una referencia. Mediante iteraciones se llega a la conclusión de que aproximadamente 12 muestras es un buen número si se desea equilibrar la desviación estándar de la población con la tolerancia esperada en las muestras.

Por otro lado, en un estudio de este tipo la decisión de cuántos especímenes fabricar también se basa en los recursos disponibles en el laboratorio, el tiempo disponible para realizar el total de especímenes por día y los tiempos de falla.

Considerando todo lo mencionado se decidió realizar las siguientes cantidades:

- 51 cilindros de concreto hidráulico para cada uno de los cinco diseños de mezcla
- 51 cubos de mortero para cada uno de los cinco tipos de cemento hidráulicos

El total de especímenes que se fabricaron fue de 255 cilindros de concreto hidráulico y de igual forma 255 cubos de mortero.

La distribución se decidió de la siguiente forma: a las edades de 7 y 14 días se fallaron tres especímenes y en edades de 28 días en adelante se fallaron 10 especímenes por edad. En las pruebas de “*Bootstrapping*” realizadas en el programa R se obtuvo que con 10 especímenes la desviación estándar de la muestra se asemeja a la poblacional, por lo que esta cantidad se acerca a un mínimo aceptable.

Aleatoriedad

El proyecto se basó en la aleatorización, ya que este aspecto es un “principio básico del diseño de experimentos” según Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar (2008). Esta aleatorización se llevó

a cabo seleccionando especímenes al azar (con el programa Minitab) de entre las tres tandas realizadas en cada tipo de concreto y de entre las cuatro tandas en cada tipo de mortero.

De las 51 muestras fabricadas para cada tipo de concreto y mortero, se fallaron 46 especímenes como parte de la selección aleatoria. Con esto se tiene independencia de los resultados, lo cual es un supuesto que debe comprobarse para la realización de las pruebas de ANOVA.

Elaboración de cilindros de concreto hidráulico

El proceso de fabricación de los cilindros de concreto hidráulico se realizó basándose en la norma ASTM C192-19: "*Fabricación y curado estándar para especímenes de concreto en el laboratorio*".

Los procedimientos descritos a continuación aplican para cada una de las cinco mezclas de concreto realizadas. Al realizarse 51 cilindros por cada mezcla, esta cantidad no podía fabricarse en un solo lote para evitar el endurecimiento de la mezcla por el tiempo que conlleva todo el proceso, por lo que se dividió en tres partes iguales y cada lote (tanda) de concreto abarcó 17 cilindros

Es importante anotar que un día antes de inicial el proceso experimental de elaboración de cilindros se realizó una tanda de prueba del concreto A, con el fin de verificar asentamiento y calibrar el diseño de mezcla, sin embargo, por cuestión de tiempo este proceso sólo se pudo realizar para este concreto.

Preparación de materiales

Los agregados se encontraban en el inventario en el laboratorio, almacenados en sacos donde se aseguraba su condición de humedad aproximadamente constante. Sin embargo, con el fin de realizar la mezcla con las condiciones lo más cercanas a la realidad, dos días antes de realizar cada mezcla de concreto, se dejó una porción representativa del agregado grueso y del agregado fino en el horno a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas

hasta tener masa constante, obteniendo así la humedad en sitio de los materiales en ese momento.

El cemento hidráulico se tenía almacenado en el laboratorio, en bolsas plásticas negras selladas de manera que no ingresara humedad y colocados sobre tarimas. Además, el día antes de realizar cada mezcla, los moldes se engrasaron interior y exteriormente.

La normativa¹ indica: "antes de realizar la mezcla llevar los materiales a un cuarto con temperatura entre 20 a 30°C ", sin embargo, en el laboratorio no se cuenta con un cuarto de este tipo para asegurar dicha temperatura. En su lugar, aproximadamente cinco minutos antes de la realización de las mezclas se tomó la temperatura ambiente, estas se pueden observar en la tabla 26 de la sección de *Resultados*.

Procedimiento de mezclado y moldeo

Se realizó con base en la norma ASTM C192-19.

- Se colocó el agregado grueso en la mezcladora y parte del agua, se mezcló unos cuantos segundos para homogenizar.
- Después de encender la mezcladora se agregó la arena, el cemento y el agua restante.
- Se mezclaron todos los materiales durante tres minutos, después se dio un descanso de tres minutos y finalmente se mezcló de nuevo por dos minutos.
- Durante los tres minutos de descanso se cubrió la mezcladora, esto para que la mezcla no pierda humedad.
- Se vació la mezcla en un carretillo, el cual se humedeció con agua superficialmente para evitar que este absorbiera agua de la mezcla. Así como la pala, las cucharas y todo equipo que estuvo en contacto con el concreto.
- Se midió el asentamiento de la mezcla según lo indicado en la norma ASTM C143-20.
- Se compactó con varillado en dos capas de aproximadamente igual profundidad, según lo indicado en la Tabla 1 de la

¹ ASTM C192-19

norma ASTM C192-19, para los moldes de 100 mm de diámetro. También esta norma en la sección 8.4.1 indica que si el asentamiento es mayor a 25 mm se puede varillar o vibrar.

- Se aplicaron 25 golpes con la varilla en cada capa de manera distribuida por toda la superficie, según Tabla 2 de la norma ASTM C192-19.
- Luego de varillar cada capa se golpeó el molde con el mazo de 10 a 15 veces por capa.
- Se enrasó la parte superior del molde primero con la varilla para retirar el exceso y luego con la llaneta para asegurar la terminación lisa del cilindro.
- Para reducir la variabilidad una sola persona realizó el procedimiento de compactación con varillado de los 51 cilindros en cada una de las cinco mezclas realizadas, de igual forma la persona que realizó el procedimiento de enrasado y finalización del espécimen se mantuvo constante durante las cinco mezclas.
- Sin embargo, en actividades como el golpe con mazo a los cilindros, el vaciado de concreto en los moldes y la medición de cantidades de cemento y agregados fueron realizadas por la misma persona durante una misma mezcla de concreto, sin embargo, varió de una mezcla a otra. Esto porque fueron actividades realizadas por ayudantes (debido al volumen de trabajo) y ellos colaboraron en diferentes días cada uno.
- Se midió la temperatura y la humedad relativa ambiente antes de iniciar el proceso de mezclado, para cada lote.

Se confeccionó una lista de verificación del proceso de fabricación y curado de los especímenes, con el fin de tener un control más estandarizado del procedimiento. Estas listas se llenaron después de realizar cada mezcla de concreto y se pueden encontrar en el *Apéndice 3* adjunto a este documento.

A continuación, se presenta una serie de fotografías que muestran la secuencia de actividades necesarias para el mezclado y moldeo de los especímenes cilíndricos de concreto hidráulico.



Figura 20. Mezcladora cubierta durante el tiempo de reposo



Figura 21. Control de los tiempos de mezclado con cronómetro



Figura 22. Medición del asentamiento del concreto



Figura 23. Varillado y llenado de los cilindros de concreto



Figura 26. Cobertura de los moldes con plástico



Figura 24. Golpes con el mazo



Figura 25. Terminación del cilindro con llaneta

Proceso de curado

El curado se hizo según lo indicado en la norma ASTM C192-19:

- Finalizado el proceso de fabricación de los cilindros se cubrió cada molde con un plástico negro para prevenir la evaporación del agua del concreto no endurecido. Las gotas que se forman por la condensación del vapor de agua colaboran al curado inicial del concreto.
- Los especímenes se desmoldaron 24 ± 8 h después de fabricados e inmediatamente se trasladaron a una cámara húmeda en la que la temperatura se mantiene constante a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y la humedad relativa en no menos del 95%, según lo indicado en ASTM C511-19. De esta manera se asegura que el curado se realizó bajo condiciones óptimas durante todo el tiempo que los especímenes permanecieron dentro (durante 147 días).



Figura 27. Cámara húmeda

Fallas de los cilindros

Se trabajaron con base en la norma ASTM C39-20. La comprobación del diseño de mezcla se dio mediante la falla de los cilindros de concreto hidráulico. Se falló a la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días, reportando los resultados con un promedio de 3 especímenes para los 7 y 14 días y en el caso de los 28 días se fallaron 10 especímenes.

Es importante mencionar que durante esta etapa se dio la alerta de Emergencia Nacional debido a la Pandemia del Covid-19, en este escenario el Tecnológico de Costa Rica optó por la suspensión temporal del curso lectivo y de labores dentro de la Institución, razón por la cual algunas de las fallas programadas no se pudieron realizar el día previsto. En el caso de los cilindros, las mezclas afectadas fueron la “E” la cual no se falló a los 28 días, si no hasta los 48 días y la “A” que se falló a los 46 días en vez de a los 28 días.

Los equipos y métodos utilizados en este proceso se manejaron por personal calificado.



Figura 28. Cilindro después de la falla

Elaboración de cubos de mortero

Los cubos de mortero se hicieron basándose en las normas ASTM C109-20b (“Método Estándar para Cubos de mortero de cemento hidráulico”), ASTM C1437-20 (“Método Estándar para el flujo de mortero de cemento hidráulico”) y ASTM C230-20 (“Método Estándar para mesa de flujo usada en

ensayos de cemento hidráulico”). Los procedimientos descritos a continuación, aplican para cada una de las cinco mezclas de mortero realizadas, una para cada cemento hidráulico en estudio.

Flujo del mortero

El proceso seguido se presenta a continuación:

- Se colocó el molde de flujo en el centro de la mesa de flujo y dentro de este se colocó una capa de mortero de aproximadamente 25mm de grosor y se compactó 20 veces con el apisonador.
- Para la siguiente capa de mortero se realizó el mismo proceso descrito antes, luego se enrasó el molde con una regla enrasadora.
- Se levantó el molde de flujo, un minuto después de haber terminado de mezclar el mortero.
- Inmediatamente se dejó caer la mesa de flujo 25 veces en 15 segundos (la mesa utilizada era automática).
- Se midió el diámetro del mortero a lo largo de las cuatro líneas marcadas sobre la mesa.
- Se calculó el flujo del mortero en porcentaje.
- El proceso se repitió hasta encontrar el flujo de $110 \pm 5\%$.



Figura 29. Medición del flujo del mortero

Procedimiento de mezclado y moldeo

- Las proporciones de materiales fueron una parte de cemento hidráulico a 2,75 partes de arena de sílice. La cantidad de agua necesaria se encontró con el procedimiento de Flujo descrito anteriormente.
- Se colocó toda el agua en el tazón.
- Se agregó el cemento y se empezó a mezclar a velocidad baja por 30 segundos.
- Se agregó toda la arena lentamente durante 30 segundos mientras se mezcla a velocidad baja.
- Se detuvo la mezcladora, se cambió a velocidad media y se mezcló por 30 segundos.
- Se detuvo la mezcladora y se dejó reposar por 90 segundos. Durante los primeros 15 segundos se limpiaron las paredes del tazón y luego se dejó reposar cubierta con un paño.
- Se terminó mezclando por 60 segundos más a velocidad media.
- Se colocó una capa de mortero de aproximadamente la mitad de la altura del molde en todos los compartimientos de este.
- Se apisonó 32 veces en cuatro rondas como se muestra en la figura 30.
- Se realizó el mismo procedimiento para la segunda capa y se enrasó la superficie final.

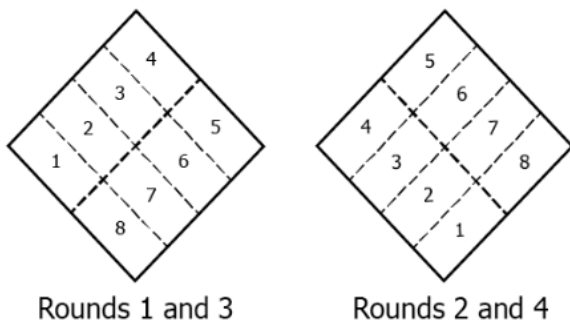


Figura 30. Orden de apisonado en moldeo de especímenes
Fuente: ASTM C109-20b

Se realizó una lista de verificación del proceso de fabricación y curado de los especímenes, con el fin de tener un control más estandarizado del

procedimiento. Estas listas se llenaron después de terminar cada día de fabricación de cubos y se encuentran en el *Apéndice 3* adjunto a este documento.

A continuación, se presenta una serie de figuras que muestran la secuencia de actividades necesarias para el mezclado y moldeo de los especímenes cúbicos.



Figura 31. Control de los tiempos de mezclado con cronómetro



Figura 32. Llenado de la primera capa de mortero



Figura 33. Apisonado de los cubos de mortero

Curado de los cubos

La normativa¹ indica que inmediatamente después de moldear los cubos se mantienen en la cámara húmeda cubiertos de manera que no les caiga agua directamente y luego de 24 horas desmoldar.

El lugar de trabajo donde se realizaron los cubos se encuentra lejos de la cámara húmeda y en el proceso de traslado de los moldes hasta la cámara podían sufrir algún golpe o caída ya que los cubos estaban en estado fresco. Por esta razón se optó por fabricar una cámara temporal de curado cerca de la zona. Esta aseguró que los cubos no perdieran humedad durante las primeras 24 horas, sin embargo, no se pudo establecer el control de la temperatura durante esta etapa inicial. Una vez desmoldados los cubos se trasladaron inmediatamente a la cámara húmeda donde la temperatura y humedad relativa es constante y controlada según los requerimientos de la norma ASTM C511-19 ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura y una humedad relativa de no menos del 95%).

Asegurando de esta manera condiciones óptimas de curado para los cubos durante toda su estancia en la cámara húmeda, el tiempo alcanzado por cada uno de los grupos de cubos fue de 147 días.



Figura 34. Cámara húmeda provisional para cubos

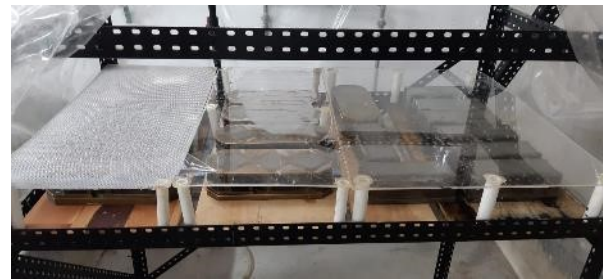


Figura 35. Colocación de moldes en cámara provisional

Fallas de los cubos

Los métodos y equipos utilizados en este proceso se realizaron según lo indicado en la norma ASTM C109-20b y por personal calificado.

Se falló a la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días. Se reportan los resultados con un promedio de tres especímenes a los 7 y 14 días y 10 especímenes para los 28 días. Los cubos por fallar fueron seleccionados de manera aleatoria haciendo uso del programa Minitab.

De igual manera como se mencionó en las 'Fallas de los cilindros', los cubos también se vieron afectados por la suspensión del curso lectivo y de labores en el Tecnológico de Costa Rica debido a la Emergencia Nacional por la Pandemia del Covid-19. En el caso de los cubos, las mezclas afectadas fueron la "A, C, D y E", las cuales en vez de fallarse a los 28 días se realizó la falla a los 34, 47, 41 y 39 días de edad, respectivamente.

¹ ASTM C109-20b



Figura 36. *Especimen cúbico fallado*

Fallas edades posteriores a 28 días

Una vez alcanzados los 28 días en cada una de las mezclas, se procedió a realizar la comprobación de la resistencia a la compresión para las edades posteriores a la edad de diseño (f_c).

Nuevamente en esta etapa el cierre de algunas actividades en el TEC debido a la pandemia por el Covid-19, afectó el cronograma planteado para la realización de estas, ocasionando un retraso en la obtención de los resultados. Por lo que una vez que se permitió el ingreso de la estudiante a la Institución (para procesos de etiquetado y acomodo de especímenes) se reinició inmediatamente con las pruebas a compresión tanto de los cilindros como de los cubos. Estas fueron realizadas por los técnicos de laboratorio, es decir, personal calificado para la realización de ensayos. Sin embargo, no se estuvo presente durante los procesos de fallas, para evitar un mayor contacto con otras personas, tanto para la estudiante como para el personal del laboratorio.

Las edades planteadas para esta etapa fueron **133, 140 y 147 días**. Una vez se reiniciaron las fallas, en el nuevo cronograma también se tuvo en cuenta la semana de vacaciones dada, por lo que los resultados de algunas de estas nuevas edades propuestas no se pudieron obtener. En las siguientes tablas se muestran las edades de falla que se realizaron para cada uno de los especímenes.

Tabla 8. *Edades de falla posteriores a 28 días para Cilindros*

ID Concreto	Edad (días)
A	133
	140
	147
B	133
	147
C	126
	140
	147
D	126
	140
	147
E	133
	140
	147

Tabla 9. *Edades de falla Posteriores a 28 días para Cubos*

ID Mortero	Edad (días)
A	133
	140
	147
B	126
	140
	147
C	133
	140
	147
D	133
	140
	147
E	133
	140
	147

Para las mezclas donde no se logró obtener el resultado a los 133 días, se optó por fallar una semana antes y tener el dato a 126 días de edad (como se observa en las tablas 8 y 9), esto con el fin de tener la mayor cantidad de puntos para formar las curvas de resistencia a lo largo del tiempo.

Tratamiento estadístico

Los procedimientos descritos a continuación fueron realizados para el análisis y tratamiento tanto de los cilindros de concreto hidráulico como de los cubos de mortero.

Programa estadístico

En este estudio se utilizó el programa estadístico Minitab. El uso de este está respaldado por más de 4000 universidades en todo el mundo, que lo utilizan en la enseñanza de la Estadística. Originalmente fue concebido como un programa que facilitara la enseñanza a los profesores y el aprendizaje a los estudiantes, donde el enfoque fuera en el análisis de datos en situaciones reales con el fin de dar a conocer la aplicabilidad de la estadística. Además, miles de compañías lo utilizan para sus análisis, por esta razón las universidades optan por preparar a los estudiantes en el uso de este programa desde esta etapa, teniendo una ventaja en el momento de salir al mundo empresarial (Minitab Inc., 2020).

Por estas razones se decidió utilizar el programa Minitab en el tratamiento estadístico de los resultados, en general se logró constatar la interfaz intuitiva que posee, de fácil uso para el aprendizaje y la gran cantidad de material de referencia y tutoriales que se encuentran disponibles.

Estadística Descriptiva

Se calcularon los estadísticos descriptivos mínimos requeridos según lo expuesto en la guía ACI 214R-11, estos son:

- Promedio (media aritmética)
- Desviación estándar muestral (S)
- Coeficiente de variación (CV)
- Rango

Además, también se calcularon los intervalos de confianza al 95%, para cada promedio en MPa.

Estos estadísticos se utilizaron en la comparación de los resultados obtenidos contra los estándares de control propuestos por la normativa.

Una vez definidos los tratamientos del estudio se decidieron los grupos para comparación y análisis, el primer grupo Concretos y morteros fabricados con los cementos hidráulicos clase de resistencia nominal 28¹ y el segundo grupo Concretos y morteros fabricados con los cementos clase de resistencia nominal AR¹ (en adelante se llamarán *Clase 28* y *Clase AR*)

Dispersión de datos

Con el fin de observar visualmente el comportamiento de los datos se realizaron gráficos de Dispersión de Datos para cada tratamiento, donde se analizó el comportamiento en cada edad de falla. También se elaboraron gráficos de caja o “Boxplots” como ayuda visual en el análisis de la variabilidad de los resultados.

Valores atípicos

Con la realización de los gráficos de caja se logró observar en algunos casos la existencia de valores atípicos. Una vez detectado esto, se siguió la recomendación planteada en la guía ACI 214R-11 sobre el tratamiento de valores atípicos, esta referencia hacia la norma ASTM E178.

Siguiendo los procedimientos presentados en esta última norma, se realizaron las pruebas de valores atípicos de Grubbs y Dixon con el programa Minitab, este se enfoca únicamente en buscar atípicos en el valor más pequeño y el más alto de un set de datos. En algunos conjuntos podían observarse grupos de dos o tres valores alejados del resto, para estos casos la norma ASTM E178 presenta derivaciones de Grubbs o Dixon para buscar dos o más atípicos del mismo lado de la muestra o en lados opuestos. Estas comprobaciones que no realiza el programa Minitab se calcularon con Excel (*Ver apéndices 5 y 6*).

¹ Según las clasificaciones indicadas en la normativa nacional INTE C147:2018

Normalidad de los datos

La guía ACI 214R-11 establece que: “la suposición básica es que los resultados de resistencia del concreto son normalmente distribuidos” (p.8). Además, las pruebas paramétricas que se practicaron a los resultados (más adelante se explican), requieren que estos sigan un comportamiento normal, por ejemplo para la prueba de ANOVA, este es uno de los supuestos para realizarla y “debe verificarse para estar seguros de las conclusiones obtenidas” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008, p.69).

Por estas razones se buscó la normalidad en los resultados obtenidos en este estudio.

El programa Minitab ofrece en su catálogo tres pruebas de normalidad (Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov y Ryan-Joiner) para este estudio se decidió realizar dos pruebas como parámetros de comparación, ya que algunas detectan la no normalidad con mayor eficacia.

En el artículo “Comparación de potencias en pruebas estadísticas de normalidad, con datos escasos” se llega a la conclusión de que para tamaños de muestra pequeños de diez a quince datos (similar al proyecto realizado), la prueba de Anderson-Darling (AD) ocupa el tercer lugar, Kolmogorov-Smirnov (KS) el quinto lugar y Ryan-Joiner el séptimo lugar, en cuanto a potencia de la prueba (Cabrera, Zanazzi, Zanazzi, & Boaglio, 2017). Por lo que se seleccionaron AD y KS para el análisis de los resultados. Ambas con un valor de significancia de 0,05.

Regresión

Con ayuda del programa Excel se realizaron varias pruebas para conocer el tipo de modelo que más se ajusta a los resultados de resistencia. Esto se hizo con el promedio de los datos y también con la dispersión de los datos, se llegó a la conclusión que la dispersión de los datos presenta más información del fenómeno y permite crear un modelo más fiel al comportamiento real de los concretos incluyendo su variabilidad. No se hizo con Minitab porque no ofrece el resultado de R^2 para modelos no lineales; sin embargo, se verificó

que las ecuaciones de los modelos dados por ambos programas fueran iguales.

Con el coeficiente de determinación (R^2) se seleccionó el modelo de mejor ajuste, posterior a esto con la ecuación obtenida en Excel se creó el modelo completo en Minitab, con sus correspondientes intervalos de confianza y predicción.

La selección del modelo también se apoyó en investigación bibliográfica de estudios en concreto hidráulico como por ejemplo algunos son: “Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados” de Jorge Delgado Castro, “Determinación de las curvas características de resistencia a la compresión en función del tiempo para el cemento de uso general comercializado en San José, Costa Rica” de Luis Carvajal Coto y la norma ASTM C918-20.

ANOVA y Tukey

Para la aplicación de estas pruebas se siguió la comparación según los grupos definidos anteriormente, este esquema se utilizó para cada edad de falla, es decir, se realizaron seis pruebas de ANOVA, como mínimo, para cada tipo de concreto o mortero:

Tabla 10. Grupos de comparación entre tratamientos para cada edad de falla

ID Concreto / Cemento	Clase de resistencia nominal ¹	Grupo
A	28	1
C		
E		
B	AR	2
D		

Como se mencionó en la sección de teoría la prueba de ANOVA parte de que se cumplen tres supuestos:

- Independencia de datos: para asegurar esto se seleccionaron al azar los cilindros y cubos para cada edad de falla con ayuda de la opción *Datos aleatorios* del programa Minitab.

¹ Según las clasificaciones indicadas en la normativa nacional INTE C147:2018

- Normalidad: anteriormente se mencionó las pruebas de normalidad realizadas.
- Varianza constante: este punto se verificó con la prueba de *igualdad de varianzas* que ofrece Minitab, utiliza la prueba de Levene y Comparaciones múltiples para verificar este supuesto.

Para las edades donde no se logró realizar la falla (por causa del Covid-19 y la suspensión temporal de labores en el TEC), no se contó con los 10 datos de resultados, sino solamente con la media obtenida del modelo de regresión.

Al realizar la prueba de igualdad de varianzas para los grupos donde se perdió alguna edad se tenía por ejemplo el siguiente escenario:

Tabla 11. Ejemplo de grupo para comparación con ANOVA

Edad (días)	ID cilindros	N
28	A	1
	C	10
	E	1

En el cuadro anterior, N corresponde a la cantidad de resultados con que se contó para esa edad de falla, en los que se tenía solamente un resultado corresponde a la media obtenida de la regresión no lineal. Al practicar la prueba de igualdad de varianzas en estos casos se obtenían valores de p menores a 0,05 indicando que por lo menos una varianza es diferente y con este resultado no se podía realizar la prueba de ANOVA. Esto sucede porque se tiene un solo dato y no un conjunto, entonces, no se puede calcular varianza y lo más recomendable para esta prueba es que todos los tratamientos tengan la misma cantidad de datos (N).

Por la razón anterior, se decidió realizar una “simulación” de datos para las edades de falla que no se lograron realizar, esto como una especie de validación de los datos y para poder realizar la prueba de ANOVA. Principalmente porque la falla a 28 días no se obtuvo en varios cilindros de concreto y también en cubos de mortero.

Los 28 días representa una edad importante en este proyecto ya que es un punto de comparación contra normativa nacional y permite la verificación de los diseños de mezcla (cumplimiento con $f'c$ y $f'cr$). Por tal razón, no era recomendable perder la oportunidad de realizar la comparación de ANOVA entre los grupos completos de concretos y morteros.

La simulación propuesta consistió en la generación de datos aleatorios con distribución normal y que se encuentren dentro del rango del intervalo de predicción de cada edad de falla para cada tipo de concreto o mortero. En la figura 37 se presenta un diagrama de flujo que explica con más detalle el proceso realizado.

Para aprovechar el método utilizado, se realizó no solamente para la edad de 28 días sino también para las demás edades en donde se tenían cilindros o cubos a los que no se pudo efectuar la falla.

Una vez obtenidos todos los datos se realizaron las pruebas de ANOVA correspondientes. En los casos donde se detectaban diferencias significativas se aplicó la prueba de Tukey para identificar en cuáles tratamientos se daba la diferencia.

Es importante anotar el siguiente caso particular: a la edad de 28 días en el caso de los concretos realizados con cementos hidráulicos clase 28, se tenían los 10 resultados del concreto C y no se contaba con los resultados de los concretos A y E por lo que, al hacer la simulación de datos, el resultado para hacer el ANOVA era el siguiente:

Tabla 12. Ejemplo caso de combinaciones para realizar ANOVA (28 días cilindros)

ID cilindros	Cantidad de datos “N”	Sets de datos
A	10	10
C	10	1
E	10	10

Al realizar todas las combinaciones posibles derivadas de los datos de la tabla anterior se tenían 100 posibles combinaciones, es decir 100 posibles ANOVAS. En el caso de los cubos a los 28 días se tenían 10 grupos de 10 para los cubos A, C y E por lo que en estos las posibles combinaciones eran 1000.

Debido a que en el programa Minitab estas pruebas se realizan una por una, no era factible por cuestiones de tiempo realizar dichas cantidades de esta forma. Por lo que en cada uno de estos dos casos se realizaron 50 pruebas de ANOVA y se descartaron 20 de manera aleatoria, de forma tal que el análisis se realizó con 30 pruebas de ANOVA.

Técnicas complementarias

Con el fin de examinar las posibles causas que provocan variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión, de los cilindros de concreto y cubos de mortero, se utilizaron las siguientes técnicas:

- Diagramas de Causa-Raíz (diagramas de Ishikawa)
- Técnica de los cinco porqués
- Técnica de las seis M

La técnica de los cinco porqués se utilizó para facilitar la creación de los diagramas de Ishikawa. Y las seis M se utilizaron para clasificar las principales causas (“espinas principales”) en el diagrama de Ishikawa.

Los diagramas se crearon con la mayor cantidad posible de potenciales causas que pueden inferir en la variabilidad de los resultados de un proyecto de este tipo. Esto con el propósito de que puedan ser utilizados como referencia en experimentos futuros. Por lo tanto, no todas las causas allí anotadas son aplicables a este proyecto, en la sección de *Análisis* se evaluarán las que sean aplicables y representativas para las condiciones de este proyecto.

Para finalizar esta sección, a manera de resumen en la figura 38 se muestran los diagramas de flujo de cada etapa que fue realizada en este proyecto.

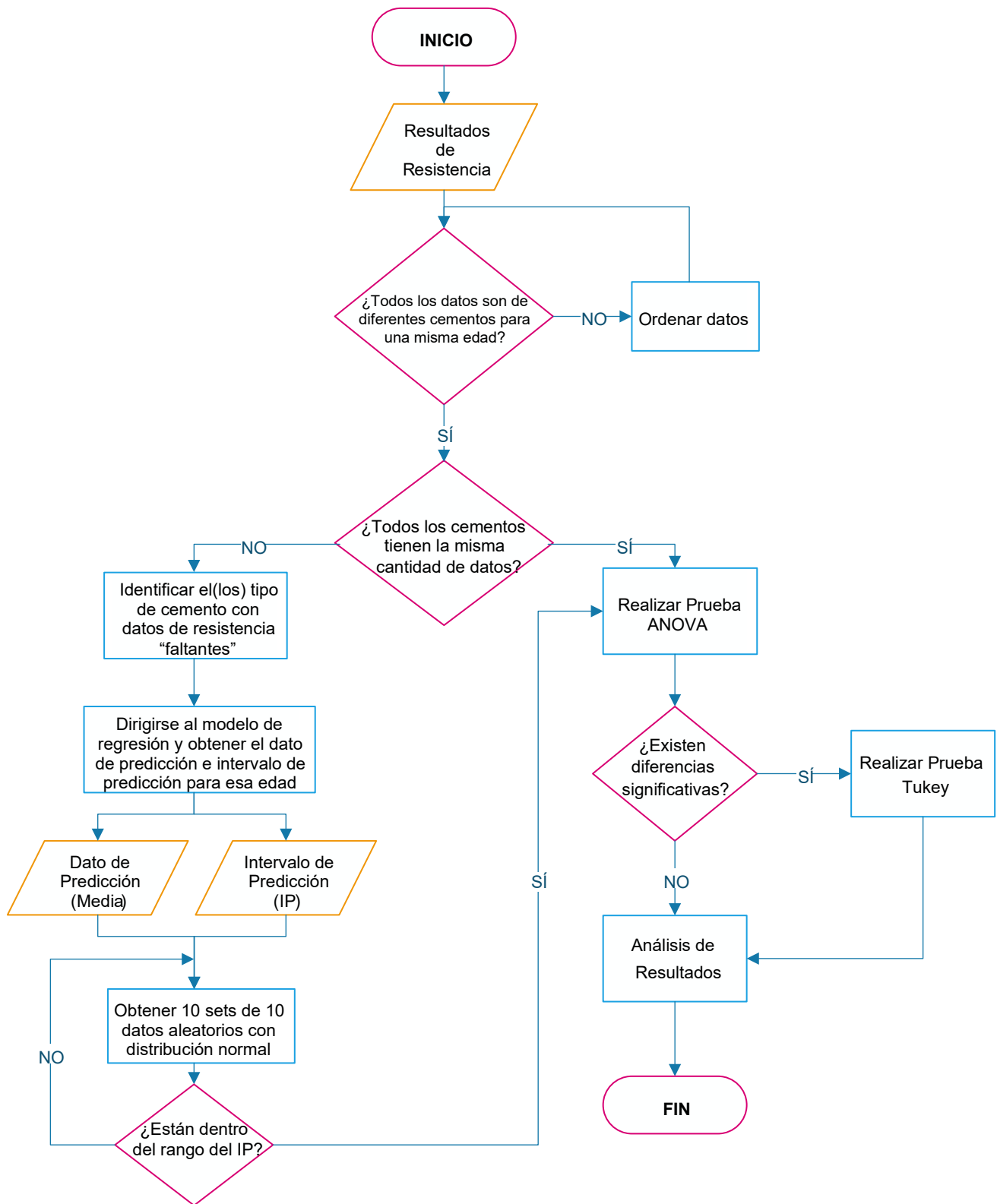


Figura 37. Diagrama de flujo Proceso de ANOVA

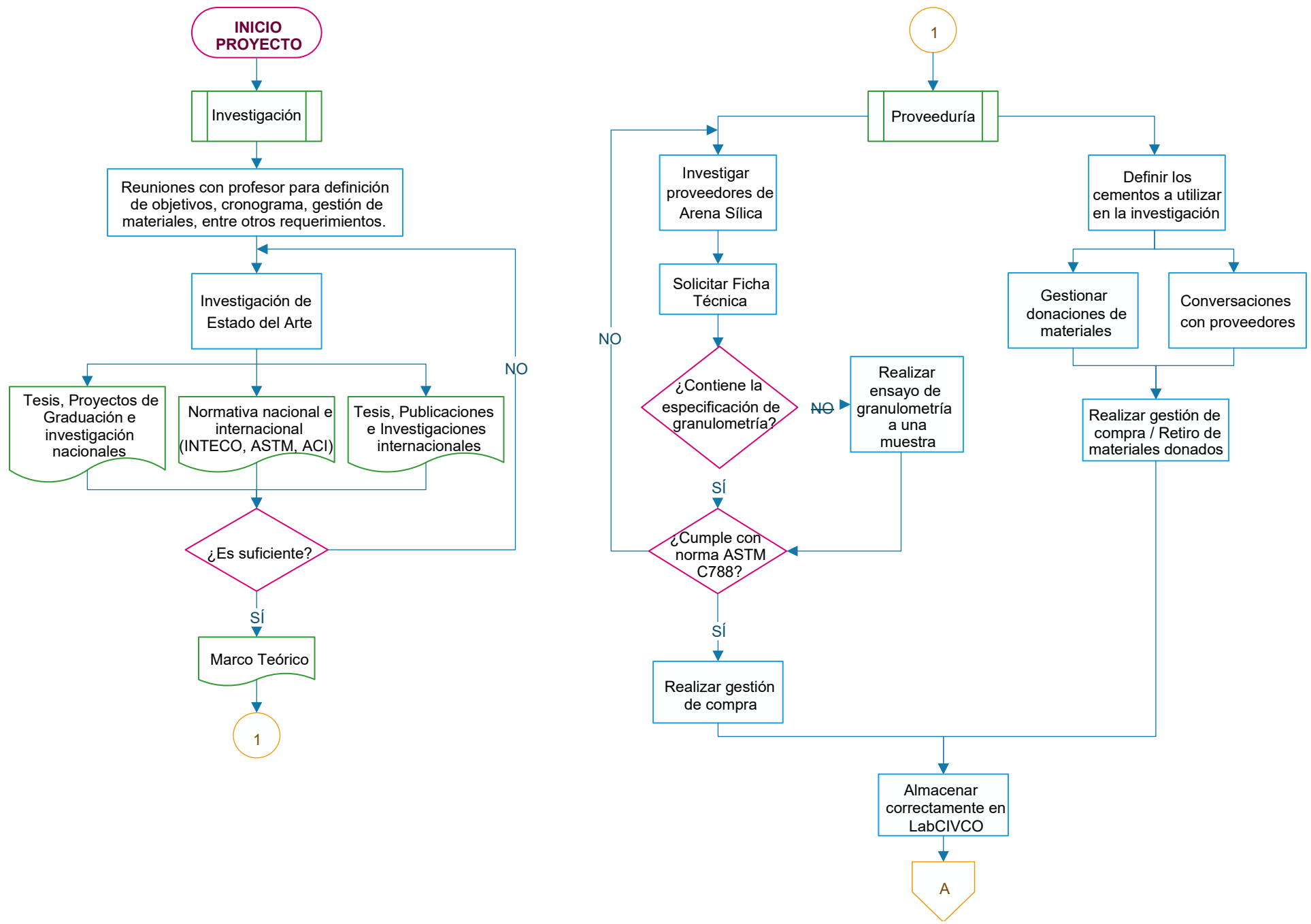
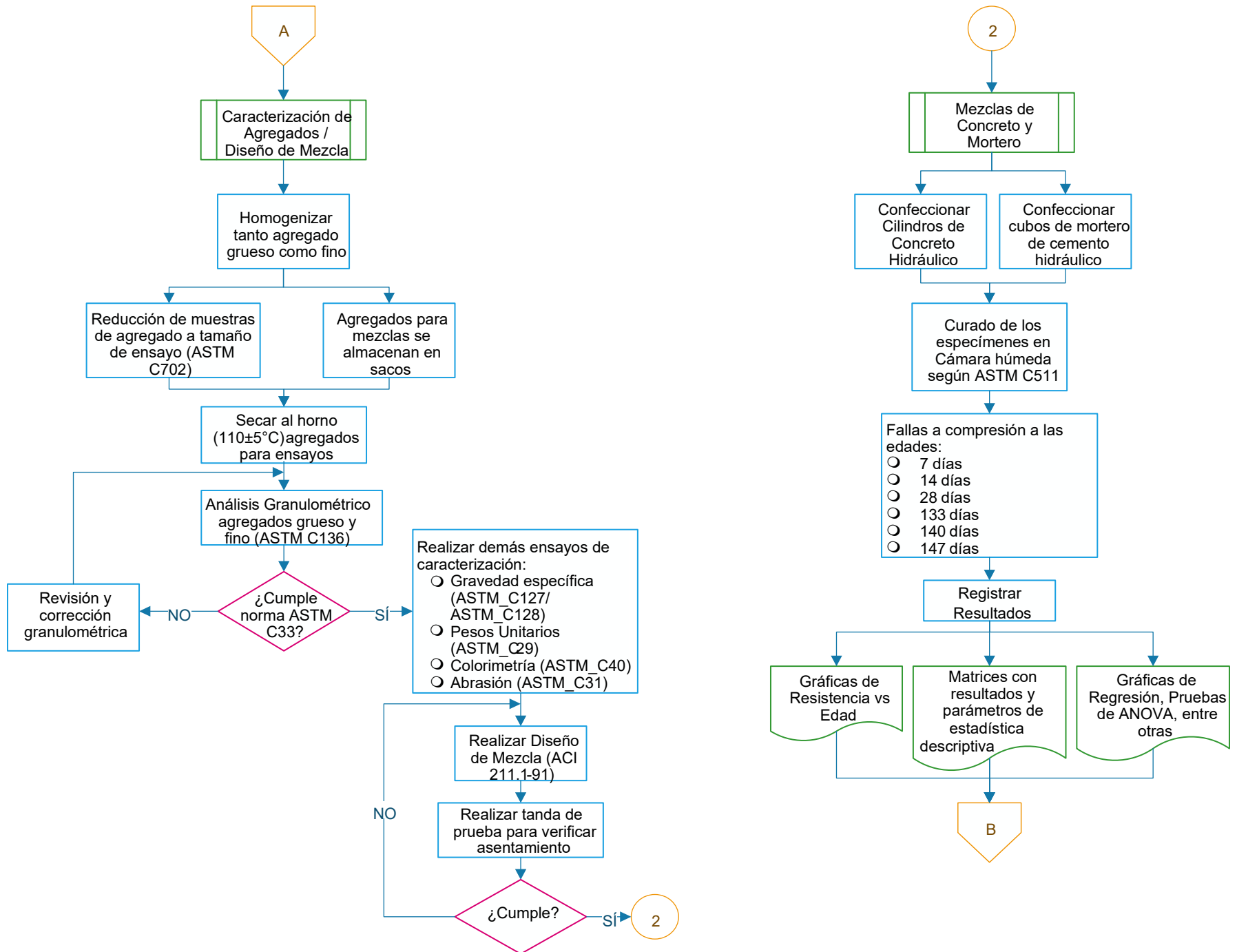
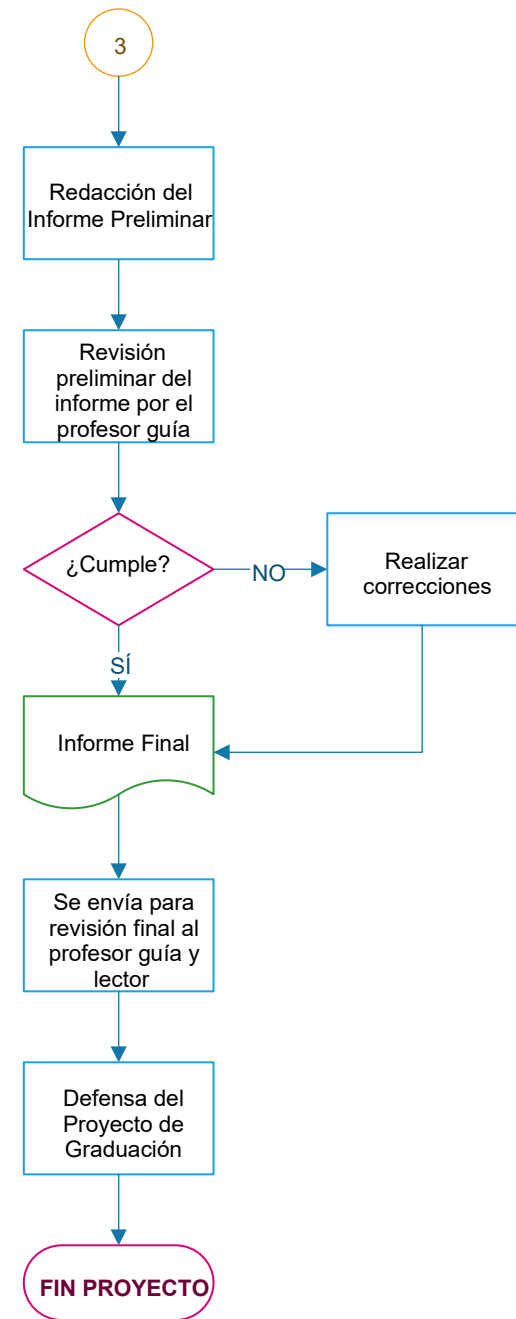
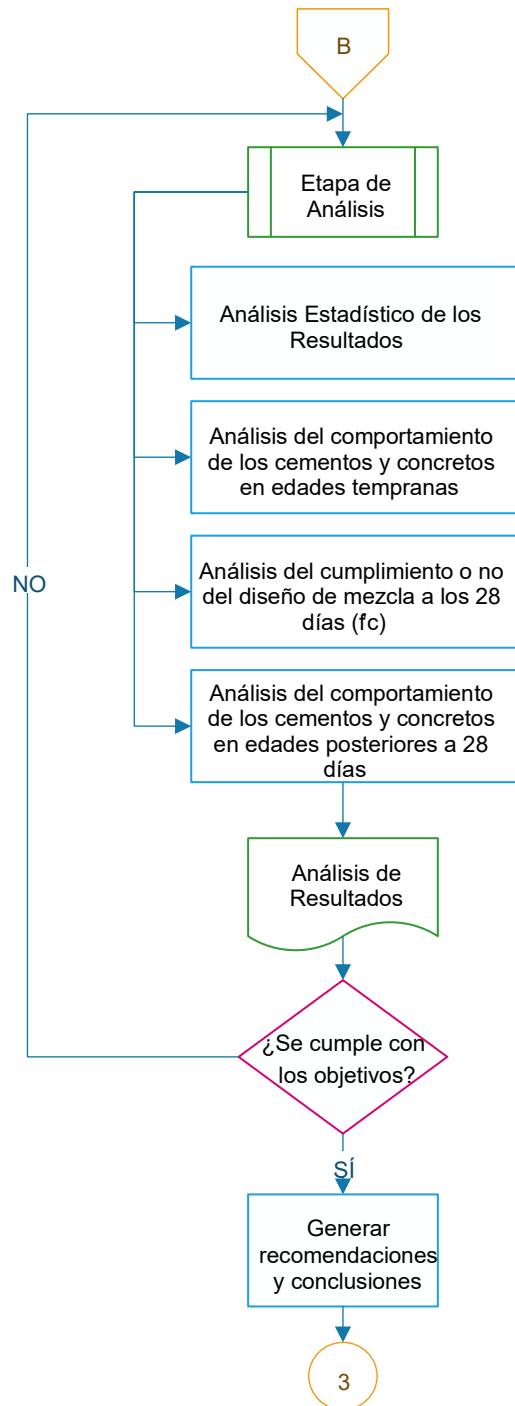


Figura 38. Diagrama de flujo del proyecto en general (continúa)





Resultados

Caracterización de agregados

Agregado fino (Arena)

El tamaño de esta arena se encuentra entre los 0,075 mm y 4,75 mm. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 13. Propiedades Físicas agregado fino

Propiedad	Norma	Valor obtenido
Peso unitario suelto	ASTM C29	1510 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C29	1570 kg/m ³
% vacíos compactado	ASTM C29	28%
% vacíos suelto	ASTM C29	31%
Gbs	ASTM C128	2,18
Ga	ASTM C128	2,88
Gsss	ASTM C128	2,42
% Absorción	ASTM C128	8,0%
% Humedad evaporable	ASTM C566	3,6%

Tabla 14. Parámetros de control agregado fino

Parámetro	Norma	Valor obtenido	Requisito ¹
Pasa tamiz #200 (lavado y tamizado)	ASTM C117 y C136	5,8%	≤5% ²
Módulo de finura	ASTM C136	2,74	2,3-3,1
Colorimetría	ASTM C40	2	≤3

¹ Según ASTM C33-18



Figura 39. Agregado fino utilizado en el proyecto

Tabla 15. Análisis Granulométrico agregado fino según ASTM C136-19

Tamiz (mm)	Tamiz N°	% Pasando corregido	Especificación (ASTM C33)
9,5	3/8"	100	100
4,75	#4	100	95 a 100
2,36	#8	82	80 a 100
1,18	#16	63	50 a 85
0,6	#30	44	25 a 60
0,3	#50	25	5 a 30
0,15	#100	12	0 a 10
0,075	#200	5,8	0 a 5

Error obtenido en granulometría= 0,28%

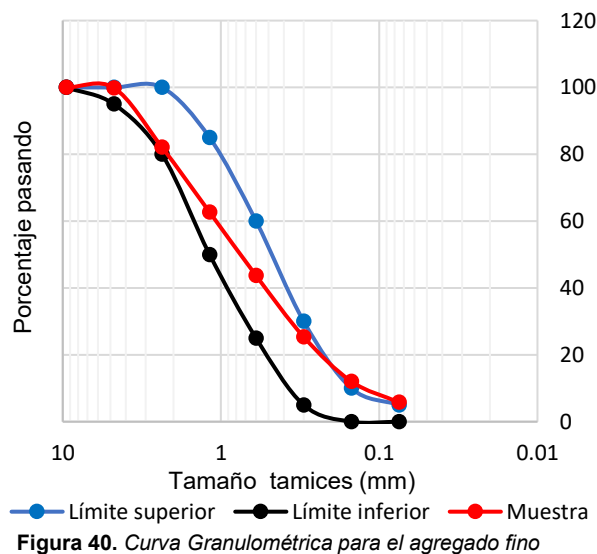


Figura 40. Curva Granulométrica para el agregado fino

² Para concreto no sujeto a abrasión el límite será 5% máximo y sujeto a abrasión es 3% máximo

Agregado grueso (Piedra)

Esta piedra posee un tamaño nominal entre los 4,75 mm y 12,5 mm. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio.

Tabla 16. Propiedades Físicas agregado grueso

Propiedad	Norma	Valor obtenido
Peso unitario suelto	ASTM C29	1490 kg/m ³
Peso unitario compactado	ASTM C29	1550 kg/m ³
% vacíos compactado	ASTM C29	41%
% vacíos suelto	ASTM C29	43%
Gbs	ASTM C127	2,61
Ga	ASTM C127	2,77
Gsss	ASTM C127	2,67
% Absorción	ASTM C127	2,2%
% Humedad evaporable	ASTM C566	0,9%

Tabla 17. Parámetro de control agregado grueso

Parámetro	Norma	Valor obtenido	Requisito
Pérdida por abrasión	ASTM C131	21%	≤50% ¹

¹ Según ASTM C33-18



Figura 41. Agregado grueso utilizado en el proyecto

Tabla 18. Análisis Granulométrico agregado grueso según ASTM C136-19

Tamiz (mm)	Tamiz N°	% Pasando	Especificación (ASTM C33)
19	3/4"	100	100
12,5	1/2"	99	90 a 100
9,5	3/8"	72	40 a 70
4,75	#4	6	0 a 15
2,36	#8	1	0 a 5

Error obtenido en granulometría= 0,01%

TMN (Tamaño Máximo Nominal) =12,5 mm

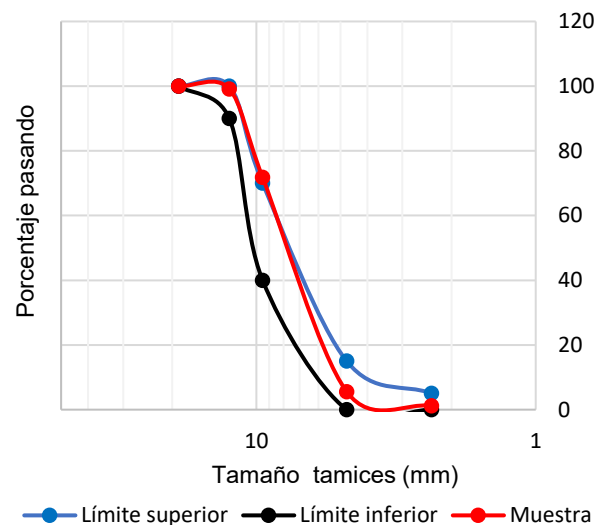


Figura 42. Curva Granulométrica para el agregado grueso

Arena de Sílice 20/30

Este nombre es la designación comercial que le otorga el proveedor. Su tamaño se ubica entre los 0,15 mm y 0,85 mm. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos de laboratorio.



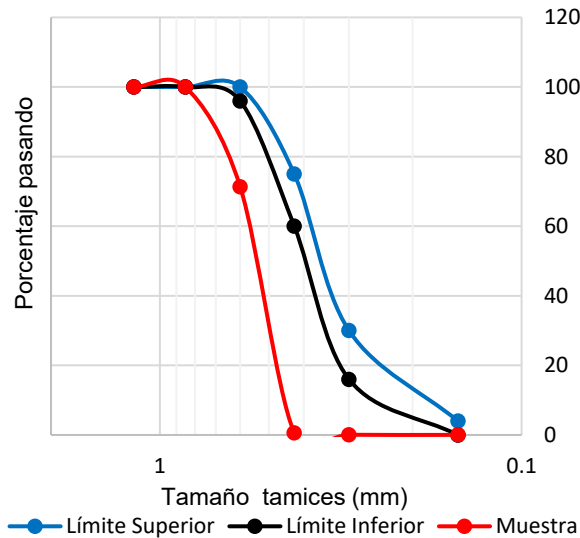
Figura 43. Arena de sílice 20/30

Tabla 19. Análisis Granulométrico arena de sílice 20/30 según ASTM C136-19

Tamiz (mm)	Tamiz N°	% Pasando	Especificación Arena Graduada ¹
1,18	#16	100	100
0,6	#30	71	96 a 100
0,425	#40	1	60 a 75
0,3	#50	1	16 a 30
0,15	#100	0	0 a 4

Error obtenido en granulometría= 0,23%

Para el ensayo de cubos de mortero la norma ASTM C109-20b admite únicamente Arena Graduada.



Arena de Sílice 30/40

Este nombre es la designación comercial que le otorga el proveedor. Su tamaño se ubica entre los 0,15 mm y 0,85 mm. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos de laboratorio.



Figura 45. Arena de sílice 30/40

Tabla 20. Análisis Granulométrico arena de sílice 30/40 según ASTM C136-19

Tamiz (mm)	Tamiz N°	% Pasando	Especificación Arena Graduada ¹
1,18	#16	100	100
0,6	#30	100	96 a 100
0,425	#40	36	60 a 75
0,3	#50	13	16 a 30
0,15	#100	3	0 a 4

Error obtenido en granulometría= 0,04%

Para el ensayo de cubos de mortero la norma ASTM C109-20b admite únicamente Arena Graduada.

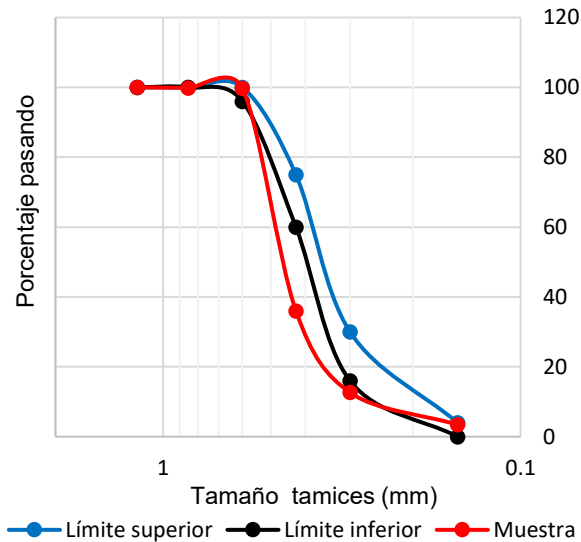


Figura 46. Curva Granulométrica para arena de sílice 30/40 (Especificación Graduada)

¹ Según ASTM C778-17

Diseño de mezcla

En esta sección se muestra en resumen la dosificación por m³ para cada una de las mezclas de concreto hidráulico realizadas en el proyecto. El detalle del procedimiento del Diseño de Mezcla se puede observar en el *Apéndice 2*. El

asentamiento de diseño fue de 150 mm y el porcentaje de aire de 2,5% sin aire incluido mediante aditivos. El tamaño máximo nominal del agregado grueso es de 12,5 mm.

Tabla 21. Resultados de Diseño de Mezcla para 1m³ de concreto hidráulico para cada mezcla realizada

Materiales	Mezclas / Tipos de Cementos Hidráulicos				
	Proveedor "X"		Proveedor "Y"		Proveedor "Z"
	Mezcla A MM/B(P-C)-28	Mezcla B MC/A-AR	Mezcla C MM/B(P-C)-28	Mezcla D MP/A-AR	Mezcla E MM/C(C-P)-28
Cemento Hidráulico(kg)	390,62	390,62	390,62	390,62	390,62
Arena (kg)	645,30	656,13	641,39	652,14	633,08
Piedra (kg)	870,16	873,31	869,40	869,40	870,16
Agua (kg)	267,96	263,87	267,43	267,90	267,41

Tabla 22. Dosificación teórica para cada mezcla de concreto hidráulico realizada

Materiales	Mezclas / Tipos de Cementos Hidráulicos				
	Mezcla A MM/B(P-C)-28	Mezcla B MC/A-AR	Mezcla C MM/B(P-C)-28	Mezcla D MP/A-AR	Mezcla E MM/C(C-P)-28
Cemento Hidráulico	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Arena	1,65	1,68	1,64	1,67	1,62
Piedra	2,23	2,24	2,23	2,23	2,23
Agua	0,69	0,68	0,68	0,69	0,68

Listas de verificación

Las observaciones tomadas en cada una de las listas se encuentran en el *Apéndice 3*. En las siguientes páginas se muestra el formato utilizado en la verificación del proceso de creación tanto de cubos de mortero como cilindros de concreto hidráulico.

Tabla 23. Lista de Verificación para fabricación de cilindros de concreto en laboratorio

Quien realiza la verificación: _____ Especímenes por realizar: _____ Fecha: _____ Hora: _____	Temperatura: _____ Humedad Relativa: ____
--	--

Actividad	Cumple (X / ✓)	Observaciones
Moldes		
Los moldes están hechos de acero, hierro u otro material no absorbente y no reactivo con el cemento hidráulico		
Diámetro del molde es al menos 3 veces el TMN del agregado grueso		
Los moldes se ajustan a las dimensiones y tolerancias especificadas (100x200mm)		
Los moldes retienen el material acuoso vertido en ellos		
Las bases de los moldes están firmemente sujetas a este		
Se aplica aceite, grasa o algún tipo de material para recubrir el molde interiormente		
Equipo:		
La varilla de apisonamiento es redonda, lisa, recta, de acero y con diámetro de 10±2mm		
La varilla de apisonamiento posee ambos extremos redondeados		
Su longitud es al menos 300mm y no más de 600mm de longitud total		
El mazo posee cabeza de hule o cuero, con peso de 0,6±0,2kg		
Preparación de materiales:		
Antes de realizar la mezcla los materiales estuvieron de 20°C a 30°C.		
El cemento se almacenó en un lugar seco, libre de humedad y preferiblemente de metal.		

Actividad	Cumple (X / ✓)	Observaciones
Procedimiento:		
Se colocó el agregado grueso en la mezcladora y parte del agua antes de encenderla		
Después de encender la mezcladora se agregó la arena, el cemento y el agua restante		
Se mezclaron todos los ingredientes durante tres min, después un descanso de tres min y la mezcla final de dos min.		
Mezcla se ve uniforme		
Se midió el asentamiento después de mezclar		
Los especímenes se realizaron cerca del lugar donde van a estar almacenados por 24 horas y este es libre de vibraciones y otras perturbaciones		
Para diámetro de 100mm se compacta con varillado en dos capas de aproximadamente igual profundidad		
Se aplicaron 25 golpes en cada capa de manera distribuida sobre toda la superficie		
Luego de varillar se golpeó el molde con el mazo de 10 a 15 veces		
Se enrasó el molde al terminar sin manipular en exceso la superficie		
Una sola persona realizó el procedimiento de compactación		
Se utilizó el equipo mínimo de seguridad: lentes, guantes, gabacha y mascarilla		
Todos los especímenes se realizaron dentro de los 15 minutos después de fabricación del concreto (ASTM C172)		
Curado:		
Se cubrieron los cilindros inmediatamente después de terminarlos con alguna placa no reactiva y no absorbente o plástico resistente e impermeable		
Se curaron las muestras en ambiente húmedo a 23±2°C hasta el momento de ensayo		

Tabla 24. Lista de Verificación para fabricación de cubos de mortero

Quien realiza la verificación: _____ Especímenes por realizar: _____ Fecha: _____ Hora: _____	Temperatura: ____ Humedad Relativa: ____
--	---

Actividad	Cumple (X / ✓)	Observaciones
Equipo:		
La balanza utilizada cumple en precisión y exactitud con ASTM C1005		
Moldes son hechos de un metal duro, no tienen más de tres compartimientos y cuando se ensamblan se mantienen juntas las partes		
Los moldes cúbicos son de 50mm de lado		
El apisonador es de hule con la cara plana		
Materiales:		
La arena utilizada es arena sílica graduada. Se realizó la comprobación mediante los tamices indicados en ASTM C778		
Especímenes:		
Se realizaron como mínimo dos o tres especímenes para cada edad de falla		
Preparación de moldes:		
Se aplicó una capa de aceite o grasa en el interior del molde		
Flujo:		
Se realizó el ensayo de flujo para determinar la cantidad de agua necesaria		
La mesa de flujo estaba limpia y seca		
El molde para flujo cumple con un diámetro interno del fondo de 100±0,5mm		
Se compactaron dos capas en el molde de flujo de aproximadamente 25mm cada una		
Se limpiaron los restos del mortero antes de levantar el molde		
La mesa se dejó caer 25 veces en 15 segundos		
El diámetro del mortero se midió a lo largo de las cuatro marcas de la mesa de flujo		

Actividad	Cumple (X / ✓)	Observaciones
Procedimiento:		
Temperatura ambiente del lugar donde se realizan los cubos es 23±3°C		
Temperatura del agua de mezcla es 23±2°C		
Se siguió el correcto orden para mezclar los materiales: -colocar toda el agua de mezcla en el tazón.		
-agregar el cemento, iniciar la mezcla a velocidad baja por 30s		
-agregar lentamente toda la arena durante 30s, mezcla a velocidad baja		
-detener el mezclado, cambiar a velocidad media y mezclar por 30s		
-detener el mezclado y dejar reposar 90s. Durante los primeros 15s mezclar el mortero que está en las paredes del tazón, después terminar el tiempo con la mezcladora cubierta		
-terminar mezclando por 60s a velocidad media		
Se comenzó a moldear los cubos en no más de 2min y 30s después de completar la mezcla		
Se colocó una capa de una pulgada en todos los compartimentos del molde. Esta se apisonó 32 veces según la dirección que indica la norma		
Se enrasó la parte superior de los especímenes con una llana		
Curado:		
Especímenes son curados un día en los moldes y después se sumergen en agua con cal hasta su falla		
Temperatura de cámara húmeda debe ser 23±2°C		

Resistencia a la compresión – Concretos

Estado fresco

En estado fresco la variable medida en el concreto hidráulico fue el Asentamiento (según ASTM C143-20), los resultados promedio obtenidos para cada mezcla se muestran en la siguiente figura.

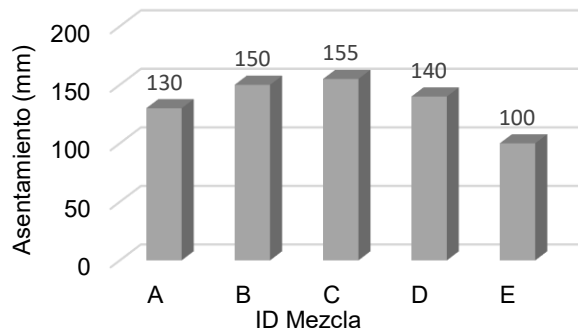


Figura 47. Asentamiento promedio en cada mezcla de concreto hidráulico

El promedio de asentamiento se obtuvo de las mediciones hechas en cada tanda (una en cada tanda, 3 tandas). La precisión del procedimiento fue la siguiente (datos individuales se encuentran en Apéndice 2):

Tabla 25. Precisión ensayo de asentamiento

ID Mezcla Concreto	Desviación Estándar (mm) ¹	Rango (mm) ²
A	2,52	5,00
B	3,06	6,00
C	5,00	10,00
D	6,34	12,00
E	7,37	14,00

Como parámetros de control, al inicio de cada tanda de concreto se registró la temperatura ambiente y humedad relativa ambiente. Los datos obtenidos se muestran en las tablas siguientes.

¹ Máximo permitido por norma es 10 mm

Tabla 26. Temperatura ambiente registrada durante la realización de cada mezcla de concreto

ID Concreto	Temperatura (°C)		
	Tanda 1	Tanda 2	Tanda 3
A	18,5	21,0	22,6
B	17,8	19,6	22,3
C	18,8	20,5	27,0
D	20,8	23,0	23,4
E	19,7	21,2	22,9

Tabla 27. Humedad relativa ambiente registrada durante la realización de cada mezcla de concreto

ID Concreto	Humedad Relativa (%)		
	Tanda 1	Tanda 2	Tanda 3
A	75,6	61,9	54,8
B	93,0	80,3	67,0
C	74,4	64,9	59,7
D	73,9	63,3	60,3
E	67,2	62,9	57,4

Resistencia hasta 28 días y edades posteriores

A continuación, se muestran los resultados de resistencia a la compresión de cada una de las mezclas para cada edad de falla y sus porcentajes de desarrollo de la resistencia. Las edades marcadas con un asterisco (*) indica que este resultado se obtuvo con la media de la regresión no lineal y no con falla directa. En el Apéndice 4 se pueden observar los resultados detallados de todos los cilindros testeados.

La resistencia especificada (f_c) se toma como 20,59 MPa que corresponden a 210 kg/cm² según el Diseño de Mezcla. Y como "factor de seguridad" se tiene que f'_{cr} es 27,59 MPa.

Tabla 28. Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto 'Mezcla A'

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	IC al 95%
7	16,5	15,9 – 17,1
14	18,8	18,4 – 19,2
28*	22,3	21,3 – 23,4
133	27,6	26,2 – 28,9
140	29,8	28,2 – 31,3
147	28,9	27,1 – 30,6

² Rango aceptable es de 28 mm máximo

Tabla 29. Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto 'Mezcla B'

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	IC al 95%
7	22,7	22,2 – 23,3
14	26,6	25,7 – 27,4
28	30,1	28,7 – 31,4
133	38,9	37,8 – 39,9
140*	37,9	37,0 – 38,9
147	37,0	35,5 – 38,5

Tabla 31. Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto 'Mezcla D'

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	IC al 95%
7	20,6	19,4 – 21,8
14	22,1	17,0 – 27,1
28	26,2	24,2 – 28,1
133*	30,2	28,9 – 31,6
140	27,1	24,1 – 30,0
147	32,4	30,3 – 34,5

Tabla 30. Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto 'Mezcla C'

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	IC al 95%
7	16,4	16,0 – 16,8
14	19,6	19,4 – 19,9
28	21,8	20,7 – 22,8
133*	24,9	24,0 – 25,9
140	24,2	22,0 – 26,5
147	25,8	24,5 – 27,1

Tabla 32. Resistencia a la compresión promedio de los cilindros de concreto 'Mezcla E'

Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	IC al 95%
7	14,9	13,1 – 16,7
14	19,5	17,0 – 22,1
28*	23,2	21,6 – 24,9
133	28,5	25,9 – 31,1
140	30,1	27,9 – 32,3
147	30,7	28,2 – 33,1

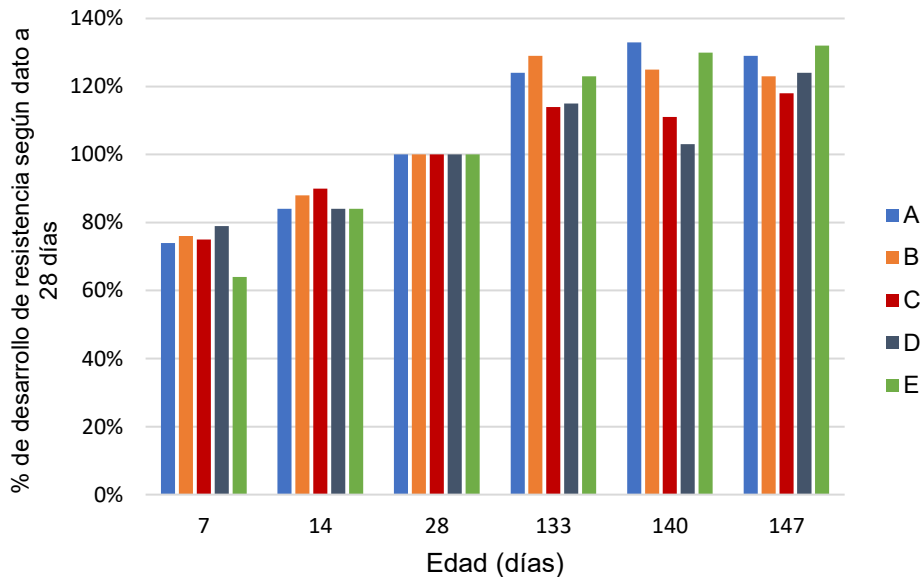


Figura 48. Porcentaje de desarrollo de resistencia para cada mezcla de concreto según dato obtenido a los 28 días

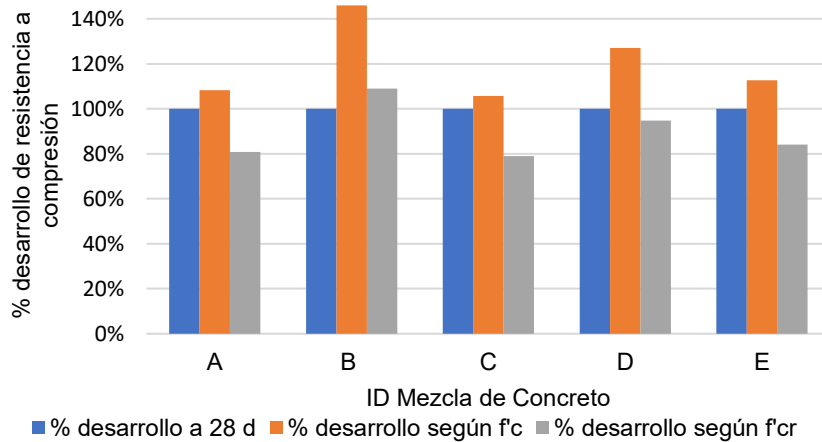


Figura 49. Comparación del porcentaje de desarrollo de resistencia según $f'c$ y $f'cr$, para cada mezcla a los 28 días

En las figuras mostradas a continuación, se aprecia la comparación del desarrollo de resistencia de los concretos fabricados con ambas clases de cementos hidráulicos (28 y AR). Las curvas corresponden al mejor ajuste de los datos según el modelo de regresión planteado para cada caso (como se muestra más adelante en la sección de *Tratamiento Estadístico*).

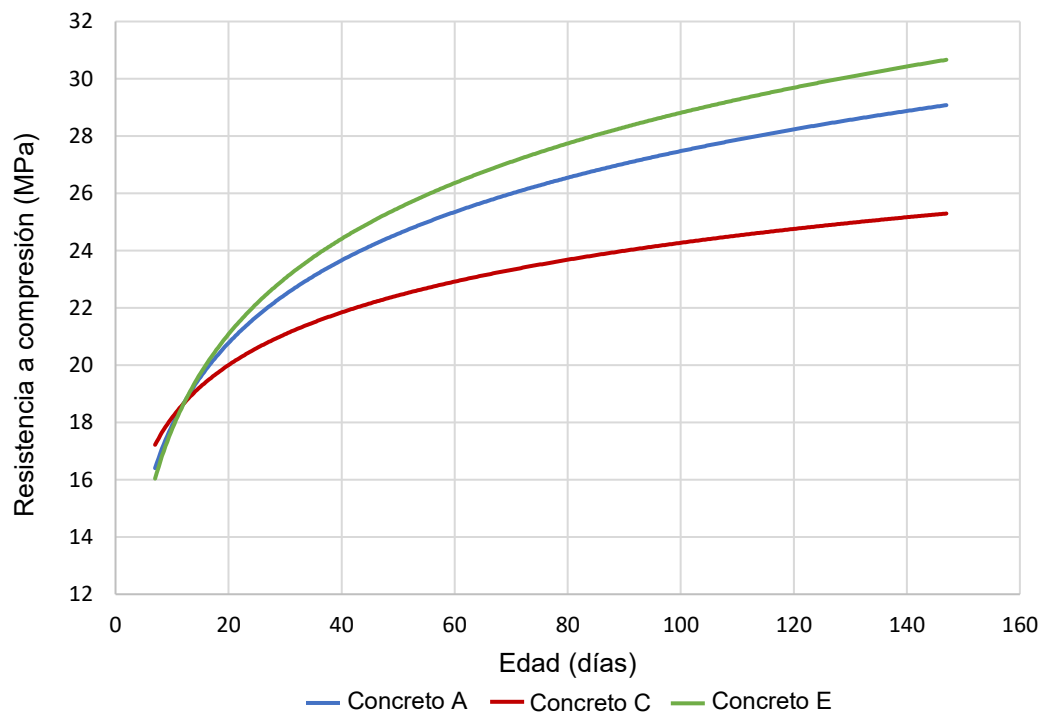


Figura 50. Comparación del desarrollo de resistencia en los concretos fabricados con Cementos 'clase 28'

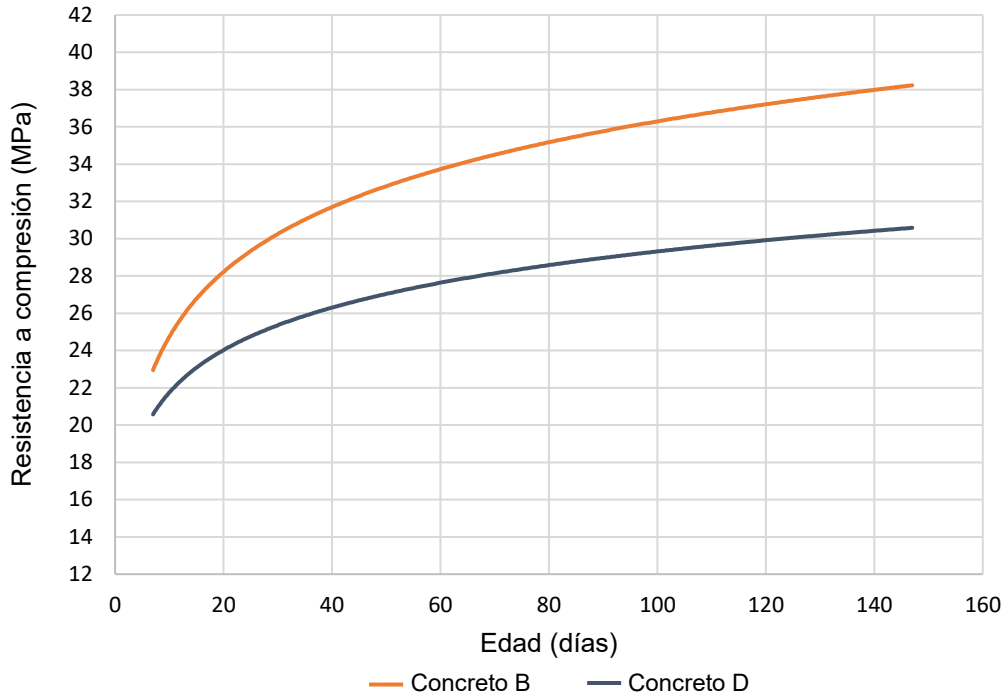


Figura 51. Comparación del desarrollo de resistencia en los concretos fabricados con Cementos 'clase AR'

Tratamiento estadístico – Concretos

Estadísticos Descriptivos

En la tabla 33 se muestran los valores de coeficiente de variación (CV) y desviación estándar (S) para cada edad de falla, según lo indicado en la guía ACI 214R-11. Es importante mencionar que en los concretos 'A' y 'E' no se cuenta con el dato a 28 días puesto que no se pudo realizar la falla por la suspensión de labores en el TEC debido al Covid-19 como se explicó en la sección *Metodología*, por lo que se presenta el resultado a 46 y 48 días, respectivamente. De igual forma aplica para algunas de las edades superiores a 28 días.

Tabla 33. Estadísticos descriptivos para cada edad de falla en Cilindros

ID Concreto	Edad	CV (%)	S (MPa)
A	7	3,3%	0,5
	14	1,9%	0,4
	46	9,1%	2,3
	133	7,9%	2,2
	140	8,4%	2,5
B	147	9,8%	2,8
	7	2,2%	0,5
	14	3,0%	0,8
	28	7,1%	2,1
	133	4,4%	1,7
C	147	6,6%	2,5
	7	2,1%	0,3
	14	1,2%	0,2
	28	8,0%	1,7
	126	13,1%	3,2
D	140	14,8%	3,6
	147	8,0%	2,1
	7	5,0%	1,0
	14	20,1%	4,4
	28	12,1%	3,2
D	126	8,1%	2,5
	140	17,7%	4,8
	147	10,5%	3,4

ID Concreto	Edad	CV (%)	S (MPa)
E	7	10,7%	1,6
	14	11,5%	2,2
	48	7,9%	2,2
	133	14,8%	4,2
	140	11,8%	3,5
	147	12,9%	4,0

Dispersión de datos

Una forma recomendada para conocer el comportamiento de los datos es observando la distribución de cada set (en este caso cada set representa una edad de falla). Por facilidad de interpretación y otras ventajas se presentan gráficos de caja o 'Boxplot' para las edades de falla de cada concreto hidráulico realizado.

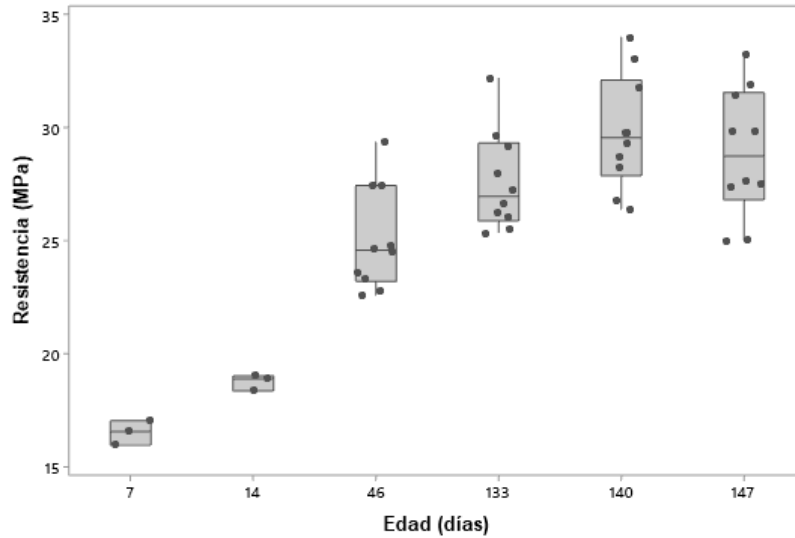


Figura 52. Gráfico de cajas concreto hidráulico Mezcla A

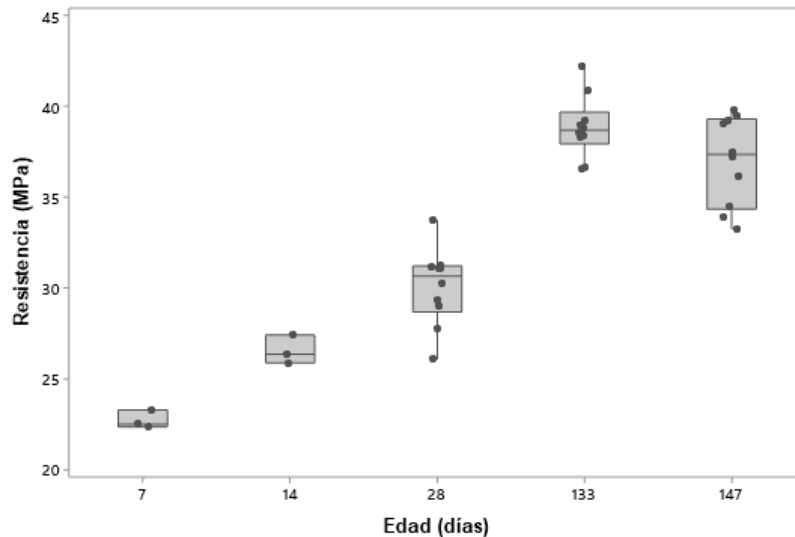


Figura 53. Gráfico de cajas concreto hidráulico Mezcla B

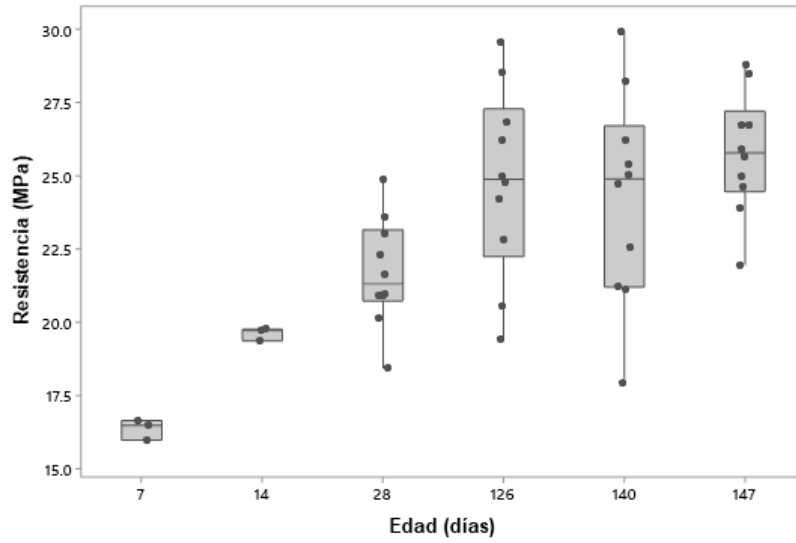


Figura 54. Gráfico de cajas concreto hidráulico Mezcla C

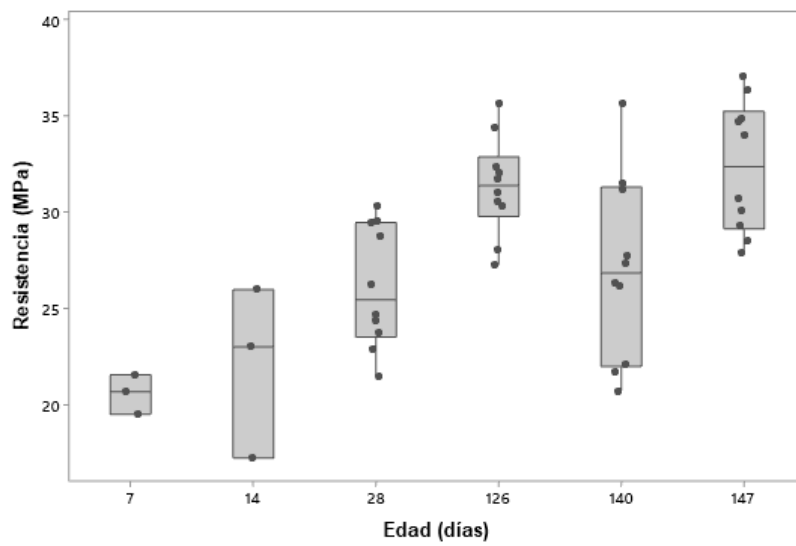


Figura 55. Gráfico de cajas concreto hidráulico Mezcla D

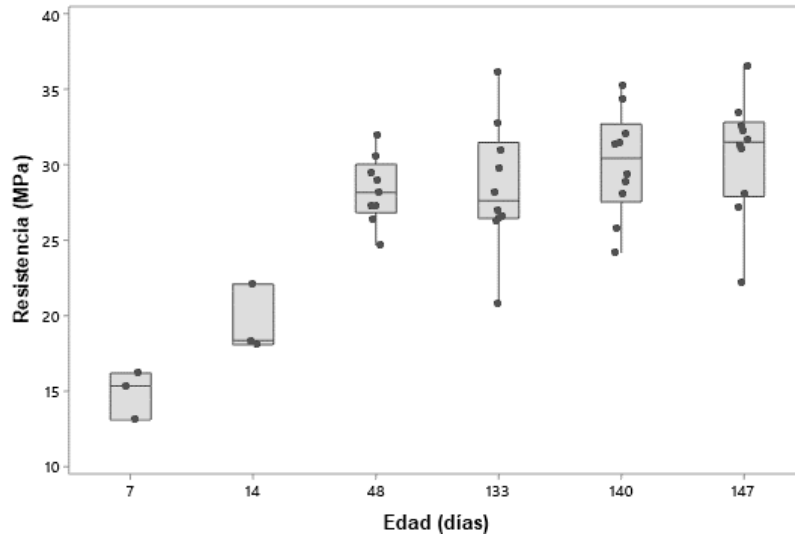


Figura 56. Gráfico de cajas concreto hidráulico Mezcla E

Valores atípicos

Ante la dispersión observada en los datos, se procede a realizar la Prueba de Grubbs y Prueba de Dixon, para corroborar la presencia de datos atípicos en cada set de datos por edad. En las tablas a continuación se presenta en valor G (Grubbs) y el p-value para esta prueba según la cantidad de datos (N) en cada edad de falla. En caso de encontrar un dato atípico se analizará su posible descarte. Para observar demás pruebas realizadas dirigirse al Apéndice 5.

Tabla 34. Prueba de Grubbs concreto hidráulico Mezcla A

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,04	0,869
14	3	1,13	0,381
46	10	1,89	0,365
133	10	2,09	0,152
140	10	1,68	0,730
147	10	1,54	1,000

Tabla 35. Prueba de Grubbs concreto hidráulico Mezcla B

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,14	0,271
14	3	1,10	0,591
28	10	1,86	0,399
133	10	1,95	0,291
147	10	1,54	1,000

Tabla 36. Prueba de Grubbs concreto hidráulico Mezcla C

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,12	0,471
14	3	1,15	0,169
28	10	1,76	0,565
126	10	1,65	0,780
140	10	1,76	0,572
147	10	1,85	0,421

Tabla 37. Prueba de Grubbs concreto hidráulico Mezcla D

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,04	0,855
14	3	1,09	0,650
28	10	1,47	1,000
126	10	1,69	0,713
140	10	1,79	0,506
147	10	1,38	1,000

Tabla 38. Prueba de Grubbs concreto hidráulico Mezcla E

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,11	0,515
14	3	1,15	0,119
48**	10	2,30	0,040
48	9	1,66	0,670
133	10	1,84	0,435
140	10	1,68	0,721
147	10	2,14	0,122

**El set de datos a 48 días originalmente presenta un dato atípico, posterior a su análisis se decide eliminarlo, obteniendo entonces un set a esta edad sin datos atípicos con un 'n' de 9.

Normalidad

Con el fin de asegurar la normalidad de los datos de resistencia a la compresión es necesario realizar pruebas estadísticas como se estipuló en la sección *Marco Metodológico*. A continuación, se presentan los valores obtenidos de p-value para las pruebas de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov. Estos se obtuvieron con ayuda del programa Minitab.

Tabla 39. Prueba de normalidad concreto hidráulico A

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,606
14	>0,150	0,264
46	0,078	0,141
133	>0,150	0,300
140	>0,150	0,645
147	>0,150	0,570

Tabla 40. Prueba de normalidad concreto hidráulico B

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,181
14	>0,150	0,447
28	>0,150	0,442
133	>0,150	0,253
147	>0,150	0,298

Tabla 41. Prueba de normalidad concreto hidráulico C

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,340
14	0,142	0,120
28	>0,150	0,847
126	>0,150	0,923
140	>0,150	0,899
147	>0,150	0,900

Tabla 42. Prueba de normalidad concreto hidráulico D

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,601
14	>0,150	0,498
28	>0,150	0,283
126	>0,150	0,796
140	>0,150	0,609
147	>0,150	0,238

Tabla 43. Prueba de normalidad concreto hidráulico E

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,379
14	0,118	0,099
48**	>0,150	0,285
48	>0,150	0,978
133	>0,150	0,521
140	>0,150	0,909
147	0,083	0,250

**Este es el resultado antes de el descarte de datos

Regresión No Lineal

Se presentan las curvas típicas de desarrollo de la resistencia a la compresión para cada mezcla de concreto hidráulico realizada. Se añade su respectivo intervalo de confianza en verde (IC) y el intervalo de predicción en morado (IP). Además, cada curva presenta la ecuación del modelo no lineal y su coeficiente de correlación (R^2).

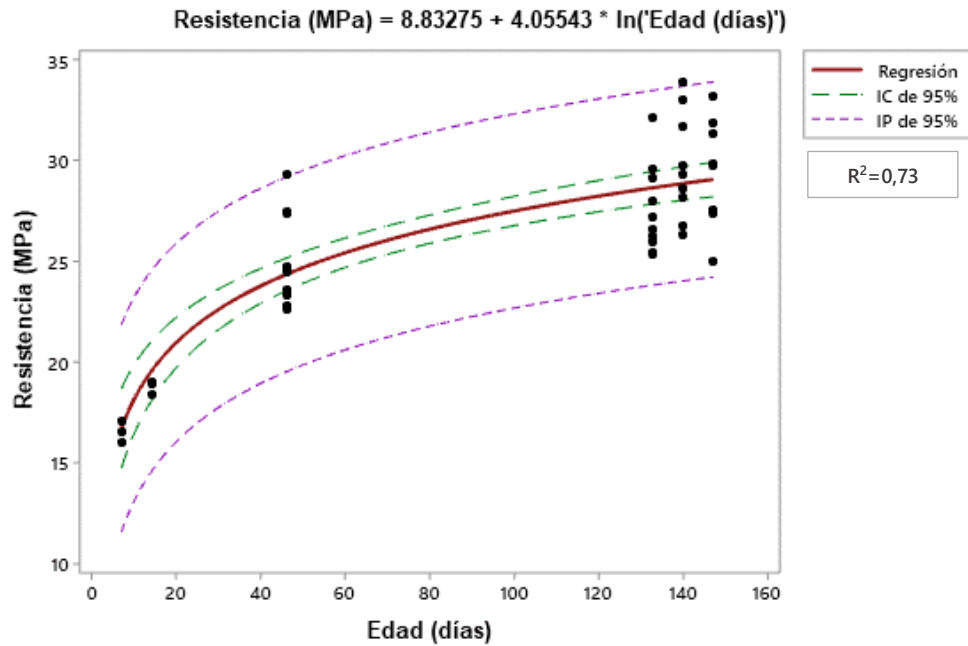


Figura 57. Curva de resistencia a la compresión para la mezcla de concreto hidráulico 'A'

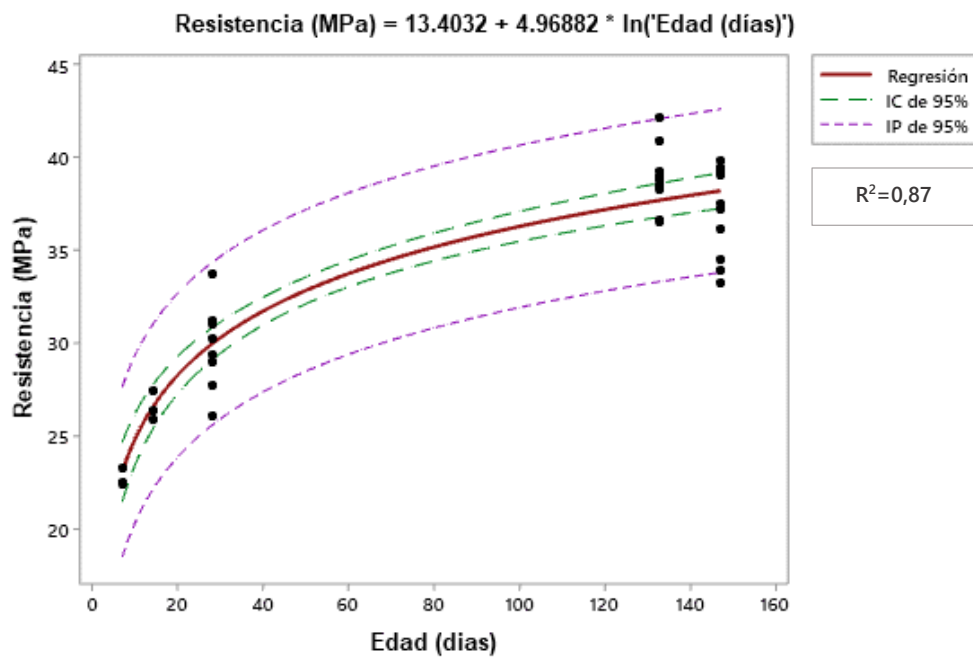


Figura 58. Curva de resistencia a la compresión para la mezcla de concreto hidráulico 'B'

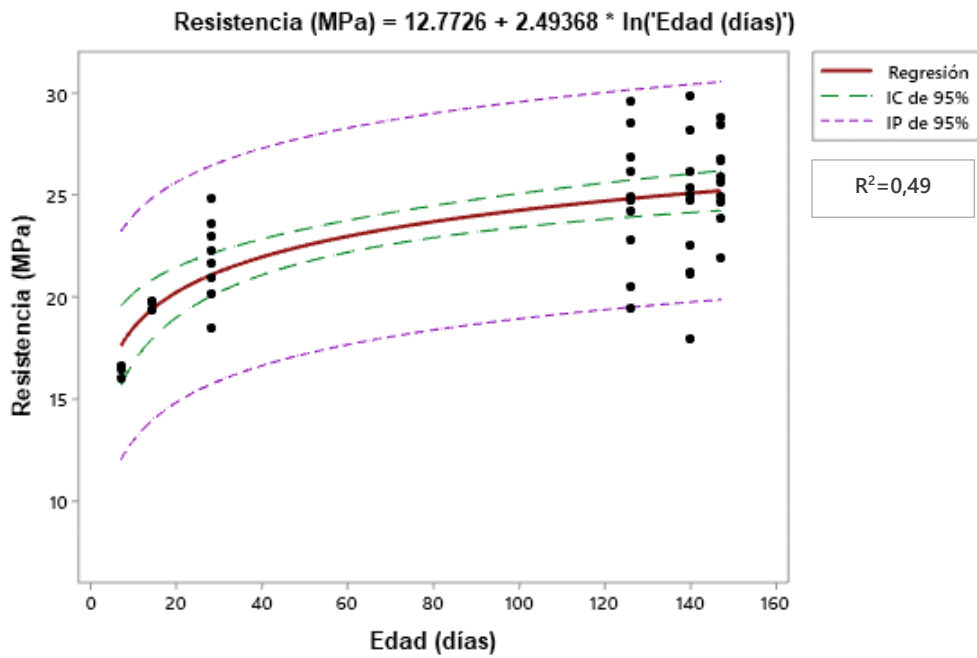


Figura 59. Curva de resistencia a la compresión para la mezcla de concreto hidráulico 'C'

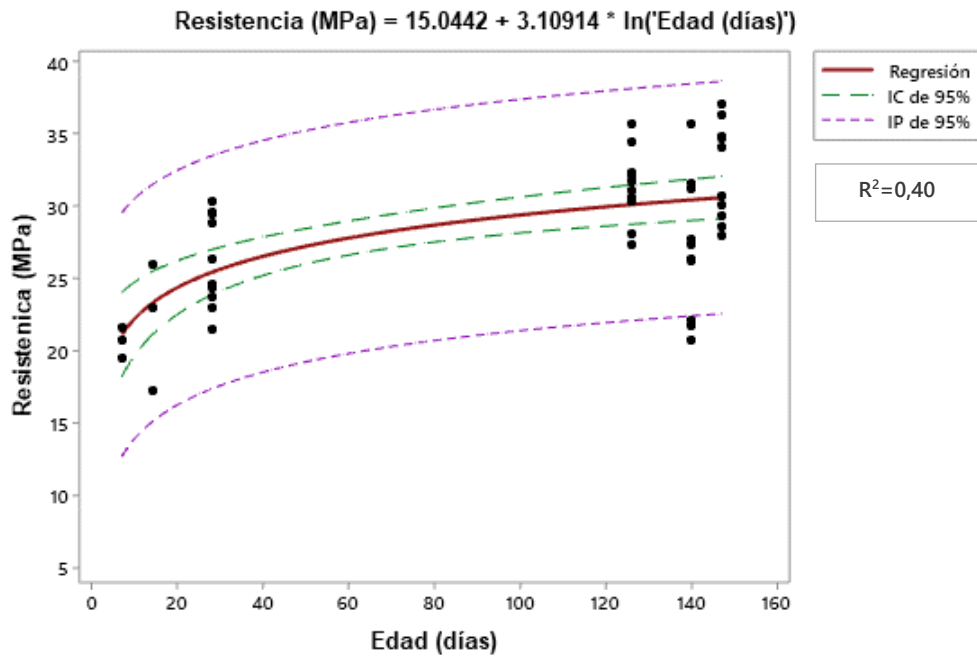


Figura 60. Curva de resistencia a la compresión para la mezcla de concreto hidráulico 'D'

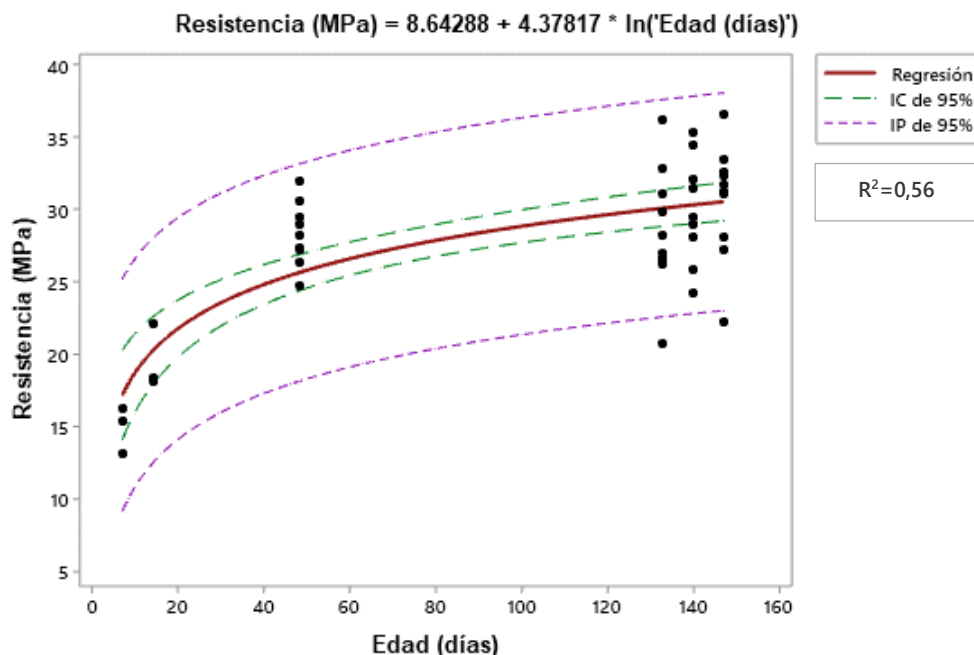


Figura 61. Curva de resistencia a la compresión para la mezcla de concreto hidráulico 'E'

Tabla 44. Resumen de las ecuaciones de regresión no lineal para todos los concretos

ID Concreto	Ecuación de Regresión ¹
A	$y=8,833+4,055*\ln(x)$
B	$y=13,403+4,969*\ln(x)$
C	$y=12,773+2,494*\ln(x)$
D	$y=15,044+3,109*\ln(x)$
E	$y=8,643+4,378*\ln(x)$

Donde 'y' es la variable de respuesta de resistencia a la compresión en MPa y 'x' es la variable explicativa de edad en días

ANOVA de un solo factor y prueba de Tukey

Para detectar las diferencias significativas entre las medias de los diferentes tratamientos para cada edad de falla, se realizó la prueba de ANOVA (Análisis de Varianza) de un factor, en este caso el tipo de cemento hidráulico utilizado. Por esta razón, la comparación se realiza entre clases de cemento (28 y AR). Esta prueba, además, establece la comparación del error dentro de los tratamientos y entre los tratamientos. La notación

¹ Las condiciones de aplicación de estas ecuaciones se presentan en la sección *Análisis de Resultados*

de las tablas mostradas a continuación es la siguiente: GL (Grados de Libertad), SC (Suma de Cuadrados), MC (Cuadrados medios).

La prueba de Tukey solamente se muestra en los casos donde el Análisis de Varianza indica que existe una diferencia significativa entre alguno de los tratamientos.

La prueba de ANOVA tiene tres condiciones principales para su realización, por lo que a todas las comparaciones se les realizó la prueba de normalidad, prueba de igualdad de varianzas y los cilindros se muestrearon de manera aleatoria.

En la prueba de igualdad de varianzas para los cilindros B, D y E a la edad de 14 días se obtuvo un valor de P menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula teniendo que al menos una de las varianzas es diferente, por lo tanto, en estos casos no se realizó ANOVA al no cumplir con la igualdad de varianzas. De igual forma sucede con los concretos fabricados con cemento hidráulico clase AR a la edad de 140 días.

Demás detalles y pruebas se pueden ver en el *Apéndice 5*.

Tabla 45. Análisis de Varianza cilindros edad 7 días- Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	4,98	2,49	2,52	4,46	0,16
Dentro de grupos	6	5,94	0,99			
Total	8	10,92				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Tabla 46. Tabla 35Z. Análisis de Varianza cilindros edad 14 días- Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	1	1,11	1,11	12,61	6,61	0,02
Dentro de grupos	4	0,35	0,09			
Total	5	1,46				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros A y C.

Tabla 47. Análisis de Varianza cilindros edad 28 días- Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	2	4,29	2,14	0,33	3,33	0,72
Dentro de grupos	27	176,56	6,54			
Total	29	180,85				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Nota: para esta edad y clase de resistencia del cemento se realizaron 50 pruebas de ANOVA y se descartaron 20 aleatoriamente, por lo que se muestra el último resultado obtenido, el cual es representativo de la mayoría (86,7% del total de 30 pruebas analizadas)

Tabla 48. Análisis de Varianza cilindros edad 133 días- Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	2	93,85	46,93	4,72	3,33	0,02
Dentro de grupos	27	268,55	9,95			
Total	29	362,40				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, señalando así que no todas las medias son iguales. Según prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros C y E

Nota: para esta edad y clase de resistencia del cemento se realizaron 10 pruebas de ANOVA, por lo que se muestra el último resultado obtenido, el cual es representativo de la mayoría (70% del total de pruebas analizadas)

Tabla 49. Análisis de Varianza cilindros edad 140 días- Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	2	216,7	108,34	10,25	3,33	0,000
Dentro de grupos	27	285,3	10,57			
Total	29	502,0				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros C y A y entre C y E.

Tabla 50. Análisis de Varianza cilindros edad 147 días- Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	2	120,9	60,45	6,47	3,33	0,005
Dentro de grupos	27	252,1	9,34			
Total	29	373,0				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, estableciendo así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros C y E.

Tabla 51. Análisis de Varianza cilindros edad 7 días- Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	1	6,83	6,83	10,48	6,61	0,03
Dentro de grupos	4	2,61	0,65			
Total	5	9,44				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros B y D

Tabla 52. Análisis de Varianza cilindros edad 28 días- Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	1	76,36	76,36	10,46	4,38	0,005
Dentro de grupos	18	131,43	7,30			
Total	19	207,79				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, señalando así que no todas las medias son iguales. Según prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros B y D

Tabla 53. Análisis de Varianza cilindros edad 133 días- Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	1	303,42	303,42	60,10	4,38	0,000
Dentro de grupos	18	90,87	5,05			
Total	19	394,29				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros B y D.

Nota: para esta edad y clase de resistencia del cemento se realizaron 10 pruebas de ANOVA, por lo que se muestra el último resultado obtenido, el cual es representativo de la mayoría (100% del total de las pruebas analizadas)

Tabla 54. Análisis de Varianza cilindros edad 147 días- Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F crítico	Valor P
Entre grupos	1	107,8	107,79	12,21	4,38	0,003
Dentro de grupos	18	158,9	8,83			
Total	19	266,7				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cilindros B y D.

Resistencia a la compresión – Cementos

En esta sección se presentan los resultados del mortero para resistencia a la compresión del cemento hidráulico, medida mediante especímenes cúbicos (50 mm). En la tabla a continuación se muestran los resultados de flujo para cada mezcla de mortero, este fue determinado a $110 \pm 5\%$ ¹. Los detalles de cada prueba de flujo realizada a todos los tipos de cemento se encuentran en el Apéndice 7.

Tabla 55. Flujo y % de agua utilizada

ID Mortero	Flujo (%)	Agua (%)
A	109	63,0
B	109	61,5
C	110	63,0
D	106	62,1
E	113	61,0

Se realiza la comparación con los valores *mínimos* de resistencia a la compresión requerida por la norma nacional INTE C147:2018

¹ Norma ASTM C109-20b

(anteriormente INTE 06-11-15:2015). El resultado de resistencia a la compresión se reporta con su respectivo Intervalo de Confianza (IC) al 95%.

Las edades marcadas con un *asterisco (*)* fueron obtenidas mediante la media dada por el modelo de regresión, no por falla directa.

Tabla 56. Resistencia a la compresión promedio del cemento A-clase 28

Edad (días)	Resist. a compresión (MPa)	IC al 95%	Resistencia requerida (MPa)
3*	12,5	10,4 – 14,6	13
7	15,2	14,7 – 15,6	20
14*	18,2	17,1 – 19,5	--
28*	20,9	20,0 – 21,9	28
133	26,7	25,5 – 27,8	--
140	26,0	24,8 – 27,2	--
147	27,9	26,6 – 29,3	--

Tabla 57. Resistencia a la compresión promedio del cemento B-clase AR

Edad (días)	Resist. a compresión (MPa)	IC al 95%	Resistencia requerida (MPa)
3*	20,4	17,4–23,3	24
7	21,1	19,7–22,4	--
14	22,9	19,4–26,5	--
28	25,8	24,8–26,8	--
133*	27,9	26,9–29,0	--
140	29,0	27,8–30,3	--
147	29,1	27,5–30,8	--

Tabla 59. Resistencia a la compresión promedio del cemento D-clase AR

Edad (días)	Resist. a compresión (MPa)	IC al 95%	Resistencia requerida (MPa)
3*	15,3	12,8– 17,8	24
7	18,6	17,3– 19,9	--
14	19,3	18,8– 19,7	--
28*	24,2	23,1– 25,2	--
133	29,6	27,6– 31,6	--
140	30,4	28,9– 31,9	--
147	31,2	30,8– 31,6	--

Tabla 58. Resistencia a la compresión promedio del cemento C-clase 28

Edad (días)	Resist. a compresión (MPa)	IC al 95%	Resistencia requerida (MPa)
3*	13,2	10,6–15,8	13
7	13,9	13,0–14,7	20
14	15,8	15,1–16,4	--
28*	17,9	16,9–18,9	28
133	21,5	20,7–22,2	--
140	21,9	21,0–22,8	--
147	19,7	17,6–21,9	--

Tabla 60. Resistencia a la compresión promedio del cemento E-clase 28

Edad (días)	Resist. a compresión (MPa)	IC al 95%	Resistencia requerida (MPa)
3*	11,2	9,3– 13,1	13
7	15,0	13,4– 16,6	20
14	19,3	17,2– 21,4	--
28*	24,5	23,6– 25,3	28
133	33,2	32,0– 34,5	--
140	33,0	31,2– 34,8	--
147	34,9	33,7– 36,2	--

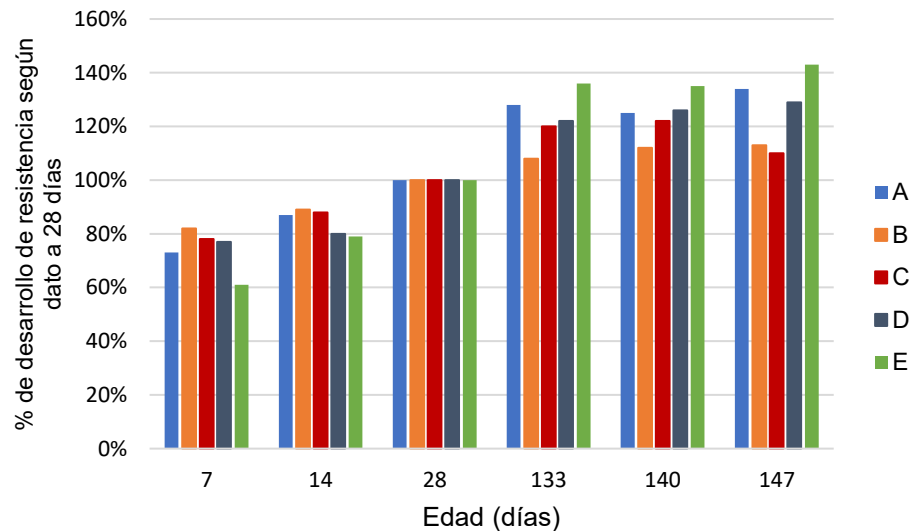


Figura 62. Porcentaje de desarrollo de resistencia según dato obtenido a los 28 días para cementos

En las figuras mostradas a continuación, se aprecia la comparación del desarrollo de resistencia de ambas clases de cementos hidráulicos utilizados (28 y AR). Las curvas

corresponden al mejor ajuste de los datos según el modelo de regresión planteado para cada caso (como se muestra más adelante en la sección de *Tratamiento Estadístico*).

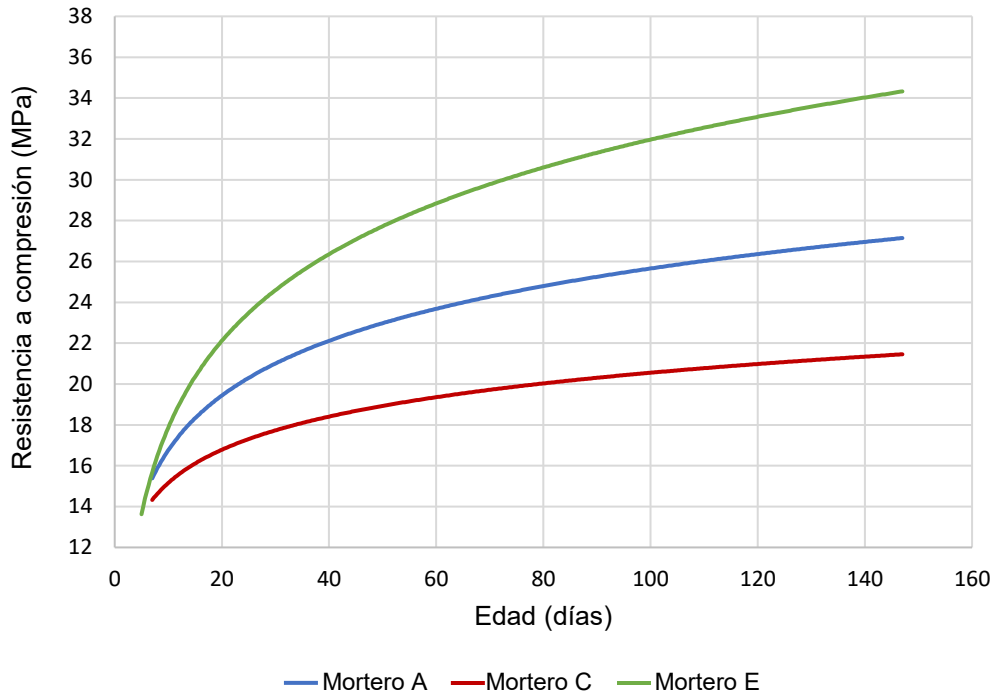


Figura 63. Comparación del desarrollo de resistencia en los morteros fabricados con Cementos 'clase 28'

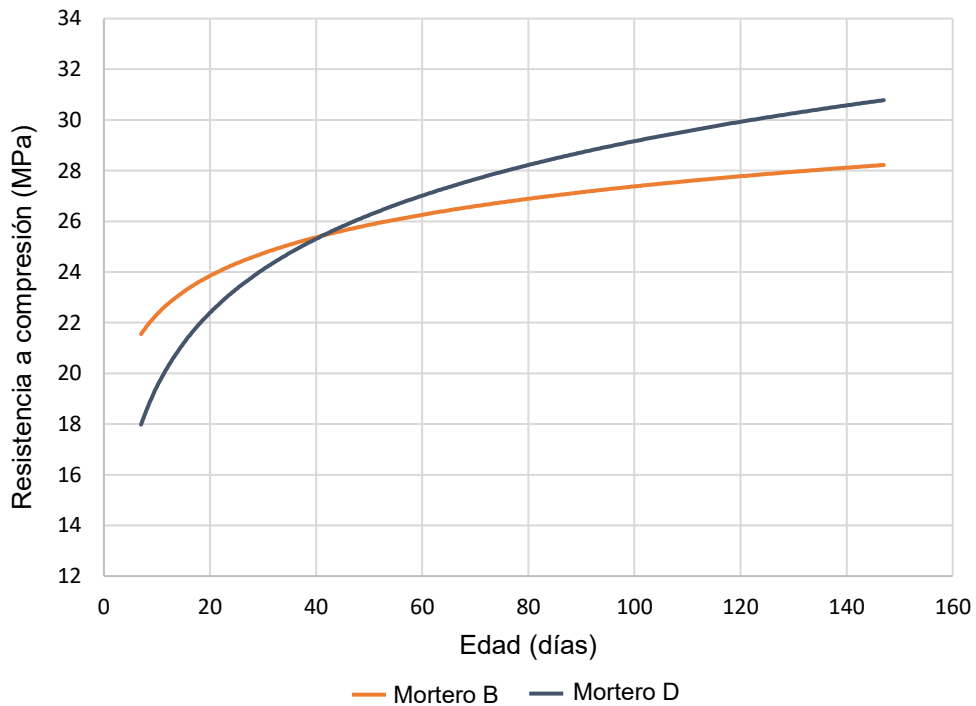


Figura 64. Comparación del desarrollo de resistencia en los morteros fabricados con Cementos 'clase AR'

Tratamiento estadístico – Cementos

Estadísticos descriptivos

En la tabla 61 se muestran los valores de coeficiente de variación (CV) y desviación estándar (S) para cada edad de falla. Es importante mencionar que en los cubos A, C, D y E, no se cuenta con el dato de 28 días debido a que no se pudo realizar la falla por la suspensión de labores en el TEC por el Covid-19 como se explicó en la sección *Metodología*, por ello se presenta el resultado a edades posteriores. De igual forma aplica para algunas de las edades superiores a 28 días.

Tabla 61. Estadísticos descriptivos para cada edad de falla en Cubos

ID Mortero	Edad	CV (%)	S (MPa)
A	7	2,7%	0,4
	34	3,3%	0,7
	133	6,9%	1,8
	140	7,4%	1,9
	147	7,7%	2,1
B	7	5,7%	1,2
	14	13,8%	3,2
	28	6,1%	1,6
	126	16,7%	4,2
	140	6,9%	2,0
C	147	9,2%	2,7
	7	5,5%	0,8
	14	3,6%	0,6
	47	11,8%	2,4
	133	5,6%	1,2
D	140	6,8%	1,5
	147	17,5%	3,5
	7	6,0%	1,1
	14	2,1%	0,4
	41	8,3%	2,2
E	133	10,8%	3,2
	140	8,0%	2,4
	147	1,8%	0,6
	7	9,4%	1,4
	14	9,7%	1,9
	39	7,2%	2,0
	133	6,2%	2,1
	140	8,8%	2,9
	147	5,8%	2,0

Dispersión de datos

Una forma recomendada para conocer el comportamiento de los datos es observando la distribución de cada set (en este caso cada set representa una edad de falla). Se presentan gráficos de caja o 'Boxplot' para cada edad de falla de las mezclas de mortero realizadas.

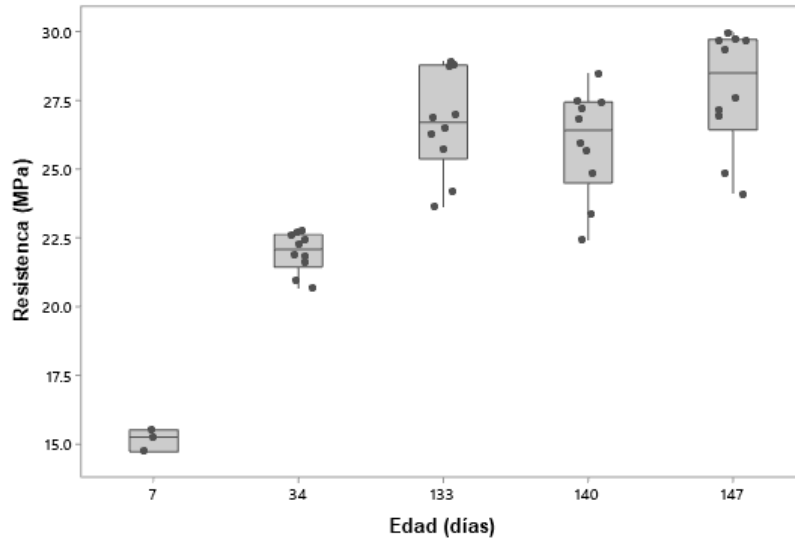


Figura 65. Gráfico de cajas cemento hidráulico Mezcla A

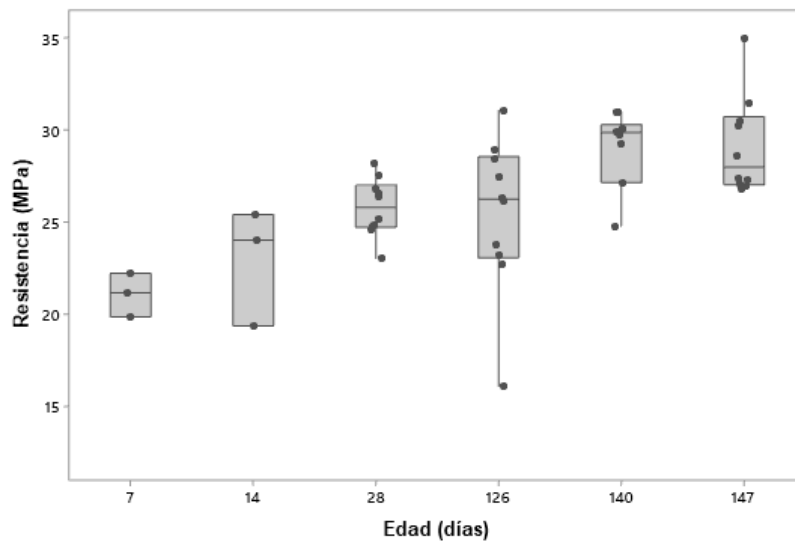


Figura 66. Gráfico de cajas cemento hidráulico Mezcla B

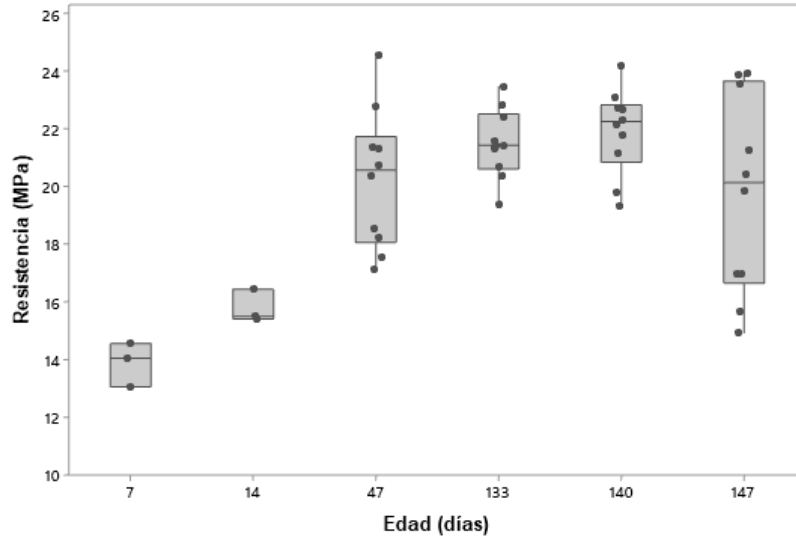


Figura 67. Gráfico de cajas cemento hidráulico Mezcla C

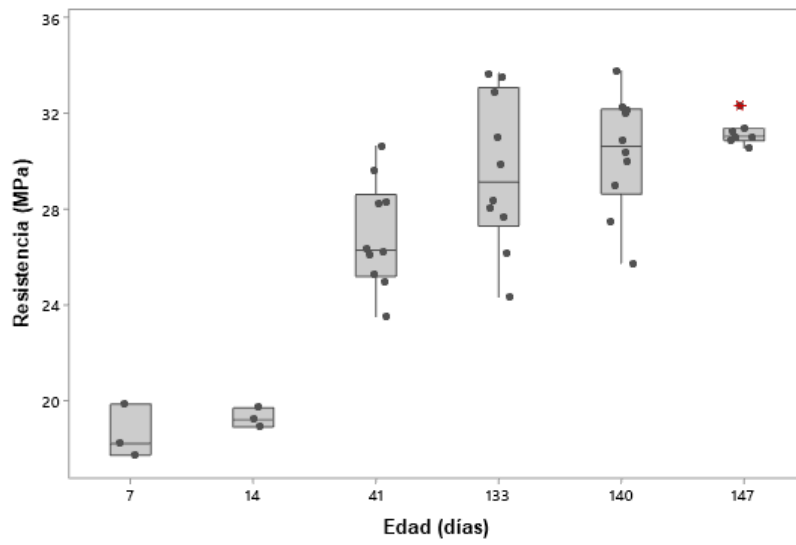


Figura 68. Gráfico de cajas cemento hidráulico Mezcla D

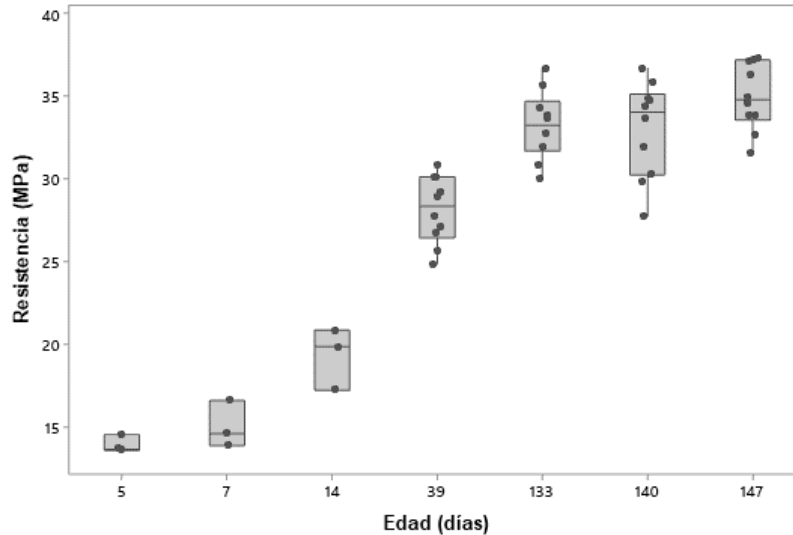


Figura 69. Gráfico de cajas cemento hidráulico Mezcla E

Normalidad

Con el fin de asegurar la normalidad de los datos de resistencia a la compresión, es necesario realizar pruebas estadísticas como se comentó en la sección *Marco Metodológico*. A continuación, se presentan los valores obtenidos de p-value para las pruebas de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov, obtenidas con el programa Minitab.

Tabla 62. Prueba de normalidad cemento hidráulico A

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,494
34	>0,150	0,337
133	>0,150	0,432
140	>0,150	0,428
147	0,073	0,073

Tabla 63. Prueba de normalidad cemento hidráulico B

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,613
14	>0,150	0,298
28	>0,150	0,713
126	>0,150	0,443
140	0,077	0,051
147	0,084	0,056

Tabla 64. Prueba de normalidad cemento hidráulico C

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,491
14	0,133	0,113
47	>0,150	0,683
133	>0,150	0,827
140	>0,150	0,460
147	>0,150	0,324

Tabla 65. Prueba de normalidad cemento hidráulico D

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,291
14	>0,150	0,536
41	>0,150	0,658
133	>0,150	0,682
140	>0,150	0,631
147**	<0,010	0,005
147	>0,150	0,174

**En este caso el set a 147 d presenta No Normalidad por lo que se decide eliminar los datos necesarios hasta conseguir la normalidad del set (tres datos debieron descartarse)

Tabla 66. Prueba de normalidad cemento hidráulico E

Edad (días)	P-value	
	Kolmogorov-Smirnov	Anderson-Darling
7	>0,150	0,360
14	>0,150	0,385
39	>0,150	0,733
133	>0,150	0,965
140	>0,150	0,436
147	>0,150	0,498

Valores atípicos

Ante la dispersión observada en los datos, se procede a realizar la Prueba de Grubbs y Prueba de Dixon, para corroborar la presencia de datos atípicos en cada set de datos. En las tablas a continuación se presenta en valor G (Grubbs) y el p-value para esta prueba según la cantidad de datos (N) para cada edad de falla. En caso de encontrar un dato atípico se analizará su posible descarte. Para observar demás pruebas realizadas dirigirse al Apéndice 6.

Tabla 67. Prueba de Grubbs cemento hidráulico Mezcla A

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,09	0,646
34	10	1,80	0,503
133	10	1,65	0,785
140	10	1,84	0,433
147	10	1,78	0,540

Tabla 68. Prueba de Grubbs cemento hidráulico Mezcla B

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,03	0,889
14	3	1,13	0,422
28	10	1,75	0,578
126	10	2,21	0,085
140	10	2,11	0,143
147	10	2,20	0,087

Tabla 69. Prueba de Grubbs cemento hidráulico Mezcla C

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,09	0,642
14	3	1,15	0,151
47	10	1,79	0,514
133	10	1,75	0,577
140	10	1,76	0,571
147	10	1,40	1,000

Tabla 70. Prueba de Grubbs cemento hidráulico Mezcla D

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,13	0,413
14	3	1,07	0,726
41	10	1,67	0,743
133	10	1,64	0,818
140	10	1,90	0,344
147	10	2,01	0,227
147**	7	2,00	0,059

**El set de datos a 147d no presenta datos atípicos antes ni después del descarte

Tabla 71. Prueba de Grubbs cemento hidráulico Mezcla E

Edad (días)	N	G	P-value
7	3	1,12	0,493
14	3	1,11	0,521
39	10	1,60	0,907
133	10	1,68	0,732
140	10	1,80	0,489
147	10	1,68	0,728

Regresión No Lineal

Se presentan las curvas típicas de desarrollo de la resistencia a la compresión para cada cemento hidráulico en estudio. Se añade su respectivo intervalo de confianza en verde (IC) y el intervalo de predicción en morado (IP). Además, cada curva presenta la ecuación del modelo no lineal y su coeficiente de correlación (R^2).

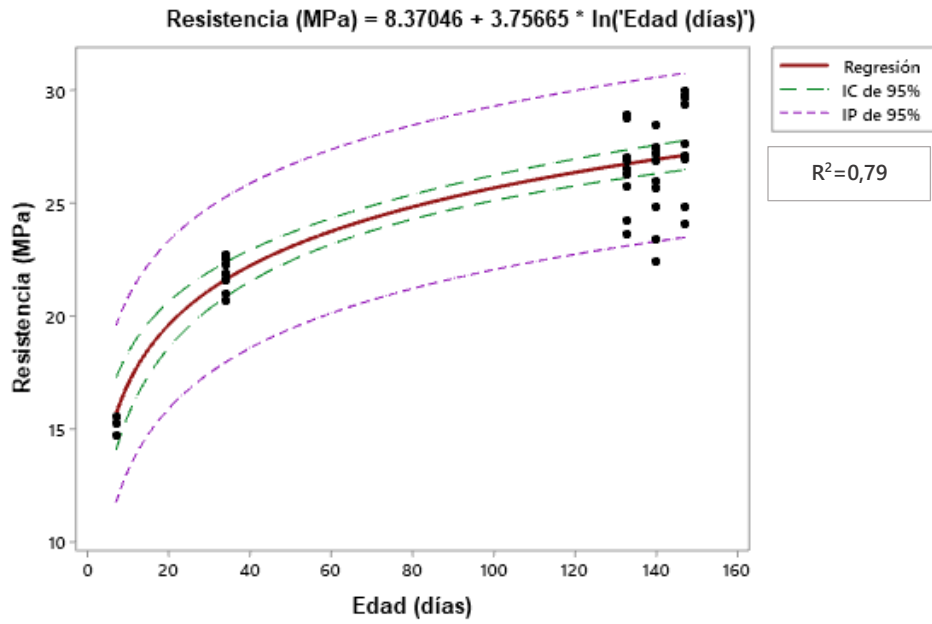


Figura 70. Curva de resistencia a la compresión para el cemento hidráulico 'A'

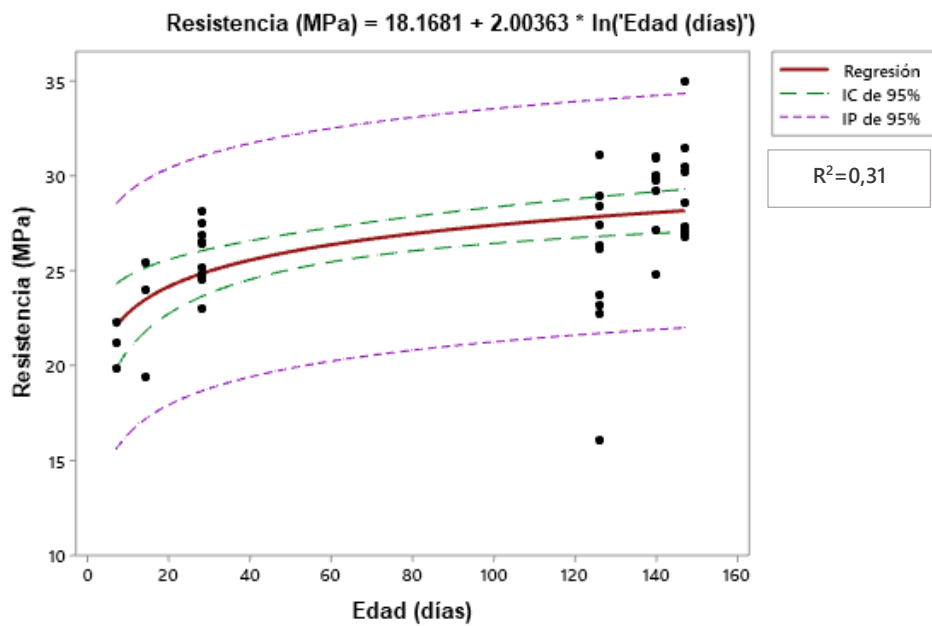


Figura 71. Curva de resistencia a la compresión para el cemento hidráulico 'B'

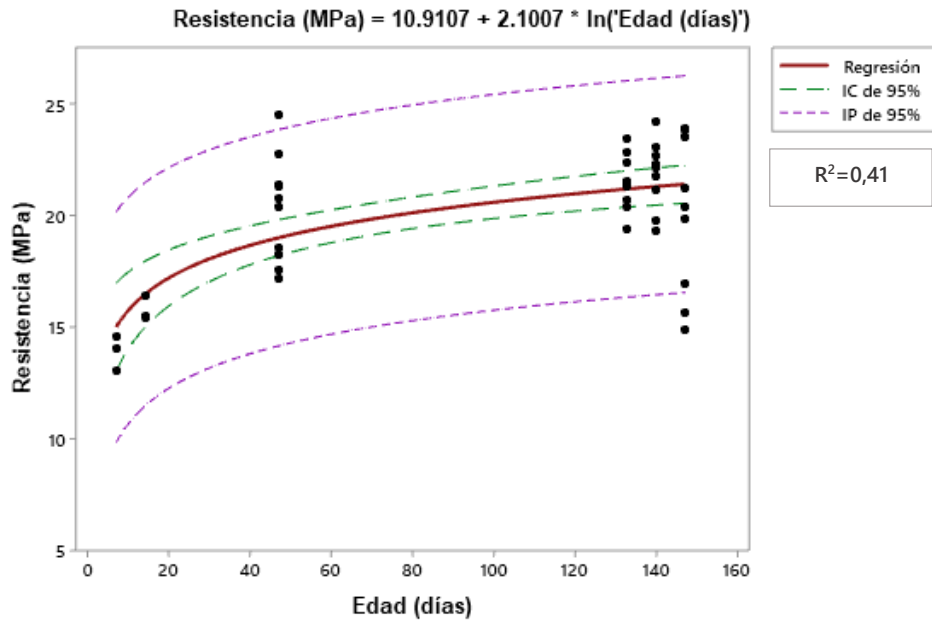


Figura 72. Curva de resistencia a la compresión para el cemento hidráulico 'C'

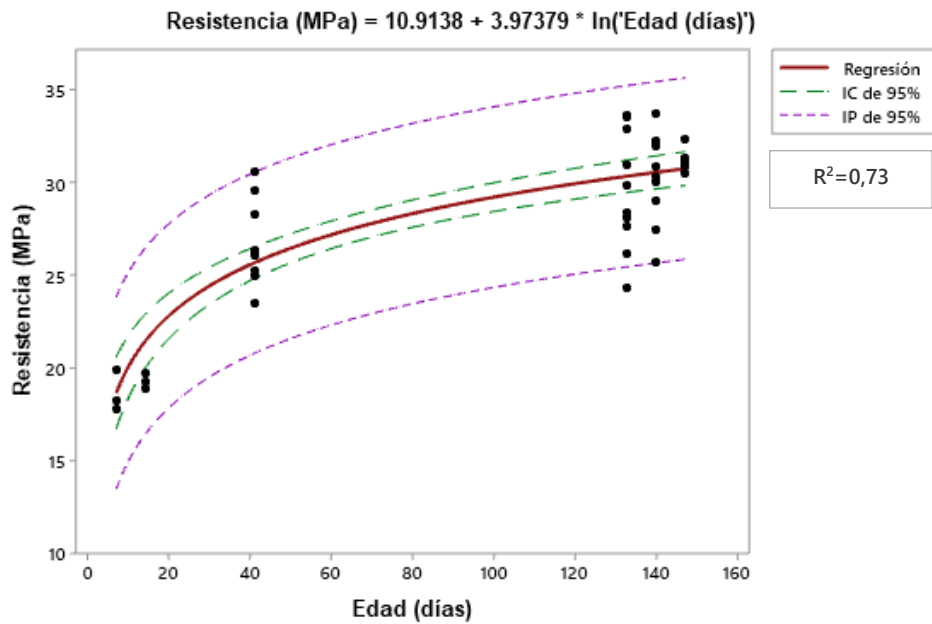


Figura 73. Curva de resistencia a la compresión para el cemento hidráulico 'D'

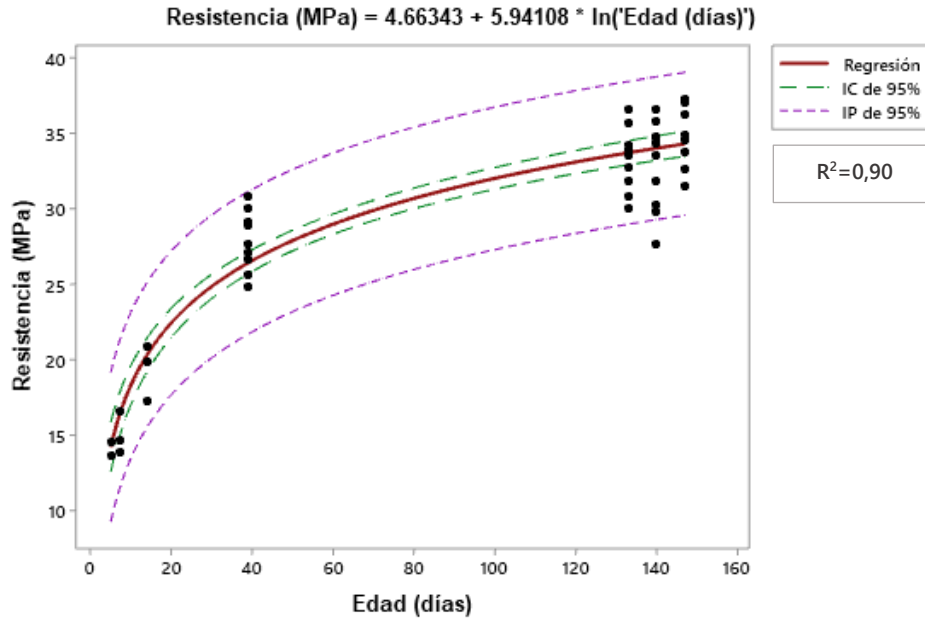


Figura 74. Curva de resistencia a la compresión para el cemento hidráulico 'E'

ANOVA de un solo factor y prueba de Tukey

Para detectar las diferencias significativas entre las medias de los diferentes tratamientos para cada edad de falla, se realizó la prueba de ANOVA (Análisis de Varianza) de un factor, en este caso el tipo de cemento hidráulico utilizado.

Por esta razón la comparación se realiza entre las clases de cemento hidráulico (28 y AR). Esta prueba, además, establece la comparación del error dentro de los tratamientos y entre los tratamientos. La notación de las tablas mostrados a continuación es la siguiente: GL (Grados de Libertad), SC (Suma de Cuadrados), MC (Cuadrados medios).

La prueba de Tukey es solamente necesaria en los casos donde el Análisis de Varianza muestra que existe una diferencia significativa entre alguno de los tratamientos.

La prueba de ANOVA tiene tres condiciones principales para su realización, por lo que a todas las comparaciones se les realizó la prueba de normalidad, prueba de igualdad de varianzas y los cubos se muestrearon aleatoriamente. En la prueba de igualdad de varianzas para los cubos B y D a la edad de 14 días, se obtuvo un valor de P menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula teniendo que al menos una de las varianzas es diferente, por lo tanto, en estos casos no se hizo ANOVA al no cumplir con la igualdad de varianzas.

Demás detalles y pruebas se pueden ver en el Apéndice 6.

Tabla 72. Análisis de Varianza cementos edad 7 días-Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	2,97	1,48	1,63	4,46	0,272
Dentro de grupos	6	5,45	0,91			
Total	8	8,42				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Tabla 73. Análisis de Varianza cementos edad 14 días-Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	31,63	15,82	7,33	4,46	0,025
Dentro de grupos	6	12,95	2,16			
Total	8	44,59				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cubos A y C.

Nota: para esta edad y clase de cemento se realizaron 10 pruebas de ANOVA, por lo que el resultado que se muestra es representativo de la mayoría (60% de las pruebas analizadas)

Tabla 74. Análisis de Varianza cementos edad 28 días-Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	195,4	97,72	26,25	3,33	0,000
Dentro de grupos	27	100,5	3,72			
Total	29	259,9				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, señalando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cubos A, C y E.

Nota: para esta edad y clase de cemento se realizaron 50 pruebas de ANOVA (se descartaron 20 aleatoriamente), por lo que se muestra el último resultado obtenido, el cual es representativo de la mayoría (100% de las 30 pruebas analizadas)

Tabla 75. Análisis de Varianza cementos edad 133 días-Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	693,72	346,86	114,92	3,33	0,000
Dentro de grupos	27	81,49	3,02			
Total	29	775,21				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cubos A, C y E.

Tabla 76. Análisis de Varianza cementos edad 140 días-Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	625,1	312,55	65,03	3,33	0,000
Dentro de grupos	27	129,8	4,81			
Total	29	754,9				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, estableciendo así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cubos A, C y E.

Tabla 77. Análisis de Varianza cementos edad 147 días-Clase 28

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	2	1155	577,55	83,89	3,33	0,000
Dentro de grupos	27	186	6,89			
Total	29	1341				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cubos A, C y E.

Tabla 78. Análisis de Varianza cementos edad 7 días-Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	1	9,23	9,23	6,91	6,61	0,06
Dentro de grupos	4	5,34	1,34			
Total	5	14,57				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Tabla 79. Análisis de Varianza cementos edad 28 días-Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	1	6,82	6,82	2,20	4,38	0,16
Dentro de grupos	18	55,83	3,10			
Total	19	62,64				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Nota: para esta edad y clase de cemento se realizaron 10 pruebas de ANOVA, por lo que se muestra el último resultado obtenido, el cual es representativo de la mayoría (60% de las pruebas analizadas)

Tabla 80. Análisis de Varianza cementos edad 133 días-Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	1	20,05	20,05	3,00	4,38	0,10
Dentro de grupos	18	120,26	6,68			
Total	19	140,31				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Nota: para esta edad y clase de cemento se realizaron 10 pruebas de ANOVA, por lo que se muestra el último resultado obtenido, el cual es representativo de la mayoría (100% de las pruebas analizadas)

Tabla 81. Análisis de Varianza cementos edad 140 días-Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	1	9,28	9,28	1,87	4,38	0,19
Dentro de grupos	18	88,48	4,97			
Total	19	98,76				

Significancia: P-value es mayor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que todas las medias son iguales.

Tabla 82. Análisis de Varianza cementos edad 147 días-Clase AR

Fuente de variaciones	GL	SC	MC	Valor F	F tablas	Valor P
Entre grupos	1	26,83	26,83	15,18	4,67	0,002
Dentro de grupos	12	21,20	1,77			
Total	13	48,03				

Significancia: P-value es menor al nivel de significancia 0,05 por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula, indicando así que no todas las medias son iguales. Según la prueba de Tukey existe diferencia significativa para esta edad entre los cubos B y D.

Nota: para esta edad en los cubos D se realizó el descarte de tres datos por presentar no normalidad, al compararse 7 datos de D contra 10 datos de B la prueba de igualdad de varianzas presentó un valor de P menor a 0,05, por lo que para realizar la comparación se descartaron tres datos aleatoriamente de los cubos B, obteniendo en esta ocasión un valor de P mayor a 0,05 al tener ambos sets un 'n' de siete datos.

Comparación resistencia Concreto-Cemento

Los morteros, como se ha indicado antes, son realizados para la determinación de la resistencia a compresión del cemento hidráulico. Las siguientes gráficas corresponden a la comparación del comportamiento entre ambos materiales fabricados con el mismo cemento. Las curvas corresponden a los modelos de regresión de cada material.

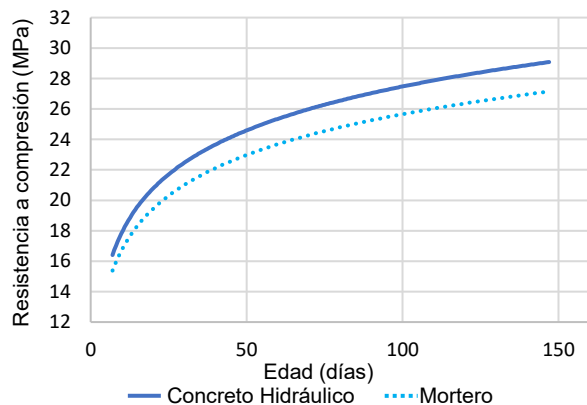


Figura 75. Resistencia a la compresión a través del tiempo Concreto y Cemento – fabricados con Cemento A clase 28

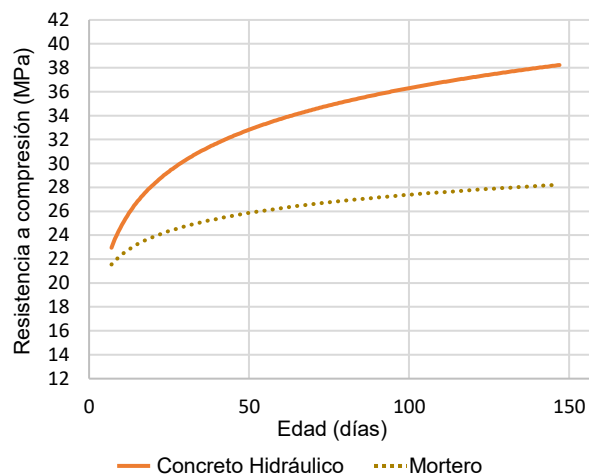


Figura 76. Resistencia a la compresión a través del tiempo Concreto y Cemento – fabricados con Cemento B clase AR

Diagramas Causa-Efecto

Con el fin de analizar las posibles causas de la variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión, se crearon los siguientes diagramas de Causa-Efecto, conocidos comúnmente como diagramas de Ishikawa.

En el *Apéndice 8* se pueden observar con detalle los cuadros realizados con las técnicas de los cinco porqués y las seis M.

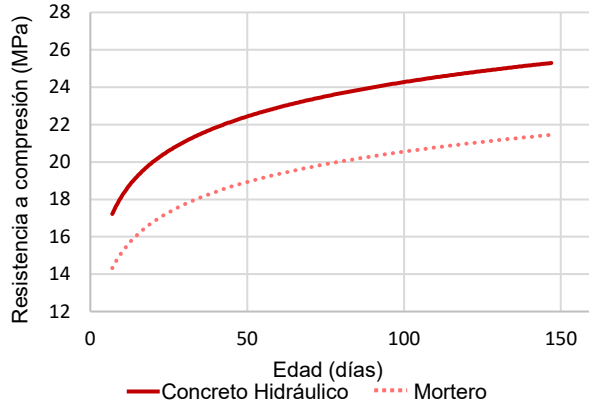


Figura 77. Resistencia a la compresión a través del tiempo Concreto y Cemento - fabricados con Cemento C clase 28

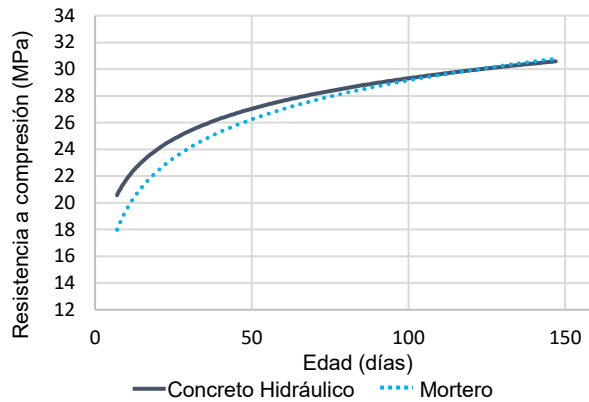


Figura 78. Resistencia a la compresión a través del tiempo Concreto y Cemento - fabricados con Cemento D clase AR

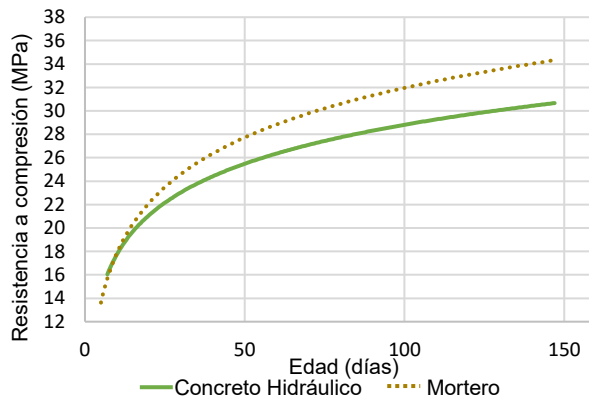


Figura 79. Resistencia a la compresión a través del tiempo Concreto y Cemento - fabricados con Cemento E clase 28

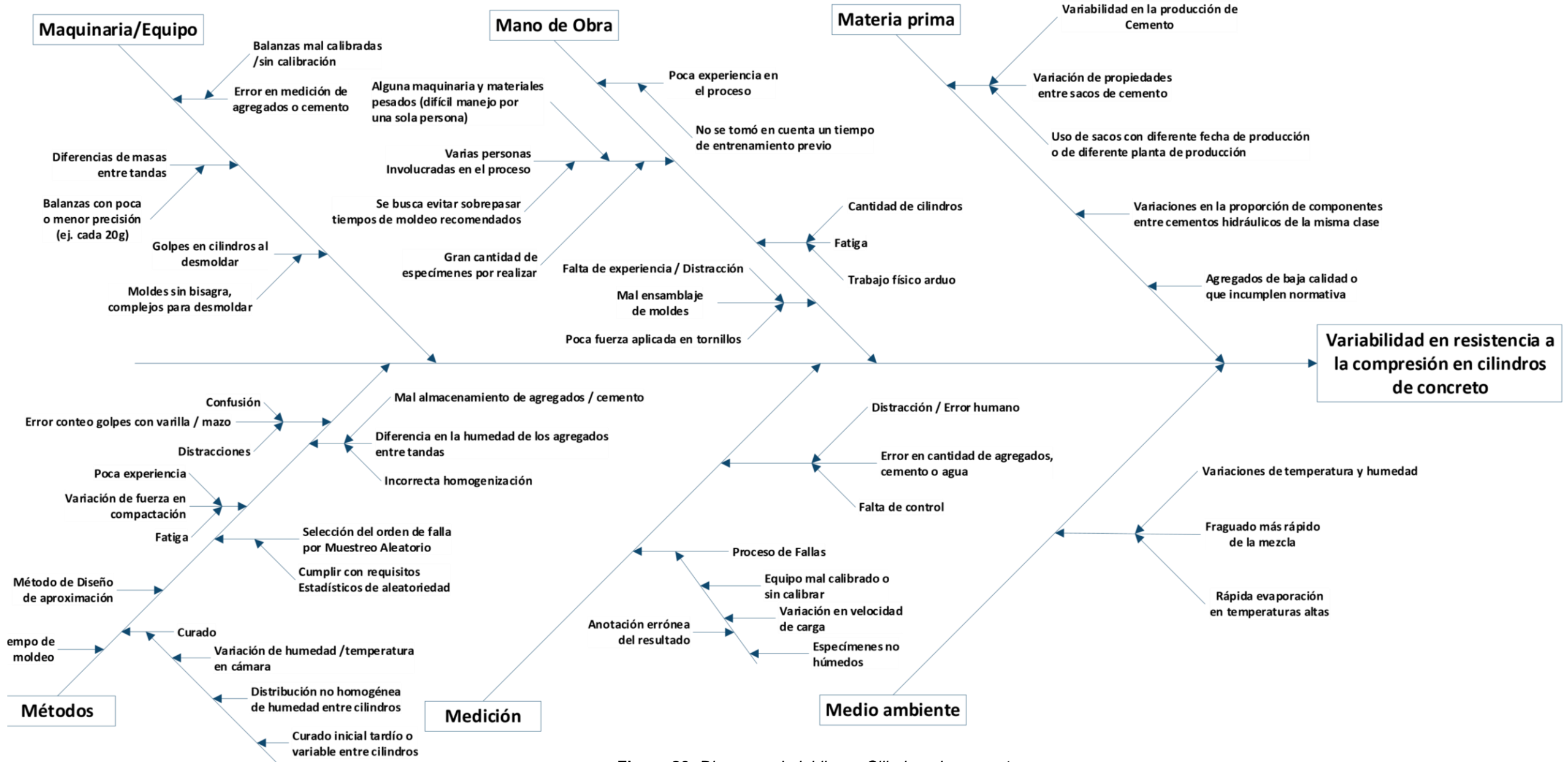


Figura 80. Diagrama de Ishikawa Cilindros de concreto

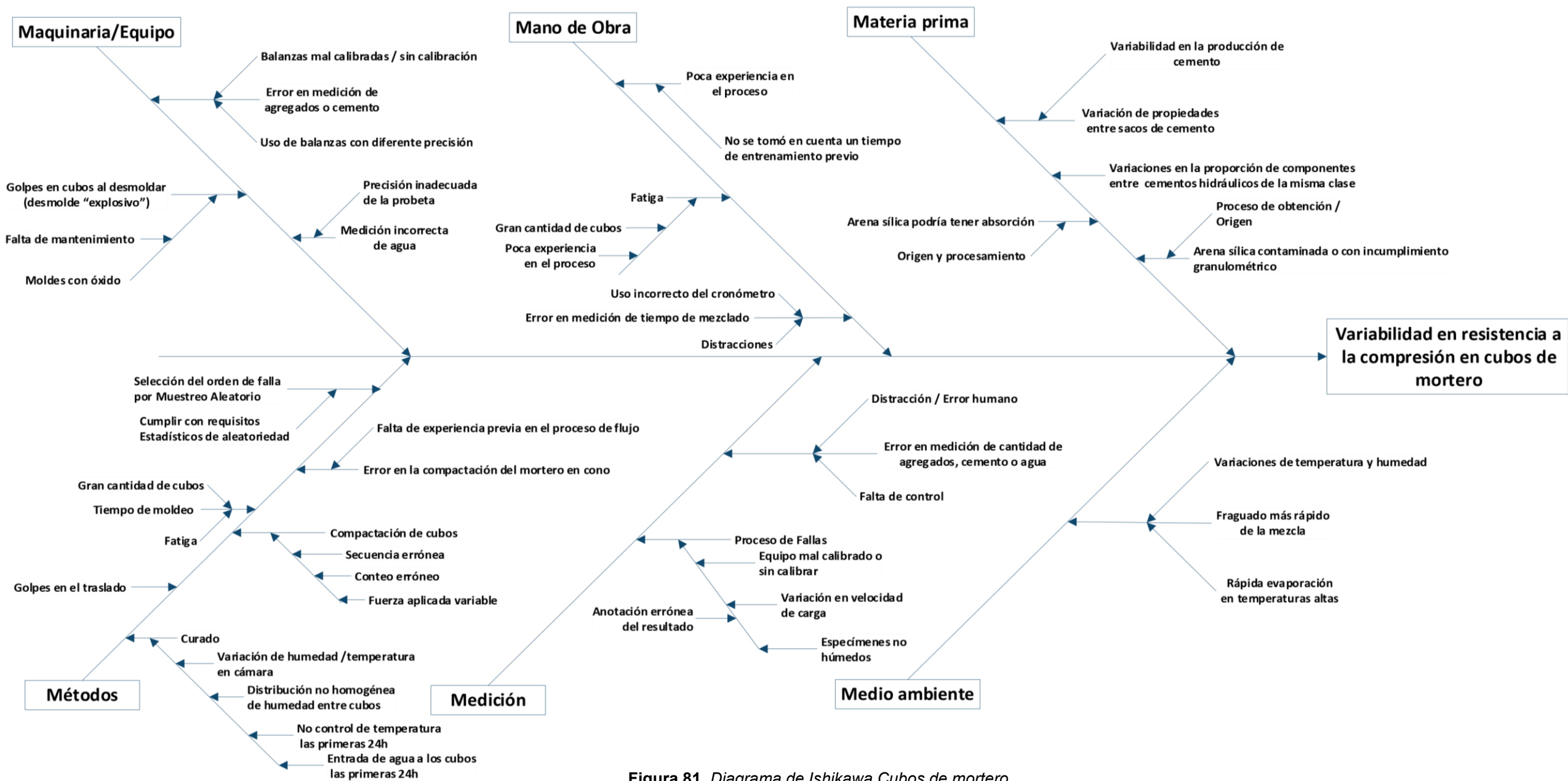


Figura 81. Diagrama de Ishikawa Cubos de mortero

Análisis de los resultados

Agregados

A continuación, se analizarán las características de los agregados pétreos utilizados en la fabricación del concreto hidráulico y el agregado fino para la fabricación del mortero de cemento hidráulico.

Agregado fino para concreto

Se comparan los parámetros obtenidos contra lo indicado en la norma ASTM C33-18 (versión vigente en el momento de realizar este estudio).

En cuanto a la granulometría del material, es importante recordar lo mencionado en la sección de *Metodología*. El agregado fino originalmente tenía entre 80% y 85% de material pasando el tamiz 4,75 mm (#4) lo que hacía que incumpliera el porcentaje pasando en este tamiz según norma¹ (el cual debe ser entre 95% y 100%). Por esta razón, como se indicó, todo el agregado fino utilizado (aproximadamente 700 kg) se procesó y se hizo pasar por el tamiz 4,75 mm (#4) eliminando de esta forma la mayor cantidad de partículas gruesas, acercando su granulometría a la especificación. Esto con el fin de no tener interacción de agregado grueso con el agregado fino.

A partir de esta nueva construcción granulométrica se obtuvieron los resultados de los ensayos propuestos, mostrados en las tablas 13 a 15.

En la figura 40 se muestra la curva granulométrica del agregado fino (construido), se observa que la mayoría de los tamices cumplen con la especificación. En el caso del tamiz 0,075mm (N°200) la norma¹ indica que el límite de porcentaje pasando este tamiz es 5% máximo

para concreto no sujeto a abrasión (como es el caso del concreto de este estudio), sin embargo, en la arena ensayada se obtuvo 5,78%. Por lo que se supera el límite especificado.

No obstante, en la prueba de colorimetría (ASTM C40-20) se obtuvo el color N° 2 en la placa orgánica, el cual está por debajo del N°3 (estándar). Al presentar un color más claro que el estándar el agregado fino estudiado se considera que no contiene posibles impurezas orgánicas. En la figura 18 de la *Metodología*, se puede observar la coloración obtenida.

Es importante mencionar que el material más fino que el tamiz 0,075 mm puede contener arcillas, limos y material orgánico y cuando este representa elevadas proporciones dentro de la muestra la normativa¹ recomienda algunos ensayos que se pueden realizar para asegurar que el agregado no contiene sustancias deletéreas que sobrepasen los límites especificados (ver sección de *Recomendaciones*).

En el ensayo de granulometría realizado se obtuvo un error de 0,28% el cual está por debajo del máximo de 0,3% permitido por la norma ASTM C136-19. Por lo tanto, durante el ensayo la muestra original no perdió o ganó material más de lo permitido.

El módulo de finura (M.F.) obtenido fue de 2,74 el cual está ubicado entre el rango de 2,3 a 3,1 de la especificación¹. Este dato no es un indicador de calidad, pero es útil conocer la medida de finura del agregado que además influye en la trabajabilidad que alcanza la mezcla de concreto hidráulico.

Agregado grueso para concreto

Los resultados obtenidos para el agregado grueso se presentan en las tablas 16 a 18.

¹ ASTM C33-18

La pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles (ASTM C131-20) fue de 21% valor aceptable ya que el límite indicado en la norma ASTM C33-18 es máximo 50%. Este ensayo como se indica en la sección 5 de la ASTM C131-20 es un indicador de calidad relativa.

En la tabla 18 se muestra el comportamiento granulométrico de la piedra; únicamente en el tamiz 9,5 mm (3/8") se sobrepasa en 1,78% el límite superior del porcentaje pasando de norma, sin embargo, esto se considera cercano a la especificación. En la figura 42 se observa que posee una adecuada distribución granulométrica a lo largo de los límites establecidos. Esta característica favorece un buen acomodo de las partículas en la matriz del concreto hidráulico.

En el ensayo de granulometría realizado se obtuvo un error de 0,01% el cual está por debajo del máximo de 0,3% permitido por la norma ASTM C136-19. Por lo tanto, durante el ensayo la muestra original no perdió o ganó material más de lo permitido.

Como percepción visual, el agregado grueso presentaba forma prismática e irregular lo cual favorece la adherencia con la pasta de cemento hidráulico y esto mejora las propiedades mecánicas de resistencia del concreto. Se considera entonces que el agregado grueso utilizado en el proyecto es apto para la elaboración de mezclas de concreto hidráulico.

Agregado fino para mortero

En la fabricación de los morteros de cemento hidráulico la norma ASTM C109-20b permite el uso únicamente de arena de sílice graduada acorde con la ASTM C778-17. El proveedor seleccionado brindó dos muestras de arenas de sílice con diferente granulometría. Se realizó el ensayo en ambas arenas según los tamices que indica esta última norma.

La muestra denominada '20/30', presenta un porcentaje pasando menor al especificado tal como se observa en la figura 44. Mientras que la arena '30/40' (ver figura 46) posee una granulometría que se ubica casi por completo dentro de los límites de la especificación, a excepción del tamiz 0,425 mm (N°40) donde el porcentaje pasando es menor al especificado.

Para este proyecto se decidió seleccionar esta última (arena 30/40) para la fabricación de los

cubos de mortero, ya que incumple únicamente en un tamiz por el contrario la arena '20/30' posee un incumplimiento en cuatro de los cinco tamices indicados.

En ambas pruebas granulométricas se cumple con el porcentaje de error máximo permitido por la ASTM C136-19 para este tipo de ensayo. Por lo tanto, durante la prueba la masa de la muestra original no disminuyó o aumentó más de lo permitido.

Método de diseño de mezcla

Se utilizó el procedimiento indicado en el capítulo 6 de la práctica estándar ACI 211.1-91 (reaprobada en 2002).

Este método corresponde a una primera aproximación de las proporciones requeridas en la mezcla de concreto, así se indica en el artículo 1.2 de la práctica. Al ser aproximado esto puede generar variables en el proceso sobre las que no se tiene control, por razones como las que se indican a continuación:

- El método se basa en mezclas de concreto realizadas en los Estados Unidos con cementos hidráulicos y agregados producidos en este país; las características de estos pueden no ser equivalentes a las condiciones de agregados y cementos hidráulicos nacionales.
- Hace referencia a los cementos hidráulicos de las normas ASTM C150 y ASTM C595, sin embargo, no menciona la ASTM C1157, la cual es la norma con la que cumplen los cementos hidráulicos equivalentes costarricenses utilizados en este estudio y que son los únicos comercializados en el país.
- Requiere como parámetro del cemento hidráulico, únicamente su gravedad específica y no otras características propias de cada cemento como el calor de hidratación, resistencia a la compresión, agua necesaria para hidratación o componentes adicionados como puzolanas, calizas, entre otros, que permitan diferenciar realmente las resistencias que pueden alcanzar los

distintos tipos de cemento hidráulico, sobre todo en el caso de Costa Rica, donde los cementos hidráulicos comercializados son combinados.

- Para lograr la mezcla de concreto con las características deseadas se requiere un proceso iterativo de prueba y error (en este estudio por límite de tiempo y recursos el proceso iterativo no pudo darse).

Desde esta perspectiva se tiene que el método utilizado al aplicarse a las condiciones nacionales requiere ajustes. Sin embargo, el estudio de estos sobrepasa el alcance de este proyecto, por lo que es altamente recomendable realizar una investigación enfocándose en este aspecto.

Diseño de mezcla

En las tablas 21 y 22 se observa que la dosificación para 1 m³ de concreto hidráulico es casi igual para los cinco diseños, a pesar de que el tipo de cemento hidráulico es variable. Esto sucede por lo explicado anteriormente de que el método de diseño no toma en consideración parámetros más específicos de cada tipo de cemento hidráulico.

Por ejemplo, en la siguiente tabla se presenta la resistencia que propone ACI 211.1-91 (reaprobada en 2002) contra lo obtenido en este estudio. La relación A/C mostrada corresponde al agua total de la mezcla de concreto (incluye agua para hidratar el cemento, agua para trabajabilidad y agua para absorción de agregados).

Tabla 83. Resistencia (f_c) según ACI 211.1 vs resultados obtenidos

Relación A/C	f_c ACI 211.1	ID concreto	f_c obtenido
0,68	21,3 MPa	A	22,3 MPa
		B	30,1 MPa
		C	21,8 MPa
		D	26,2 MPa
		E	23,2 MPa

En la tabla anterior se observa que los resultados obtenidos no son completamente iguales a lo que propone el método, a pesar de que las mezclas de concreto contienen cantidades similares de cada uno de los componentes. Se

puede decir que los resultados propuestos por el método se aproximan más a los concretos fabricados con cementos hidráulicos clase 28 (A, C y E) que a los fabricados con cemento clase AR (B y D), sin embargo, es relativo ya que, como se ha mencionado, es un método de aproximación y en los resultados de resistencia a la compresión se muestra la variabilidad entre mezclas que es inherente al método.

Concretos hidráulicos

Moldeo de los especímenes

Durante la fabricación de los concretos hidráulicos se cumplió con los *tiempos de mezclado* que estipula la ASTM C192-19, esto asegura que se ha mezclado de manera óptima obteniendo una distribución uniforme de los materiales. Al no mezclarse por un tiempo mayor al especificado se previene la evaporación del agua, la segregación de los agregados y la trituración de estos.

Respecto del tiempo de moldeo la norma ASTM C172-17 recomienda que el moldeo de los especímenes de concreto se realice dentro de los 15 minutos después de haber terminado el mezclado. Los *tiempos de moldeo* aproximados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 84. Tiempos aproximados de moldeo de los especímenes de concreto hidráulico

ID Concreto	Tiempo (min)		
	Tanda 1	Tanda 2	Tanda 3
A	30,0	30,0	30,0
B	27,0	30,0	35,0
C	25,0	27,0	30,0
D	25,0	35,0	35,0
E	25,0	30,0	35,0

Como se observa en la tabla anterior no fue posible cumplir con el tiempo de los 15 minutos, esto se debe al volumen de trabajo y el tiempo con que se contaba para realizarlos (tres horas aproximadamente). El total de muestras fue de 51 cilindros por tipo de cemento por lo que se decidió dividir el trabajo en tres tandas (17 cilindros en cada una) para optimizar el tiempo disponible. El moldeo de esta cantidad de especímenes requirió en promedio 30 minutos por tanda.

El no cumplir con el tiempo recomendado repercute en la trabajabilidad de la mezcla, pues

conforme transcurre el tiempo el concreto empieza el proceso de fraguado.

Se requiere remezclar el concreto, rompiendo los cristales ya formados en la pasta de cemento. La colocación del concreto en los moldes, la compactación y el acabado no se realizan de la misma manera conforme el tiempo transcurre, ya que el concreto tiene menos trabajabilidad que al inicio. Esto ocasiona que los cilindros tengan más vacíos, los cuales son posibles planos de falla.

Además, lo descrito en el párrafo anterior es una de las posibles causas de variabilidad entre los resultados de resistencia a compresión de los cilindros, lo cual se ampliará más adelante en el apartado “*Dispersión de Datos*”.

Es importante mencionar que la norma ASTM C172-17 no señala la cantidad máxima o recomendada de especímenes que deberían realizarse en los 15 minutos que establece.

Condiciones ambientales

Las mediciones de temperatura ambiente y humedad relativa en el momento de realizar cada tanda de concreto se muestran en las tablas 26 y 27, estos se mantienen por debajo de los máximos recomendados, por ejemplo el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2017) indica que la temperatura de colocación debería ser entre 10 °C y 32 °C; de igual forma American Concrete Institute (2010) afirma que en ningún caso la temperatura debe exceder los 35 °C (95 °F).

En estas tablas (26 y 27) se observa que, durante la segunda y tercera tanda de cada tipo de concreto hidráulico fabricado, la temperatura era mayor y la humedad relativa menor en comparación con la primera tanda; las temperaturas más altas favorecen una más rápida evaporación del agua. En consecuencia, en las tandas 2 y 3 se requería mayor remezclado del concreto, lo cual puede ocasionar que se rompan los cristales ya formados en la pasta de cemento hidráulico.

Ensayo de asentamiento

En esta sección se analizan los resultados únicamente del ensayo de asentamiento; no se realizó el ensayo de temperatura del concreto hidráulico ya que este no es un parámetro de entrada requerido para el diseño de mezcla.

En el diseño se definió que las mezclas de concreto tuvieran un asentamiento de aproximadamente 150 mm para lograr tener trabajabilidad adecuada que permita el proceso de moldeo durante el máximo tiempo posible. Como se observa en la figura 47 la mayoría de los resultados se aproximan al valor de asentamiento de diseño, sin embargo, no se alcanza con exactitud. En la mezcla B se alcanza en promedio 150 mm, sin embargo, en las demás mezclas los valores promedio se alejan del esperado entre 5 mm y 50 mm.

El asentamiento recomendado por el método de diseño de mezcla (ACI 211.1-91), se estableció utilizando agregados de los cuales no se especifican sus características, que al ser estadounidenses probablemente difieren de los utilizados en este estudio, de igual forma aplica con los cementos hidráulicos, pues esta práctica del ACI se realizó con cemento Portland. Por lo que la aplicación del método de diseño de aproximación es una de las posibles causas en la variación de los resultados de asentamiento obtenidos con respecto del esperado de diseño.

En la tabla 25 se muestra el cumplimiento con la Desviación Estándar y el Rango permitidos por la norma ASTM C143-20 para este ensayo. Esto indica que en cada tipo de concreto individual se lograron mezclas con asentamientos dentro de los límites aceptados de variación.

Resistencia a la compresión edades tempranas y avanzadas

A partir de esta sección se tomará como ‘*resistencia temprana o inicial*’ la obtenida a los 7 días, ‘*resistencia media*’ a los 14 días, ‘*resistencia de diseño*’ (f_c) a los 28 días y posteriores a 28 días son ‘*resistencias avanzadas*’.

En cuanto al desarrollo porcentual de resistencia, en la figura 82 mostrada a continuación, se observa que, los concretos alcanzan a los siete días entre un 66% a 79% de la resistencia obtenida a los 28 días y a los 14 días

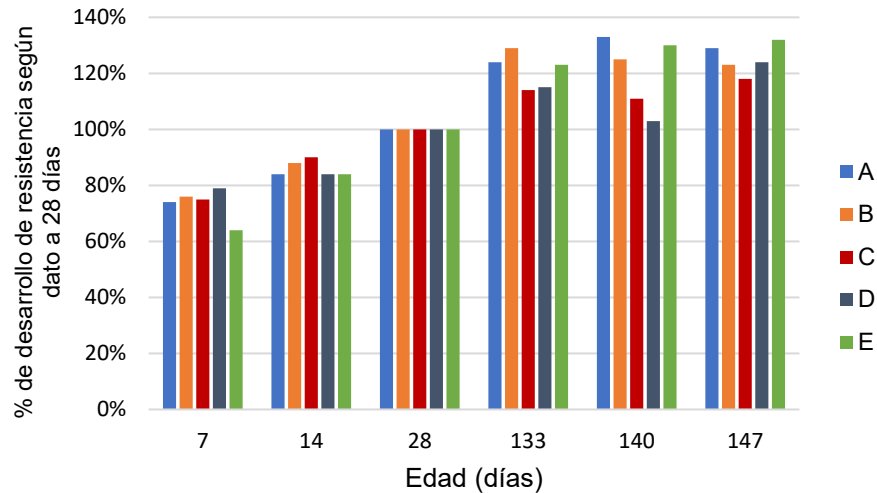


Figura 82. Porcentaje de desarrollo de resistencia para cada mezcla de concreto según dato obtenido a los 28 días

alcanzan entre 84% y 90%, esto es congruente con investigaciones donde se indica que a los siete días normalmente se estima como 65%-75% de la resistencia a los 28 días y a los 14 días alrededor del 80% (Kosmatka & Wilson, 2011), (Valcuente, Marco, Jardón, & Gil, 2009), (Neira Chávarri, 2016).

Los resultados de resistencia a la compresión se presentan en las tablas 28 a la 32.

Entre los concretos hidráulicos fabricados con Cementos de resistencia Clase-28 (A, C y E) se tiene que:

Según lo observado en la figura anterior a edades de 7 y 14 días el concreto C es el que alcanza mayores porcentajes de desarrollo de resistencia. Sin embargo, en la figura 50 se muestra que el concreto C es el que desarrolla menor resistencia en términos absolutos a partir de los 14 días éste forma una curva con tendencia al comportamiento asintótico.

Por lo que los concretos fabricados con el cemento 'C' (*MM/B(P-C)-28*) alcanzan a edades tempranas y medias, resistencias muy cercanas a la obtenida a los 28 días, pero esta resistencia no es la más alta que ofrece el mercado según los cementos hidráulicos analizados. Los concretos 'A' (*MM/B(P-C)-28*) y 'E' (*MM/C(C-P)-28*) ganan resistencia inicial de manera más lenta en comparación con el 'C', pero a partir de los 28 días tienen capacidad de desarrollar mayores resistencias a la compresión.

En cuanto al comportamiento a edades avanzadas, los concretos A y E ganan alrededor de un 25% a un 33% más resistencia que lo

obtenido a 28 días. Mientras que el concreto C gana entre un 11% a 18% más.

En detalle, como se observa en la figura 50, el concreto E es el que gana mayor resistencia a edades avanzadas en términos absolutos. Esto puede explicarse por su composición (*MM/C (C-P)-28*): Cemento Modificado Mixto grado C con Caliza y Puzolanas, este posee de un 36% a 55% de caliza y puzolanas, por el contrario, los cementos hidráulicos A y C poseen de un 21% a 35% y los cementos B y D poseen entre un 6% y 20% (INTECO, 2018). "Las puzolanas son efectivas disminuyendo el calor de hidratación, lo que mejora la trabajabilidad y durabilidad" (Al - Chaar & Alkadi, 2013, p.1), la reducción en el calor de hidratación provoca que "se generen menos fisuras y se fabrican concretos más densos que mejoran la resistencia, a mediano y largo plazo" (Elizondo Valverde, 2013).

En cuanto a la caliza, este material en pequeñas proporciones actúa como un relleno ("filler") en la matriz de la pasta de cemento hidráulico, desarrollando mezclas de concreto más densas, menos porosas y más resistentes (Díaz et al., 2013), también se ha demostrado que a edades posteriores, la estabilización de estringita que provoca la caliza, mejora la resistencia (Celik, Hay, Hargis, & Moon, 2019; Zajac, Rossberg, Le Saout, & Lothenbach, 2014). Por lo que el concreto E al tener en mayor proporción estos componentes provoca que desarrolle las mayores resistencias.

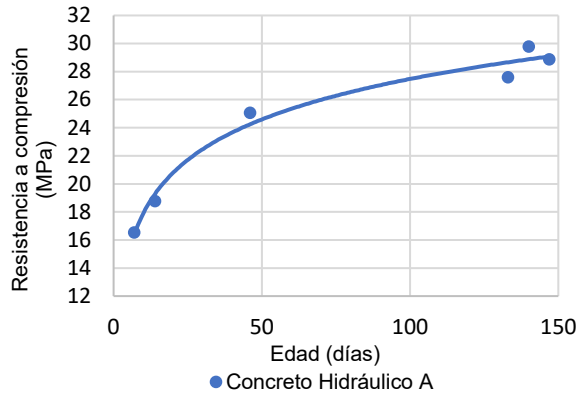


Figura 83. Ejemplo de comportamiento errático en la resistencia a la compresión promedio en edades avanzadas

De forma general, todos los concretos fabricados con cemento clase-28 presentan una tendencia al aumento de resistencia, existen algunos puntos en las edades posteriores a 100 días donde se observa un comportamiento errático (ver ejemplo de esto en la figura anterior). Este comportamiento es propio de la variabilidad en la resistencia del concreto, “debido a que es un material heterogéneo, existen muchos factores que afectan las resistencias de los ensayos a compresión” (Torres Farías, 2019). En la sección de *Tratamiento Estadístico* se profundizará en el tema de la variabilidad.

Posterior a los 100 días los concretos comienzan a mostrar una estabilidad en la resistencia, ya que las ganancias porcentuales son menores en comparación con los primeros 28 días.

En los concretos hidráulicos fabricados con Cementos de resistencia Clase-AR (B y D), a edades tempranas y medias ambas mezclas tienen un desarrollo porcentual de resistencia similar como se observa en la figura 82 en la página anterior. A pesar de que en términos porcentuales se comportan similar, en la figura 51 se aprecia que, para esta clase de cementos, el concreto B es el que gana mayor resistencia desde edades tempranas

El cemento hidráulico B se clasifica como MC/A-AR y el cemento D se clasifica como MP/A-AR. Esta clase de cementos hidráulicos son los que poseen mayor porcentaje de clínker (80% a 94%), pues ambos son grado A. Se diferencian en el componente de adición, el cemento B posee caliza y el cemento D posee puzolanas, ambos entre un 6% a 20% (INTECO, 2018).

En cuanto al comportamiento a edades avanzadas, el concreto B gana entre un 23% a

29% más resistencia que lo obtenido a los 28 días y el concreto ‘D’ entre un 3% a 23% más aproximadamente. De esta forma el concreto ‘D’ (MP/A-AR) es el que alcanza menores resistencias tanto a edades tempranas como avanzadas, para los concretos fabricados con la clase de cemento AR.

De forma general, los concretos hidráulicos fabricados con cemento clase-AR presentan igualmente una tendencia al aumento de resistencia y existen algunos puntos en las edades posteriores a 100 días con un comportamiento errático como se mostró en la figura 83, este comportamiento es propio de la variabilidad en la resistencia de concreto. Posterior a los 100 días los concretos comienzan a mostrar una estabilidad en la resistencia, ya que las ganancias porcentuales son menores en comparación con los primeros 28 días.

Los cementos hidráulicos AR corresponden a Alta Resistencia Inicial, este concepto se observa en la figura siguiente donde los concretos fabricados con cemento **clase AR** alcanzan los 20 MPa a los siete días, mientras que en concretos fabricados con cemento **clase 28** los 20 MPa se alcanzan en un punto entre los 14 y los 20 días.

En esta figura también se observa que el concreto E, el cual es el que alcanza mayor desarrollo de resistencia entre los fabricados con cemento clase 28, posterior a los 120 días llega a equipararse con el concreto D, el cual es fabricado con cemento clase AR.

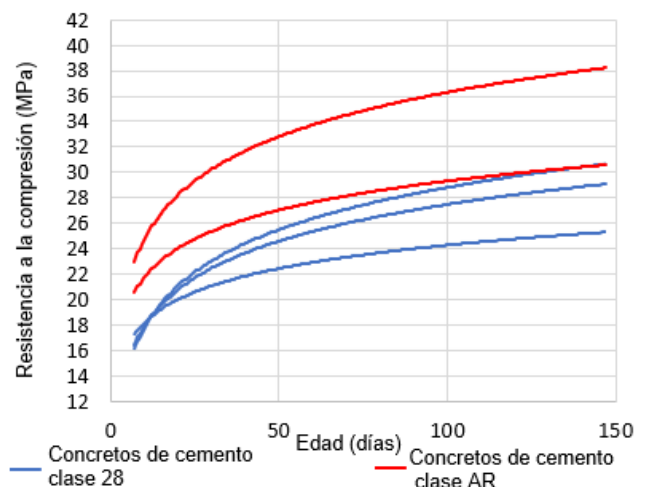


Figura 84. Comparación del desarrollo de resistencia concretos fabricados con cementos clase 28 y con cementos clase AR

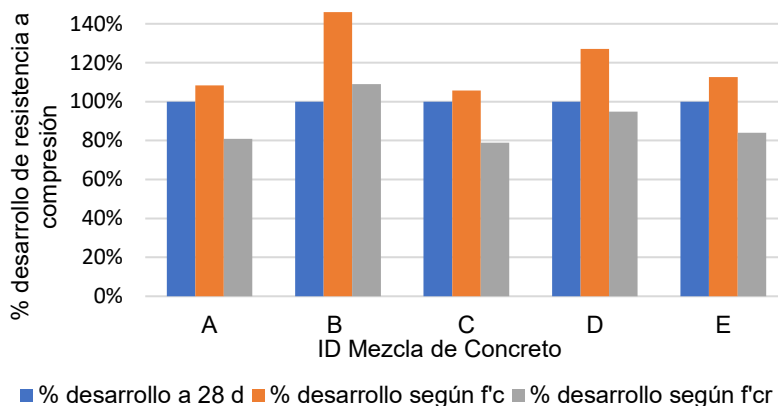


Figura 85. Comparación del porcentaje de desarrollo de resistencia según f'_c y f'_{cr} , para cada mezcla a los 28 días

Resistencia a la compresión a los 28 días

La figura anterior permite analizar el comportamiento de los concretos a los 28 días. Esta edad es relevante porque el diseño de mezcla se desarrolla basándose en la resistencia alcanzada en este punto, además, la mayoría de la normativa nacional e internacional utiliza la resistencia a esta edad como parámetro de diseño. En este estudio 20,59 MPa (210 kg/cm²) es la resistencia de diseño mínima (f'_c) que todas las mezclas de concreto deben igualar o superar.

En esta figura las barras azules corresponden a la referencia, indican la resistencia a la compresión que alcanzó cada mezcla de concreto, en términos porcentuales es el 100% a los 28 días. Las barras naranjas indican el porcentaje de desarrollo según f'_c , ya que todas las barras naranjas son más altas que las azules quiere decir que en todas las mezclas se superó la resistencia de diseño mínima propuesta.

Las barras grises muestran el porcentaje de desarrollo según f'_{cr} (resistencia a la compresión requerida) que corresponde a 27,59 MPa según el diseño de mezcla. Esta es la resistencia final a la que se está diseñando y funciona como factor de seguridad. f'_{cr} solamente fue alcanzada en el concreto B y superada en 9%, este concreto fue fabricado con cemento hidráulico clase AR.

Ambos límites (f'_c y f'_{cr}) deberían sobrepasarse o igualarse por los promedios de resistencia a la compresión obtenidos, ya que el diseño de mezcla se realiza para alcanzar la

mayor resistencia. No obstante, las características propias de cada clase de cemento hidráulico son diferentes.

Además, el método de diseño de mezcla, como se ha mencionado antes, toma como parámetro del cemento hidráulico únicamente su gravedad específica. Esta característica parece no ser suficiente para diferenciar los comportamientos de cada clase de cemento comercializado en Costa Rica analizados en este estudio.

Tratamiento estadístico – Concretos Hidráulicos

En esta sección es importante recordar que este estudio se realizó mediante un diseño aleatorio. Los especímenes fallados en cada edad se obtuvieron de tres tandas diferentes del mismo tipo de concreto hidráulico, seleccionados aleatoriamente mediante el programa Minitab.

Estadísticos descriptivos

La norma ASTM C39-20 establece al requisito de coeficiente de variación y rango aceptable para resultados de resistencia a compresión en cilindros de concreto. En esta se presenta solamente la precisión “*Single-Operator Precision*”; no obstante, en este estudio se requiere la precisión llamada “*Single-Operator, Multi-Batch*” que, como lo menciona la ASTM

C670-15 “se incluye para ensayos donde se requieren resultados de especímenes realizados en más de un lote” (p.3). Por lo que, al no presentarse la precisión adecuada para este caso, los requisitos expresados en la norma ASTM C39-20 no son aplicables en este estudio.

Por lo anterior, se decide comparar la desviación estándar obtenida (tabla 33) contra los estándares de control del ACI 214R-11 para concretos con $f'c \leq 35$ MPa, mostrados en la tabla 5 del *Marco Teórico*. “Estos estándares de control son aplicables a especímenes fallados a los 28 días” (ACI 214R-11, p.8), sin embargo, se decidió tomar el estándar y compararlo contra los resultados de todas las edades en estudio, como una forma de conocer el control sobre la variabilidad a través del tiempo.

En la tabla a continuación, se muestra un ejemplo de la clasificación obtenida en los concretos hidráulicos fallados a 28 días; la clasificación para las demás edades se puede observar en el *Apéndice 4*. Se debe recordar que la falla a 28 días no se realizó en los concretos A y E por los cambios realizados en el cronograma.

Tabla 85. Control de la variabilidad obtenido para los concretos hidráulicos a los 28 días

ID Concreto	Clasificación
B	Aceptable
C	Bueno
D	Pobre

En el ejemplo anterior se observa que la clasificación obtenida varía entre tipos de concreto y en el *apéndice 4* se observa que las variaciones también se dan entre edades de falla. En las edades tempranas la clasificación predominante es “Excelente”, mientras que a partir de 28 días prevalecen las clasificaciones de “Aceptable” o “Pobre”.

De forma global, el estudio se concentra en la clasificación de variabilidad “Pobre”. Al obtener este indicador como predominante se presenta la necesidad de detectar cuáles fueron las posibles fuentes de variación, con el fin de determinar pasos apropiados para mantener y mejorar el control de calidad en el proceso de fabricación de muestras y colaboren en la disminución de dispersión en los resultados. Para esto se realizó un análisis de Causa-Efecto, cuyos resultados se presentan en la figura 80. Las posibles causas de esta variabilidad se analizan en el apartado siguiente: “*Dispersión de datos*”.

Dispersión de datos

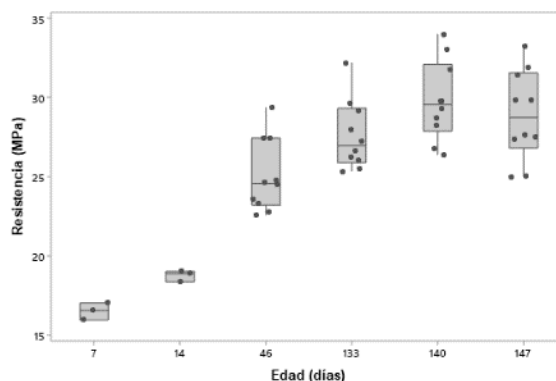


Figura 86. Ejemplo de dispersión de datos obtenida (Concreto A)

Anteriormente se comentó que la norma ASTM C172-17 recomienda que el moldeo de cilindros se realice dentro de los 15 minutos posteriores a finalizar el mezclado y como se muestra en la tabla 84 de esta sección, ninguna de las tandas realizadas pudo culminarse en este tiempo, debido a la cantidad de especímenes. Por el contrario, se tuvo en promedio 30 minutos de moldeo por tanda.

Analizando los gráficos de caja de todos los concretos (figuras 52 a 56) se observan algunas edades con un descenso en la mediana (y la media), con respecto de la tendencia de crecimiento de cada tipo de concreto. En estas edades los especímenes que presentan el menor resultado y contribuyen a esta disminución en la resistencia a la compresión promedio, en la mayoría de los casos fueron moldeados aproximadamente al final de las tandas respectivas por lo que se pudieron ver perjudicados por superar el tiempo recomendado de moldeo ya que la mezcla se ve afectada por el proceso de fraguado inicial y el remezclado del concreto donde se rompen los cristales ya formados en la pasta de cemento hidráulico.

Tomando como ejemplo la figura anterior (86), a los 147 días se observa un descenso en la mediana (y en la media) con respecto a los 140 días. En el set fallado a los 147 días los dos cilindros que dan menor resultado son los cilindros moldeados número 14 y 33. Estos cilindros se moldearon casi al final en la primera y segunda tanda respectivamente. Debido a este hallazgo es recomendable realizar un estudio donde se analice específicamente los efectos que puede tener el tiempo de moldeo en el desarrollo de resistencia.

Por otro lado, en los *concretos C y D* (figuras 54 y 55 respectivamente) llegan a tener rangos intercuartil de 5,5 y 9 respectivamente, esto se pone en evidencia en el tamaño de los boxplot donde se observa que los resultados mínimos son comparables con los obtenidos a 14 días y los máximos superan los obtenidos a 147 días. Por lo que estos dos concretos presentan la mayor variabilidad de todas las mezclas fabricadas.

La dispersión obtenida en los concretos C y D puede explicarse debido a que no se logró la estanqueidad de los moldes ya que se encontraron fugas de agua perimetrales, lo cual varió la relación A/C causando diferencias en el desarrollo de resistencia entre especímenes. Es bien sabido que la relación A/C es de suma importancia en el desarrollo de resistencia del concreto hidráulico; variaciones en la cantidad de agua perjudica directamente la resistencia ya sea aumentándola o disminuyéndola (Kosmatka & Wilson, 2011, p.7); (Instituto del cemento Portland Argentino, 2015, p.3).

En el caso del concreto E (figura 56) en los datos a 140 y 147 días se observa similitud entre las medianas y también entre el Q1 y el Q3 de cada edad, esto indica que la dispersión de los valores centrales en ambas edades se ubica en un rango de resultados aproximadamente igual. Lo cual es indicio de que la resistencia a la compresión tiende a la estabilidad a partir de estas edades.

A continuación, se muestran algunas posibles causas de la variabilidad obtenida en cada tipo de concreto hidráulico; estas causas se amplían en el Diagrama de Ishikawa (figura 80) y con la técnica de los Cinco porqués (Apéndice 8):

- El muestreo por lotes aleatorios involucra dos fuentes de variación: “variaciones de lote a lote y variación dentro del lote” (ACI 214R Committee, 2011, p.3), lo que aumenta la posibilidad de obtener mayor dispersión.
- Exceder tiempos de moldeo recomendados, por la cantidad de especímenes por tanda.
- Composición química de los cementos hidráulicos puede variar según el tipo¹, lo cual sería una causa inherente de variabilidad.
- Variación de fuerza en los golpes al compactar los especímenes.

- Fugas de agua a través de los moldes.
- Uso de un método de diseño de mezcla de aproximación.
- Fatiga de los operarios.
- Ausencia de un tiempo previo de entrenamiento y ajuste de variables en el proceso.

En la sección de *Recomendaciones* se establecen algunas sugerencias para reducir el efecto de las posibles causas encontradas, sobre la variabilidad.

Valores atípicos

Se realizaron las pruebas de Grubbs y Dixon para el tratamiento de valores atípicos, según las recomendaciones dadas en la guía ACI 214R-11.

En las tablas de la 34 a la 37 se tienen los resultados de la prueba de Grubbs para los concretos A, B, C y D, en todos sus tratamientos se observa que el valor de P es mayor al nivel de significancia 0,05 con lo cual se dice que no se cuenta con suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que *no hay valores atípicos*.

En la tabla 38 se observa que el *concreto E* a los 48 días presenta un dato atípico. Este es el valor más pequeño de los resultados a esta edad y corresponde al cilindro moldeado número 26, su variación respecto de los demás especímenes del tratamiento puede deberse a las posibles causas mencionadas anteriormente. Se decide eliminar este dato del conjunto ya que las pruebas lo determinan como un dato atípico, genera un alto Coeficiente de Variación en el set comparándolo con las demás edades de falla y genera un promedio y una mediana menor a esta edad de lo que en realidad muestra la tendencia del conjunto.

Distribución de los datos

La normalidad en los datos es un requisito para realizar las pruebas paramétricas como el Análisis de Varianza y la prueba de Tukey (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008), además el ACI 214R-11 señala que “una distribución normal es apropiada en la mayoría de los casos cuando la resistencia del concreto no excede los 70 MPa”.

¹ INTE C147:2018

En las tablas de la 39 a la 43 se tienen los resultados de las pruebas de normalidad para cada uno de los concretos hidráulicos. Se aprecia que tanto para Anderson-Darling (AD) y para Kolmogorov-Smirnov (KS) el valor de P en todas las edades es mayor a 0,05 (nivel de significancia), con lo que no se tiene suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. Por lo que se utiliza el comportamiento normal para el tratamiento de los datos.

Regresión No Lineal

El modelo de regresión de resistencia a la compresión versus edad, que mejor se ajusta al comportamiento de los resultados de resistencia a la compresión del concreto hidráulico, es el No Lineal Logarítmico. Después de haber realizado pruebas con diversos modelos, el logarítmico es el que presenta un mejor ajuste de la curva y un valor de R^2 (coeficiente de determinación) mayor en todos los concretos independientemente del tipo de cemento hidráulico utilizado.

El modelo logarítmico matemáticamente se indefinir en el valor de cero, esto en el caso del concreto hidráulico no es inconveniente ya que una vez elaboradas las muestras y en términos de la reacción de hidratación, estas tardan horas en adquirir endurecimiento y, por ende, resistencia. Como lo establece la norma INTE C147:2018 el fraguado inicial no debe ocurrir antes de 45 minutos y el fraguado final debe tardar máximo 420 minutos, es decir, siete horas.

Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en cada modelo se muestran en la siguiente tabla. Se debe recordar que valores de R^2 cercanos a 1 son indicio de que “el modelo explica una mayor proporción o porcentaje de variabilidad de los datos experimentales” (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008, p.178).

Tabla 86. R^2 modelos logarítmicos concreto

ID Concreto	R^2 modelo con dispersión	R^2 modelo con promedio
A	0,73	0,98
B	0,87	0,98
C	0,49	0,96
D	0,40	0,84
E	0,56	0,94

Generalmente los modelos para la resistencia del concreto hidráulico se realizan con el promedio de los resultados en cada edad de falla. Como se observa en la tabla anterior, utilizando el modelo con los promedios los valores son más cercanos a 1, en comparación de los modelos con dispersión. Sin embargo, al utilizar los promedios no se visualizan tendencias en los datos ni posibles valores atípicos. Los estudios basados en el promedio buscan estabilidad en la media más no cualquier hallazgo en el proceso de evaluación de los especímenes que puedan dar como resultado variación en los datos individuales y que permita tomar decisiones respecto al control de calidad en el proceso y en los materiales.

Por lo que en este estudio se decidió presentar los modelos de regresión con la dispersión de los datos. Utilizar la dispersión en el modelo permite visualizar el comportamiento real de la resistencia del concreto al presentar datos individuales, conocer que tan preciso es el método y los resultados, su dispersión con respecto del modelo propuesto y su dispersión con respecto de los intervalos de confianza y predicción.

La siguiente figura muestra un ejemplo de modelo obtenido; los modelos para todos los concretos pueden observarse con detalle en las figuras 57 a 61 de *Resultados*.

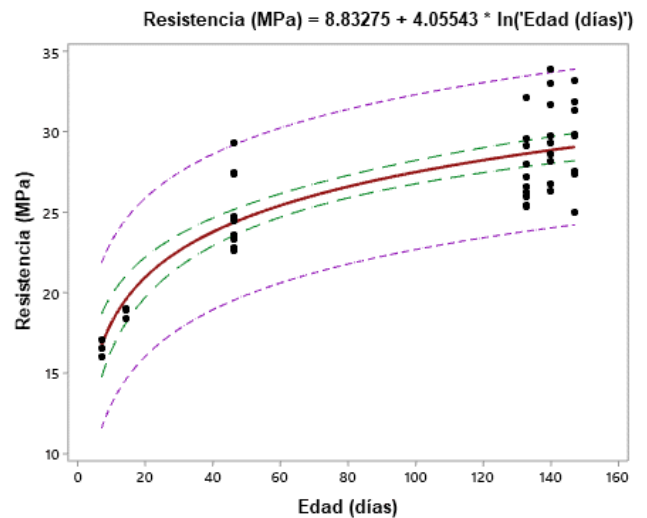


Figura 87. Ejemplo de modelo de regresión (Concreto A)

Se observa el intervalo de confianza (IC) al 95% delimitado con color verde, el cual en todos los concretos es más angosto ya que su cálculo es basado en las medias de los datos, por lo tanto, hay un 95% de confianza de que la media de los

resultados se ubique en el rango de este intervalo. En color morado se tiene el intervalo de predicción (IP) al 95%, para todos los concretos este intervalo es más amplio ya que su cálculo se basa en los valores individuales por lo que se ve influenciado por la dispersión de los datos. Este indica que existe una probabilidad del 95% de que un resultado individual se ubique en el rango de este intervalo. Este último rango es evidentemente más amplio en los concretos que presentaron mayor dispersión.

Debido a lo anterior, es recomendable reportar los valores de resistencia a la compresión del concreto con su respectivo intervalo de confianza o de predicción según se requiera. Ya que los resultados siempre tienen asociado cierta variabilidad que no se conoce cuando se reporta solamente un promedio. Sería una buena práctica que los diseños de mezcla se realicen para un rango de resistencias (dentro de los intervalos) y no solamente para un promedio indicado, así como que los requerimientos y normas constructivas indiquen resistencias mínimas aceptadas en un rango o con sus respectivos intervalos.

En la tabla 44 se muestran las ecuaciones de regresión de los modelos analizados. Se observa gran similitud en las ecuaciones de los concretos A y E lo que podría indicar que tienen tendencia de desarrollar resistencias similares, lo cual se analizará a profundidad en la sección "ANOVA".

Lo habitual en el desarrollo de estructuras de concreto, es hacer uso de este tipo de ecuaciones para establecer estimaciones de cuánto sería el valor aproximado a 28 días a partir de muestreos obtenidos a 7 y 14 días y con esto tomar decisiones tempranas sobre los pasos por seguir en caso de tener un comportamiento no deseado en los resultados de resistencia a la compresión. Para esto lo recomendable es utilizar modelos que abarquen edades de falla antes y después de la edad a proyectar, como el presentado en este estudio.

Para la *aplicación de las ecuaciones* obtenidas para la proyección a 28 días, las condiciones en general deben ser iguales o similares a las de este estudio, como lo son: los parámetros de absorción, gravedad específica y peso unitario de los agregados finos y gruesos, el tipo de cemento hidráulico, las proporciones del diseño de mezcla y las condiciones ideales de laboratorio como el curado. Para su uso en

condiciones de campo se deben tomar en cuenta la participación de las variables inherentes a esta condición.

ANOVA de un factor y prueba de Tukey

La comparación con prueba de ANOVA se realizó entre los concretos fabricados con cementos hidráulicos de la misma clase de resistencia: *clase 28* o *clase AR*, en cada edad de falla. Los resultados se pueden observar en las tablas 45 a 54.

Los concretos hidráulicos fabricados con cementos 'clase de resistencia 28' corresponden a los concretos A, C y E. A las edades de 7 y 28 días se obtuvo un valor de P mayor al nivel de significancia (0,05) con lo que no se rechaza la hipótesis nula de que 'todas las medias son iguales', por lo que los concretos no presentan diferencias estadísticamente significativas. Se puede decir que dentro de los primeros 28 días de edad utilizar el cemento A, C o E para fabricar concreto no representa diferencia significativa; en este rango de edades todos desarrollan resistencia promedio estadísticamente igual.

No obstante, al analizar las edades avanzadas, en la prueba ANOVA se obtiene valores de P menores a 0,05, por eso se rechaza la hipótesis nula, es decir, 'al menos uno de estos concretos desarrolla resistencia promedio estadísticamente diferente'.

Ante este resultado se recurre a la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para conocer cuál tratamiento es diferente, esta indica que las diferencias ocurren entre los concretos C-A y entre C-E. En otras palabras, entre el concreto A y E no hay diferencia significativa, estos desarrollan resistencias promedio estadísticamente iguales tanto a edades tempranas como avanzadas. El concreto C es el que presenta mayor diferencia, por lo tanto, los concretos realizados con el cemento hidráulico C, a edades avanzadas desarrollan resistencias medias distintas a los otros cementos clase 28 de este estudio.

Las diferencias presentadas por el concreto hidráulico 'C' son con tendencia al desarrollo de resistencias *menores* a edades avanzadas en comparación con los concretos A y E, como ya se había analizado con la figura 50. La prueba de ANOVA viene a recalcar que su

comportamiento característico no es sólo el ganar menor resistencia, sino que es estadísticamente significativa; esto implica que sí existe una diferencia importante de desarrollo de resistencia promedio a edades avanzadas al utilizar el cemento C para concreto hidráulico.

Estos cementos hidráulicos están catalogados bajo la misma clase de resistencia según la INTE C147:2018, sin embargo, como se observó al ser de diferentes proveedores y posiblemente poseer diferentes proporciones de adiciones, generan concretos con comportamientos mecánicos diferenciados.

Los concretos hidráulicos fabricados con cementos 'clase de resistencia AR' corresponden a los concretos hidráulicos B y D. Para estos se tiene que en el 100% de las edades de falla el valor de P es menor al nivel de significancia de 0,05, indicando que se rechaza la hipótesis nula, por lo que, al menos uno de los tratamientos es diferente con respecto de la media. Por lo tanto, independientemente de la edad los resultados de resistencia promedio de estos concretos son estadísticamente diferentes, a pesar de realizarse con cementos comercializados bajo la misma clase de resistencia nominal (AR) y el mismo nombre comercial.

Es recomendable realizar un estudio a nivel químico de los cementos hidráulicos y compararlos con los datos que brindan los proveedores, asimismo determinar la influencia que tienen las variaciones en componentes químicos, en la ganancia de resistencia.

Las tablas de ANOVA también indican el resultado de la suma de cuadrados (SC), que permite medir la variabilidad de la variable dependiente respecto de la media. En la gran mayoría de las pruebas realizadas la variabilidad o error se ubica *dentro* de los grupos o tratamientos, es decir, la mayor dispersión entre los resultados es dentro del mismo tipo de concreto, esto puede ser signo de que los errores no controlados son los que dominan el experimento.

Como se ha comentado anteriormente, los resultados de resistencia a la compresión de este estudio presentan una alta variabilidad y dispersión independientemente del tipo de cemento utilizado. Algunas de las razones más notables en este estudio fueron discutidas en el apartado de *Dispersión de Datos* y otras se presentan en el diagrama de Ishikawa (figura 80).

Cementos hidráulicos

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en los cubos de mortero de cemento hidráulico, en los ensayos realizados en estado fresco y endurecido.

Trabajabilidad (ensayo de Flujo)

La normativa costarricense INTE C147:2018 llama a que los ensayos para mortero sigan la normativa nacional; como se aclaró en la *Metodología* este estudio se basa en sus homólogas ASTM. A continuación, se muestran los ensayos realizados en morteros según esta normativa.

En este estudio no se utiliza cemento Portland, por lo que la norma ASTM C109-20b indica que se debe realizar la prueba de flujo para determinar la cantidad de agua por utilizar en las mezclas de mortero. En la tabla 55 se observa que el porcentaje de flujo con el que se realizó cada mezcla de mortero se encuentra dentro del rango estipulado por la norma ASTM C109-20b de $110\pm 5\%$, asegurando la trabajabilidad requerida.

El porcentaje de agua obtenido para alcanzar este flujo en los cinco cementos hidráulicos utilizados varió entre 61,0% y 63,0%. En investigaciones previas en Costa Rica, con cementos nacionales iguales o similares a los utilizados en este estudio, la cantidad de agua requerida para el flujo ha sido entre 47% y 50% (en el estudio de Carvajal Coto, 2016) y aproximadamente 51% (en el estudio de Hernández Mora, 2018). Molina Hernández & Terán López (2019) en su investigación utilizan cemento hidráulico equivalente a los cementos clase 28 costarricenses y la cantidad de agua requerida para el flujo fue de 49% a 51% aproximadamente.

Como puede verse, existe una amplia diferencia entre el porcentaje de agua obtenido en este estudio y lo que presentan las investigaciones. Esto principalmente puede deberse a que la arena de sílice utilizada difiere con la especificación ASTM C778-17, por lo que podría tener absorción u otros componentes en su matriz que causan la variante en la demanda de agua en las mezclas de mortero, con respecto de investigaciones anteriores.

La ASTM C778-17 indica que los sacos de empaque de la arena de sílice deben estar

correctamente etiquetados con el cumplimiento de norma ASTM C778 y la fuente del material debe ser Ottawa IL, sin embargo, la comercialización de este tipo de arena en el país no es amplia y durante la etapa de proveeduría de este estudio no se encontró ningún proveedor que cumpliera con estas características. Por ello, si se debe utilizar arena de sílice de producción nacional, es recomendable realizar ensayos que permitan conocer su composición química y mineralógica, grado de contaminación y porcentaje de absorción, y con esto estudiar su efecto en los resultados de flujo.

Por otro lado, como se observa en la figura 88, la relación A/C utilizada para el flujo en cada mezcla es diferente, esto es debido a causas como las siguientes:

- en función de la composición química de cada cemento hidráulico varía la relación A/C para alcanzar el requisito de trabajabilidad especificado
- la norma ASTM C109-20b establece el flujo de $110 \pm 5\%$, lo cual abre un rango de porcentajes de agua donde se puede encontrar el flujo especificado. Esto es causa intrínseca de diferencias en la resistencia a la compresión entre los cementos hidráulicos analizados, lo cual puede provocar variaciones entre en los resultados, tema que será analizado en la sección de *Tratamiento Estadístico*, apartado de ANOVA.

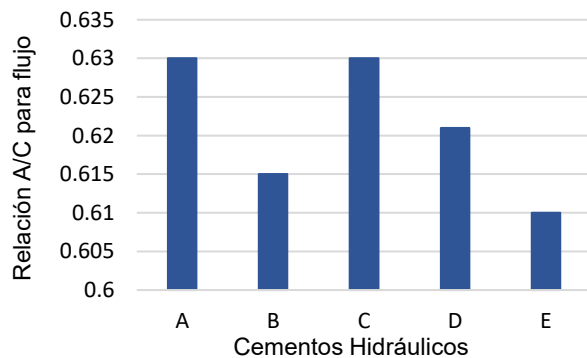


Figura 88. Relación A/C para ensayo de flujo según cada tipo de cemento hidráulico en estudio

Resistencia a la compresión

En la figura 89 mostrada en la página siguiente se presenta el desarrollo porcentual de resistencia a la compresión de los cementos, tomando como 100% el dato obtenido a los 28 días.

Entre los morteros fabricados con cementos de resistencia clase 28 (A, C y E), el cemento hidráulico C desarrolla mayor porcentaje de resistencia temprana; no obstante, a edades avanzadas gana menor porcentaje en comparación con los cementos A y E, los cuales ganan entre 25% y 43% más resistencia que la obtenida a los 28 días.

Como se observa en la figura 63 el desarrollo de resistencia a la compresión del cemento hidráulico C tiende a ser más asintótica. Por lo que el cemento hidráulico C alcanza rápidamente la resistencia que tendrá a los 28 días y posterior a este punto no gana tanto porcentaje de resistencia como los otros dos cementos hidráulicos de su misma clase (A y E).

En el caso de los morteros fabricados con cementos de resistencia clase AR (B y D), a edades avanzadas se tiene que el cemento hidráulico D logra hasta un 29% más de lo obtenido a los 28 días, mientras que el cemento B gana un 13% más. En la figura 64 se observa cómo el cemento hidráulico B a pesar de iniciar con mayor resistencia a la compresión, alrededor de los 40 días disminuye en comparación con el cemento hidráulico D.

En todos los cementos hidráulicos se observa que a edades avanzadas los resultados tienden a una estabilidad, ya que las ganancias porcentuales de resistencia a la compresión son menores en comparación con los primeros 28 días. Los resultados en general tienden al aumento de resistencia. En algunos casos se presenta un comportamiento errático en edades avanzadas como el ejemplo que se presenta en la figura 90 (página siguiente) esto se puede explicar debido a la variabilidad en los resultados, tema que se ampliará en el apartado de *Dispersión de Datos*.

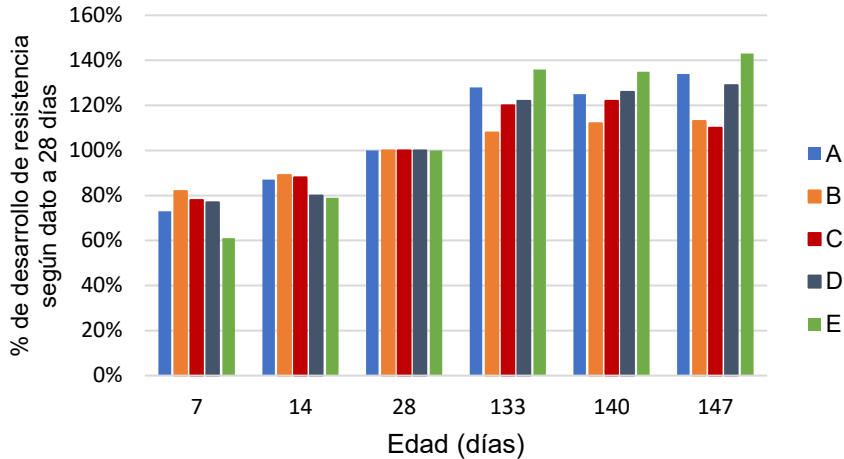


Figura 89. Porcentaje de desarrollo de resistencia según dato obtenido a los 28 días para cementos

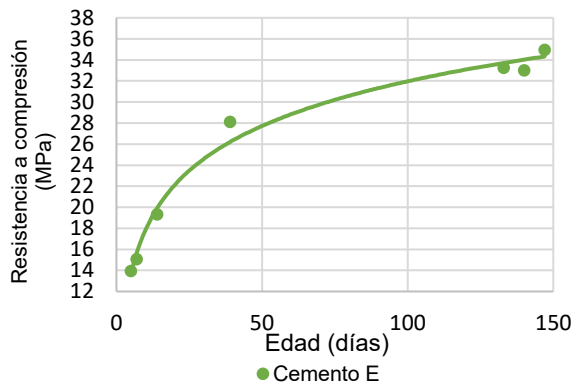


Figura 90. Ejemplo de comportamiento errático en la resistencia a la compresión promedio en edades avanzadas

En las tablas 56 a 60 se presentan los resultados de resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico. Estos se comparan con lo estipulado en la normativa nacional INTE C147:2018.

Según los resultados obtenidos, tanto en los cementos hidráulicos clase 28 como en los cementos hidráulicos clase AR los resultados de resistencia a la compresión son inferiores al requisito de resistencia mínima.

Algunas de las posibles fuentes del incumplimiento en este estudio se presentan a continuación:

- incumplimiento granulométrico en la arena de sílice
- mayor demanda de porcentaje de agua en comparación con investigaciones previas
- el porcentaje de agua obtenido del flujo es requisito para obtener trabajabilidad

adecuada, no para alcanzar resistencias máximas.

- la cantidad de especímenes realizados por tanda, ya que al ser tandas de 12 cubos se superó el tiempo de compactación especificado por ASTM C109-20b (se debe iniciar el moldeo dentro de los 2min 30s después de finalizar la mezcla).

En la tabla siguiente se muestran los tiempos de moldeo obtenidos para el mortero de cemento hidráulico A. Para los demás tipos de mortero pueden observarse en el Apéndice 7.

Tabla 87. Tiempos de moldeo de especímenes de mortero de cemento hidráulico A

Tanda #	Tiempo de moldeo (min)
1	16
2	16
3	17
4	18

Es importante aclarar que las tandas de mínimo 12 cubos fueron necesarias para optimizar el tiempo disponible para realizar los 51 especímenes requeridos por cada tipo de cemento hidráulico.

Por lo tanto, para la verificación del cumplimiento de resistencia a la compresión de los cementos hidráulicos, se recomienda utilizar arena de sílice que cumpla con los estándares internacionales. Algunas sugerencias para mejorar el proceso de fabricación de los cubos de cemento hidráulico se muestran en la sección de *Recomendaciones*.

Tratamiento estadístico- Cementos

Estadísticos descriptivos

En la tabla 61 se presentan la desviación estándar (S) y el coeficiente de variación (CV) de los resultados de resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico. Estos parámetros muestran que existe variabilidad en los resultados, como es de esperar en un estudio experimental de este tipo. Se observan fluctuaciones entre edades de falla, no obstante, se aprecia una tendencia en las edades avanzadas de presentar mayor dispersión, una posible causa de esto es que a edades de 28 días en adelante el número de muestras por edad de falla se aumenta a 10 especímenes.

Para tener resultados representativos de los lotes de mortero y cumplir con requisitos de independencia de los datos para pruebas estadísticas, se realizó una selección aleatoria entre todas las tandas, para cada edad de falla. Por lo que las especificaciones de rango máximo permisible establecidos por la ASTM c109-20b no pueden tomarse como estándar de comparación ya que este rango permisible es para "especímenes *fabricados del mismo lote de mortero*" (sección 14.2).

El modelo experimental aleatorio genera la intervención de dos fuentes de la variabilidad: dentro del lote y entre lotes. Para determinar las posibles fuentes de variabilidad se realizó un análisis de Causa-Efecto cuyos resultados se presentan en la figura 81, las posibles causas de esta variabilidad se analizan en el apartado siguiente: "*Dispersión de datos*".

Dispersión de datos

La dispersión de los datos se presenta de forma detallada en los gráficos de caja mostrados en las figuras de la 65 a 69. En estos se observan algunas edades con un descenso en la mediana (y la media), respecto de la tendencia de crecimiento de cada tipo de mortero. Un ejemplo de esto se observa en la figura 91 mostrada a continuación, a la edad de 140 días el conjunto de datos presenta un descenso en comparación con lo

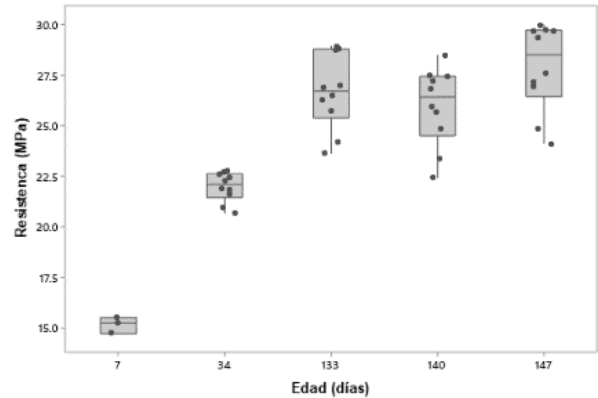


Figura 91. Ejemplo de dispersión de datos obtenida (Mortero de cemento hidráulico A)

obtenido a 133 días.

Entre los diferentes tipos de cemento se observa la tendencia de que, en los últimos especímenes moldeados en cada tanda es donde se da un descenso en los resultados y, por ende, una disminución de la resistencia promedio. Esto podría ser una posible causa del comportamiento errático en los resultados. Sin embargo, se recomienda realizar un estudio donde se analice de forma específica el efecto que puede tener el tiempo de moldeo en el desarrollo de resistencia a la compresión de este tipo de especímenes.

Es importante recordar, como se mencionó anteriormente, que durante el proceso de elaboración de las muestras y por las cantidades fabricadas se tardó en promedio 18 minutos por tanda, superando el tiempo recomendado por la ASTM C109-20b de 2min y 30s (Ver tabla 87).

Por otra parte, en la figura 66 se tiene el gráfico de caja para el cemento B, a los 126 días posee un valor mínimo que se aleja de la tendencia, es incluso menor que los resultados obtenidos a los siete días, sin embargo, no llega a ser un dato atípico debido a la dispersión que presenta este conjunto. A los 140 días el 50% de los valores menos dispersos se concentran mayoritariamente en el Q3 y Q4, mientras que a los 147 días los valores menos dispersos están en el Q1 y Q2.

En el cemento C (figura 67) se presenta el conjunto de datos con la mayor dispersión a los 147 días, posee un rango intercuartil de 7, presenta sus datos agrupados en tres secciones definidas. Sin embargo, al analizar los resultados individuales estos no representan ninguna tendencia marcada.

En la figura 68 se muestra el gráfico de caja del cemento D, la mayor variabilidad se tiene en las edades de 47, 133 y 147 días. Se observa a los 147 días el resultado mayor marcado como valor atípico, este comportamiento se analiza más adelante en la sección de *Valores atípicos*.

Finalmente, en la figura 69 se tiene el gráfico de caja del cemento E, en este se observa la variabilidad más uniforme a través de los diferentes conjuntos, el rango intercuartil es aproximadamente constante a partir de los siete días, exceptuando los 140 días donde se amplía la dispersión.

Una vez analizada la dispersión, se muestran a continuación algunas posibles causas de la variabilidad obtenida en cada tipo de cemento hidráulico; estas se amplían en el Diagrama de Ishikawa (figura 81) y con la técnica de los Cinco porqués (*Apéndice 8*):

- El muestreo por lotes aleatorios involucra dos fuentes de variabilidad: variaciones de lote a lote y dentro del lote, esto aumenta la posibilidad de obtener mayor dispersión
- Exceder los tiempos de moldeo recomendados debido a la cantidad de especímenes fabricados por tanda.
- Composición química de los cementos hidráulicos puede variar según el tipo¹, lo cual sería una causa inherente de variabilidad.
- Variación de fuerza al compactar los especímenes.
- Ausencia de un tiempo previo de entrenamiento y ajuste de variables.
- Incumplimiento en arena de sílice utilizada
- No controlar la temperatura durante las primeras 24 horas de curado.
- Golpes en especímenes al desmoldar.

En la sección de *Recomendaciones* se establecen algunas sugerencias para reducir el efecto de las posibles causas encontradas sobre la variabilidad.

Distribución de los datos

En las tablas 62 a 66 se muestran los valores de P para las pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. La gran mayoría de los tratamientos en cada edad de falla poseen un

valor de P mayor a 0,05 con lo que no se tiene suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

En el cemento D se tiene el único caso donde el valor de P es menor al nivel de significancia de 0,05, esto ocurre a los 147 días. Por lo tanto, aquí se rechaza la hipótesis nula, es decir los datos no siguen una distribución normal.

Para la realización de las pruebas estadísticas de ANOVA y Tukey se debe verificar que los resultados sean normalmente distribuidos ya que son pruebas paramétricas. Con el fin de analizar esta importante edad de falla, ya que representa la mayor edad en análisis y debido a que 97% de los resultados en este estudio demostraron seguir una distribución normal, se decide eliminar los datos individuales que causan la no normalidad en este conjunto.

Como se puede verificar en el *Apéndice 4*, se descartaron los tres cubos con menor resultado de resistencia a la compresión, estos corresponden a los cubos moldeados 30, 37 y 44. Los números 30 y 37 fueron moldeados casi al final en sus correspondientes tandas de 12 cubos, por lo que también pudieron haber sido afectados por sobrepasar el tiempo recomendado de moldeo. El valor de P posterior al descarte es mayor al nivel de significancia con lo cual no se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Valores atípicos

En las tablas 67 a 71 se tienen los resultados de las pruebas de valores atípicos realizadas con el método Grubbs, los resultados en todas las edades muestran un valor de P mayor al nivel de significancia de 0,05 con lo cual se dice que no se tiene suficiente información para rechazar la hipótesis nula de que, *no hay valores atípicos*.

Como efecto de eliminar los tres datos a los 147 días del cemento D (explicados anteriormente), el conjunto transformado posee una baja dispersión en comparación con la tendencia de los datos (desviación estándar 0,53 y rango intercuartil 0,51). En la figura 68 se observa que el dato mayor de este conjunto, el gráfico de caja lo detecta como atípico, sin embargo, al realizar la prueba de Grubbs y la

¹ INTE C147:2018

prueba de Dixon estas no detectan el valor como atípico. Se decide no eliminar este dato debido a que de este set se han descartado tres datos y la dispersión en el conjunto se redujo considerablemente.

Regresión no lineal

En el caso de los morteros de cemento hidráulico los resultados presentan un mejor ajuste con el modelo logarítmico no lineal, el cual se presenta en las figuras 70 a 74.

Para una mejor visualización de la variabilidad de los resultados, los modelos propuestos se basan en su dispersión y no en su comportamiento promedio. De esta manera se puede conocer su dispersión con respecto del modelo y su dispersión en relación con los intervalos de confianza y predicción, muestra más información y permite un análisis más veraz que al utilizar los promedios.

Los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en cada modelo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 88. R^2 modelos logarítmicos cementos

ID Mortero	R^2 modelo con dispersión	R^2 modelo con promedio
A	0,79	0,98
B	0,31	0,82
C	0,41	0,89
D	0,73	0,96
E	0,90	0,99

Como se observa, utilizando el modelo con los promedios los valores son más cercanos a 1, en comparación con los modelos con dispersión. Sin embargo, al utilizar los promedios no se visualizan tendencias en los datos ni posibles valores atípicos. Los estudios basados en el promedio buscan estabilidad en la media más no cualquier hallazgo en el proceso de evaluación de los especímenes que puedan dar como resultado variación en los datos individuales que permita tomar decisiones respecto del control de calidad en el proceso y en los materiales.

La figura 92 mostrada a continuación es un ejemplo de modelo obtenido; los modelos para todos los morteros pueden observarse con detalle en las figuras 70 a 74 de *Resultados*.

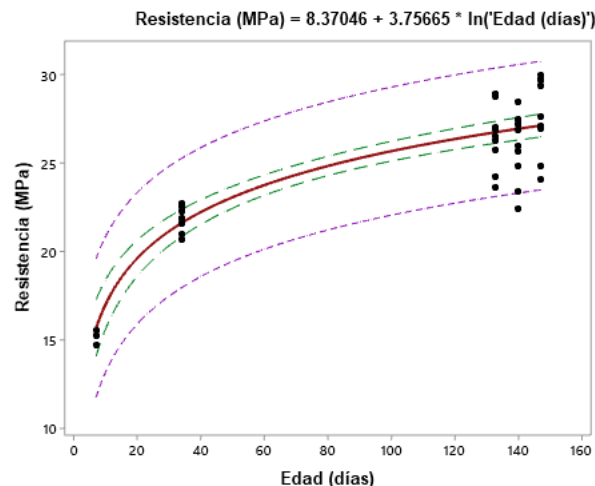


Figura 92. Ejemplo de modelo de regresión (Cemento A)

El intervalo de confianza (IC) al 95% se indica en color verde, el cual en todos los morteros es más angosto ya que su cálculo es basado en las medias de los datos, por lo tanto, hay un 95% de confianza de que la media de los resultados se ubique en el rango de este intervalo. En color morado se indica el intervalo de predicción (IP) al 95%, para todos los morteros este intervalo es más amplio ya que su cálculo se basa en los valores individuales por lo que está influenciado por la dispersión de los datos. Este indica que existe una probabilidad del 95% de que un resultado individual se ubique en el rango de este intervalo.

Para predecir resistencias a la compresión del cemento hidráulico, se pueden utilizar procedimientos como los descritos en este documento para construir las ecuaciones, tomando en cuenta las variables del proceso según la condición que corresponda.

ANOVA de un factor y prueba de Tukey

La comparación con prueba de ANOVA se realizó entre los morteros fabricados con la misma clase de resistencia del cemento hidráulico: *clase 28* o *clase AR*, en cada edad de falla. Los resultados se pueden observar en las tablas 72 a 82 de *Resultados*, para mayor detalle ver *Apéndice 6*.

Los cementos hidráulicos 'clase de resistencia 28' corresponden a los cementos A, C y E. En la mayoría de las edades de falla (excepto

a siete días) el valor de P de la prueba ANOVA es menor a 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula, indicando que al menos uno de los tratamientos es diferente con respecto de la media. Se recurre entonces a la prueba de Tukey para conocer cuál(es) tratamientos son diferentes, esta indica que la diferencia significativa ocurre entre todos los morteros. Por lo tanto, durante la mayoría de las edades en estudio los resultados de resistencia promedio de estos morteros son estadísticamente diferentes, a pesar de realizarse con cementos comercializados de la misma clase de resistencia nominal (28).

Los cementos hidráulicos 'clase de resistencia AR' corresponden a los cementos B y D. En la mayoría de las edades de falla (excepto a 147 días) el valor de P de la prueba de ANOVA es mayor a 0,05 por lo que no se tiene suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, indicando que todas las medias son iguales.

Comparación resistencia Concreto-Cemento

Las figuras de la 75 a la 79 de *Resultados* representan la comparación del desarrollo de resistencia a la compresión entre los concretos y morteros realizados con el mismo tipo de cemento hidráulico.

Los especímenes fabricados con los cementos hidráulicos A, C, D y E, presentan la misma tendencia de comportamiento más no el mismo alcance de resistencia a la compresión debido a que los agregados utilizados, la proporción de cemento hidráulico y la relación A/C entre ambos materiales varía

En el caso del mortero de cemento hidráulico B (figura 76), se observa diferencia en el comportamiento entre ambos materiales, pues ambas curvas siguen una tendencia logarítmica distinta, en el caso del mortero esta curva es más asintótica a lo largo del tiempo. El descenso en la resistencia a compresión del mortero en comparación con el concreto homólogo puede deberse a las causas explicadas al final de esta sección.

En cuanto a los concretos y morteros fabricados con cemento hidráulico clase 28, en términos de la ganancia de resistencia ambos materiales se comportan de la misma forma, es

decir, el cemento E es el que desarrolla más resistencia en términos absolutos y el cemento C es el que gana menos resistencia en esta clase.

De las pruebas de ANOVA se tiene que, en concretos fabricados con cementos hidráulicos clase 28 solamente el concreto C desarrolla resistencia promedio estadísticamente diferente a edades avanzadas, mientras que en los morteros fabricados con cementos hidráulicos clase 28 el desarrollo de resistencia promedio es estadísticamente diferente en todos los morteros (A, C y E) a lo largo de todas las edades de falla.

En los concretos fabricados con cemento hidráulicos clase AR, las pruebas de ANOVA establecieron que ambos (B y D) desarrollan resistencia promedio estadísticamente diferente a lo largo de todas las edades de falla. Sin embargo, en el caso de los morteros se tiene lo contrario, la resistencia promedio en estos es estadísticamente igual.

Algunas de las posibles causas de este comportamiento diferenciado entre materiales son las siguientes:

- En el concreto hidráulico se toma en cuenta la absorción de los agregados en el diseño, para establecer la relación A/C, en el mortero el agregado estándar no debería presentar absorción, si el agregado para mortero no cumple con los estándares puede influir en la relación A/C del mortero de cemento hidráulico.
- En cada mortero se utilizó una relación A/C diferente entre ellos debido a que la norma ASTM C109-20b establece el flujo de $110 \pm 5\%$, el cual se puede encontrar con diferentes porcentajes de agua.
- Las reacciones del cemento hidráulico con los respectivos agregados de cada material pueden ser variables.
- Variaciones debidas al proceso de fabricación de los especímenes.
- Las pruebas de ANOVA de 14, 28, 133 y 140 días se realizaron con la simulación planteada en la *Metodología*, por lo que los resultados corresponden a una simulación de los datos de falla de estas edades.

Aplicación en Ingeniería

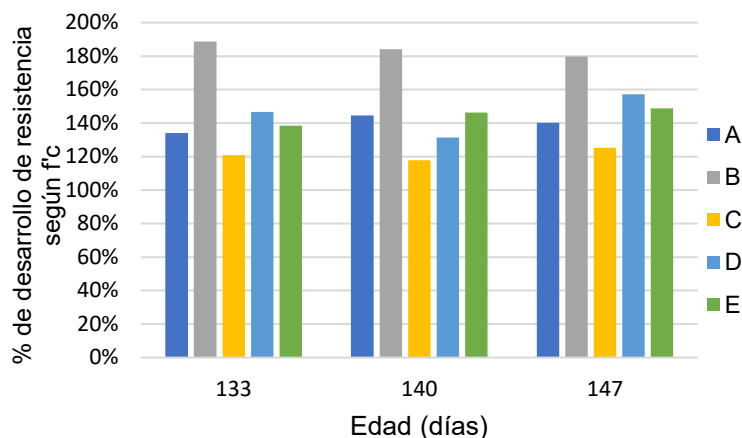


Figura 93. Desarrollo porcentual de resistencia de los concretos a edades avanzadas en comparación con $f'c$

Porcentajes de aumento de resistencia a edades avanzadas

Entre los concretos fabricados con los cementos hidráulicos clase 28 se tiene que, hasta los 147 días, con los cementos 'A' (MM/B (P-C)-28) y 'E' (MM/C (C-P)-28) se gana aproximadamente hasta un 33% más de resistencia a la compresión que la obtenida a 28 días. Y según lo mostrado en la figura anterior, estos concretos pueden llegar a desarrollar en promedio hasta 40% a 45% más resistencia que la de diseño ($f'c$).

Este es un hallazgo que se debe tomar en cuenta al diseñar concreto estructural, ya que como se menciona en la sección 8.1.1 del Código Sísmico de Costa Rica, Revisión 2014 (CSCR), durante un sismo los elementos estructurales se comportan en función de su capacidad real y no de los valores de análisis, por ello es probable exceder el rango elástico. Por lo tanto, "el diseño sísmico no solo debe satisfacer valores mínimos de resistencia sino también *debe limitar sus valores máximos*".

Los aspectos del diseño estructural que requieren parámetros de resistencia a la compresión del concreto hidráulico se basan en el $f'c$, es decir, la resistencia de *diseño* a 28 días. No toman en cuenta la resistencia que puede llegar a ganar este material hasta alcanzar su estabilidad. En este estudio se demuestra que la estabilidad puede ocurrir incluso después de los 100 días.

El CSCR indica que "se deben evitar fallas frágiles causadas por deformación excesiva del

concreto" (p.8/2), el no tomar en cuenta este porcentaje extra de resistencia podría ocasionar este tipo de fallas ya que la ganancia de hasta un 45% más de resistencia que la de diseño puede generar elementos de concreto más rígidos y, por ende, menos dúctiles, condición requerida ante sollicitaciones sísmicas.

Lo anterior también debe tomarse en cuenta en concretos fabricados con el cemento hidráulico C (MM/B (P-C)-28). Sin embargo, este demostró desarrollar un menor porcentaje de ganancia de resistencia a la compresión en comparación con A y E (hasta un 18% más que resistencia que la obtenida a 28 días), por lo que, en caso de utilizar el método de diseño de mezcla del ACI 211.1-91(2002) sin modificaciones, un posible uso de este cemento hidráulico sería en elementos estructurales donde sea crucial no aumentar sustancialmente su rigidez y no obtener fallas frágiles, como lo son por ejemplo las vigas.

Entre los concretos fabricados con los cementos hidráulicos clase AR se tiene que, hasta los 147 días, con los cementos 'B' (MC/A-AR) y 'D' (MP/A-AR) se gana aproximadamente entre 23% y 29% más de resistencia a la compresión que la obtenida a 28 días. Y según lo mostrado en la figura anterior, en el caso del concreto D puede llegar a desarrollar en promedio hasta 45% más resistencia que la de diseño ($f'c$). Mientras el concreto B puede llegar a ganar en promedio 84% más que la resistencia de diseño ($f'c$).

Esto debe tomarse en cuenta con rigurosidad en el diseño de concreto estructural al

utilizar estos cementos hidráulicos, por las mismas razones mencionadas anteriormente.

Un posible uso de los concretos hidráulicos con cemento AR es en elementos de concreto prefabricados donde por las condiciones del mercado se requiere una producción rápida de las piezas terminadas, donde se están alcanzando altas resistencias tempranas sin uso de aditivos; sin embargo, de igual manera se debe tener en consideración los efectos sobre la rigidez antes comentados.

Aunado a estos comentarios, el diseñador debe tomar en cuenta tanto los efectos de rigidez de la estructura como las condiciones de exposición a las que se encontrarán los elementos de concreto reforzado y los posibles agentes que pueden afectar la resistencia a la compresión del concreto hidráulico a largo plazo, por ejemplo:

- Corrosión del acero
- Carbonatación
- Ataque por sulfatos
- Exposición a salinidad marina, entre otros

Control de calidad

En el método de diseño de mezcla utilizado en este estudio se tomó en cuenta el factor de mayoración f'_{cr} con el cual se diseña para un 34% más de resistencia que el f'_c (como “factor de seguridad”). En la figura 85 se mostraron los porcentajes de resistencia ganados en cada concreto hidráulico tomando como referencia f'_c y f'_{cr} . A continuación, se presenta en resumen cuánto porcentaje extra ganó cada concreto hidráulico según el f'_c :

Tabla 89. Porcentaje de resistencia ganado según f'_c

ID Concreto	Porcentaje extra ganado tomando como base f'_c
A	8%
B	46%
C	6%
D	27%
E	13%

Como se observa, en cuatro de los cinco concretos hidráulicos fabricados no se logró igualar el f'_{cr} propuesto. Se debe tomar en cuenta que el presente estudio se realizó en condiciones controladas (laboratorio) donde se involucran

variables diferentes a las que pueden intervenir en un proceso en campo. Por lo que, si se utiliza este mismo método para el diseño de mezclas de concreto sin realizar ajustes para alcanzar el f'_{cr} o sin utilizar este factor de mayoración, en campo existe una alta posibilidad de no alcanzar las resistencias mínimas de diseño debido a la gran cantidad de variables existentes en este ambiente.

Un ejemplo de esto es que según un reciente estudio sobre la calidad del concreto hecho en obra en la Gran Área Metropolitana (GAM), “un 45% de los concretos no cumplen con el requisito de la resistencia mínima a la compresión de 210 kg/cm² y un 72% de los sitios muestreados no contaban con un control de calidad del concreto, además, se observó que el principal problema radica en la falta de un adecuado diseño de mezcla” (ICCYC & CFIA, 2020).

Por lo tanto, en condiciones de campo a nivel nacional es necesario establecer diseños de mezcla y procesos definidos para la fabricación del concreto hidráulico, así como adecuados controles de calidad en obra.

Técnicas complementarias

El uso de las *listas de verificación* mostradas en las tablas 23 y 24 de este documento (detalles en *Apéndice 3*), fue una práctica constante durante la fabricación de los cilindros de concreto y cubos de mortero. Su uso permite presentar el procedimiento como una serie de pasos en orden lógico, disminuye que se olviden pasos, cantidades específicas o materiales. Sin embargo, luego de superar las semanas de trabajo experimental y al contar con mayor experiencia en la fabricación de especímenes se afirma que las listas propuestas pueden mejorarse al incluir algunas prácticas aprendidas en el proceso (mostradas en la sección de *Recomendaciones*).

Con las técnicas de los *Cinco porqués* e *Ishikawa* se logró encontrar la mayoría de las posibles fuentes de variabilidad en los resultados que se dan en el proceso la fabricación de los especímenes y con esto brindar recomendaciones para mejorar el proceso y colaboren en la disminución de la dispersión de los resultados.

Conclusiones

En este trabajo se analizó el comportamiento de resistencia a la compresión de concretos y cementos hidráulicos de producción costarricense, comparando mediante pruebas estadísticas los cementos clase de resistencia 28 y los cementos clase AR. De acuerdo con los resultados, se extraen las siguientes conclusiones.

AGREGADOS PARA CONCRETO HIDRÁULICO

- La caracterización granulométrica del agregado fino presenta incumplimiento en el tamiz 0,15 mm y 0,075 mm y el agregado grueso presenta incumplimiento en el tamiz 9,5 mm. A pesar de esto, se alcanzaron las resistencias de diseño en los concretos hidráulicos por lo que el incumplimiento no representó afectación significativa.
- El resultado obtenido del ensayo de colorimetría (ASTM C40-20) demuestra que la porción del agregado fino que pasa el tamiz 0,075 mm (N°200) no contiene impurezas orgánicas.
- La granulometría del agregado fino fue construida para acercarse a los parámetros estipulados en ASTM C33-18 debido a que la fuente original no cumplía por presentar mayor porcentaje de material grueso. Con esto se consiguió que los parámetros obtenidos del agregado fino no se vean influenciados por las características de absorción y gravedad específica de material grueso.
- El agregado grueso presenta un TMN (Tamaño Máximo Nominal) de 12,5 mm, el cual es conocido comercialmente a nivel nacional como piedra "quinta", la cual es de uso común en construcción a nivel nacional.

DISEÑO DE MEZCLA

- Tomando en cuenta que el método de Diseño de Mezcla utilizado (ACI 211.1-91, reprobado 2002) es aproximado y en

función de los resultados de trabajabilidad y resistencia, este requiere ajustes para adaptarse a las características de agregados pétreos y cementos hidráulicos nacionales. Principalmente en los siguientes aspectos:

- Parámetros de los agregados pétreos costarricenses
 - Parámetros de desempeño de los cementos hidráulicos costarricenses
 - Cantidad de agua por m³ de concreto para alcanzar el asentamiento de diseño
 - Correspondencia entre la relación A/C y la resistencia a la compresión del concreto hidráulico
- Al ser un método de aproximación genera de manera implícita variabilidad entre mezclas de concreto hidráulico. Los resultados demuestran que a pesar de que las proporciones de las mezclas de concreto se realizaron en función de la misma resistencia de diseño ($f'c$), se obtuvieron diferentes resistencias a la compresión a los 28 días. En los concretos hidráulicos fabricados con cementos *clase 28*, $f'c$ fue sobrepasada en 6% a 13% y en los concretos fabricados con cementos *clase AR* se sobrepasó en 27% y 46%.
 - De acuerdo con los resultados obtenidos, solamente el concreto hidráulico B superó la resistencia requerida de diseño ($f'cr$). Los cuatro concretos restantes no igualaron el 34% más de resistencia que se propone en el diseño con el factor de mayoración del $f'cr$. Esto podría ser causado por el método de diseño de mezcla al ser de aproximación.

CONCRETOS HIDRÁULICOS

- Las pruebas de análisis de varianza (ANOVA) muestran que el desarrollo promedio de resistencia a la compresión entre los concretos hidráulicos difiere, a pesar de fabricarse con cementos de la misma clase. En el caso de los concretos fabricados con cemento hidráulico *clase 28*, el concreto 'C' en edades avanzadas es estadísticamente diferente a los concretos 'A' y 'E'. Mientras que los concretos hidráulicos elaborados con cementos *clase AR* (B y D) desarrollan resistencia promedio estadísticamente diferente a lo largo de todas las edades analizadas en este estudio.
- Según los resultados obtenidos del análisis de varianza los concretos fabricados con los cementos hidráulicos 'A' y 'E' generan resistencias promedio estadísticamente iguales tanto a edades tempranas como avanzadas, por lo que, contemplando únicamente el parámetro de desarrollo de resistencia a la compresión, el uso de uno u otro en concreto hidráulico no representa una diferencia estadísticamente significativa.
- Tanto el concreto hidráulico E (*Clase 28*) como el D (*clase AR*), después de los 120 días igualan la resistencia a la compresión y este comportamiento se mantiene constante a partir de este punto, para las edades en estudio.
- Conocer el comportamiento del concreto hidráulico posterior a los 28 días permite determinar cuánta diferencia porcentual se desarrolla con respecto del valor de diseño de f_c y esto es importante, ya que una mayor ganancia de resistencia genera elementos más rígidos los cuales podrían presentar fallas frágiles y estas deben evitarse para garantizar un comportamiento dúctil durante sollicitaciones sísmicas.

CEMENTOS HIDRÁULICOS

- La arena de sílice utilizada en el estudio incumple con la especificación ASTM C778-17. Lo anterior es una posible fuente de variabilidad e incumplimiento en los resultados de resistencia a la compresión de los morteros de cemento hidráulico.

- Los cementos hidráulicos desarrollan diferente resistencia a la compresión, a pesar de ser de la misma clase, esto puede deberse a que la norma INTE C147:2018 establece rangos para los componentes en cada clasificación, generando distintas opciones para los proveedores.
- Para el mismo tipo y marca de cemento hidráulico, las curvas de desarrollo de resistencia tanto de concreto como de mortero poseen la misma tendencia logarítmica.

MODELOS DE REGRESIÓN

- Cuando los modelos de regresión se realizan con la dispersión de los datos y no con la media aritmética, los intervalos de confianza y predicción, así como los modelos y la ecuación obtenida, ofrecen la mayor representatividad del fenómeno de desarrollo de resistencia a la compresión.
- Si bien los modelos de regresión con la dispersión de los datos permiten analizar la variabilidad, los gráficos de caja permiten una mejor visualización de los comportamientos y tendencias por lo que al ser utilizados como complemento uno del otro se identifican las posibles fuentes de la variabilidad.
- Los valores promedio de resistencia a la compresión siempre tienen asociada variabilidad, por lo que deben reportarse con su respectivo intervalo de confianza o predicción según se requiera, definiendo así un rango donde es posible encontrar la media o un dato individual.

VARIABILIDAD

- Al seleccionar los especímenes de falla de diferentes lotes, para cumplir con requisitos estadísticos de aleatoriedad, se involucran dos fuentes intrínsecas de variabilidad en los resultados: variaciones de lote a lote y variación dentro del lote.
- Las normas ASTM C39-20 y ASTM C109-20b presentan límites de desviación estándar y rango aceptable que no son aplicables en estudios donde la resistencia promedio se obtiene de especímenes fabricados en distintos lotes.
- Los tiempos de fabricación de los especímenes de concreto hidráulico

rondan los 30 minutos por tanda y en los especímenes de mortero rondan los 17 minutos por tanda, incumpliendo con lo recomendado en ASTM C109-20b y ASTM C172- 17 por los procesos de rigidez. Por ello los tiempos de moldeo corresponden a una de las principales causas de variabilidad en los resultados.

- Una de las posibles fuentes de variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión es la fuga de agua en los moldes durante los procesos de elaboración de los especímenes de concreto, debido a la incorrecta verificación del cierre de los moldes.
- Tomando en cuenta que el presente estudio fue realizado en condiciones controladas de laboratorio y los resultados obtenidos reflejan que se debe tener especial cuidado en los agentes que causan variabilidad, pues se tienen concretos hidráulicos que sólo desarrollan un 6% del f'_{cr} propuesto. Por lo que en condiciones de campo, debido a la gran cantidad de variables que intervienen, debe existir control sobre las metodologías de diseño, las fuentes de variabilidad y sobre los procesos de fabricación del concreto hidráulico.

Recomendaciones

COMPONENTES DE CONCRETO HIDRÁULICO

- Con respecto del material pasando el tamiz 0,075 mm (N°200) para determinar si este contribuye en la resistencia del concreto hidráulico, no sólo por porcentaje pasando sino por efecto químico, es necesario realizar ensayos que permitan determinar la cantidad de sustancias deletéreas que contiene. Por ejemplo:
 - Análisis Petrográfico (ASTM C295)
 - Análisis Hidrométrico (ASTM D422)
 - Determinación de absorción de azul de metileno (AASHTO T330)
 - Difracción de rayos X
- Asegurar el cumplimiento de los agregados pétreos para concreto y mortero hidráulico, con el fin de reducir las fuentes de variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión.
- Realizar un estudio químico a los cementos hidráulicos y compararlo contra propiedades mecánicas, para determinar si existe o no una relación entre la composición de cada cemento y las diferencias en el desarrollo de resistencia a la compresión.

COMPONENTES DEL MORTERO

- Es recomendable realizar ensayos a la arena de sílice de producción nacional, para conocer su composición química, grado de contaminación, porcentaje de absorción y estudiar su efecto en los resultados del ensayo de flujo y en el desarrollo de resistencia a la compresión del cemento hidráulico.

MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLA

- Se recomienda realizar una investigación a nivel nacional donde se determinen las características de los agregados pétreos comercializados en el país y el

desempeño de los cementos hidráulicos costarricenses. Con el propósito de generar una base de datos que permita el ajuste del procedimiento propuesto por el ACI 211.1-91 (reaprobado 2002) hacia los parámetros de materiales costarricenses.

- Si se utiliza el método sin modificación, tomar en consideración que es aproximado, por lo que es recomendable realizar mezclas de concreto hidráulico de prueba, con el fin de conocer parámetros en estado fresco y endurecido, como el asentamiento y la resistencia a la compresión, para verificar el diseño realizado y ajustarlo de ser necesario.

LISTAS DE VERIFICACIÓN

- Incluir los siguientes aspectos, a las Listas de Verificación presentadas en este informe:
 - “Todas las herramientas requeridas se verifican al menos un día antes de realizar las mezclas de concreto y mortero hidráulico.”
 - “Se revisa la fecha recomendada de uso de todos los sacos de cemento hidráulico que se utilizarán en la fabricación tanto del concreto como del mortero hidráulico.”

EQUIPO

- Es recomendable dar mantenimiento constante a los moldes de acero para cubos, con el fin de evitar que en estos se produzca óxido.
- Se recomienda hacer un estudio de localización de las muestras dentro de la cámara húmeda y determinar si la posición tiene efecto sobre la variabilidad de los resultados de resistencia a la compresión.

TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

- Si se desea realizar un estudio similar al presentado, con más especímenes. Se recomienda verificar que el laboratorio cuente con los recursos materiales y humanos necesarios.
- Explorar el uso de software estadísticos que permitan programar procesos, ya que tienen más flexibilidad cuando se debe realizar pruebas repetitivas o se desea establecer un método específico para analizar datos. Por ejemplo, Matlab, R, Python, entre otros.
- Realizar un estudio que permita establecer los parámetros de desviación estándar y rango aceptable con los que se puedan comparar resultados obtenidos de especímenes realizados en más de una tanda, debido a que las normas ASTM C109-20b y C39-20 no incluyen este tipo de precisión llamada "Single Operator-Multi Batch".

ESTUDIOS RECOMENDADOS

Estos son algunos posibles estudios que se derivan del presentado en este informe.

- Realizar un estudio similar al presentado, con cementos hidráulicos con diferentes fechas de producción o fabricados en diferentes plantas de producción, para evaluar repetibilidad y reproducibilidad de los resultados de resistencia a la compresión, de los proveedores.
- Plantear un estudio donde se investigue el efecto de rigidez, según los cementos hidráulicos, a través del tiempo en los distintos elementos de concreto estructural.
- Hacer un estudio estadístico de la variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión en concreto fabricado en campo.
- Es recomendable que los reglamentos técnicos y decretos nacionales hagan referencia a la normativa técnica vigente y esta última debería actualizarse con mayor frecuencia de acuerdo con la reglamentación homóloga internacional.

EN CONDICIONES DE CAMPO

- Es recomendable establecer diseños de mezcla en obra, que hayan sido

previamente probados y transmitirlos de manera correcta a los colaboradores.

- Conservar los agregados y cementos hidráulicos en condiciones adecuadas de almacenamiento.
- Utilizar equipo que se encuentre en condiciones óptimas como por ejemplo la batidora.

A continuación, se presenta una lista de recomendaciones para *estudiantes*, en estudios similares al presentado en este informe, con el fin de mejorar el proceso de fabricación de los especímenes y disminuir la variabilidad en los resultados de resistencia a la compresión:

Etapa de planificación previa:

1. Incluir dentro del cronograma un período de preparación o entrenamiento previo, acompañado de ser posible por personal técnico, con la finalidad de practicar los procedimientos de mezclado y moldeo y detectar posibles errores. Además, esto permite la verificación o ajuste del método de diseño de mezcla.
2. En esta etapa previa se deben medir tiempos de moldeo y así verificar la cantidad de cilindros o cubos a confeccionar por tanda y determinar si se requiere una cuadrilla de trabajo.
3. Al seleccionar la cantidad de especímenes a realizar por tanda, tomar en cuenta la recomendación acerca del tiempo de confección de las normas ASTM C172 y C109, además de considerar que esta cantidad debe permitir un adecuado moldeo de todos los especímenes sin que se produzca fraguado inicial y sin requerir excesivo remezclado que rompa los cristales ya formados en la pasta de cemento hidráulico.
4. Adecuar un espacio ergonómico de trabajo para el moldeo de los cilindros (a cierta altura sobre el nivel del suelo) para una postura cómoda durante el proceso y que facilite mantener fuerza de compactación constante.
5. En caso de utilizar cuadrillas de trabajo todos los miembros deben estar familiarizados con el proceso.

Etapas de verificación de métodos y materiales:

6. Realizar pruebas de estanqueidad a los moldes (Norma ASTM C470) y verificar el correcto cierre de estos antes de utilizarlos. En caso de presentar fugas se recomienda colocar grasa en pasta o vaselina fuera de las juntas, puede funcionar un material como plastilina o arcilla de modelar, que actúen como sello e impida la salida de agua.
7. Verificar que el mazo utilizado para vibración de los moldes cilíndricos para concreto hidráulico, tenga el peso indicado en norma ($0,6\pm 0,2\text{kg}$) para lograr una densificación óptima de los especímenes.
8. Verificar el cumplimiento de los agregados pétreos con las normas de caracterización respectivas, en caso de no cumplir determinar el impacto de esta posible fuente de variabilidad en los concretos o morteros por estudiar.
9. Evitar el uso de moldes (para cilindros y cubos) que presenten óxido en sus paredes internas. Estos se pueden lijar, sin embargo, este proceso debe realizarse de forma tal que no se elimine la planicidad de las paredes ni se modifiquen las dimensiones.
10. Asegurar una correcta limpieza de los moldes con el fin de evitar que los restos de mezclas anteriores queden en ellos, impidiendo su adecuado cierre.
11. Al determinar la masa de un mismo tipo de agregado utilizar la misma balanza con la finalidad de disminuir variabilidad en los resultados.

Durante la fabricación de especímenes:

12. Es recomendable que una persona externa a la cuadrilla de trabajo revise el proceso con las listas de verificación con el fin de tener objetividad en las observaciones.
13. Utilizar un cronómetro para medir los tiempos totales de duración de mezclado y moldeo tanto en cilindros como en cubos.
14. Mezclar un volumen adecuado de concreto según el volumen de la batidora utilizada para evitar el desperdicio de material o sobrecargar el equipo.
15. Durante el proceso de moldeo mantener los parámetros de elaboración constantes

como por ejemplo la fuerza ejercida por el operario durante la compactación.

16. Anotar cualquier hallazgo que suceda durante la fabricación de los especímenes y durante el desmolde de estos.
17. Utilizar los moldes siempre en el mismo orden durante los moldeos y enumerar los especímenes de acuerdo con su número de moldeo.
18. Al finalizar el moldeo cubrir los especímenes con plástico o algún material no absorbente para disminuir la pérdida de agua por evaporación.

Posterior a la fabricación de especímenes:

19. Al utilizar moldes de cilindros que no poseen bisagra para abrirse, realizar el desmolde cuidadosamente y entre dos personas para evitar alguna alteración en los especímenes como por ejemplo golpes.
20. En el momento de fallar, es recomendable que todos los especímenes estén en condición húmeda. Si, debido a la cantidad por fallar, los especímenes deben permanecer mucho tiempo fuera de la cámara húmeda, se debe considerar una manera para mantenerlos húmedos, como un rociador manual (botella con aerosol) o paños húmedos.

Apéndices

Los apéndices generados se presentan adjuntos a este documento y corresponden a los listados a continuación:

- **Apéndice 1.** Caracterización de Agregados Gruesos y Finos
- **Apéndice 2.** Diseño de Mezcla de Concreto Hidráulico
- **Apéndice 3.** Listas de Verificación
- **Apéndice 4.** Resultados de resistencia a la compresión de Concreto y Mortero Hidráulico
- **Apéndice 5.** Tratamiento Estadístico Concretos Hidráulicos
- **Apéndice 6.** Tratamiento estadístico Morteros de Cemento Hidráulico
- **Apéndice 7.** Resultados Ensayo de Flujo para Morteros de Cemento Hidráulico
- **Apéndice 8.** Técnica de los Cinco porqués para Ishikawa

Anexos

Los anexos que se presentan a continuación corresponden a:

- **Anexo 1.** Equivalencia entre ASTM 1157 y la INTE C147. Autor: INTECO (2018)
- **Anexo 2.** Composición de los cementos hidráulicos costarricenses para su clasificación. Autor: INTECO (2018)

Tabla A1. Equivalencia entre ASTM C1157 y la INTE C147:2018

Tipo de cemento hidráulico ASTM C1157	Tipo de cemento hidráulico INTE C147
GU	I-28, ME-28, MF-28, MP-28, MC-28, MM-28
HE	I-AR, ME-AR, MF-AR, MP-AR, MC-AR, MM-AR
MS	I-25-MS, ME-25-MS, MF-25-MS, MP-25-MS, MC-25-MS, MM-25-MS
HS	I-25-AS, ME-25-AS, MF-25-AS, MP-25-AS, MC-25-AS, MM-25-AS
MH	I-21-MH, ME-21-MH, MF-21-MH, MP-21-MH, MC-21-MH, MM-21-MH
LH	I-21-LH, ME-21-LH, MF-21-LH, MP-21-LH, MC-21-LH, MM-21-LH

Fuente: INTE C147:2018

Tabla A2. Composición de los cementos hidráulicos para su clasificación

Tipos	Denominación	Tipo/Grado de sustitución	Clínter	Escoria de Alto Horno	Humo de Sílice	Puzolanas	Caliza	Componentes minoritarios adicionales
Tipo I	Cemento Portland Ordinario (CPO)	Tipo I	95 - 100	-	-	-	-	0 - 5
Tipo MP	Cemento Hidráulico con; Puzolana, Ceniza volante, Esquisto	MP / A	80 - 94	-	-	06 - 20	-	0 - 5
		MP / B	65 - 79	-	-	21 - 35	-	0 - 5
		MP / C	45 - 64	-	-	36 - 55	-	0 - 5
		MP / D	20 - 44	-	-	56 - 80	-	0 - 5
Tipo MC	Cemento Hidráulico con Caliza	MC / A	80 - 94	-	-	-	06 - 20	0 - 5
		MC / B	65 - 79	-	-	-	21 - 35	0 - 5
		MC / C	45 - 64	-	-	-	36 - 55	0 - 5
Tipo MM	Cemento Hidráulico Modificado Mixto	MM / A	80 - 94			06 - 20		0 - 5
		MM / B	65 - 79			21 - 35		0 - 5
		MM / C	45 - 64			36 - 55		0 - 5
		MM / D	20 - 44			56 - 80		0 - 5
		MM / E	5 - 19			81 - 95		0 - 5
Tipo ME	Cemento Hidráulico con Escoria de Alto Horno	ME / A	80 - 94	06 - 20	-	-	-	0 - 5
		ME / B	65 - 79	21 - 35	-	-	-	0 - 5
		ME / C	45 - 64	36 - 55	-	-	-	0 - 5
		ME / D	20 - 44	56 - 80	-	-	-	0 - 5
		ME / E	5 - 19	81 - 95	-	-	-	0 - 5
Tipo MF	Cemento Hidráulico con Humo de Sílice	MF/A	90 - 94	-	06 - 10	-	-	0 - 5

Nota. Los porcentajes mostrados en la tabla, se calculan con respecto a la suma de los componentes principales y minoritarios, sin tomar en cuenta el sulfato de calcio y cualquier aditivo adicionado. El contenido total del cemento es la suma de los componentes principales, componentes minoritarios, sulfato de calcio y aditivos.

Fuente: INTE C147:2018

Referencias

- ACI 211.1 Committee. (1991). *ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills, MI, USA.
- ACI 214R Committee. (2011). ACI 214R-11 Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. En *American Concrete Institute*. Farmington Hills, MI, USA.
- ACI 318 Committee. (2014). *ACI 318SUS-14 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural* (2014a ed.). Farmington Hills, USA: American Concrete Institute.
- Aguirre, A. M., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. *Materiales de Construcción*, 63(309), 7–38. <https://doi.org/10.3989/mc.2013.00313>
- Al-Chaar, G. K., & Alkadi, M. (2013). Natural Pozzolan as a Partial Substitute for Cement in Concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 7(1), 33–42. <https://doi.org/10.2174/1874836801307010033>
- American Concrete Institute. (2010). *ACI 301-10 Specifications for Structural Concrete*. Recuperado de http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI_301-10_Specifications_for_Structural_Concrete_MyCivil.ir.pdf
- ASTM. (2015). ASTM C670-15 Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods. En *American Society for Testing and Materials*. <https://doi.org/10.1520/C0670-15.2>
- ASTM. (2016). ASTM E178-16a Dealing With Outlying Observations. En *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/E0178-16A.2>
- ASTM. (2017a). *ASTM C172 -17 Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0172>
- ASTM. (2017b). *ASTM C778-17 Standard Specification for Standard Sand*. <https://doi.org/10.1520/A0323-05.2>
- ASTM. (2018). *ASTM C33-18 Standard Specification for Concrete Aggregates*. <https://doi.org/10.1520/C0033>
- ASTM. (2020a). ASTM C109-20b Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2 in or 50 mm cube specimens). En *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/C0109>
- ASTM. (2020b). ASTM C131-20 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large -Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. En *American Society for Testing and Materials*. <https://doi.org/10.1520/C0131>
- ASTM. (2020c). ASTM C39-20 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. En *Annual Book of ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/C0039>
- Barreto Villanueva, A. (2012). El progreso de la Estadística y su utilidad en la evaluación del desarrollo. *Papeles de población*, (73), 241–271.
- Bouza Herrera, C. N. (2018). *Modelos de Regresión y sus aplicaciones*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Carlos_Bouza/publication/323227561_MODELOS_DE_REGRESION_Y_SUS_APLICACIONES/links/5a871265a6fdcc6b1a3abe40/MODELOS-DE-REGRESION-Y-SUS-APLICACIONES.pdf
- Cabrera, G., Zanazzi, J. F., Zanazzi, J. L., & Boaglio, L. (2017). Comparación de potencias en pruebas estadísticas de normalidad, con datos escasos. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 4(2), 47–52. Recuperado de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/viewFile/16775/17859>
- Candelaria Cerón, R. (2017). *Mejora de Procesos con la Metodología Lean Six Sigma en Área de Nóminas* (Universidad Nacional Autónoma de México). Recuperado de

- <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14873/Tesina.pdf?sequence=1>
- Carvajal Coto, L. E. (2016). *Determinación de las curvas características de resistencia a la compresión en función del tiempo para el cemento de uso general comercializado en San José, Costa Rica* (Universidad de Costa Rica). Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/8749/1/39838.pdf>
- Cazau, P. (2006). *Fundamentos de Estadística*. Buenos Aires, Argentina.
- Ceballos Arana, M. (2016). El concreto, material fundamental para la infraestructura. *Construcción y Tecnología en Concreto*, (Agosto), 24–25. Recuperado de <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/agosto2016/experto.pdf>
- Celik, K., Hay, R., Hargis, C. W., & Moon, J. (2019). Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 197, 803–812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.193>
- Chan, J. L., Solís, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39–46. Recuperado de <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen7/influencia.pdf>
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. (s/f). *Código Sísmico de Costa Rica* (5ta Edició). Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Concha Torre, A., Díaz Alonso, Y., Álvarez Blanco, S., Vivanco Allende, A., Mayordomo Colunga, J., & Fernández Barrio, B. (2020). The checklists: A help or a hassle? *Anales de Pediatría*, 93(2), 135.e1-135.e10. <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.05.006>
- Delgado Castro, J. A. (2018). *Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados* (Universidad de Costa Rica). Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/6535/1/43411.pdf>
- Denis, D., & Ramírez, V. M. (2020). Si una imagen vale más que mil palabras: ¿cuánto puede decir un gráfico de cajas? *Revista del Jardín Botánico Nacional*, 41, 57–69. Recuperado de <http://www.rjbn.uh.cu/index.php/RJBN/article/view/485/489>
- Díaz, J. E., Izquierdo, S., Mejía de Gutiérrez, R., & Gordillo, M. (2013). Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de la Construcción*, 12(3), 53–60. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2013000300006>
- Elizondo Valverde, G. (2013). *Resistencia vs . relación A / C del concreto a tres edades y con dos tipos de cemento (UG y MP- AR)* (Tecnológico de Costa Rica). Recuperado de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/3211>
- Faraldo, P., & Pateiro, B. (2013). Estadística Descriptiva. En *Estadística y metodología de la investigación*. Recuperado de http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_G2021103104_EstadisticaTema1.pdf
- García Pérez, J. (2004). Estado del Conocimiento (Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3327>
- Granero, R. (2016). Metodología de Investigación en Psicología. Estadística descriptiva e inferencial. *Metodología de la investigación clínica*, 102. Recuperado de https://cdn-cms-f-static.com/uploads/2236286/normal_5cef018589ced.pdf
- Guerrero Sánchez, A., & Hoyos Muñoz, L. (2020). *Influencia del Material Fino que pasa por el Tamiz N°200. En las propiedades físicas y mecánicas del concreto* (Universidad Nacional de Jaén, Perú). Recuperado de http://repositorio.unj.edu.pe/bitstream/handle/UNJ/307/Guerrero_SA_Hoyos_MLJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda Ed; R. del Bosque Alayó, P. Roig Vázquez, & L. Campa Rojas, Eds.). Recuperado de http://gc.initelabs.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf
- Hernández Mora, L. F. (2018). *Resistencia a compresión simple versus tiempo de curado*

- en especímenes de concreto hidráulico usando cementos modificados* (Universidad de Costa Rica). Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/6532>
- ICCYC, & CFIA. (2020). *Calidad del Concreto hecho en obra GAM 2020*. Recuperado de [https://iccy.com/sites/default/files/Investigaciones/Informe Calidad del Concreto hecho en obra GAM 2020 %28con portada%29.pdf](https://iccy.com/sites/default/files/Investigaciones/Informe%20Calidad%20del%20concreto%20hecho%20en%20obra%20GAM%2020%20con%20portada%29.pdf)
- Instituto del cemento Portland Argentino. (2015). Control estadístico del hormigón mediante cartas de control y Sistema CUSUM. En *Instituto del Cemento Portland Argentino*. Recuperado de http://www.actualizarmiweb.com/sites/icpa/publico/2015-04-Analisis_estadistico_de_resultados_de_ensayo.pdf
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2009). *Herramientas para la mejora de la calidad*. Montevideo, Uruguay: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, UNIT.
- INTECO. (2018). *INTE C147:2018*. San José, Costa Rica.
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures – The Guide to Applications, Methods and Materials*. (15° edición). Recuperado de <https://faculty.uml.edu/ehajduk/Teaching/14.310/documents/EB001.15.pdf>
- Méndez, M. (2020). *Tamaños de muestras en R*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=mD-oqk3tGbY>
- Menhenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). Introducción a la probabilidad y estadística. En *Cengage Learning* (Décimo ter). Recuperado de <https://www.fcfm.buap.mx/jzacarias/cursos/estad2/libros/book5e2.pdf>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2017). *Sección 552 Concreto estructural*. Recuperado de <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/handle/123456789/3626>
- Minitab Inc. (2018). Definiciones básicas. Recuperado el 13 de noviembre de 2020, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/basics/what-is-a-confidence-level/>
- Minitab Inc. (2020). 5 razones por las cuales más estudiantes aprenden estadísticas con Minitab Statistical Software. Recuperado de <https://www.minitab.com/es-mx/News/5-razones-por-las-cuales-más-estudiantes-aprenden-estadísticas-con-Minitab-Statistical-Software/>
- Mohd Razali, N., & Bee Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33. Recuperado de <http://instatmy.org.my/downloads/e-jurnal2/3.pdf%0Ahttps://www.nrc.gov/docs/ML1714/ML17143A100.pdf>
- Molina Hernández, B., & Terán López, J. (2019). Análisis del fraguado y de la resistencia a la compresión de pastas de cemento sustituidas parcialmente por polvo cerámico (Universidad Politécnica Salesiana, Quito). Recuperado de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18190>
- Neira Chávarri, P. I. (2016). *Resistencia a compresión del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$, a mayor tiempo de curado que 28 días, utilizando agregados de la cantera del Río Chonta* (Universidad Privada del Norte). Recuperado de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/9988>
- Novales, A. (2010). *Análisis de Regresión*. Recuperado de [https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis de Regresion.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-13-Analisis%20de%20Regresion.pdf)
- Pérez Pinza, R. M. (2015). *Estudio para identificar y controlar las variables que afectan el rendimiento teórico de la pintura PPG poliésteres base solvente en las instalaciones de Maresa Ensambladora* (Universidad Tecnológica Equinoccial). Recuperado de http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/14407/1/61737_1.pdf
- Presidente de la República; Ministros de Economía Industria y Comercio y De Salud. *Reglamento Técnico RTCR 479: 2015 Materiales de Construcción, Cementos Hidráulicos*. (2015).
- Rivera, G. (2006). Agregados para el Mortero o Concreto. En *Concreto Simple* (pp. 41–75). Recuperado de [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor_gerardo_rivera/FIC_y_GEOTEC SEM 2 de](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor_gerardo_rivera/FIC_y_GEOTEC_SEM_2_de)

- 2009/Tecnolog%EDa del Concreto - PDF ver. 2009/Cap. 02 - Agregados para mortero y concreto.pdf
- Solano-Jiménez, J. (2014). Cementos adicionados (UG y MP-AR) en Costa Rica. (I Parte). *Revista CFIA, Ed. 257*, 22–23.
- Torres Fariás, C. (2019). *Evaluación de la calidad del proceso de confección de hormigón premezclado mediante el análisis estadístico de resistencias a la compresión* (Universidad de Chile). Recuperado de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/250/173709/cf-torres_cf.pdf?sequence=1
- Urvoy, M., & Autrusseau, F. (2014). *Application of Grubbs' test for outliers to the detection of watermarks*. <https://doi.org/10.1145/2600918.2600931>
- Valcuente, M., Marco, E., Jardón, R., & Gil, A. (2009). Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura. En *Universidad Politécnica de Valencia*. [https://doi.org/10.1016/0026-265X\(89\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0026-265X(89)90018-0)
- Wang, C., Caja, J., & Gómez, E. (2018). Comparison of methods for outlier identification in surface characterization. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 117(December 2017), 312–325. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.12.015>
- Xu, G., Shen, W., Fang, D., Zhou, M., Zhang, B., Du, X., & Zhang, D. (2020). Influence of size and surface condition of distributing-filling coarse aggregate on the properties of aggregate-interlocking concrete. *Construction and Building Materials*, 261, 120002. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120002>
- Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B. (2014). Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 46, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>