

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**Características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado
en condiciones de calor severo**

AUTOR:

Córdova Coronel Jamil Javier

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Martínez Rehpani Colon Gilberto

Guayaquil, Ecuador

11 de marzo del 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Córdova Coronel Jamil Javier**, como requerimiento para la obtención del título de **ingeniero civil**.

TUTOR

f. _____
Ing. Martínez Rehpani Colon Gilberto, Msc.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Alcívar Bastidas Stefany Esther, Msc.

Guayaquil, a los 11 días del mes de marzo del año 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Córdova Coronel Jamil Javier

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado en condiciones de calor severo** previo a la obtención del título de **ingeniero civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 11 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR

f. _____
Córdova Coronel Jamil Javier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, Córdova Coronel Jamil Javier

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado en condiciones de calor severo**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 11 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR:

f. _____
Córdova Coronel Jamil Javier



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

REPORTE URKUND



Urkund Analysis Result

Analysed Document: CORDOVA_JAMIL_FINAL.docx (D97639004)
Submitted: 3/8/2021 6:45:00 PM
Submitted By: claglas@hotmail.com
Significance: 3 %

Sources included in the report:

ALVARADO A, TIVANTA K.docx (D60124785)
1554.- Peredo Romero, Marianella.pdf (D33755238)
20150907 Luis Morales IIP.pdf (D15193345)
Tesis Diseu00F1o de hormigu00F3n con cantos rodados provenientes del ru00EDo Chanchan.docx (D13045515)
UCP_ingenieriacivil_2021_TSP_Jerson_Santillan_V1.pdf (D95921051)
18402-Rodriguez Dionisio, Sandra_.pdf (D61018409)
titulacion final.docx (D22300827)
<https://www.slideshare.net/johnlaza/tecnologa-del-concreto-39436161>
<https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5367/1/UPSE-TIC-2020-0011.pdf>
<https://docplayer.es/138596742-Universidad-nacional-del-santa.html>
<https://docplayer.es/98445238-Influencia-del-uso-de-microsilice-en-las-propiedades-en-estado-fresco-y-endurecido-en-concreto-de-alta-resistencia.html>

Instances where selected sources appear:

AGRADECIMIENTO

A Dios, por permitirme culminar una de las etapas más importantes en mi vida y por conocer personas maravillosas en el transcurso de mi formación académica.

A mis padres, las personas que siempre me apoyan incondicionalmente y son parte fundamental en mi vida, transmitiéndome sus valores, sentimientos y consejos.

Al Ing. Gilberto Martínez por su orientación, paciencia y valiosos consejos que siempre inspiran a buscar la excelencia académica.

Al grupo de profesionales que conforman el laboratorio de CONSTRULADESA S.A por brindarnos un espacio dentro de sus instalaciones, además de sus recomendaciones y varios aportes esenciales durante el desarrollo de la investigación de este proyecto.

A mis amigos y compañeros, por su apoyo y ayuda constante durante los momentos más difíciles que se han presentado durante mi vida académica, demostrando que con esfuerzo y dedicación podemos superar cualquier inconveniente que se presente.

DEDICATORIA

A toda mi familia, que siempre han demostrado su apoyo y felicidad por mi desempeño en la vida, así como compartirme sus consejos y experiencias para que mi formación personal sea aún mejor.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Carlos Yldefonso Chon Díaz, Msc.

DECANO

f. _____

Ing. Guillermo Alfonso Ponce Vásquez, Msc.

DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

Ing. Luis Octavio Yépez Roca, Msc.

OPONENTE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
CAPITULO I.....	3
GENERALIDADES	3
Antecedentes	3
Situación problemática.....	4
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
Alcance.....	5
CAPITULO II	7
EFFECTO DEL CLIMA TROPICAL EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN.....	7
Contexto climático en la zona de estudio.....	7
Contexto ambiental de la zona de estudio.....	9
Efectos del clima tropical en las propiedades del hormigón.....	9
Efectos sobre el hormigón fresco	13
Efectos sobre el hormigón endurecido	13
Temperatura del hormigón.....	14
Materiales componentes del hormigón y la temperatura	16
Agua de amasado	17
Cemento	20
Cemento Portland.....	20
Cemento hidráulico compuesto.....	26
Cemento hidráulico por desempeño	32
Agregados	35
Características y requerimientos en los agregados	36
Granulometría de los agregados.....	36
Sustancias perjudiciales en los agregados	40
Reactividad álcali-agregado	43
Reacción álcali-sílice.....	44
Reacción álcali-carbonato	47
Aditivos	48
Tipos de aditivos	49
Aditivos aceleradores.....	50
Aditivos retardadores	51
Aditivos reductores de agua	52

Aditivos superplastificantes	53
La hidratación del cemento Portland.....	55
Termodinámica química.....	56
Ley cero de la termodinámica.....	56
Primera ley de la termodinámica.....	56
Segunda ley de la termodinámica.....	56
Tercera ley de la termodinámica	56
Mecanismo de hidratación	57
Período de inducción	57
Período de aceleración	58
Período de post-aceleración	58
El agua en el cemento hidratado	59
Difusión del agua libre a través de las capas de hidratación.....	59
Aspectos físico-químicos de la hidratación.....	60
Problemas y precauciones existentes en la producción del hormigón	63
Métodos de control de la temperatura del hormigón	64
Enfriamiento de los agregados	65
Sustitución parcial del agua de amasado por hielo	66
Inyección de nitrógeno líquido	66
CAPITULO III.....	68
EL HORMIGÓN Y LA TEMPERATURA	68
Aditivos químicos	68
Hormigón en estado fresco.....	70
Mezclado.....	70
Trabajabilidad y consistencia	70
Hidratación, segregación, exudación y sangrado	71
El calor de Hidratación.....	72
Ensayo de asentamiento con el Cono de Abrams.....	74
Pérdida del asentamiento y factores que afectan la trabajabilidad.....	76
Hormigón endurecido.....	78
Curado húmedo	78
Velocidad de secado del hormigón.....	79
Resistencia a la compresión y flexión	79
CAPITULO IV.....	81
DESARROLLO DE METODOLOGÍA, DISEÑO DE MEZCLA Y	
ENSAYOS DE LABORATORIO	81

Generalidades	81
Materiales	81
Cemento.....	81
Agregado fino.....	81
Granulometría del agregado fino.....	82
Módulo de finura	84
Gravedad específica de masa saturada con superficie seca del agregado fino..	84
Porcentaje de absorción	84
Peso volumétrico del agregado fino	85
Agregado grueso	86
Granulometría del agregado grueso	87
Gravedad específica de masa saturada con superficie seca y porcentaje de absorción del agregado grueso.....	89
Porcentaje de absorción	89
Peso volumétrico del agregado grueso	90
Aditivo	91
Tipo de hielo aplicado en la mezcla	91
Diseño y elaboración de la mezcla.....	92
Diseño de hormigón $f'c$: 400 kg/cm ²	93
Diseño de hormigón $f'c$: 450 kg/cm ²	97
Curado del hormigón.....	100
CAPITULO V	102
ANALISIS DE RESULTADOS	102
Generalidades	102
Ensayos al hormigón en estado fresco	102
Temperatura y revenimiento del hormigón	102
Ensayo del hormigón en estado endurecido.....	103
Resistencia a la compresión simple	103
Análisis comparativo de los resultados	116
CONCLUSIONES	119
RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	121

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efectos de la evaporación del hormigón, la trayectoria del sangrado y los esfuerzos producidos por la contracción plástica.....	11
Figura 2. Efecto de las temperaturas del hormigón y del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento en la velocidad de evaporación de la humedad en la superficie del hormigón.	12
Figura 3. Efecto de la temperatura durante las dos primeras horas después del colado sobre el desarrollo de la resistencia.	14
Figura 4. Contenidos de cemento y agua con relación al tamaño máximo del agregado en el hormigón con y sin aire incluido.	39
Figura 5. Influencia en la expansión de la barra de mortero utilizando diferentes cantidades de ceniza, escoria y humo de sílice según norma ASTM.....	47
Figura 6. Pérdida de revenimiento de hormigones con y sin aditivos retardadores en temperaturas variadas.....	52
Figura 7. Pérdida del revenimiento de la mezcla de hormigón a 23°C, aplicando reductores de agua convencionales.	53
Figura 8. Pérdida de revenimiento del hormigón a 32 °C. utilizando mezclas fluidas (TN, TM, TB, TX) y hormigón convencional (TC).....	54
Figura 9. Representación grafica de la hidratación del cemento.....	57
Figura 10. (a) Resistencia de los diferentes componentes del cemento según Bogue y Lerch. (b) Resistencia de cada uno de los componentes del cemento.....	61
Figura 11. Procesos de percolación durante la hidratación del cemento: (a) Los productos hidratados forman una conexión mecánica con los productos no hidratados; (b) Los productos hidratados crean "fracciones conectadas" de gran tamaño, lo cuales van disminuyendo el de los capilares; (c) Debido al aumento del tamaño, los capilares disminuyen en número.	62
Figura 12. Influencia de la temperatura en los materiales de la mezcla con respecto a la temperatura del hormigón.	65
Figura 13. Efecto de la temperatura y el cemento en el tiempo de fraguado para morteros de hormigón.	68
Figura 14. Desarrollo del calor de hidratación para diferentes tipos de cementos curados a 21°C.	74
Figura 15. Ensayo de asentamiento aplicando el Cono de Abrams.	75
Figura 16. Resultados de asentamiento en la mezcla al retirar el molde.	75
Figura 17. Reducción del requerimiento de agua en la mezcla al incorporar aire. .	77
Figura 18. Desarrollo de la resistencia del hormigón con respecto al tiempo de curado.....	79
Figura 19. Curva granulométrica del agregado fino.	83
Figura 20. Curva granulométrica del agregado grueso.	88
Figura 21. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 400 kg /cm (Patrón sin hielo).....	106
Figura 22. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 400 kg /cm (80% de reemplazo del agua con hielo).	109
Figura 23. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 450 kg /cm ² (Patrón sin hielo).....	112
Figura 24. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 450 kg /cm ² (80% de reemplazo del agua con hielo).	115
Figura 25. Curvas comparativas sobre la evolución de la resistencia del hormigón de 400 kg/cm ² sin hielo y el 80% de reemplazo del agua con hielo.	117

Figura 26. Curvas comparativas sobre la evolución de la resistencia del hormigón de 450 kg/cm ² sin hielo y el 80% de reemplazo del agua con hielo.	118
---	-----

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1. Secado natural y protección de la arena del río Chimbo.....	82
Imagen 2. Secado natural y almacenamiento de la piedra entregada por LICOSA.	87
Imagen 3. Aditivo líquido superplastificante de la marca ADITEC para la elaboración de hormigón.....	91
Imagen 4. Almacenamiento del hielo en escamas que se utilizó en la elaboración de hormigón.....	92
Imagen 5. Encofrado de los especímenes de hormigón de 400 y 450 kg/cm ²	100
Imagen 6. Desencofrado y colocación de las muestras de hormigón en piscina de curado.....	101
Imagen 7. Máquina de ensayo utilizado para determinar la resistencia de los especímenes de hormigón.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Temperatura media de máxima absoluta en el Ecuador. Semestre (enero-junio) 2016.....	8
Tabla 2. Registro de temperaturas más altas del año 2019 en Guayaquil.....	8
Tabla 3. Requisitos físicos e inorgánicos para el agua potable.....	18
Tabla 4. Requisitos orgánicos para el agua potable.....	18
Tabla 5. Requisitos biológicos para el agua potable.....	19
Tabla 6. Criterio de aceptación de aguas dudosas.....	19
Tabla 7. Límites químicos opcionales para utilización de agua de lavado.....	20
Tabla 8. Tipos de cemento según la norma aplicada.....	20
Tabla 9. Compuestos químicos del cemento Portland.....	22
Tabla 10. Requisitos químicos de composición normalizada.....	24
Tabla 11. Requisitos químicos de composición opcionales.....	24
Tabla 12. Requisitos físicos normalizados.....	25
Tabla 13. Requisitos Físicos opcionales.....	25
Tabla 14. Requisitos químicos para cementos hidráulicos compuestos.....	28
Tabla 15. Requisitos físicos para cementos hidráulicos compuestos.....	30
Tabla 16. Requisitos para puzolana usados en cementos compuestos y para escoria usados en cementos Portland con escoria de altos hornos Tipo IS (<25) y cementos compuestos ternarios Tipo IT (S<25).	31
Tabla 17. Requisitos de granulometría de áridos para el ensayo de expansión de morteros.....	32
Tabla 18. Requisitos físicos normalizados.....	34
Tabla 19. Requisitos físicos opcionales para cementos hidráulicos.....	34
Tabla 20. Rocas y minerales presentes en los agregados.....	36
Tabla 21. Límites granulométricos del agregado fino.....	37
Tabla 22. Requisitos granulométricos del agregado grueso.....	38
Tabla 23. Límites para sustancias perjudiciales en los agregados finos para hormigón.....	41

Tabla 24. Límites para sustancias perjudiciales y requerimientos de propiedades físicas para el agregado grueso del hormigón.	42
Tabla 25: Minerales potencialmente perjudiciales y materiales sintéticos.	44
Tabla 26. hidratación de los componentes del cemento.....	61
Tabla 27. Calor de hidratación desarrollado a diferentes temperaturas.	73
Tabla 28. Calor de hidratación de los componentes individuales.	73
Tabla 29. Descripción de la trabajabilidad y consistencia en función de la magnitud del asentamiento.....	76
Tabla 30. Tolerancias para condiciones de asentamiento nominal en la mezcla. ...	76
Tabla 31. Resistencia promedio requerida a compresión (f'_{cr}).....	80
Tabla 32. Resistencia promedio requerida a tracción por flexión (MR_r).....	80
Tabla 33. Ensayos realizados al agregado fino.	81
Tabla 34. Ensayo de caracterización del agregado fino para hormigón.....	83
Tabla 35. Ensayos realizados al agregado grueso.....	86
Tabla 36. Ensayo de caracterización del agregado grueso para hormigón.	88
Tabla 37. Resumen de ensayos para los agregados del hormigón.	92
Tabla 38. Selección de la resistencia promedio sin desviación estándar.	93
Tabla 39. Selección del asentamiento de la mezcla.	93
Tabla 40. Selección del volumen unitario de agua para la mezcla.	94
Tabla 41. Contenido de aire atrapado por el agregado grueso.	94
Tabla 42. Determinación de la relación agua-cemento de la mezcla.	94
Tabla 43. Determinación del peso del agregado grueso por unidad de volumen del hormigón.....	95
Tabla 44. Resultado del ensayo de la mezcla en estado fresco para hormigón de 400 kg/cm ²	102
Tabla 45. Resultado de los ensayos de la mezcla en estado fresco para hormigón de 450 kg/cm ²	103
Tabla 46. Resumen comparativo para los diseños de hormigón 400 y 450 kg/cm ²	116

RESUMEN

La ciudad de Guayaquil presenta varias condiciones ambientales que afectan el desempeño y calidad de los elementos de hormigón, como la alta concentración de salinidad en el medio, la humedad y las altas temperaturas ambientales. Por lo tanto, El desarrollo del proyecto plantea una solución utilizando el hielo triturado en sustitución parcial del agua de amasado para la mezcla de hormigón, demostrando sus beneficios no solo para contrarrestar los efectos climáticos de la ciudad, también para mejorar la calidad y las propiedades de las estructuras de hormigón, además de que Guayaquil presenta una gran ventaja para obtener el hielo triturado, debido a que es uno de los exportadores de camarón más grandes del mundo, existen alrededor de la ciudad varias plantas de fabricación de dicho material comercializándolo en diversos tipos como: triturado, escamas, molido, escarcha y en bloques, haciendo que su obtención sea más sencillo y económico que en algunas otras partes del mundo, donde uno de los inconvenientes más grandes que presenta, es el abastecimiento adecuado de hielo para la aplicación de dicha metodología.

PALABRAS CLAVES

Preenfriado, resistencia, hielo, hormigón, temperatura ambiental, agua, mezcla, revenimiento.

ABSTRACT

The city of Guayaquil has several environmental conditions that affect the performance and quality of concrete elements, such as the high concentration of salinity in the environment, humidity and high ambient temperatures. Therefore, the development of the project proposes a solution using crushed ice as a partial replacement for mixing water for the concrete mix, demonstrating its benefits not only to counteract the climatic effects of the city, but also to improve quality and properties of concrete structures, in addition to the fact that Guayaquil has a great advantage to obtain crushed ice, due to the fact that it is one of the largest shrimp exporters in the world, there are several manufacturing plants around the city for this material, marketing it in various types such as: crushed, flakes, ground, frosted and in blocks, making it easier and cheaper to obtain than in some other parts of the world, where one of the biggest drawbacks is the adequate supply of ice for the of this methodology.

KEYWORDS

Precooled, strength, ice, concrete, environmental temperature, water, mixture, slump.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es una composición heterogénea que consiste principalmente por agua, cemento, agregados y en ocasiones se emplean aditivos para mejorar alguna propiedad en específico, siendo uno de los materiales de construcción más utilizados y de mayor demanda en la sociedad moderna, debido a sus beneficios y al poco mantenimiento que se requiere para su elaboración.

Las estructuras de hormigón se van deteriorando por la exposición a agentes nocivos en el medio ambiente, en especial si se aplican materiales de mala calidad para su fabricación o por prácticas habituales ineficientes. Se requiere un adecuado control y seguimiento en obra para asegurar una durabilidad en sus elementos, puesto que una mala ejecución puede reducir las propiedades en el hormigón inclusive si se aplica materiales de buena calidad.

Para determinar los elementos perjudiciales por la exposición de cualquier estructura de hormigón, se necesita un análisis de las condiciones ambientales y la ubicación geográfica de la zona, sin embargo, en el interior de la mezcla también prevalecen situaciones que afectan su durabilidad, siendo la más inestable la que es ocasionada por las reacciones entre los agregados y el cemento.

En Ecuador, las condiciones climáticas que presentan son altas, lo que causa dificultades en el mezclado, colocación y curado del hormigón, afectando sus propiedades y su composición en el ámbito constructivo. Esta situación es muy frecuente en la región Costa del país, siendo de gran importancia destacar los aspectos y métodos aplicables de dichos parámetros ambientales que están presentes en la elaboración del hormigón.

El proyecto se basa en los criterios y recomendaciones de la norma ACI 305R enfocada a la fundición de hormigón en climas cálidos para identificar y establecer los fundamentos más importantes a considerar en la obra, además de realizar investigaciones y ensayos correspondientes del hormigón endurecido para esfuerzos de compresión y flexión expuestos a los efectos climático de la zona.

CAPITULO I

GENERALIDADES

Antecedentes

El tema desarrollado busca contribuir en el sector económico con la reducción de costos en la preparación de hormigón para áreas urbanas, estudiando los efectos de la sustitución del agua de amasado por hielo en la resistencia característica del hormigón y en su durabilidad.

La vida útil de la obra civil sería beneficiada, al reducir las condiciones para la propagación de fisuras que comprometen la integridad estructural de los elementos, debido al incremento de la dilatación térmica diferencial producto del calor de hidratación que genera el cemento.

La manifestación patológica relacionada con la contracción térmica es el agrietamiento del hormigón. Esta retracción puede conducir a un deterioro de las estructuras si se tiene en cuenta la apertura de un camino libre para la percolación del agua, que da lugar al inicio de un proceso de lixiviación del hormigón. Estas fisuras también pueden favorecer la penetración de agentes agresivos y contribuir a la corrosión del acero de refuerzo. Por lo tanto, el control de grietas en estructuras de hormigón es importante para garantizar su durabilidad desde las edades más tempranas.

Además de los constituyentes que influyen en el aumento de la temperatura final del hormigón, los factores ambientales inciden en la pérdida de agua por evaporación, como las condiciones climáticas al momento de fundir el hormigón, contribuyendo a la aparición de fisuras tras el colado y acabado final de la pieza estructural.

En muchos casos, es necesario preenfriar el hormigón utilizando hielo en sustitución parcial o total del agua, aire frío, agua helada o nitrógeno líquido, e incluso la refrigeración de los agregados para reducir la temperatura inicial en el vaciado del hormigón fresco.

El agua de amasado tiene el mayor efecto sobre la temperatura del hormigón por unidad de peso entre todos los demás componentes. El uso de

agua de amasado enfriada y/o el empleo de hielo en la mezcla, es la mejor manera de reducir la temperatura del hormigón porque el hielo absorbe 80 cal/gr al derretirse.

La finalidad de este proyecto es monitorear y analizar la evolución de la temperatura de un hormigón fresco, así como su resistencia a 3, 7, 14 y 28 días, en un diseño que pueda ser aplicado en elementos estructurales para la construcción de cualquier edificio residencial, ubicado en la ciudad de Guayaquil. El agua de amasado será reemplazada por hielo, con el propósito de reducir la temperatura de vaciado del hormigón e incrementar su resistencia.

Situación problemática

Es necesario considerar la gran importancia que presenta el medio ambiente tanto en la elaboración de hormigón como en los materiales que lo conforman. Debido a que el colado del hormigón en condiciones ideales no se dispone en nuestro medio y es más probable que se presenten situaciones desfavorables en que el hormigón no desarrolle adecuadamente sus capacidades. Afectando no solo a la durabilidad del hormigón, también a la dosificación de la mezcla, puesto que demandara un incremento de agua, para preservar su consistencia.

Por lo tanto, los diseños y métodos constructivos deben estar basados tanto en criterios estructural como climáticas, esto incluye condiciones ambientales como la temperatura del ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento, entre otros. Este periodo es esencial, porque la estructura conserva sus propiedades y características de desempeño para las cuales fue proyectado sin costos adicionales o imprevistos. Las definiciones deben ser indicadas adecuadamente para su correcta interpretación, así como se dispone en los detalles estructurales.

En Guayaquil, los efectos ambientales se ven reflejados en dos estaciones diferentes, la estación seca donde las temperaturas son bajas y la estación húmeda donde las temperaturas son altas con presencia de lluvias, siendo esta temporada la más influyente en los procesos de fabricación y transportación del hormigón. Pero la norma vigente no presenta fundamentos

o recomendaciones a implementar en obra para dichas condiciones ambientales y que en el ACI es uno de los parámetros esenciales para evitar la propagación de grietas debido a la contracción plástica en los elementos de hormigón.

Es vital considerar todos estos factores ambientales especialmente en nuestro entorno, para que el hormigón logre el desempeño esperado, mejorando los fundamentos prácticos e incentivar a la investigación de los parámetros que afectan a la mezcla en estado fresco y al comportamiento de la misma en estado endurecido.

Objetivo general

- Analizar la influencia del hielo molido como reemplazo del agua de amasado, en las propiedades de las mezclas para hormigón estructural fresco y endurecido, colocado con bajas temperaturas de vaciado en condiciones de clima extremo.

Objetivos específicos

1. Analizar de manera comparativa, la resistencia a la compresión simple a 3, 7, 14 y 28 días, en muestras de hormigones convencionales de $f'c=400 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c=450 \text{ kg/cm}^2$ preparados con hielo triturado en sustitución del agua de amasado y sin hielo, para el mismo revenimiento.
2. Evaluar de manera comparativa la reducción de la temperatura del hormigón fresco preparado con hielo triturado en sustitución del agua de amasado y sin hielo.
3. Evaluar de manera comparativa a través del ensayo del Cono de Abrams, la consistencia del hormigón fresco preparado: con hielo triturado en sustitución del agua de amasado y sin hielo.

Alcance

Se pretende verificar los efectos que genera el uso de hielo molido en los diseños de hormigón estructural, para mejorar los criterios de durabilidad en elementos de cimentación fundidos en condiciones de calor severo en la ciudad de Guayaquil. Al mismo tiempo se podría estimar el incremento de

resistencia a la compresión simple, o la reducción de cemento para la misma resistencia y el mismo revenimiento, considerando que el hielo molido aplicado en las dosificaciones de hormigón, podría reducir las condiciones de fricción entre las partículas y por lo tanto podría ser necesaria una menor cantidad de agua de amasado en los diseños. Este fenómeno físico natural podría ser aprovechado para lograr una reducción de costos por la reducción del cemento en estas dosificaciones.

CAPITULO II

EFEECTO DEL CLIMA TROPICAL EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Contexto climático en la zona de estudio

Una de los parámetros meteorológicos para referirse a las condiciones climáticas es la temperatura la cual se define como “una magnitud física que mide la cantidad de calor que tiene un cuerpo, objeto o ambiente. Esta magnitud mide la cantidad de energía térmica que posee cada cuerpo. El instrumento de medición de temperatura es el termómetro” (Chipana & Chambi, 2020, p. 36).

La temperatura ambiental es una de las propiedades más importantes a considerar dentro de la construcción de elementos estructurales de hormigón en obras civiles, siendo un requisito necesario el conocimiento de la meteorología local. En Ecuador, la entidad encargada del registro y pronóstico climatológico es el INAMHI (Instituto nacional de meteorología e hidrología), indicando que “La región Costa se caracteriza por un clima tropical árido al suroeste, seco a húmedo hacia el centro-sur y muy húmedo al norte, en la zona del Chocó” (Varela & Ron, 2020).

El desarrollo del proyecto analizará los efectos que se producen por la temperatura ambiental de la ciudad de Guayaquil, por lo cual en la tabla 1 se presenta el registro del 2016 sobre la temperatura ambiental media máxima en el Ecuador para la región Costa.

Tabla 1. Temperatura media de máxima absoluta en el Ecuador. Semestre (enero-junio) 2016.
Fuente: INAMHI, 2016.

LOCALIDADES	Normal Temperatura Media Máxima absoluta Semestral	Temperatura Media Máxima Absoluta Semestral 2016	Anomalía
REGION LITORAL/INSULAR			
ESMERALDA AER.	31.8	31.1	-0.7
LA CONCORDIA	32.3	32.2	-0.1
STO.DOMINGO AER.	30.2	30.5	0.3
PUERTO ILA	32.1	32.8	0.7
PORTOVIEJO	34.4	35.2	0.7
PICHILINGUE	33.1	33.6	0.5
MILAGRO	33.1	34.1	0.9
GUAYAQUIL AER.	34.1	34.1	0.0
SANTA ROSA AER.	32.4	33.0	0.6
S. CRISTOBAL -GAL.	31.3	32.6	1.3

En la actualidad, la ciudad de Guayaquil ha sido azotada por variaciones grandes de temperatura esto ha resultado en un incremento de la radiación solar y la temperatura, según lo indica la tabla 2 correspondiente a los datos presentados por el INAMHI sobre la temperatura ambiental, siendo este la mayor que ha registrado hasta ahora.

Tabla 2. Registro de temperaturas más altas del año 2019 en Guayaquil.
Fuente: INAMHI, 2019.

GUAYAQUIL AEROPUERTO	Temperatura Máxima (°C)
28 de diciembre	34.8
15 de diciembre	34.2
1 de noviembre	34.2
14 de abril	34.2
2 de marzo	34.2
4 de mayo	33.7
4 de enero	33.6

En Guayaquil existen dos estaciones climáticas: húmeda y seca. La estación húmeda presenta temperaturas ambientales altas junto con la presencia de lluvias abundantes debido al fenómeno de El Niño, siendo este una corriente cálida que se registra entre el mes de diciembre y a finales del mes de mayo. La estación seca se caracteriza por la presencia de temperaturas bajas y lluvias escasas, se registra entre el mes de junio y noviembre.

Contexto ambiental de la zona de estudio

La ciudad de Guayaquil es una zona costera, ubicada en el golfo del mismo nombre. En los alrededores de la ciudad se pueden denotar dos cuerpos de agua principales, como los son el río Guayas y el Estero Salado.

El río Guayas es el resultado de la unión entre dos grandes ríos denominados Daule y Babahoyo. El Estero Salado es un estuario que está compuesto por varios sistemas de drenaje, juntos estos cuerpos de agua conforman el conocido Golfo de Guayaquil, el cual contiene variaciones en la marea debido a su proximidad con el océano, haciendo que el agua sea una mezcla de origen marino y dulce con una gran biodiversidad en su ecosistema.

Debido a que las mareas, el oleaje y las escorrentías varían en tiempo y espacio, el estuario es un sistema dinámico en lo que respecta a la salinidad de sus aguas en un punto en el estuario la salinidad puede ser igual a la del agua de mar, mientras que, a poca distancia en otro punto, la mezcla produce una salinidad intermedia, y hasta contener solamente agua fresca. (Quiñones, 2014, p. 1).

Según lo indicado anteriormente, el sector de Guayaquil presenta altas concentraciones de salinidad en el ambiente, esto afecta directamente en el campo constructivo principalmente en elementos y estructuras de acero que se van deteriorando por la exposición directa adicionando una escasa protección contra este ambiente se produce una reacción química conocida como corrosión.

Efectos del clima tropical en las propiedades del hormigón

El clima es uno de los factores esenciales a considerar en la mezcla de hormigón, debido a que afecta a sus propiedades físicas y químicas de los elementos fabricados, manifestando sus efectos tanto en el vertido de la mezcla como en su resistencia.

Los efectos ambientales que presenta el clima tropical, podrían considerarse en cualquier época del año, debido a que en ocasiones presentan combinaciones de diversas condiciones ambientales que afectan al hormigón ya sea: temperatura ambiental, velocidad del viento o la humedad relativa del aire.

En la mayoría de los diferentes tipos de construcción en clima caluroso, no es práctico recomendar una temperatura máxima del concreto o del ambiente como límite, ya que las circunstancias de una obra a otra, tienen variación. Un límite que puede servir para un caso específico, puede no ser satisfactorio para otros. (Alvarado, Guzmán & Henríquez, 2009, p. 100).

Según los criterios de la tecnología del hormigón recomienda que la temperatura de la mezcla deba mantenerse alrededor de los 20°C, por lo tanto, referirse a temperaturas mayores, serían condiciones extremas para el hormigón por lo que requerirán medidas preventivas no solo en la dosificación, también incluye la preparación, transporte, el colado, curado adecuado, correcto almacenaje de los materiales y los debidos ensayos para el control de la resistencia.

En el hormigón, los efectos de la temperatura influyen principalmente en el requerimiento de agua, producido por la velocidad de hidratación en el cemento y a la evaporación del agua por altas temperaturas ambientales, Adicionando la escasez de humedad en el ambiente o presencia de elevadas velocidades de viento, aumentaría la probabilidad de agrietamiento por contracción plástica.

El fenómeno conocido como contracción plástica, se da cuando la velocidad de evaporación del agua en el ambiente es mayor que la velocidad del sangrado en el hormigón, en la figura 1 se muestran los efectos de este procedimiento resultando un secado más rápido en el elemento haciendo que presente esfuerzos de tensión y la aparición de grietas en la zona superficial debido a la contracción del hormigón.

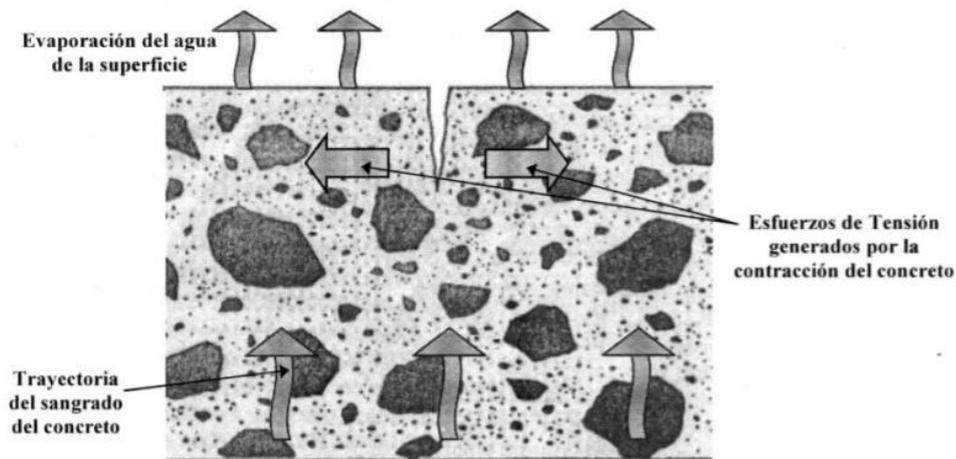


Figura 1. efectos de la evaporación del hormigón, la trayectoria del sangrado y los esfuerzos producidos por la contracción plástica.
Fuente: Alvarado, Guzmán & Henríquez, 2009,

La norma ACI 305R es la encargada sobre los criterios y recomendaciones para la construcción de hormigón en climas tropicales. Según la cual indica un método gráfico para estimar la pérdida de humedad en la superficie del hormigón debido a las condiciones ambientales presentada en la figura 2.

Según el ACI 305R-99 indica recomendaciones esenciales sobre la velocidad del viento, estableciendo que se controle a 0.50 m o 20 pulg por encima de la superficie de evaporación, debido a que a mayor altura sobre el nivel de la superficie la velocidad del viento se incrementa y las mediciones de viento tomadas a una altura superior a la indicada van a presentar valor sobrestimados de la rapidez de evaporación en el método gráfico.

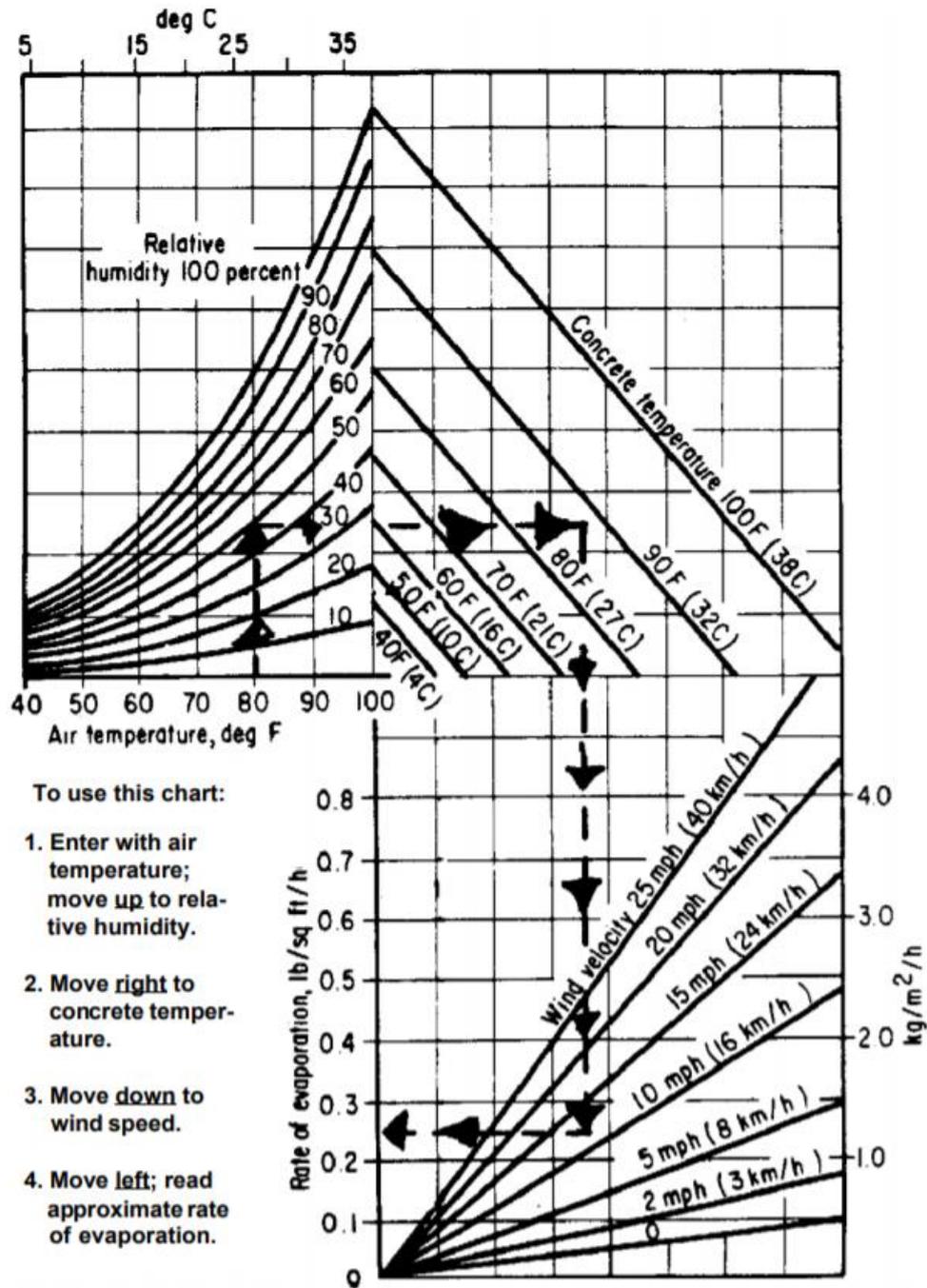


Figura 2. Efecto de las temperaturas del hormigón y del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento en la velocidad de evaporación de la humedad en la superficie del hormigón.

Fuente: ACI 305R-99

Según recomendaciones del ACI 305R-99 para la prevención del agrietamiento por contracción plástica, indica que si la velocidad de evaporación sobrepasa a $1\text{kg/m}^2/\text{hr}$ se presentara grietas en el hormigón,

aunque se han registrado algunos casos en que se han producido fisuras cuando la velocidad de evaporación sobrepasa a $0.5\text{kg/m}^2/\text{hr}$.

Efectos sobre el hormigón fresco

La temperatura influye principalmente en la trabajabilidad del hormigón, es decir mientras la temperatura ambiental aumenta, la manipulación de la mezcla disminuye, además de los efectos que ocurren en el momento del vertido debido a las variaciones en las condiciones climáticas presentes, como la humedad relativa o el viento.

En el ámbito constructivo existen inconvenientes que comúnmente se presentan durante el mezclado del hormigón debido a la presencia de altas temperaturas, tales como:

- Incremento del agua dosificada.
- Aceleración en el proceso del fraguado, dificultando el manejo y compactación de la misma.
- Altas probabilidades de agrietamiento por contracción en los elementos.

Debido a la ubicación de las construcciones y el tráfico pesado de vehículos en sus diferentes horarios, existe la tendencia en nuestro medio de agregar agua a la mezcla mientras está siendo transportada al lugar de la construcción para evitar el fraguado inicial de la misma, resultando como efecto de dicha acción la pérdida del revenimiento y la entrega de un hormigón de menor calidad.

Efectos sobre el hormigón endurecido

Después de exponer al hormigón a altas temperaturas ambientales, aumentará la reacción química de hidratación en la mezcla por lo que presentará un incremento de su resistencia a temprana edad, aunque esto es perjudicial a edades a largo plazo transcurridos los 28 días, por lo que su resistencia en ese tiempo disminuye en comparación a un hormigón endurecido a bajas temperaturas.

Una hidratación inicial rápida parece formar productos de estructura físicas más pobres, probablemente más porosos, por lo que una parte

de los poros siempre quedara sin llenar. De la regla de la relación gel/espacio se deduce que esto conducirá a una menor resistencia en comparación con una pasta de cemento menos porosa, aunque de hidratación lenta, en la que eventualmente se alcanzara una alta relación gel/espacio. (Neville, 1995, p. 1143).

En la figura 3 se presenta el gráfico desarrollado por el autor Neville con el propósito de explicar los efectos debido a la exposición a altas temperaturas ambientales desde el vertido del hormigón y el desarrollo de su resistencia a largo plazo, mostrando un incremento en su resistencia al mantener bajas temperaturas en la mezcla.

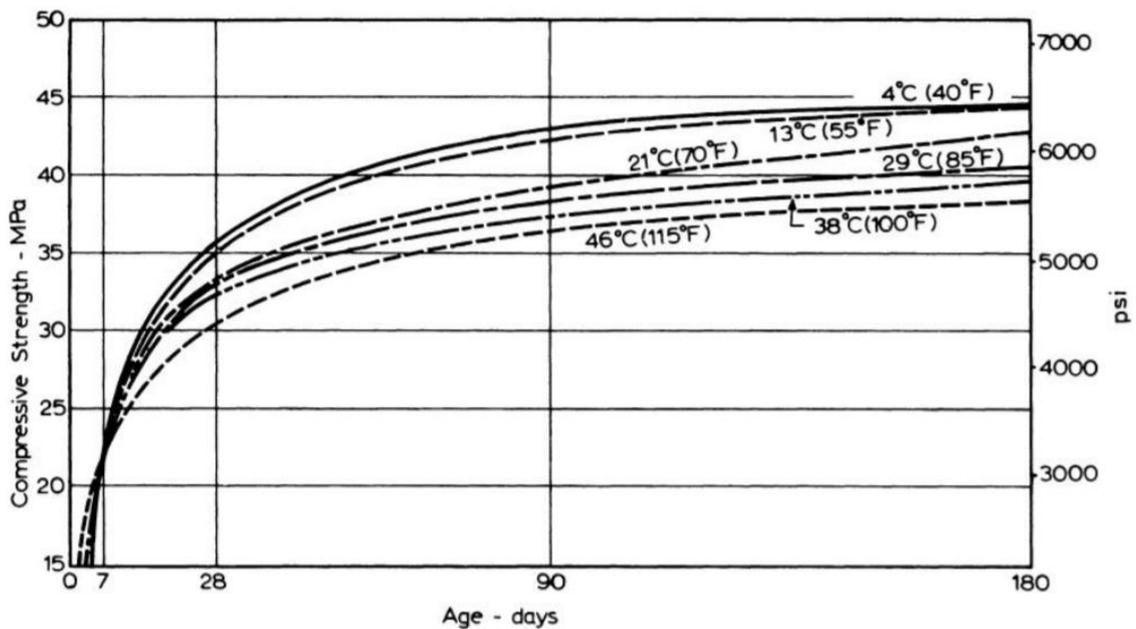


Figura 3. Efecto de la temperatura durante las dos primeras horas después del colado sobre el desarrollo de la resistencia.
Fuente: Neville, 1995.

Temperatura del hormigón

Para condiciones de temperatura en el hormigón, el ACI 305 no da recomendaciones acerca de la temperatura máxima permisible en la mezcla, pero indica que la temperatura del hormigón entre 24°C y 38°C se considera más favorable para la presentación de mejores resultados, aunque dichos argumentos dependen de la zona y la ejecución del trabajo para determinar el límite requerido.

Los criterios podrían variar según la normativa del país, en Chile se basan en los criterios y especificaciones de la norma NCh 170 para hormigones colocados en climas severos, indicando que “la temperatura del hormigón en el momento de ser colocado debe ser menor que 30 °C en elementos corrientes, y menor que 16 °C en elementos cuya menor dimensión exceda de 0,80 m” (Covarrubias, 1988, p. 2).

Según criterios de la norma ACI 305, presenta fórmulas para estimar la temperatura de la mezcla del hormigón, dependiendo de las condiciones utilizadas ya sea sin hielo o enfriado con hielo.

- Sin hielo (unidades del S.I y Sistema inglés).

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa}}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_{wa}} \quad (E-1)$$

- Con hielo (unidades del Sistema inglés).

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} - 112W_i}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (E-2)$$

- Con hielo (unidades del S.I).

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} - 79.6W_w}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_w + W_i + W_{wa}} \quad (E-3)$$

En las ecuaciones (E-2) y (E-3) se estima la temperatura de la mezcla suponiendo que el hielo agregado alcanza su punto de fusión. Para un enfoque más exacto el ACI 305 presenta las siguientes ecuaciones (E-4) y (E-5) considerando la temperatura del hielo:

- Con hielo (unidades del sistema inglés) (E-4)

$$T = \frac{0.22(T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa} - 79.6W_w} + \frac{T_a W_{wa} - W_i(128 - 0.5T_i)}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}}$$

- Con hielo (unidades del S.I) (E-5)

$$T = \frac{0.22(T_a W_a - T_c W_c) + T_w W_w}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}} + \frac{T_a W_{wa} + -W_i(79.6 - 0.5T_i)}{0.22(W_a + W_c) + W_w + W_i + W_{wa}}$$

Donde:

T_a = temperatura del agregado (°C, °F)

T_c = temperatura del cemento (°C, °F)

T_w = temperatura del agua de la mezcla sin incluir hielo (°C, °F)

T_i = temperatura del hielo (°C, °F)

W_a = masa seca del agregado (kg, lb)

W_c = masa del cemento (kg, lb)

W_i = masa del hielo (kg, lb)

W_w = masa del agua de la mezcla (kg, lb)

W_{wa} = masa de humedad libre y absorbida por los agregados (kg, lb)

Materiales componentes del hormigón y la temperatura

La calidad de los materiales constructivos es una de las propiedades fundamentales que influyen en la resistencia, la durabilidad y el costo de los proyectos. Dicha composición de la mezcla, dependerá de diversos factores como el manejo adecuado del elemento cementante según sus características físico-químicas, la estructura geológica de los materiales que conforman los agregados, además del tamaño y textura de los mismos.

La durabilidad del hormigón está definida por el desempeño de cada uno de sus componentes, siendo de mayor incidencia los agregados, para un debido control de la calidad en la obtención y uso de dichos materiales se implementa en Ecuador los requerimientos de la norma INEN (instituto ecuatoriano de normalización).

Agua de amasado

El agua se requiere para dos aplicaciones en relación al hormigón, como ingrediente en la elaboración de la mezcla y medio de curado para elementos de hormigón endurecidos. Por lo tanto, se requiere especificaciones y recomendaciones para establecer la calidad correspondiente para su uso.

Debido a que los efectos que podría presentar por un inadecuado control en sus parámetros, resultaría perjudicial en la mezcla relacionados con el tiempo de fraguado, resistencias a corto y a largo plazo. Adicionando la posibilidad de ataques por sulfatos y corrosión del acero de refuerzo en el hormigón.

La norma INEN presenta parámetros de análisis en el agua requerida para la prevención y aceptación de los parámetros físicos, orgánicos, inorgánicos, y biológicos determinados en la tabla 3, 4 y 5 sobre las especificaciones en el agua potable para uso constructivo del hormigón.

Tabla 3. Requisitos físicos e inorgánicos para el agua potable.
Fuente: NTE INEN 1108, 2011.

PARAMETRO	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMITIDO
Características físicas		
Color	Unidades de color aparente (Pt-Co)	15
Turbiedad	NTU	5
Olor	---	no objetable
Sabor	---	no objetable
Inorgánicos		
Animonio, Sb	mg/l	0.02
Arsénico, As	mg/l	0.01
Bario, Ba	mg/l	0.7
Boro, B	mg/l	0.5
Cadmio, Cd	mg/l	0.003
Cianuros, CN	mg/l	0.07
Cloro libre residual	mg/l	0.3 a 1.5
Cobre, Cu	mg/l	2.0
Cromo, Cr (Cromo total)	mg/l	0.05
Fluoruros	mg/l	1.5
Manganeso, Mn	mg/l	0.4
Mercurio, Hg	mg/l	0.006
Nitratos, NO ₃	mg/l	50
Nitritos, NO ₂	mg/l	0.2
Plomo, Pb	mg/l	0.01
Radiación total (Ra, Th, U)	Bq/l	0.1
Radiación total (Sr, I, Cs)	Bq/l	1.0
Selenio, Se	mg/l	0.01

Tabla 4. Requisitos orgánicos para el agua potable
Fuente: NTE INEN 1108, 2011.

PARAMETRO	UNIDAD	LIMITE MAXIMO PERMITIDO
Hidrocarburos policíclicos aromáticos HAP		
Benzo pireno	mg/l	0.0007
Hidrocarburos		
Benceno	mg/l	0.01
Tolueno	mg/l	0.7
Xileno	mg/l	0.5
Estireno	mg/l	0.02
Dicloroetano	mg/l	0.3
Cloruro de vinilo	mg/l	0.0003
Tricloroetano	mg/l	0.02
Tetracloroetano	mg/l	0.04
Di(2-etilhexil) ftalato	mg/l	0.008
Acrylamida	mg/l	0.0005
Epíclorohidrina	mg/l	0.0004
Hexaclorobutadieno	mg/l	0.0006
Dibromoetano	mg/l	0.0004
Dioxano	mg/l	0.05
Acido Nitrotriacético	mg/l	0.2

Tabla 5. Requisitos biológicos para el agua potable
Fuente: NTE INEN 1108, 2011.

PARÁMETRO	MÁXIMO
Coliformes fecales	
- Tubos múltiples NMP/100ml	< 1.1
- Filtración por membrana UFC/ 100ml	< 1
<i>Cryptosporidium</i> , número de quistes/100 litros	Ausencia
<i>Giardia</i> , número de quistes/ 100 litros	Ausencia

La norma INEN indica que, si no se dispone de agua potable, deberá de cumplir ciertas condiciones para la utilización en el hormigón. Siendo:

- El agua dispuesta a utilizar deberá ser clara y limpia, además no presentar sustancias perjudiciales en su contenido, como: aceites, ácidos, materia orgánica y otras sustancias que alteren la estructura del hormigón, los criterios de aceptación para el agua de calidad cuestionable se presentan en la tabla 6.
- El agua proveniente del lavado de mezcladoras o demás sustancias originales de los procesos de fabricación de hormigón, podrá ser aceptada mientras cumpla con los requisitos de la tabla 6 previo a su utilización, además existen requisitos químicos opcionales para el cumplimiento del agua dispuestos por el usuario presentados en la tabla 7.

Tabla 6. Criterio de aceptación de aguas dudosas.
Fuente: NTE INEN 1855-1, 2016.

ENSAYOS	LÍMITES
Resistencia a la compresión, % mínimo de control a 7 días	90
Tiempo de fraguado, desviación del testigo h:min	Desde 1:00 antes hasta 1:30 después

Tabla 7. Límites químicos opcionales para utilización de agua de lavado
Fuente: NTE INEN 1855-1, 2016.

REQUISITOS QUIMICOS, CONCENTRACION MÁXIMA EN EL AGUA DE MEZCLADO, PPM	LÍMITES
Cloruro como Cl, ppm	500
- Hormigón pretensado o en losas de puentes	
- Otros hormigones armados en ambientes húmedos o conteniendo embebido aluminio u otros metales disimiles, o construidos con encofrados metálicos galvanizados perdidos.	1000
Sulfato como SO ₄ , ppm	3000
Álcalis como Na ₂ O + 0.658 K ₂ O, ppm	600
Sólidos totales, ppm	50 000

Cemento

Se considera como un material seco que al mezclarse con el agua produce una reacción química adquiriendo propiedades tanto cohesivas como adhesivas, la cual permite la conglomeración de minerales en su composición, resultando una masa compacta.

Los tipos de cemento están indicados en la norma, además de las especificaciones técnicas a cumplir para implementar dicha variedad de cementos con diferentes propiedades, debido a que depende de la ubicación y las exigencias del proyecto para utilizar el más adecuado.

Tabla 8. Tipos de cemento según la norma aplicada.
Fuente: Portland Cement Association, 2004.

TITULO DE LA NORMA	NORMA NACIONAL	NORMA INTERNACIONAL	1ra PUBLICACION
Cementos Portland. Requisitos.	NTE INEN 152	ASTM C150	1940
Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos.	NTE INEN 490	ASTM C595	1967
Cementos Hidráulicos. Requisitos de Desempeño.	NTE INEN 2380	ASTM C1157	1992

Cemento Portland

El descubrimiento de este material, se le atribuye a Joseph Aspdin y es uno de los más utilizados en el ambiente constructivo, denominado de tal manera porque el hormigón que se fabricaba presentaba un color semejante a la caliza que se la extraía en una isla llamada Portland, ubicada en el Canal de la Mancha. Se indica que “el clínker enfriado y molido en polvo muy fino, es lo que constituye el cemento Portland convencional. Durante el molido se

agrega una pequeña cantidad de yeso para regular la fragua del cemento” (Abanto, 2009, p. 15).

Para la fabricación del cemento Portland se implementan materias primas de las mencionadas que son cal, sílice, hierro y alúmina, además de materiales cohesivos y calizos. Dichos materiales se trituran para ser dosificados y colocados hasta que se presente una mezcla homogénea, ya sea de manera seca o húmedo; la cual se introduce en un horno rotatorio procesándose a temperaturas alrededor de 1400 °C, el resultado es un material fragmentado denominado clínker Portland.

Cuando se enfría se procede a tritarlo junto con una proporción reducida de yeso, el propósito de incluir tal material a la dosificación es de regular el tiempo de fraguado en el proceso, dando como resultado un material fino de color gris conocido comúnmente como cemento Portland.

Según la norma INEN 152, presenta 10 tipos de cemento Portland, siendo:

- Tipo I. Cemento de uso general donde no se requieren propiedades específicas y no estén expuestos a ambientes agresivos, como son los ataques por sulfatos tanto en suelos como en agua y hormigones donde tengan un incremento notable de temperatura debido al calor producido durante la hidratación.
- Tipo IA. Cemento con especificaciones similares al Tipo I, las cuales requieren incorporación de aire.
- Tipo II. Cemento donde se requiere una moderada resistencia a los sulfatos, siendo utilizados en estructuras de volumen considerable, hormigones expuesto al agua de mar, estribos de gran espesor, muros de contención, entre otros.
- Tipo IIA. Cemento con especificaciones similares al tipo II, las cuales requieran incorporación de aire.
- Tipo II (MH). Cemento de uso general. Utilizados principalmente para un moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos.

- Tipo II (MH)A. Cemento con especificaciones similares al Tipo II (MH), las cuales requieran incorporación de aire.
- Tipo III. Cemento utilizado para proveer al hormigón de un incremento en su resistencia a edades tempranas, aunque su resistencia a largo plazo es semejante a los que presentaría los cementos tipo I y II.
- Tipo IIIA. Cemento con especificaciones similares al tipo III, las cuales requieran incorporación de aire.
- Tipo IV. Cemento utilizado para hormigones que necesiten un bajo calor de hidratación que el de otros tipos haciendo su desarrollo más lento, aplicados en estructuras de elementos grandes con baja relación de superficie/volumen, además requieren de mayor tiempo de curado que otros tipos de cemento.
- Tipo V. Cemento utilizado para producir hormigón resistente a los ataques por sulfatos ya sean debido al suelo o por acción del agua de mar, la cual incrementa si se incluye aire o mayor contenido de cemento en la mezcla, es decir bajas relaciones agua/cemento.

En el cemento Portland se identifican 4 componentes principales para su elaboración que se muestra en la tabla 9 y dependiendo de sus variaciones se determina el tipo de cemento utilizado.

Tabla 9. Compuestos químicos del cemento Portland.
Fuente: Chipana & Chambi, 2020.

NOMBRE DEL ÓXIDO	FÓRMULA	ABREVIATURAS
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminio tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3$	C_4AF

El proceso de hidratación para cada tipo de cemento va depender de las reacciones químicas que se producen entre los minerales del compuesto y el agua. Según el INEN 152, Los porcentajes de C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF en el cemento se los determinan mediante análisis químicos realizados en los ensayos dictados por la NTE INEN 160. Además, se debe emplear las ecuaciones correspondientes para cada caso.

- Cuando la relación entre los porcentajes de óxido de aluminio y óxido férrico es igual o mayor a 0.64, los compuestos se determinan a partir de las ecuaciones E-6 y E-9.

$$\begin{aligned} \text{Silicato tricálcico (C}_3\text{S)} & \quad \text{(E-6)} \\ & = (4.071 * \%CaO) - (7.600 * \%SiO_2) - (6.718 * \%Al_2O_3) \\ & \quad - (1.430 * \%Fe_2O_3) - (2.852 * \%SO_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Silicato dicálcico (C}_2\text{S)} & \quad \text{(E-7)} \\ & = (2.867 * \%SiO_2) - (0.7544 * \%C_3S) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Aluminato tricálcico (C}_3\text{A)} & \quad \text{(E-8)} \\ & = (2.650 * \%Al_2O_3) - (1.692 * \%Fe_2O_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ferroaluminato tetracálcico (C}_4\text{AF)} & \quad \text{(E-9)} \\ & = 3.043 * \%Fe_2O_3 \end{aligned}$$

- Cuando la relación entre los porcentajes de óxido de aluminio y óxido férrico es menor a 0.64 se forma una solución sólida expresada como $ss (C_4AF + C_2F)$, el aluminato tricálcico no debe estar presente en la composición del cemento, el silicato dicálcico debe ser calculado con la ecuación E-7, los contenidos de la solución sólida y el silicato tricálcico se determinan mediante las ecuaciones E-10 y E-11.

$$ss(C_4AF + C_2F) = (2.100 * \%Al_2O_3) + (1.702 * \%Fe_2O_3) \quad \text{(E-11)}$$

$$\begin{aligned} \text{Silicato tricálcico (C}_3\text{S)} & \\ & = (4.071 * \%CaO) - (7.600 * \%SiO_2 - (4.479 * \%Al_2O_3) \\ & \quad - (2.859 * \%Fe_2O_3) - (2.852 * \%SO_3) \end{aligned}$$

El contenido de cada una de los compuestos presentados anteriormente debe ser ajustado para considerar el uso de caliza y de adiciones inorgánicas en el proceso, el cual se determina a partir de la ecuación E-12.

$$X_f = X_b * \frac{(100 - L - P)}{100} \quad \text{(E-12)}$$

Donde:

X_b = Porcentaje en masa de C_3S , C_2S , C_3A o C_4AF en la base cemento (Clinker de cemento Portland y cualquier cantidad de sulfato de calcio.)

L = Porcentaje en masa de caliza

P = Porcentaje en masa de adición inorgánica de proceso

X_f = Porcentaje en masa de C_3S , C_2S , C_3A o C_4AF en el cemento terminado

La norma INEN 152 indica en la tabla 10 requisitos específicos para que cumpla las exigencias en su composición química, dependiendo el tipo de cemento a utilizar. En la tabla 11 se presentan requisitos químicos opcionales para la composición del cemento, indicadas por la norma.

Tabla 10. Requisitos químicos de composición normalizada
Fuente: NTE INEN 152-5, 2012.

TIPO DE CEMENTO	I y IA	II y IIA	II (MH) y II (MH)A	III y IIIA	IV	V
Óxido de aluminio (Al_2O_3), % máximo	---	6.0	6.0	---	---	---
Óxido férrico (Fe_2O_3), % máximo	---	6.0	6.0	---	6.5	---
Óxido de magnesio (MgO), % máximo	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trióxido de azufre (SO_3), % máximo						
Cuando (C_3A) es 8% o menor	3.0	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
Cuando (C_3A) es mayor del 8%	3.5	N.A	N.A	4.5	N.A	N.A
Pérdida por calcinación, % máximo	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Residuo insoluble, % máximo	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricálcico (C_3S), % máximo	---	---	---	---	35	---
Silicato dicálcico (C_2S), % mínimo	---	---	---	---	40	---
Aluminato tricálcico (C_3A), % máximo	---	8	8	15	7	5
Suma de $C_3S + 4.75C_3A$, % máximo	---	---	100	---	---	---
Ferroaluminato tetracálcico mas dos veces aluminato tricálcico ($C_4AF + 2(C_3A)$), o solución sólida ($C_4AF_2 + C_2F$), cuando sea aplicable, % máximo	---	---	---	---	---	25

Tabla 11. Requisitos químicos de composición opcionales.
Fuente: NTE INEN 152-5, 2012.

TIPO DE CEMENTO	I y IA	II y IIA	II (MH) y II (MH)A	III y IIIA	IV	V	OBSERVACIONES
Aluminato tricálcico (C_3A), % máximo	---	---	---	8	---	---	Para moderada resistencia a sulfatos
Aluminato tricálcico (C_3A), % máximo	---	---	---	5	---	---	Para alta resistencia a los sulfatos
Álcalis equivalentes ($Na_2O + 0.658K_2O$), % máximo	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	Cemento con bajo contenido de álcalis

Para los requisitos físicos de la composición, se indica en la tabla 12 los parámetros a considerar por la norma y en la tabla 13 se presentan requisitos físicos opcionales para los diferentes tipos de cemento.

Tabla 12. Requisitos físicos normalizados
Fuente: NTE INEN 152-5, 2012.

TIPO DE CEMENTO	I	IA	II	IIA	II (MH)	II (MH)A	III	IIIA	IV	V
Contenido de aire del mortero, volumen %:										
Máximo	12	22	12	22	12	22	12	22	12	12
Mínimo	---	16	---	16	---	16	---	16	---	---
Finura, superficie específica, m ² /kg (métodos alternativos):										
Ensayos de turbidímetro										
mínimo	150	150	150	150	150	150	---	---	150	150
máximo	---	---	---	---	245	245	---	---	245	---
Ensayo de permeabilidad al aire										
mínimo	260	260	260	260	260	260	---	---	260	260
máximo	---	---	---	---	430	430	---	---	430	---
Expansión en autoclave, % máximo	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Resistencia, no menor que los valores mostrados para las edades que se indican a continuación:										
Resistencia a la compresión, Mpa:										
1 día	---	---	---	---	---	---	12	10	---	---
3 días	12	10	10	8	10	8	24	19	---	8
7 días	19	16	17	14	17	14	---	---	7	15
28 días	---	---	---	---	---	---	---	---	17	21
Tiempo de fraguado; ensayo de Vicat										
Tiempo de fraguado, minutos; no menor que	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Tiempo de fraguado, minutos; no mayor que	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375

Tabla 13. Requisitos Físicos opcionales.
Fuente: NTE INEN 152-5, 2012.

TIPO DE CEMENTO	I y II	IA y IIA	II (MH)	II (MH)A	III	IIIA	IV	V
Falso fraguado, penetración final, % mínimo	50	50	50	50	50	50	50	50
Calor de hidratación								
7 días, máximo kJ/kg (cal/g)	---	---	290 (70)	290 (70)	---	---	250 (60)	---
28 días, máximo, kJ/kg (cal/g)	---	---	---	---	---	---	290 (70)	---
Resistencia no menor que lo valores mostrados: Resistencia a compresión, Mpa								
28 días	28	22	28 22	22 18	---	---	---	---
Resistencia a sulfatos, Máximo % de expansión, 14 días	---	---	---	---	---	---	---	0.04
Ensayo de Gillmore:								
Fraguado inicial, minutos, no menor que	60	60	60	60	60	60	60	60
Fraguado final, minutos, no mayor que	600	600	600	600	600	600	600	600

Para determinar las propiedades indicadas anteriormente, la norma INEN 152 enumera los métodos de ensayos correspondientes:

- Contenido de aire en el mortero. NTE INEN 195
- Análisis químico. NTE INEN 160.
- Resistencia mecánica. NTE INEN 488.
- Falso fraguado. NTE INEN 875.
- Finura por permeabilidad al aire. NTE INEN 196.
- Finura por turbidímetro. NTE INEN 197.
- Calor de hidratación. NTE INEN 199.
- Expansión en autoclave. NTE INEN 200.
- Tiempo de fraguado por el método de la aguja de Gillmore. NTE INEN 159.
- Tiempo de fraguado por el método de la aguja de Vicat. NTE INEN 158.
- Sulfato de calcio, expansión en mortero. NTE INEN 2529.

Cemento hidráulico compuesto

Este tipo de cemento consiste en la mezcla de dos o más compuestos inorgánicos, de los cuales, al menos uno de sus componentes no necesariamente será Clinker o cemento Portland. Estas combinaciones contribuyen al mejoramiento de las propiedades y características del cemento, además de que generan menores cantidades de CO₂ en su proceso de fabricación, reduciendo las concentraciones y beneficiando al medio ambiente.

Para fabricar los cementos hidráulicos compuesto es esencial realizar un análisis adecuado sobre la compatibilidad entre los componentes a mezclar, debido a que sus diferentes minerales tienden a reacción de manera diferente, influyendo en la composición de la pasta y las demandas de agua, además de determinarse los contenidos correspondientes de sulfatos y álcalis que afectan al fraguado o en el comportamiento de los aditivos que se utilicen en la mezcla.

La norma INEN 490 presenta diferentes tipos de cemento hidráulico compuesto siendo estos:

- Cemento hidráulico compuesto para uso en hormigón de construcción general.
- Tipo IS: Cemento Portland de escoria de altos hornos.
- Tipo IP: Cemento Portland puzolánico.
- Tipo IT: Cemento compuesto ternario.

Para la nomenclatura de cementos compuestos se debe agregar el sufijo (X) dependiendo del tipo de cemento hidráulico presentado anteriormente, donde (X) es igual al porcentaje utilizado de escoria o puzolana en el producto expresado en el compuesto de la mezcla.

Para los cementos compuestos ternarios la norma indica que su nomenclatura será agregar los sufijos **AX** y **BY** a la designación del tipo IT de cemento. Donde:

- **A** es para el cemento de escoria representado como **S** o para los contenidos de puzolana representado como **P**, dependiendo la que presente mayores cantidades en masa.
- **X** es el porcentaje en masa utilizado del constituyente **A**.
- **B** es **S** para el cemento de escoria o **P** para el cemento de puzolana.
- **Y** es el porcentaje en masa utilizado del constituyente en **B**

Los valores de **X** y **Y** están representadas por valores numéricos enteros de la masa del compuesto final, si dichos valores fueran iguales entonces se debe expresar inicialmente el contenido de puzolana. La norma INEN 490 indica ejemplos para expresar la nomenclatura indicada correspondiente a compuestos binarios y ternarios, se presenta a continuación lo siguiente:

- Para el caso de cemento compuesto binario, con 80% de cemento Portland y 20% de cemento de escoria la representación sería IS (20).
- Para el caso de cemento compuesto binario, con 85% de cemento Portland y 15% de puzolana la representación sería IP (15).
- Para el caso de cemento compuesto ternario, con 70% de cemento Portland, 20% de cemento de escoria y 10% de puzolana, la representación sería IT (S20) (P10).

- Para el caso de cemento compuesto ternario, con 60% de cemento portland, 20% de cemento de escoria y 20% de puzolana, la representación sería IT (P20) (S20).

Por efecto práctico, la norma utiliza una nomenclatura simplificada para representar a los tipos de cemento hidráulico compuesto en los requerimientos específicos, los cuales se aplican a un rango de productos o en cementos compuestos ternarios, cuando los requisitos son iguales es aplicable solamente a uno y se los constituyen dentro del rango indicado. Como ejemplo se presenta lo siguiente:

- Para el caso de cementos compuestos binarios con contenidos de cemento de escoria $<70\%$, se representa como IS (<70). En el caso de los cementos compuestos ternarios, si presenta un contenido de puzolana menor que el contenido de cemento de escoria, siendo dicho contenido para cemento de escoria menor a 70% se representa como IT($P<S<25$).
- Para el caso de que se requiere ensayar solamente el contenido de cemento de escoria siendo este $<25\%$ se basa únicamente en el contenido de dicho compuesto, sin ninguna relación con el contenido de puzolana, entonces la nomenclatura simplificada y el rango de cementos compuestos ternarios se indican como Tipo IT($S<25$).

En base a la norma INEN 490 se presentan los requerimientos químicos a cumplir para los cementos compuestos, indicados en la tabla 14.

Tabla 14. Requisitos químicos para cementos hidráulicos compuestos.
Fuente: NTE INEN 490-5, 2011.

TIPO DE CEMENTO	IS (<70), IT ($P<S<70$)	IS (≥ 70), IT ($S\geq 70$)	IP, IT ($P\geq S$)
Óxido de mangnesio (MgO), % máximo	---	---	6.0
Sulfato, reportado como (SO ₃), % máximo	3.0	4.0	4.0
Sulfuro, reportado como S ² , % máximo	2.0	2.0	---
Residuo insoluble, % máximo	1.0	1.0	---
Pérdida por calcinación, % máximo	3.0	4.0	5.0

Para los requerimientos físicos se presentan las especificaciones a cumplir presentadas en la tabla 15. Además, la norma indica que la puzolana, la escoria de altos hornos o el cemento de escoria que estarán en el cemento

deben ser ensayados en el mismo estado de finura que el material a mezclar. En base a los resultados de los ensayos se debe revisar los requisitos a cumplir para el cemento de escoria que va a ser utilizado para cementos Portland de escoria de altos hornos tipo IS(<25) o cementos compuestos ternarios Tipo IT(S<25), indicados en la tabla 16.

Tabla 15. Requisitos físicos para cementos hidráulicos compuestos.

Fuente: NTE INEN 490-5, 2011.

TIPO DE CEMENTO	IS (<70), IT (P<S<70), IP, IT (P≥S)	IS (<70)(MS), IT (P<S<70)(MS), IP (MS), IT (P≥S)(MS)	IS (<70)(HS), IT (P<S<70)(MS), IP (HS), IT (P≥S)(HS)	IS (≥70), IT (S≥70)	IP (LH), IT (P≥S) (LH)
Finura	Se debe informar la cantidad retenida al tamizar en húmedo en el tamiz de 45µm (N° 325) y la superficie específica medida con el aparato de permeabilidad.				
Expansión en autoclave, % máximo	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Contracción en autoclave, % máximo	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Tiempo de fraguado, ensayo de Vicat.					
Fraguado, minutos, no menor a	45	45	45	45	45
Fraguado, horas, no mayor a	7	7	7	7	7
Contenido de aire en el mortero, volumen % máximo	12	12	12	12	12
Resistencia a la compresión, mínimo, MPa.					
3 días	13	11	11	---	---
7 días	20	18	18	5	11
28 días	25	25	25	11	21
Calor de hidratación máximo:					
7 días, kJ/kg	290	290	290	---	250
(cal/g)	(70)	(70)	(70)	---	(60)
28 días, kJ/kg	330	330	330	---	290
(cal/g)	(80)	(80)	(80)	---	(70)
Requerimiento de agua, % máximo, en pese del cemento	---	---	---	---	64
Contracción por secado, % máximo.	---	---	---	---	0.15
Expansión en mortero, % máximo:					
14 días	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
8 semanas	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Resistencia a los sulfatos, % máximo:					
Expansión a 180 días	0.1	0.1	0.05	---	0.1
Expansión a 1 año	---	---	0.1	---	---

Tabla 16. Requisitos para puzolana usados en cementos compuestos y para escoria usados en cementos Portland con escoria de altos hornos Tipo IS (<25) y cementos compuestos ternarios Tipo IT (S<25).

Fuente: NTE INEN 490-5, 2011.

PUZOLANA Y ESCORIA, SEGÚN SEA APLICABLE	IS (<25), IT (S<25)
Finura: Cantidad retenida en el tamiz de 45µm (N° 325) mediante el tamizado húmedo, % máximo	20
Reactividad alcalina de la puzolana: Para uso en cementos de tipo IP(<15), IT(P<15) y IP(<15)-(A), IT(P<15)-(A); seis ensayos, expansión de la barra de mortero a 91 días, % máximo	0.05
Índice de actividad con cemento portland, a 28 días, % mínimo	75

Para determinar las propiedades especificadas en los requisitos se deben realizar los ensayos correspondientes presentados por el INEN 490, las cuales son:

- Análisis químico según la NTE INEN 160.
- Finura por tamizado según la NTE INEN 957.
- Finura por el aparato de permeabilidad al aire según la INEN 196.
- Expansión en autoclave según la NTE INEN 200, exceptuando los casos indicados para el cemento Portland de escoria de altos hornos IS (≥ 70) o los cementos compuestos ternarios IT ($S \geq 70$).
- Tiempo de fraguado según la NTE INEN 158.
- Contenido de aire del mortero según la NTE INEN 195, utilizando la gravedad específica verdadera del cemento.
- Resistencia a la compresión según NTE INEN 488.
- Calor de hidratación según INEN 199.
- Densidad según la NTE INEN 156.
- Requerimiento de agua según la NTE INEN 488.
- Expansión del mortero de cemento compuesto según la NTE INEN 867, la granulometría debe cumplir con los requisitos de la tabla 17.
- Retracción por secado según la NTE INEN 2504, se debe reportar la contracción lineal ocurrida durante el almacenamiento al aire, basándose en una medida inicial después de un periodo de curado en agua de 6 días.

- Resistencia a los sulfatos según el NTE INEN 2503.

Tabla 17. Requisitos de granulometría de áridos para el ensayo de expansión de morteros.

Fuente: NTE INEN 490-5, 2011.

TAMAÑO DEL TAMIZ		MASA %
PASA	RETIENE EN	
4.75-mm (N°4)	2.36-mm (N°8)	10
2.36-mm (N°8)	1.18-mm (N°16)	25
1.18-mm (N°16)	600- μ m (N°30)	25
600- μ m (N°30)	300- μ m (N°50)	25
300- μ m (N°50)	150- μ m (N°100)	15

Cemento hidráulico por desempeño

Se denominan cementos hidráulicos debido a que fraguan y se endurecen por una reacción química al mezclarse con el agua, además de que incrementan su resistencia y estabilidad mientras se mantengan sumergida en dicha sustancia.

Los cementos hidráulicos relacionados con el desempeño del hormigón, depende de varios factores que influyen en sus características, tales como la dosificación de la mezcla, condiciones ambientales, manejo y un curado adecuado a los elementos de hormigón.

Según la norma INEN 2380, clasifica a los diversos tipos de cementos hidráulicos dependiendo de las propiedades con las nomenclaturas correspondientes:

- Cemento Tipo GU, de uso general donde no sea necesario la aplicación de características específicas. Las condiciones son similares al cemento Tipo I.
- Cemento Tipo HE, de altas resistencias iniciales. Sus condiciones de aplicación son similares al Tipo III.
- Cemento Tipo MS, presenta una moderada resistencia a los sulfatos, utilizado comúnmente en elementos de drenaje debido a que en el suelo se presentan concentraciones de sulfatos por la presencia de aguas subterráneas. Sus condiciones de aplicación son similares al Tipo II.

- Cemento Tipo HS, presenta alta resistencia a los ataques por sulfatos, debido a mayores concentraciones del agua subterránea en el suelo. Sus condiciones de aplicación son similares al Tipo V.
- Cemento Tipo MH, presenta un moderado calor de hidratación, provocado por el efecto de altas temperaturas. Sus condiciones de aplicación son similares al Tipo II.
- Cemento Tipo LH, presenta un bajo calor de hidratación, desarrollando su resistencia más lentamente que otros tipos de cemento. Sus condiciones de aplicación son similares al Tipo IV.

Existe la opción de solicitar un control de la reactividad álcali-agregado, en tal caso se aplica la nomenclatura correspondiente representada por (R) para cada tipo de cemento. Según la norma INEN 2380 se presentan los requerimientos físicos en la composición para cementos hidráulicos, indicadas en la tabla 18.

La norma dispone también de requisitos físicos opcionales para los cementos hidráulicos, indicados en la tabla 19. Para los requerimientos químicos, no disponen de ninguna especificación para el cemento, sin embargo, la norma recomienda que debe ser analizado comúnmente para propósitos informativos.

Tabla 18. Requisitos físicos normalizados
Fuente: NTE INEN 2380-2

TIPO DE CEMENTO	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Finura	El porcentaje del tamiz de 45 µm (N° 325) por vía húmeda y el área de superficie específica					
Tiempo de fraguado, metodo de Vicat						
Inicial, no menos de, minutos	45	45	45	45	45	45
Inicial, no mas de, minutos	420	420	420	420	420	420
Contenido de aire de mortero, en volumen, %	Informar los resultados de ensayos al fabricante					
Resistencia a la compresión, MPa, minimo						
1 día	---	12	---	---	---	---
3 días	13	24	11	11	5	---
7 días	20	---	18	18	11	11
28 días	28	---	---	25	---	21
Calor de hidratación						
7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo	---	---	---	---	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo	---	---	---	---	---	290 (70)
Expansión en barra de mortero						
14 día, % máximo	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos)						
6 meses, % máximo	---	---	0.1	0.05	---	---
1 año, % máximo	---	---	---	0.1	---	---

Tabla 19. Requisitos físicos opcionales para cementos hidráulicos
Fuente: NTE INEN 2380-2

TIPO DE CEMENTO	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Baja reactividad con áridos reactivos álcali - silice. Expansión a:						
14 días, % máximo	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
56 días, % máximo	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Falso fraguado, penetracion final, % mínimo	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la compresión,						
28 días, MPa, mínimo	---	---	28	---	22	---
Contracción por secado	Los datos deben ser suministrados por el comprador					

Para establecer las propiedades especificadas anteriormente, se presentan los ensayos correspondientes a realizar según la norma INEN 2380.

- Análisis químico, según la NTE INEN 160, destacando los óxidos presentes en mayor o menor cantidad incluida la perdida por calcinación y el análisis en conjunto de dichos componentes deben constituir al menos el 98% de la masa total del cemento.

- Finura, según la NTE INEN 196 además de realizar el ensayo sobre la cantidad retenida en el tamiz de 45µm (N°325) según la NTE INEN 957.
- Expansión en autoclave, según NTE INEN 200.
- Tiempo de fraguado, según NTE INEN 158, registrando únicamente el tiempo de fraguado inicial.
- Ensayar el mortero para determinar el contenido de aire según NTE INEN 195.
- Resistencia a la compresión, según NTE INEN 488.
- Calor de hidratación, según la NTE INEN 199.
- Resistencia a los sulfatos, según la NTE INEN 2503.
- Reactividad del cemento con áridos reactivos álcali-sílice (opción R), según la NTE INEN 867
- Falso fraguado, según NTE INEN 875
- Expansión en barras de mortero, según NTE INEN 2529, registrando el periodo de ensayo a 14 días.
- Contracción por secado, según NTE INEN 1508.

Agregados

Los agregados son parte fundamental en la dosificación de la mezcla, los cuales deben constituir por lo menos del 60% al 75% en el volumen del hormigón y dependiendo de la composición en sus minerales estos influirán en las propiedades de la mezcla en estado fresco o endurecido y se clasifican en dos grupos: finos y gruesos.

Los materiales finos se constituyen generalmente por arenas naturales o con piedras trituradas siendo el tamaño de sus partículas menores a 5 mm. Los materiales gruesos son conformados en su mayoría por gravas o piedras trituradas con tamaños en sus partículas mayores que 5 mm. Para la obtención de gravas y arenas se requieren excavaciones en minas o dragados en ríos, lagos o lechos marinos. En cambio, las piedras trituradas se las consigue mediante la pulverización de materiales rocosos provenientes de canteras, cantos rodados o gravas de gran tamaño. En la tabla 20, se presentan los diferentes minerales y rocas constituyentes en los agregados.

Tabla 20. Rocas y minerales presentes en los agregados.
Fuente: Portland Cement Association, 2004.

MINERALES		ROCAS ÍGNEAS	ROCAS SEDIMENTARIAS	ROCAS METAMÓRFICAS
Sílice	Carbonato	Granito	Conglomerado	Mármol
Cuarzo	Calcita	Sienita	Arenisca	Metacuarcita
Ópalo	Dolomita	Diorita	Cuarcita	Pizarra
Tridimita	Sulfato	Gabro	Grauvaca	Filita
Cristobalita	Yeso	Periodita	Subgrauvaca (molasa)	Esquisto
Silicatos	Anhidrita	Pegmatita	Arcosa	Anfibolita
Feldespato	Sulfuro de hierro	Vidrio volcánico	Piedra arcillosa	Hornfels (roca córnea)
Ferromagnesiano	Pirita	Obsidiana	Limonita	Gneis
Hornblenda	Marcasita	Piedra pómez (pumita)	Argilita y esquisto	Serpentinita
Augita	Pirolita	Tufa (toba volcánica)	Carbonatos	
Arcilla	Óxido de hierro	Cagafierro	Caliza	
Ilitas	Magnetita	Perlita	Dolomita	
Caolines	Hematita	Vidrio volcánico	Marga	
Cloritas	Goetita	Felsita	Greda (creta)	
Montmorinollita	Ilmenita	Basalto	Chert	
Mica	Limonita			
Ceolita				

Dichos agregados deben cumplir con los requerimientos de la norma aplicada para que su uso en la construcción sea el adecuado, siendo una de las consideraciones la presencia de partículas limpias, resistentes y sin contenidos químicos o de materiales que puedan perjudicar a la adherencia e hidratación del cemento., también se deben evitar los agregados con altos contenidos de esquistos o rocas de la misma categoría incluyendo materiales blandos o de gran porosidad. Varios estudios y ensayos recomiendan evitar especialmente los de tipo Cherts, debido a que presentan poca resistencia contra la meteorización resultando en daños superficiales como la presencia de erupciones.

Características y requerimientos en los agregados

Según la norma INEN 872 presenta las características consideradas para los agregados finos y gruesos en la elaboración de hormigón:

Granulometría de los agregados

La granulometría es necesaria para indicar la distribución del tamaño de una muestra de material la cual se determina a través de tamices y según los resultados, la norma presenta los límites correspondientes para agregados finos y gruesos. En la tabla 21 se indican los porcentajes requeridos para el pasante de cada tamiz para áridos finos.

La norma INEN indica que, si el agregado fino no cumple con los requisitos granulométricos necesarios, se puede aceptar siempre que se demuestre que el tipo de hormigón especificado, tenga sus propiedades más importantes similares a las del hormigón elaborado con dicho agregado.

Para agregados gruesos, en la tabla 22 se presentan los límites requeridos para el tamaño adecuado basándose en los criterios de la norma. Si el árido grueso no cumpliera con las especificaciones mencionadas, se debe solicitar ensayos para evaluar el desempeño y demuestren que se obtienen resultados satisfactorios.

Tabla 21. Límites granulométricos del agregado fino.
Fuente: NTE INEN 872, 2011

TAMIZ (NTE INEN 154)	PORCENTAJE QUE PASA
9.5 mm	100
4.75 mm	95 a 100
2.36 mm	80 a 100
1.18 mm	50 a 85
600 μm	25 a 60
300 μm	5 a 30
150 μm	0 a 10

Tabla 22. Requisitos granulométricos del agregado grueso
Fuente: NTE INEN 872, 2011

Número de tamaño	Tamaños nominal (Tamices con aberturas cuadradas) (mm)	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas)													
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	300 µm
1	de 90 a 37.5	100	90 a 100	---	25 a 60	---	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	---
2	de 63 a 37.5	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	---
3	de 50 a 25.0	---	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---
357	de 50 a 4.75	---	---	---	100	100	---	35 a 70	---	0 a 5	---	0 a 5	---	---	---
4	de 37.5 a 19.0	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---
467	de 37.5 a 4.75	---	---	---	---	---	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	0 a 5	---	---	---
5	de 25.0 a 12.5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---	---	---
56	de 25 a 9.5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	---	---	---
57	de 25.0 a 4.75	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25 a 60	---	0 a 10	0 a 5	---	---
6	de 19.0 a 9.5	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	---	---	---
67	de 19.0 a 4.75	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	---	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---
7	de 12.5 a 4.75	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	---	---
8	de 9.5 a 2.36	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	---
89	de 9.5 a 1.18	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	de 4.75 a 1.18	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

El tamaño máximo para las partículas de los agregados gruesos es uno de los factores esenciales en el ámbito económico para la elaboración de hormigón, si presentan un menor tamaño en sus partículas, la demanda de agua y cemento incrementa en comparación con agregados gruesos que se componen de un mayor tamaño máximo, esto se debe al incremento del área superficial total del agregado. Según se indica en la figura 4, para una relación agua-cemento, se necesitará menos material cementante a medida que se aumenta el tamaño máximo del agregado.

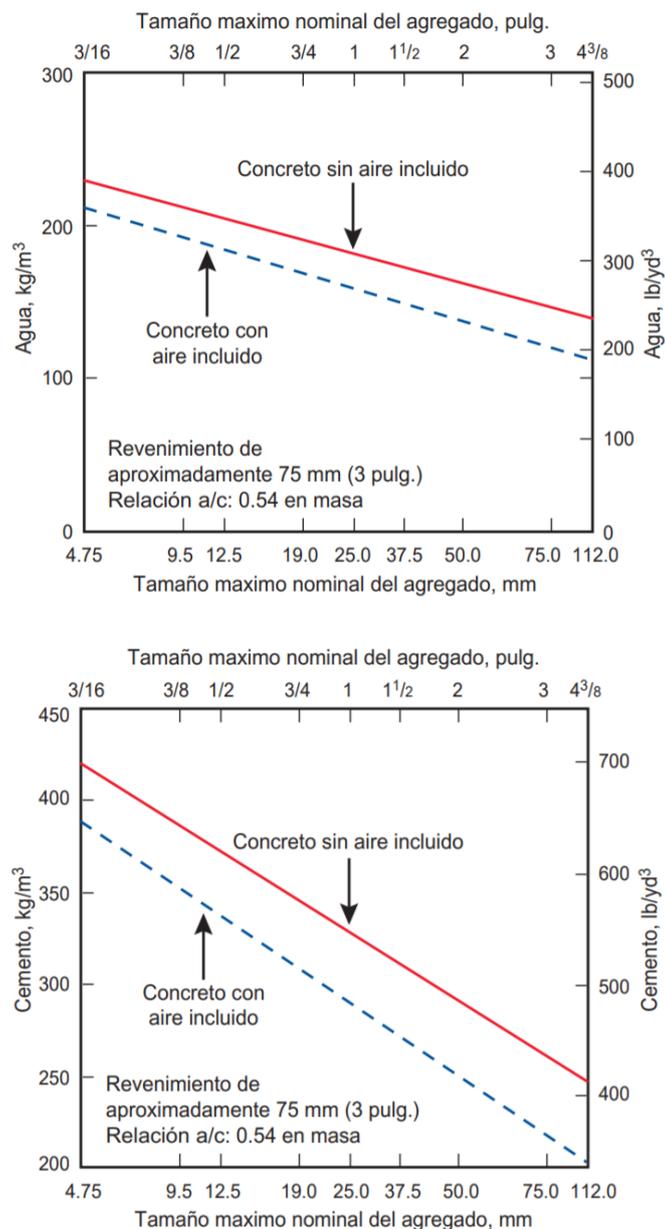


Figura 4. Contenidos de cemento y agua con relación al tamaño máximo del agregado en el hormigón con y sin aire incluido.

Fuente: Portland Cement Association, 2004

Sustancias perjudiciales en los agregados

Los agregados en la mezcla pueden ser altamente inestables si en su composición contienen elementos que se consideran químicamente reactivos en el hormigón, resultando en complicaciones como: variaciones en el volumen de la mezcla, interferencia en los procesos de hidratación del cemento, además de que evitan la unión adecuada entre las partículas del agregado con el cemento y ciertas consecuencias debido a partículas débiles o defectuosas.

Es necesario realizar un análisis del comportamiento del agregado para una adecuada selección y limitando los componentes perjudiciales en los materiales, dichas sustancias nocivas que afectan el desempeño en la dosificación pueden ser debido a contenidos de materia orgánica, arcillas u otros materiales finos, contaminación salina y presencia de partículas blandas.

- a) **Impurezas orgánicas:** Por lo general los agregados son materiales fuertes y resistentes, pero su desempeño puede ser insatisfactorio por la presencia de componentes orgánicos, debido a que alteran los procesos de hidratación en el cemento, impidiendo un tiempo de fraguado óptimo afectando al endurecimiento del hormigón y consecuentemente en el análisis de su resistencia. Pero no todos los contenidos orgánicos son potencialmente dañinos para los agregados, lo más conveniente es realizar los ensayos respectivos para su resistencia y comprobar si efectivamente no perjudican las propiedades del hormigón.
- b) **Arcilla y otros materiales finos:** La presencia de materiales arcillosos y finos en el agregado se dan en forma de recubrimientos superficiales, esto impide la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. además de que, si algunos tipos de materiales finos se presentan en grandes cantidades, afectará a la demanda de agua requiriendo mayores cantidades en su dosificación. Para evitar dichas dificultades se aplican los debidos procedimientos de lavado para eliminar los revestimientos de las partículas arcillosas y la presencia de polvo, aunque existen materiales bien adheridos que no pueden eliminarse por dicho proceso, en tal caso se podrían aceptar si

químicamente son estables y no presentan efectos contraproducentes en los agregados.

- c) **Contaminación por sal:** Estos casos generalmente se presentan para agregados como arenas obtenidas de la orilla del mar o estuarios de río, estos materiales dragados de contenidos salinos deben procesarse para su utilización y el más simple es el lavado con agua dulce, aunque existen muchos casos en que la arena proveniente del lecho marino no contiene cantidades nocivas de sales. Este parámetro es fundamental debido al potencial corrosivo que afectaría a estructuras de hormigón reforzado, adicionalmente, las sales absorben la humedad del ambiente provocando eflorescencias en los elementos estructurales, siendo estos depósitos de color blanco que aparecen en la superficie del hormigón.

Límites establecidos por la norma INEN

En las tablas 23 y 24 se presentan criterios de aceptación de la norma INEN 872 para los agregados finos y gruesos correspondientemente. Además, se indica que si los áridos finos que no cumplen con los ensayos de contenido orgánico podrán ser aceptados siempre y cuando la resistencia relativa de 7 días sea mayor al 95%.

Para el caso de los áridos gruesos de no cumplir con los límites establecidos, se aceptará cuando se demuestre que el hormigón desarrollado con el agregado y expuesto a las mismas condiciones de intemperismo, presente un desempeño satisfactorio además de que no altere significativamente sus propiedades.

**Tabla 23. Límites para sustancias perjudiciales en los agregados finos para hormigón.
Fuente: NTE INEN 872, 2011.**

DETALLE	PORCENTAJE DE LA MUESTRA TOTAL, EN MASA, MÁXIMO
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	3.0
Material más fino que 75 µm:	
Hórmigon sujeto a abrasión	3.0
Todos los demas hormigones	5.0
Carbón y lignito:	
Donde es importante la apariencia superficial del hormigón	0.5
Todos los demas hormigones	1.0

Tabla 24. Límites para sustancias perjudiciales y requerimientos de propiedades físicas para el agregado grueso del hormigón.
Fuente: NTE INEN 872, 2011.

Designación de clase	Tipo o ubicación de la construcción de hormigón	Máximo permisible, %						
		Terrones de arcillas y partículas desmenuzables	Chert (gr. esp. SSS menor de 2.40)	Total de terrones de arcilla, partículas desmenuzables y chert (gr. Esp. SSS menor de 2.40)	Material más fino que 75 µm	Carbón y lignito	Valor de la degradación (%)	Solidez de los áridos mediante el sulfato de magnesio (5 ciclos)
Condición de intemperismo severo								
1S	Zapatas, fundaciones, columnas y vigas no expuestas a la interperie, losas de pisos interiores que van a ser revestidas.	10.0	---	---	1.0	1.0	50	---
2S	Pisos interiores sin revestimiento.	5.0	---	---	1.0	0.5	50	---
3S	Muros de fundación sobre el nivel del terreno, muros de retención, estribos, pilares, vigas principales y vigas expuestas a la interperie.	5.0	5.0	7.0	1.0	0.5	50	18
4S	Pavimentos, tableros de puentes, caminos y bordillos, senderos, patios, pisos de garaje, pisos expuestos y terrazas o estructuras frente al agua, sujetas a humedecimiento continuo.	3.0	5.0	5.0	1.0	0.5	50	18
5S	Hormigón arquitectónico expuesto.	2.0	3.0	3.0	1.0	0.5	50	18
Condición de intemperismo moderado								
1M	Zapatas, fundaciones, columnas y vigas no expuestas a la interperie, losas de pisos interiores que van a ser revestidas.	10.0	---	---	1.0	1.0	50	---
2M	Pisos interiores sin revestimiento.	5.0	---	---	1.0	0.5	50	---
3M	Muros de fundación sobre el nivel del terreno, muros de retención, estribos, pilares, vigas principales y vigas expuestas a la interperie.	5.0	8.0	10.0	1.0	0.5	50	18
4M	Pavimentos, tableros de puentes, caminos y bordillos, senderos, patios, pisos de garaje, pisos expuestos y terrazas o estructuras frente al agua, sujetas a humedecimiento continuo.	5.0	5.0	7.0	1.0	0.5	50	18
5M	Hormigón arquitectónico expuesto.	3.0	3.0	5.0	1.0	0.5	50	18
Condición de intemperismo nulo								
1N	Losas sujetas a la abrasión del tráfico, tableros de puentes, pisos, senderos, pavimentos.	5.0	---	---	1.0	0.3	50	---
2N	Todas las demás clases de hormigón.	10.0	---	---	1.0	1.0	50	---

Los ensayos requeridos para determinar los parámetros presentados anteriormente, la INEN 872 presenta algunos procedimientos a realizar:

- Granulometría y módulo de finura. NTE INEN 696.
- Material más fino que el tamiz #200. NTE INEN 697.
- Sustancias orgánicas. NTE INEN 855.
- Efecto de las sustancias orgánicas en la resistencia. NTE INEN 866.
- Terrones de arcilla. NTE INEN 698.
- Carbón y lignito. NTE INEN 699.
- Densidad aparente de escoria. NTE INEN 858.
- Contenido Chert. NTE INEN 699. También se utiliza INEN 870 para identificar el contenido Chert de las partículas en fracción liviana.

Reactividad álcali-agregado

Ciertos agregados presentes en la mezcla pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos en el hormigón, esto es relevante cuando la composición produce una expansión que afecta considerablemente el comportamiento del mismo. Este procedimiento resulta en dos condiciones denominadas álcali-sílice y álcali-carbonato, siendo la más frecuente la reacción álcali-sílice, debido a que los minerales que reaccionan con el dióxido de silicio son más comunes que los minerales de carbonatos reactivos con álcalis.

Se debe comprender el potencial expansivo debido a la reactividad de los agregados, evaluándolo mediante los ensayos correspondientes vigentes en las normas. Sin embargo, hay la posibilidad de que no exista relación entre los resultados de dichos ensayos y el comportamiento expansivo requerido, por lo tanto, lo ideal es una correcta interpretación y criterio en base a los análisis realizados para estructuras de materiales y niveles de reacción similares. En la tabla 25, se presentan algunos de los minerales y rocas que influyen en la reactividad de los materiales para hormigón.

Tabla 25: Minerales potencialmente perjudiciales y materiales sintéticos.
Fuente: Portland Cement Association, 2004.

SUSTANCIAS REACTIVAS ÁLCALI-SÍLICE		SUSTANCIAS REACTIVAS ÁLCALI-CARBONATO
Andesitas	Esquistos	Calizas dolomíticas
Argilitas	Filitas	Dolomitas calcíctas
Calcedonia	Gneis granítico	Dolomitas granuladas
Cherts	Grauvacas	
Cherts calcedónicos	Material volcánico vitrificado	
Ciertas calizas, síliceas y dolomitas	Metagrauvacas	
Cristobalita	Ópalo	
Cuarcitas	Pizarras opalinas	
Cuarzo deformado y otras formas	Pizarras silíceas	
Cuarzosas	Riolitas	
Dacita	Vidrio silícico natural y sintético	
	Tridmita	

Reacción álcali-sílice

Los elementos que son afectados por las expansiones debido a la reacción álcali-sílice pueden presentar grandes propagaciones de fisuras, juntas cerradas o deterioradas, aparición de erupciones en la superficie del hormigón.

En los últimos años del siglo XX, se ha observado un número creciente de reacciones químicas perjudiciales entre el agregado y la pasta de cemento hidratada circundante. Las formas reactivas de la sílice más comunes son el ópalo, calcedonia y tridimita, estos materiales se encuentran en: Cherts opalinos o calcedonios, calizas silíceas, riolitas y tobas riolíticas, andesitas y tobas de andesita y filitas. (Neville, 1995, p. 506).

Debido a que la degradación producida por las reacciones es un procedimiento lento, el riesgo de que la estructura falle de manera súbita es relativamente bajo. Sin embargo, puede afectar a la funcionalidad y desempeño por el deterioro progresivo, siendo incluso más vulnerable si se desarrolla en un entorno altamente agresivo.

El mecanismo de reacción comienza con el ataque de los minerales silíceos en los agregados por los hidróxidos alcalinos en el agua, resultando la formación de un gel que va expandiéndose mientras más agua consume debido a la gran afinidad que presentan los reactivos con la humedad.

Consecuentemente, inducirá a la presencia de grietas en los agregados y la pasta de cemento.

La humedad relativa mínima en el interior del hormigón para que proceda la reacción es de aproximadamente 85% a 20°C (68°F). a temperaturas más altas, la reacción puede tener lugar a una humedad considerablemente más baja. Generalmente, una temperatura más alta acelera el proceso de la reacción álcali-sílice, pero no aumenta la expansión total inducida por la reacción. (Neville, 1995, pp. 508-509).

La influencia de la temperatura se debe al hecho de que al incrementarse se reduce la solubilidad del hidróxido de calcio, pero aumenta en la sílice. Este efecto acelerador es conveniente para el desarrollo de ensayos sobre la reactividad de los agregados.

Para que exista un control del potencial expansivo provocado por la reacción álcali-sílice en los agregados es recomendable utilizar materiales locales disponibles o en combinación con otros métodos, refiriéndose a la implementación de materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes, escorias de alto horno, puzolanas y humo de sílice, además de respaldar la eficiencia del método aplicado con los ensayos correspondientes según la norma vigente. Según la figura 5, la expansión disminuye debido al incremento en la dosis de materiales como escorias o puzolanas.

Para evaluar el potencial de expansión debido a la reactividad de los agregados, se han propuesto varios métodos para los ensayos, la norma INEN se basa sus criterios de las normas ASTM de los cuales se destacan de ambas normas las siguientes:

- **Método químico (INEN 868)**, este procedimiento indica las cantidades de sílice disuelta y la cantidad reducida de la alcalinidad. Además de que el ensayo se realiza de forma rápida, también proporciona información útil, exceptuando casos para materiales rocosos que reaccionan lentamente como el gneis graníticos y cuarcita. Si los resultados de los ensayos indican que los agregados son perjudiciales, se deberá comprobar mediante las disposiciones de la norma INEN 867 o ASTM 1293 el potencial de expansión en el hormigón.

- **Método de la barra de mortero para combinaciones agregado-cemento (INEN 867)**, esta norma es aplicable para casos de utilización de cemento con alto contenido de álcalis, indicando la probabilidad de que ocurra una expansión altamente perjudicial. Sin embargo, estos criterios no son recomendables para agregados de lenta reactividad, específicamente para el caso indicado se debe analizar mediante las disposiciones de la norma ASTM C 1260 o ASTM C 1293.
- **Método de la barra de mortero para indicar la efectividad de aditivos minerales o escorias de altos hornos (INEN 2565)**, esta norma analiza los materiales cementantes en las barras de mortero, los criterios sobre el procedimiento son similares a la norma INEN 867 con la diferencia de que se utiliza exclusivamente como agregado el vidrio de borosilicato altamente reactivo, pero en la interpretación de los resultados se debe considerar que este material presenta un potencial reactivo más alto que la mayoría de los agregados utilizados en construcción, por lo tanto, la cantidad indicada de material necesario para controlar la expansión en un cemento, resultara mayor que la requerida para evita la expansión perjudicial en un agregado.
- **Método de la barra de mortero para determinar la reactividad alcalina del agregado (ASTM C 1260)**, Este procedimiento de la norma indica una predicción técnica acelerada. Cuyo funcionamiento detecta materiales perjudiciales que desarrollan su expansión lentamente. Si los resultados del ensayo por este método presentan una expansión mayor a 0.10% a 16 días, se debe utilizar los criterios establecidos en la norma ASTM C 1293.
- **Método del prisma para determinar la reactividad álcali-sílice (ASTM C 1293)**, la norma analiza el potencial de expansión álcali-sílice de los agregados ya sean independientemente o combinaciones con puzolanas o escorias implementando prismas de hormigón. El ensayo es un procedimiento acelerado el cual utiliza un alto contenido de álcalis para la muestra. Este método de ensayo se considera el más

factible de las técnicas aplicadas por la norma para evaluar la reacción álcali-sílice de los agregados.

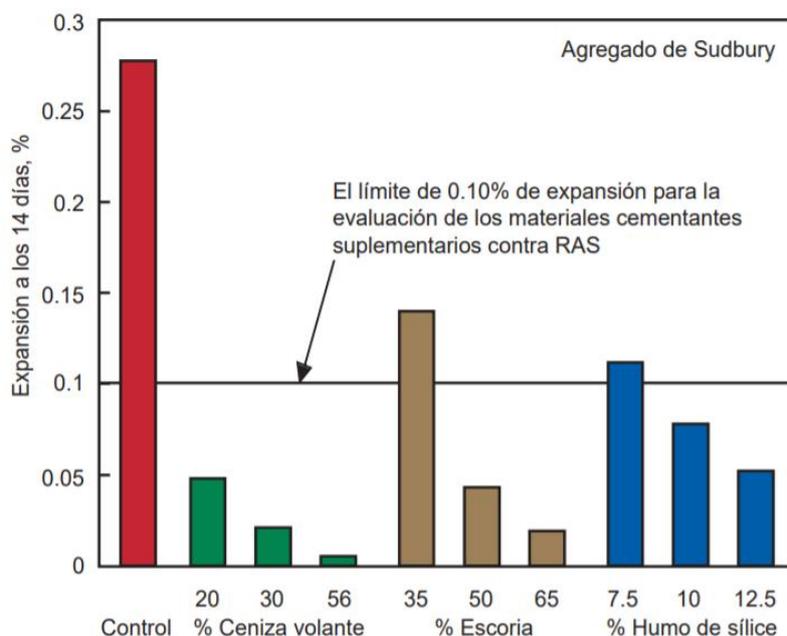


Figura 5. Influencia en la expansión de la barra de mortero utilizando diferentes cantidades de ceniza, escoria y humo de sílice según norma ASTM. Fuente: Portland Cement Association, 2004.

Reacción álcali-carbonato

La reacción álcali-carbonato se produce entre los agregados conformados por rocas dolomíticas y los álcalis del cemento, estos minerales reactivos contienen cristales de dolomita que se encuentran dispersos y recubiertos por partículas finas de calcita y arcilla.

El mecanismo de la reacción álcali-carbonato ocurre con la ruptura de la dolomita, también llamado dedolomitización, transformándose en carbonato de calcio y brucita. Sin embargo, las reacciones que involucran este procedimiento no son comprendidas en su totalidad haciendo que su interpretación sea inconclusa, especialmente sobre los efectos reactivos de la arcilla, pero en la mayoría de los casos en que ha ocurrido dicha reacción expansiva, se le ha asociado con la presencia de arcillas y partículas muy finas en los agregados potencialmente expansivos.

Por lo general, el mecanismo de la reacción álcali-carbonato ocurre en condiciones ambientales húmedas y es poco frecuente debido a que los

agregados compatibles para dicho proceso no son aptos para la fabricación de hormigón, sea por resistencia u otros parámetros indicados en las normas.

Existen varios métodos y materiales para mitigar la reacción álcali-carbonato de los agregados, entre los cuales se destacan: la mezcla de agregados, limitar el tamaño máximo del agregado utilizando el menor posible y emplear cementos con bajo contenido de álcalis, aunque se ha indicado que este último y la aplicación de puzolanas, no se consideran métodos eficientes para un adecuado control de la expansión álcali-carbonato.

Las normas INEN y ASTM presentan criterios para evaluar el potencial expansivo debido a la reactividad de los agregados, mediante los métodos de ensayos presentados:

- **Método cilindro de roca para determinar la reacción álcali-carbonato (INEN 871)**, las rocas reactivas que son potencialmente perjudiciales no se presentan comúnmente en el medio, además raramente son utilizados en el agregado para la fabricación del hormigón. La norma ha basado sus criterios de análisis y procedimientos de la norma ASTM C 586 en la realización de estudios y selección preliminar de la fuente de agregados, indicando la cantidad de material perjudicial que afectará al hormigón.
- **Método del prisma de hormigón para determinar la reacción álcali-carbonato (ASTM C 1105)**, la norma presenta diversos criterios e información general para una adecuada interpretación de los resultados, se indica que una combinación de cemento-agregado es potencialmente reactiva si el promedio de expansión de las 6 muestras de hormigón es igual o superior a 0.015% para la edad de 3 meses y 0.030% a la edad de un año. Siendo de preferencia los datos a la edad tardía.

Aditivos

A diferencia del cemento, agregados y agua, los aditivos son componentes opcionales en la dosificación de hormigón que se pueden añadir antes o durante el mezclado. En la actualidad, ha obtenido un crecimiento en la aplicación constructiva debido a que el uso de aditivos proporciona

beneficios en el hormigón tanto físicos como económicos, además de hacer posible la utilización de una categoría más amplia de ingredientes para la mezcla.

Sin embargo, la implementación de aditivos no es una solución óptima para mejorar materiales de mala calidad en la mezcla o para la mano de obra deficiente ya sea en el transporte, colocación o compactación del hormigón.

Tipos de aditivos

La composición de los aditivos puede ser de carácter orgánico o inorgánico, además su aplicación se presenta tanto en estado sólido como líquido. El uso más habitual es en estado líquido, debido a que se dispersa más rápido y de manera uniforme durante la mezcla de hormigón, sin embargo, existen aditivos que están sometidos a métodos especiales para utilizarlo en la mezcla, siendo el caso de los superplastificantes.

Generalmente los aditivos se clasifican por su función en el hormigón, pero en ocasiones se presenta alguna composición adicional que influye en la mezcla. La norma ASTM C 494 los clasifica con la siguiente nomenclatura:

- **Tipo A:** para reductores de agua.
- **Tipo B:** para retardadores.
- **Tipo C:** para aceleradores.
- **Tipo D:** para reductores de agua y retardadores.
- **Tipo E:** para reductores de agua y aceleradores.
- **Tipo F:** para reductores de agua de alto rango o superplastificantes.
- **Tipo G:** para reductores de agua de alto rango y retardadores, o superplastificantes y retardadores.

La eficiencia de los diferentes tipos de aditivos varía dependiendo de la dosificación y composición de los materiales en el hormigón, siendo esencial considerar el volumen total de aditivos utilizado en el contenido de agua de la mezcla, debido a que los aditivos son muy vulnerables a los efectos que se presentan por las variaciones en su dosificación, esto comúnmente

podría ocurrir de manera accidental durante la producción de hormigón o prácticas inadecuadas durante su transporte.

Aditivos aceleradores

La función principal de estos aditivos es de acelerar el desarrollo inicial de la resistencia en el hormigón disminuyendo el tiempo de fraguado. Se utiliza normalmente en condiciones de temperaturas bajas, donde se requiere una rápida extracción del encofrado o en situaciones constructivas de emergencias, permitiendo un acabado temprano en el hormigón y la habilitación breve de la estructura.

Por el contrario, para condiciones donde existen altas temperaturas, los aditivos aceleradores pueden afectar el desarrollo del calor de hidratación haciendo que se presenten grietas por contracción en el hormigón.

Además, se debe indicar que dichos aceleradores no protegen al hormigón del congelamiento debido a que no reduce de manera significativa su punto de congelación, siendo necesario medidas preventivas adicionales para su aplicación.

El componente más utilizado en los aceleradores es el cloruro de calcio, debido a su eficiencia que presenta para acelerar el proceso de hidratación de los silicatos de calcio. Aunque dicho mecanismo implica ciertos efectos perjudiciales en el hormigón, siendo mayor importancia la presencia de iones de cloruro que inducen a procesos corrosivos en el acero. Por lo tanto, su aplicación no es recomendada para estructuras de hormigón reforzado o pretensado y varias normas restringen o prohíben el uso del cloruro de calcio en el hormigón que contengan acero o aluminio.

Adicionalmente, el cloruro de calcio incide en el incremento de la contracción por secado y posiblemente en el aumento de la deformación en el hormigón. No obstante, la demanda de los aditivos aceleradores ha disminuido y su aplicación ha sido escasa en plantas de fabricación de hormigón, debido a que existen métodos para conseguir un incremento en la resistencia inicial como el uso de relaciones agua/cemento bajas o aplicando colectivamente superplastificantes. Sin embargo, resulta una opción adecuada para la colocación de hormigón en condiciones climáticas bajas.

Aditivos retardadores

La utilización de los retardadores es para prolongar el tiempo de fraguado ralentizando así el tiempo de endurecimiento en el hormigón, además de que dicho proceso no altera el desarrollo de resistencia ni la composición de los materiales hidratados. Estos aditivos se los utiliza habitualmente para el colado de la mezcla en climas cálidos, debido a la aceleración del fraguado que son causados en condiciones de temperaturas altas.

Esta práctica también favorece a la transportación, colocación y compactación de la mezcla de hormigón, favoreciendo especialmente a elementos de vertido masivo o de gran tamaño en las estructuras, además de que permite la ejecución de acabados especiales como superficies con agregados expuestos.

Sin embargo, los aditivos retardadores son propensos a aumentar los efectos por contracción plástica debido al aumento en la duración de su estado plástico, pero no influyen en la contracción por secado. Se indicó que el uso de dichos aditivos es de aumentar el tiempo de fraguado de la mezcla, sin embargo, también se aplica para reducir la pérdida de revenimiento lo que resultaría en una mejora de la trabajabilidad, pero según resultado de ensayos presentados en la figura 6, demuestra un incremento en la tasa de la pérdida de revenimiento al comparar hormigones convencionales con y sin aditivos.

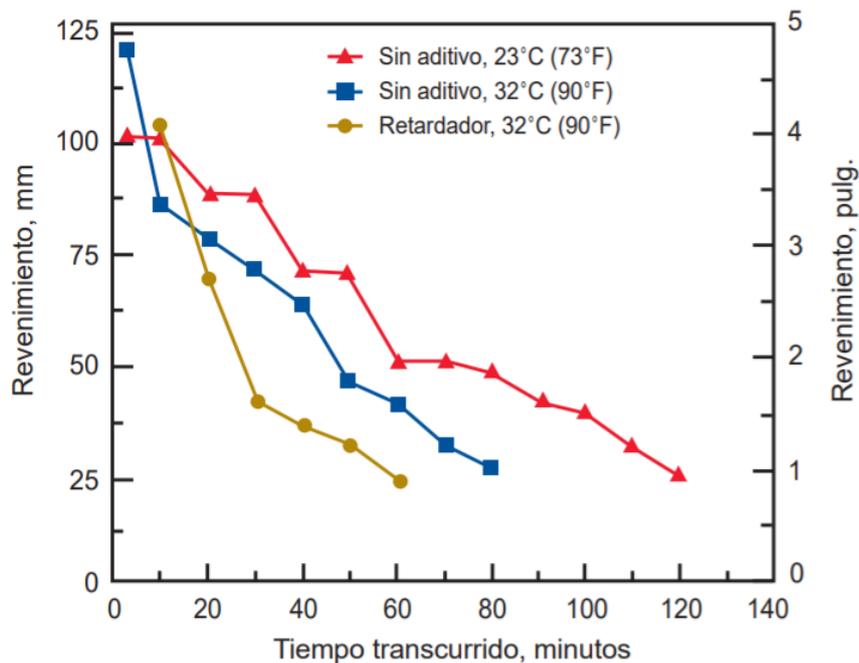


Figura 6. Pérdida de revenimiento de hormigones con y sin aditivos retardadores en temperaturas variadas.

Fuente: Portland Cement Association, 2004.

Aditivos reductores de agua

Tal como se indica, estos aditivos disminuyen el contenido de agua en la mezcla alrededor de 5% al 10%, cuyo propósito es reducir la relación agua-cemento y aumentar tanto la resistencia inicial como el revenimiento. Además, los reductores agua permiten una baja segregación y buena fluidez del hormigón. Aunque, a pesar de la reducción en el contenido de agua, estos aditivos incrementan la posibilidad de contracción por secado.

Por lo general, el efecto del reductor de agua sobre la contracción por secado es pequeño en comparación con otros factores más importantes que causan grietas por contracción en el hormigón. El uso de un reductor de agua para reducir el contenido de cemento y agua de una mezcla de concreto, mientras se mantiene una relación agua-cemento constante, puede resultar en una resistencia a la compresión igual o reducida y puede aumentar la pérdida de asentamiento en un factor de dos o más. (Whiting y Dziedzic, 1992, p. 25)

Algunos aditivos reductores no siempre disminuyen la tasa de pérdida del revenimiento y en ciertos casos pueden llegar a incrementarlos, lo que resulta en la pérdida de trabajabilidad y menor tiempo para el colado de la mezcla, como se demuestra en la figura 7 aplicando hormigón con reductores de agua convencionales.

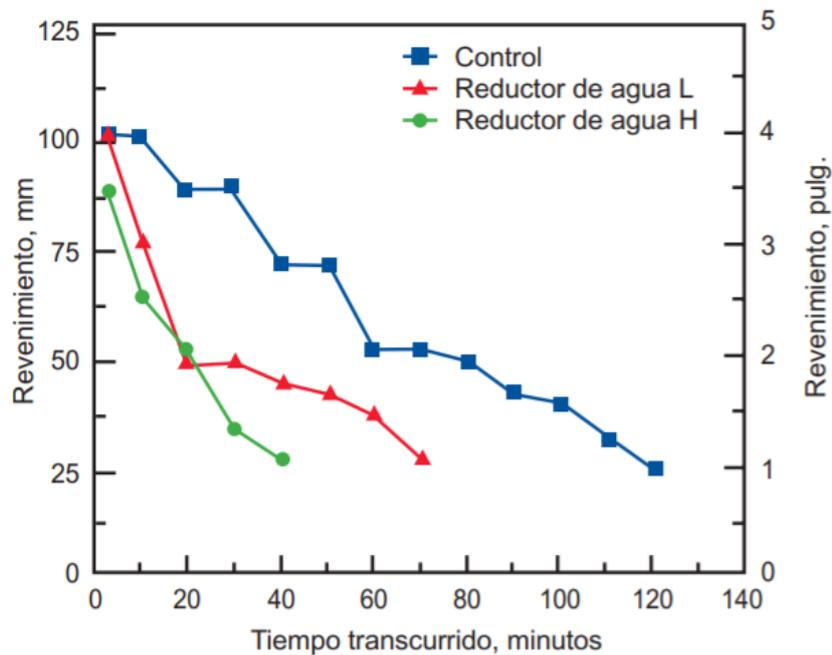


Figura 7. Pérdida del revenimiento de la mezcla de hormigón a 23°C, aplicando reductores de agua convencionales.
Fuente: Portland Cement Association, 2004.

La efectividad de los reductores va a depender del contenido de cemento y agua, además de los tipos de agregado a utilizar en su dosificación y de la temperatura del hormigón, por lo que se requiere mezclas de prueba con los materiales respectivos a utilizarse en la construcción, para determinar la cantidad y el tipo de aditivo a implementar, debido a que en ciertos casos la información proporcionada por los distribuidores es escasa para un adecuado desempeño en las propiedades del hormigón.

Aditivos superplastificantes

Estos aditivos básicamente son reductores de agua, pero son significativamente mayor que la sección anterior, categorizándolos como de alto rango. Aunque los superplastificantes, presentan ciertas diferencias características para la fabricación de hormigón, principalmente de relaciones agua-cemento bastante bajas.

Los componentes más comunes para los superplastificantes son a base de melanina o naftaleno, además de que presentan un bajo contenido de impurezas. Para los aditivos a base de naftaleno se han realizado modificaciones que incluyen un copolímero, el cual es más activo en

temperaturas altas resultando favorable para el hormigón colado en climas cálidos presentando una trabajabilidad mayor.

El beneficio que presenta los superplastificantes se debe a la acción dispersante en las partículas del hormigón, obteniendo un revenimiento de hasta 230 mm en una mezcla que normalmente presenta 75 mm. El producto resultante no requiere de compactación y es aplicado para elementos de secciones muy reforzadas o en condiciones inaccesibles donde se demanda un vertido de hormigón más rápido.

Sin embargo, la efectividad de los superplastificantes tiene una duración bastante limitada, por lo que requiere de más de una aplicación en la dosificación, pero esto influye en el aumento de los procesos de sangrado y segregación. Además, la trabajabilidad restaurada por el uso adicional, va a disminuir drásticamente a través del tiempo perjudicando al revenimiento del hormigón. En la figura 8, se presentan los efectos producidos por los aditivos plastificantes mediante resultados de ensayos.

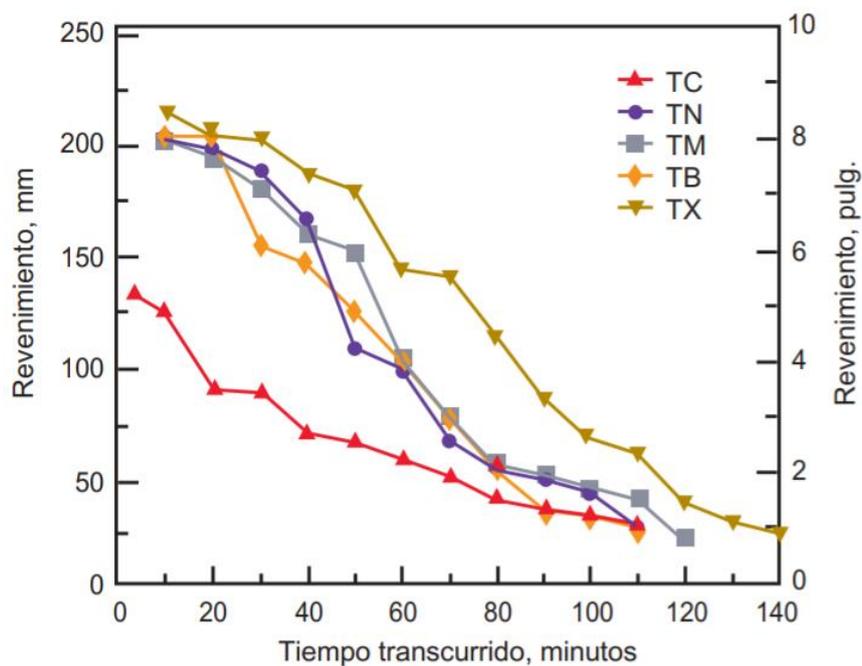


Figura 8. Pérdida de revenimiento del hormigón a 32 °C. utilizando mezclas fluidas (TN, TM, TB, TX) y hormigón convencional (TC). Fuente: Portland Cement Association, 2004.

La hidratación del cemento Portland

La hidratación es un proceso secuencial de las reacciones químicas entre los materiales componentes del clínker y el agua, resultando en el fraguado y endurecimiento de la pasta del cemento. dicho proceso está asociado a los cambios físicos y químicos que desarrolla las propiedades mecánicas del material.

La alita es el componente más importante de todos los *clínkers* de cemento Portland, el cual constituye el 50-70%, mientras que la belita constituye el 15-30%, los compuestos de aluminato constituyen el 5-15% y los compuestos de ferrita constituyen el 5-15%. (Taylor, 1997, pp. 1-2).

Para un procedimiento completo de hidratación en el cemento, se debe mezclar con suficiente agua. Sin embargo, se indica que “La relación de agua y cemento en la mezcla (a/c) afecta la reología de la pasta producida, así como el progreso de la hidratación” (García, 2011, p. 13). Existen varias condiciones que influyen en el progreso de la hidratación del cemento, como:

- La composición del cemento y la cantidad de iones presentes en la estructura física que conforman a los minerales individuales del clínker.
- La finura del cemento.
- La relación agua-cemento de la mezcla.
- La aplicación de aditivos químicos.
- Las adiciones en la mezcla como escorias de alto horno, puzolanas y humo de sílice.
- La temperatura de curado.

El desarrollo de hidratación del cemento se puede determinar por varios métodos como la medición de la cantidad de hidróxido de calcio, el calor de hidratación desprendido, el peso específico de la pasta y mediante los análisis por rayos X, dicha aplicación puede estudiar las reacciones iniciales en la pasta de cemento hidratada, además la microestructura se puede determinar mediante imágenes utilizando un microscopio electrónico de barrido.

Termodinámica química

La termodinámica es la rama que estudia el comportamiento de los fenómenos que ocurren debido a las variaciones de temperatura, presión y volumen de un material, desde un enfoque macroscópico. Además, se indica que “La Termodinámica está basada en un número reducido de postulados básicos o axiomas a partir de los cuales se deducen las leyes que gobiernan los fenómenos caloríficos” (Domingo, 2015, p. 1). Está fundamentada en conceptos básicos a partir de los cuales se presentan 4 leyes vigentes que rigen los fenómenos caloríficos.

Ley cero de la termodinámica

Este principio establece que la temperatura de un sistema va a depender del contacto con otro, así como del material separador entre ellos. Si el material que los separa es dinámico, los sistemas experimentan una modificación respectiva en sus propiedades hasta que dichos sistemas logran el estado de equilibrio. Pero si es inmóvil, los sistemas no alteraran su estado.

Primera ley de la termodinámica

Este principio se lo conoce como la ley de conservación de la energía, el cual establece que la ejecución de un trabajo sobre un sistema, resulta en la variación de la energía interna del mismo. La diferencia que existe entre la energía interna del sistema y la cantidad de energía se denomina calor.

Segunda ley de la termodinámica

Este principio indica las limitaciones que presentan las transformaciones de energía. Para un sistema en donde no existe un intercambio de energía ni materia en su entorno, la entropía va a ir aumentando cada vez que se realice una medición en un momento distinto.

Tercera ley de la termodinámica

Este principio fue propuesto por Walther Nernst, el cual indica que no es posible conseguir una temperatura igual al cero absoluto mediante procedimientos físicos. Además, fundamenta que, si un sistema dado presenta una temperatura cercana al cero absoluto, su entropía será un valor específico.

Mecanismo de hidratación

La hidratación para el cemento Portland se desarrolla en varias etapas y en cada ellas ocurren una serie de reacciones entre los minerales individuales dentro del clínker, el sulfato de calcio y el agua. Los procesos tienden a ser dirigidos esencialmente por el mecanismo de disolución del clínker y sulfato de calcio. Después el progreso de la reacción es controlado por la nucleación y el crecimiento de formación en las fases hidratadas, terminando el procedimiento en la difusión del agua e iones disueltos. El mecanismo de hidratación se puede explicar mediante la figura 9, el cual se desarrolla en función de la cantidad de calor liberado.

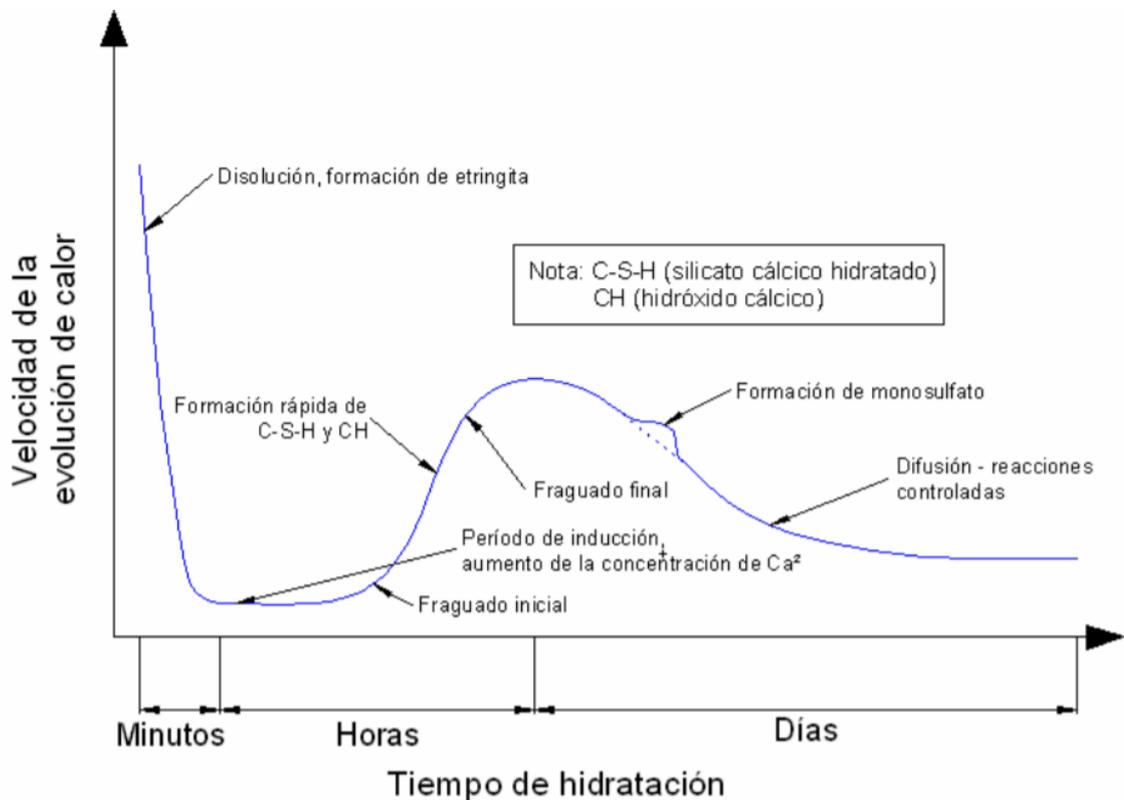


Figura 9. Representación gráfica de la hidratación del cemento.
Fuente: José Ortiz, 2005

Período de inducción

Se presenta en los primeros minutos de haber mezclado el cemento con el agua, produciendo un intercambio de iones entre las fases sólidas y líquidas. Debido a la alta solubilidad de algunos componentes del clínker, ocasiona un aumento en la concentración de los aluminatos de calcio, sulfatos

y álcalis en el estado líquido. Mientras se forman los compuestos hidratados iniciales por la cantidad de calor liberada, los cuales son complejos de analizar de manera morfológica. De tal manera que la velocidad del proceso de calor va a disminuir rápidamente.

Durante el periodo de inducción, la concentración de Ca^{+2} adquiere la sobresaturación con respecto al hidróxido de calcio en la fase líquida, esto produce el crecimiento y la nucleación del silicato de calcio hidratado y el hidróxido de calcio. Aunque el procedimiento depende de las condiciones de reacción y el ambiente.

Período de aceleración

Ocurre entre las 3 a 12 horas después del mezclado, consiste en un nuevo proceso de aceleración que es controlado por la nucleación y crecimiento de nuevos componentes hidratados. La velocidad de hidratación del silicato tricálcico se incrementa y comienza una nueva fase de formación del silicato de calcio hidratado y también del silicato dicálcico. Para la fase líquida el hidróxido cristalino cálcico se precipita, además, la concentración de Ca^{+2} disminuye lentamente. El sulfato cálcico es disuelto conjuntamente con el cemento y la concentración de SO_4^{2-} va decreciendo en la fase líquida por el inicio de la fase AF_t y la absorción de SO_4^{2-} en la superficie formada del silicato de calcio hidratado.

Período de post-aceleración

En este procedimiento la velocidad de hidratación va disminuyendo acorde a la cantidad de material sin reaccionar para después llegar a ser controlada por la difusión. El silicato de calcio hidratado continúa formándose debido a la constante hidratación de los silicatos tricálcico y dicálcico, con el tiempo, la contribución del silicato dicálcico aumenta y la formación del hidróxido de calcio disminuye. Cuando el suministro de sulfato cálcico ha sido agotado, la concentración de SO_4^{2-} disminuye en la fase líquida. Por lo que, la fase AF_t que se formó inicialmente en la etapa de hidratación, comienza a reaccionar con el Aluminato tricálcico y el Ferritoaluminato tetracálcico para producir monosulfato.

El agua en el cemento hidratado

La pasta de cemento posee una gran propiedad de absorber la humedad atmosférica debido a su carácter hidrófilo y a la presencia de poros microscópicos. Aunque, por el tamaño de los poros capilares, el agua retenida se vacía cuando la humedad ambiental relativa desciende por debajo del 45%, sin embargo, los poros del gel absorben el agua incluso si existen humedades ambientales bajas.

Por lo tanto, se indica que el agua para la hidratación del cemento se puede presentar como parte definida para la reacción de los compuestos o de manera libre. La humedad que se retiene por las fuerzas superficiales en las partículas del gel se lo conoce como agua adsorbida y la otra parte que se mantiene en algunos planos se conoce como *entrecaja* o agua zeolítica.

Por el momento no se presenta un método disponible para determinar la distribución del agua en los diferentes procedimientos o etapas, debido a que la unión del agua con los hidratos es de la misma magnitud que la energía de unión del agua adsorbida. La cantidad de agua no evaporable se incrementa conforme avanza los procesos de hidratación, pero para una pasta sobresaturada, dicha agua no puede ser más de la mitad del volumen total presente, esto es aproximadamente el 18% de la masa del material anhidro y va incremento hasta un 23% del volumen total en el cemento hidratado.

Difusión del agua libre a través de las capas de hidratación

La durabilidad de hormigón depende esencialmente de la capacidad que presentan los fluidos, ya sean líquidos o gases, de ingresar y desplazarse a través de la mezcla, esto se define como permeabilidad del hormigón. El movimiento de los diversos fluidos a través del hormigón no solo se presenta a través de los sistemas porosos, también existe por difusión y absorción, siendo la difusividad la propiedad más relevante que puede acontecer.

La difusión es el proceso en el cual un fluido se moviliza bajo un diferencial de concentración. Existen varios métodos para determinar el coeficiente de difusión efectiva en función de la humedad relativa en el ambiente y la porosidad que presenta la pasta de cemento endurecida o también de la resistencia a compresión del hormigón. Aunque es necesario

considerar que el coeficiente de difusión varía dependiendo de la edad del elemento ya que el sistema de poros en el hormigón se ve afectado por el tiempo, en especial, cuando el proceso de hidratación del cemento continúa.

Ahora se reconoce la importancia del agua entre capas en el cemento portland hidratado, y esta agua entre capas se puede eliminar a humedades relativas bajas. Bajo niveles de esfuerzos más altos, el creep puede estar asociada con una lenta descomposición de los hidratos de capa intermedia. Este efecto está influenciado por la humedad relativa y puede resultar en creep tanto reversible como irreversible. (Feldman & Sereda, 1970, p. 43)

Uno de los efectos más importantes que se presentan es con respecto al ataque por sulfatos en el hormigón y el ataque por cloruros en el acero de refuerzo, ya que estos acontecimientos agresivos, son provocados por la difusión en el agua de poros donde se desarrollan las reacciones con la pasta de cemento hidratada. La difusión iónica es más eficiente cuando los poros de la pasta de cemento endurecida se presentan saturados, sin embargo, también puede existir en condiciones donde el hormigón está parcialmente saturado.

Aspectos físico-químicos de la hidratación

A medida en que los componentes del cemento se mezclan con agua, comienzan a presentar una alta actividad química durante un corto período de tiempo. Por ejemplo, la reacción que presenta el agua con el aluminato tricálcico, resulta en la aparición de hidratos cristalinos como katiote y otros compuestos más complejos como la etringita. Luego comienza una fase que carece de actividad química, en la cual se crea una cubierta alrededor de las partículas del cemento.

Los autores Bogue y Lerch determinaron la velocidad de desarrollo de la resistencia para los componentes del cemento, pero Ramachandran realizó un análisis en la cual no estuvo basada en ciertos parámetros como el porcentaje de agua contenido en la mezcla o la distribución de los diferentes tamaños de partículas para el cemento presentados en la tabla. Los resultados fueron comparados según se presenta en la figura donde se puede encontrar diferencias significativas para los dos estudios.

Tabla 26. hidratación de los componentes del cemento.
Fuente: Álvaro García, 2007.

	Bogue-Lerch	Ramachandran-Beaudoin
10 días	$C_3S > C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_4AF > C_3S > C_2S > C_3A$
40 días	$C_3S > C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_3S > C_4AF > C_2S > C_3A$
1 año	$C_3S = C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_3S > C_2S > C_4AF > C_3A$

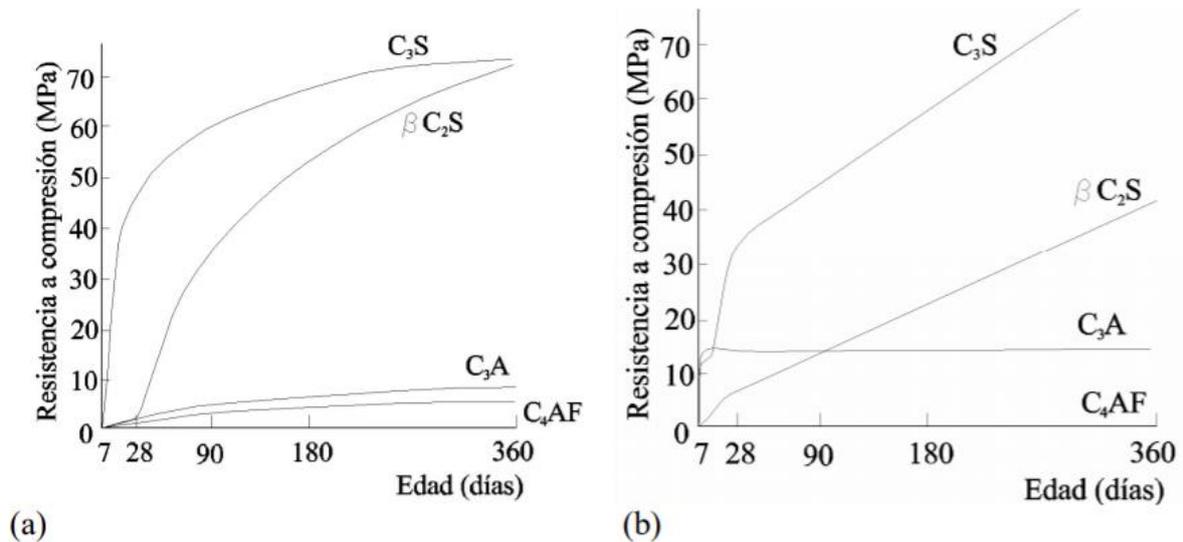


Figura 10. (a) Resistencia de los diferentes componentes del cemento según Bogue y Lerch. (b) Resistencia de cada uno de los componentes del cemento.
Fuente: Álvaro García, 2007.

Para el hormigón endurecido se relaciona su procedimiento en sus primeras etapas con la teoría de percolación, indicando que dicha teoría analiza la conectividad de los componentes de un sistema, la cual está definido por una variación alternada de dicho grado de conectividad.

Inicialmente en la mezcla, la percolación se presenta de manera aleatoria y aislada, formando una conexión entre los elementos del cemento. luego se genera un subconjunto de elementos unidos mecánicamente y finalmente se forman caminos continuos de los elementos granulares que integran ciertas partes del volumen. Este procedimiento se indica gráficamente mediante la figura 11.

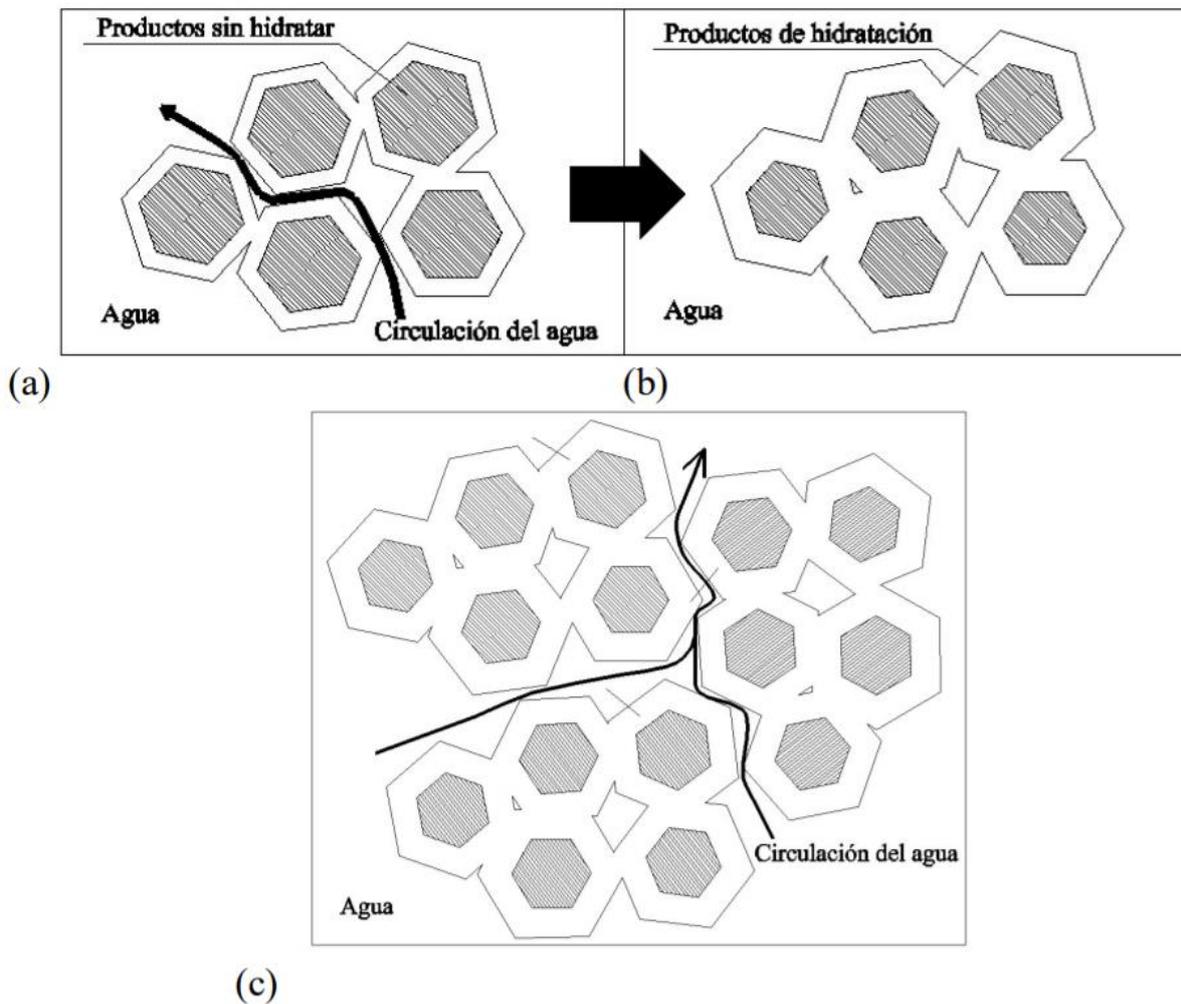


Figura 11. Procesos de percolación durante la hidratación del cemento: (a) Los productos hidratados forman una conexión mecánica con los productos no hidratados; (b) Los productos hidratados crean "fracciones conectadas" de gran tamaño, lo cuales van disminuyendo el de los capilares; (c) Debido al aumento del tamaño, los capilares disminuyen en número.

Fuente: Álvaro García, 2007.

Estos procesos se presentan en la transición del estado plástico al sólido, en el que aparecen las propiedades mecánicas características de la mezcla endurecida como la resistencia a compresión, módulo de elasticidad y demás. también, se da comienzo en el producto formado a la propagación de fisuras luego de completarse el fraguado de la mezcla.

Problemas y precauciones existentes en la producción del hormigón

Guayaquil, la zona del estudio desarrollado, se categoriza como una de las ciudades con más tráfico en el mundo a pesar de no disponer con la cantidad de vehículos que se presentan en otras ciudades más grandes en el mundo. Además, la distancia existente entre el sitio de obra y la planta de premezclado son bastantes lejanas en la mayoría de los casos, impidiendo un rápido vertido de la mezcla, por consiguiente, se requerirá mayor cantidad de agua en la mezcla afectando a la trabajabilidad del hormigón.

Siendo otro factor influyente en la zona de estudio, la presencia del ambiente salino proporcionado por 10 cuerpos de agua salobre en la ciudad que contribuyen a los procesos corrosivos en el acero para estructuras de hormigón reforzado fisurados.

En cuanto a la influencia del ambiente, el grado de agresividad del mismo está relacionada con acciones físicas como son el agua, el viento y cambio de temperaturas; químicas por la presencia del CO₂, sales como cloruro y sulfatos en ambientes salinos y biológicas como algas, hongos y bacterias que actúan sobre las estructuras de hormigón generando lesiones químicas como carbonatación y corrosión así también lesiones físicas como fisuras, grietas, expansión, disgregación y finalmente desprendimientos. (Cruz, 2016, p. 8)

La presencia de suelos licuables y fallas geológicas aumentan el potencial sísmico de la ciudad, estos eventos afectan principalmente a las estructuras con la propagación de grietas debido a los asentamientos o posibles volteos que incrementan los efectos producidos por agentes agresivos. Además, si el nivel freático posee aguas residuales de origen doméstico o industrial junto con la presencia de sulfatos, van a comportarse también como elementos agresivos para a las estructuras de hormigón enterrados o de difícil acceso para proceder a un adecuado mantenimiento. Existen varias recomendaciones de especialistas constructivos para prevenir los efectos producidos por altas temperaturas que se presentan en la zona para mezclas de hormigón, de las cuales se destacan:

- Elaboración del hormigón bajo cubierta.
- Implementar cortavientos en la obra.

- Realizar procesos de curado lo antes posible.
- Aplicar aditivos que faciliten el vaciado y reduzcan la pérdida de agua.
- Almacenar los materiales ocultándolos del sol.
- Evitar la fundición de los elementos al mediodía.
- Aumentar el tamaño de los áridos para la mezcla.

Métodos de control de la temperatura del hormigón

La norma ACI 305 indica que se puede elaborar hormigón en climas tropicales sin límites máximos en la temperatura de colocación y se obtendrá resultados favorables siempre que se aplique las debidas prevenciones en la dosificación, elaboración, transporte, colocación y curado del hormigón. Siendo un factor esencial, mantener la temperatura del hormigón lo más baja posible.

Deben tomarse medidas especiales durante el tiempo caluroso. Considere esto, si la temperatura del concreto durante la hidratación es demasiado alta, causará una menor durabilidad. El hormigón tendrá una alta resistencia inicial, pero ganará menos resistencia en la etapa posterior. Las altas temperaturas también pueden causar agrietamiento y agrietamiento térmico en grandes vertidos. (Liebmann, 2018)

En la figura 12 se indica la influencia de la temperatura en los materiales del hormigón con respecto a la temperatura del mismo. Debido a que el hormigón está constituido en gran parte por agregados, la reducción de temperatura de dicho elemento presentará mayor efecto que otros componentes en el hormigón. De tal manera que se emplean varios métodos para controlar la temperatura de la mezcla como el almacenamiento bajo cubierta de los materiales o rociar con agua fría los áridos reduciendo su temperatura por evaporación y enfriamiento directo. Sin embargo, se debe considerar que dicho método de saturación tiende a provocar una variación en el contenido de humedad de la mezcla, afectando principalmente al control del asentamiento.

Otra recomendación que sugiere la norma es de pintar las superficies del mezclador de color blanco, para reducir la absorción del calor, debido a que, si un tambor vacío permanece en el sol durante un largo período, el metal

del mezclador producirá un incremento en la temperatura del hormigón de 0.3 a 0.5°C para un tambor mezclador de color amarillo o rojo que los de color blanco. Además, se sugiere humedecer el exterior del tambor mezclador con agua antes de introducir el hormigón o durante la transportación al sitio, como una medida adicional para minimizar la temperatura.

Para controlar la temperatura por medios de enfriamiento se puede aplicar otros métodos como emplear agua fría por lotes, sustituir parte del agua de amasado por hielo triturado, o también enfriar la mezcla utilizando nitrógeno líquido.

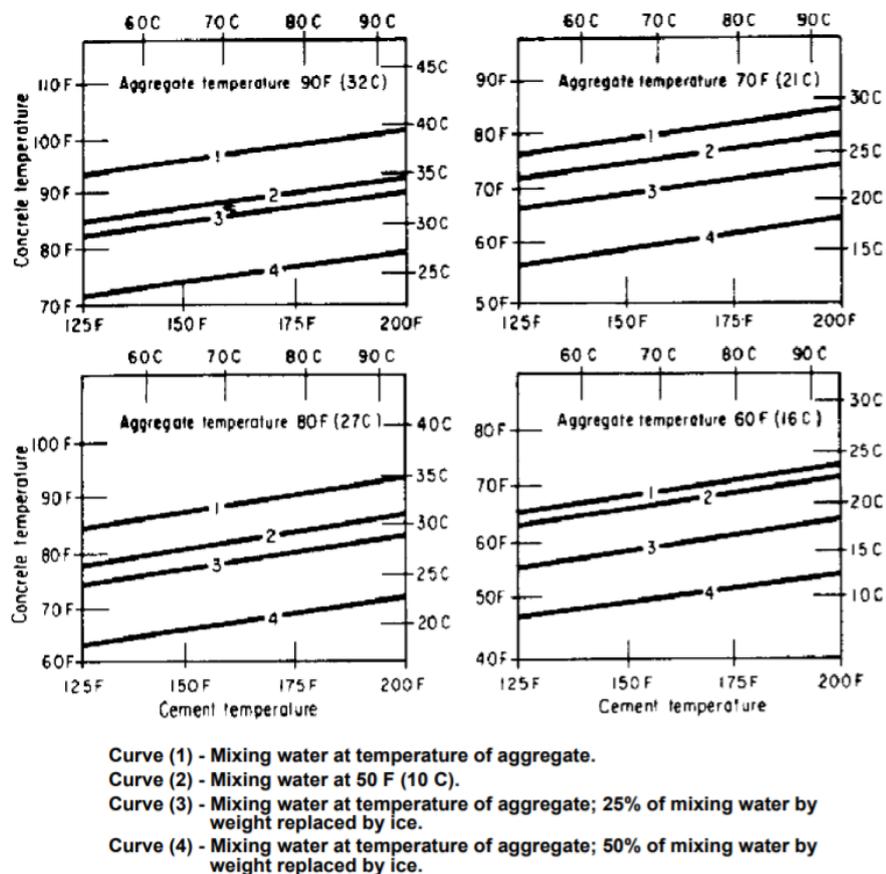


Figura 12. Influencia de la temperatura en los materiales de la mezcla con respecto a la temperatura del hormigón.
 Fuente: ACI 305R-99.

Enfriamiento de los agregados

Un método eficiente para reducir la temperatura en el agregado es de humedecerlo en agua fría, esto reducirá la temperatura del hormigón aproximadamente 0.5°C por cada grado de temperatura reducido en los

áridos. Dicha aplicación es más efectiva cuando se utiliza un silo o recipiente para que el enfriamiento se consiga en menos tiempo. Sin embargo, se debe prevenir la inundación uniforme del material para que la variación en el asentamiento sea mínima.

Otra técnica de enfriamiento para los agregados es de soplar aire a través del material húmedo, debido a que el flujo del aire optimizará la temperatura por evaporación, logrando reducir 1°C en el bulbo húmedo. La eficacia del método dependerá de las condiciones ambientales de la zona como la temperatura ambiental, la humedad relativa y la velocidad de los vientos. Se puede aplicar a su vez aire frío en lugar de aire del ambiente para despreciar dichas consideraciones y reducir la temperatura a 7°C en los agregados. Sin embargo, esta técnica presenta un costo relativamente mayor.

Sustitución parcial del agua de amasado por hielo

Esta técnica de enfriamiento utiliza hielo triturado para reemplazar el agua dosificada para la mezcla, la temperatura reducida depende de la cantidad de agua disponible para la aplicación de hielo. La norma ACI indica que la temperatura máxima reducida para la mayoría de hormigones es de 11°C y para implementar una adecuada dosificación se requiere pesar el hielo.

Algunas zonas presentan inconvenientes en la obtención de los bloques de hielo, debido a que no disponen del abastecimiento necesario para su aplicación. Además, adquirir el material en plantas de enfriamiento resultaría en costos elevados, puesto que se incluye la producción de hielo, el transporte y refrigeración del mismo, así como la mano obra requerida para su instalación.

Una solución a ejecutar es instalar cerca de la planta donde se elabora el hormigón, una planta donde se produzca, triture y transporte el hielo a la mezcladora. De tal manera que reduzca parcialmente la inversión del método aplicado.

Inyección de nitrógeno líquido

La inyección de nitrógeno líquido en el hormigón es una opción eficiente cuando se requiere temperaturas en la mezcla más bajas que 11°C, además las dosificaciones y rendimiento de los materiales no se ven alteradas

por el empleo de grandes cantidades de nitrógeno líquido. Sin embargo, la inversión que solicita dicha técnica es relativamente alta.

El método aplicado consiste en instalar un recipiente que suministre nitrógeno y una o más estaciones para el proceso de inyección en la mezcladora, este procedimiento beneficia al producto que se ve afectado por el incremento de la temperatura debido al tráfico que presenta durante el transporte y colocación del hormigón.

La cantidad de nitrógeno requerido dependerá no solo de las disposiciones y componentes de la mezcla, también se debe estimar la cantidad de temperatura a reducir. La norma ACI 305 indica que generalmente el uso de 48 m³ de nitrógeno líquido disminuirá la temperatura del hormigón 0.5 °C.

CAPITULO III

EL HORMIGÓN Y LA TEMPERATURA

Aditivos químicos

Existen varios tipos de aditivos que mejoran las propiedades de hormigón y previenen los efectos desfavorables que se producen por la presencia de altas temperaturas ambientales. La eficacia de los productos dependerá de los procedimientos químicos que realizan los componentes individuales del cemento para la elaboración del hormigón.

Los aditivos tipo D o comúnmente conocidos como retardantes y reductores de agua, influyen en las propiedades de disminución de agua y en el aumento del tiempo de fraguado, siendo una solución adecuada para mezclas vertidas en climas cálidos. Además, sus características reductoras de agua satisfacen en gran parte la demanda de agua, evitando la pérdida en su resistencia mecánica producto del incremento en la temperatura del hormigón. Sin embargo, una mezcla con dicho tipo de aditivo en comparación con una sin aditivo presenta mayor tasa en la pérdida del asentamiento.

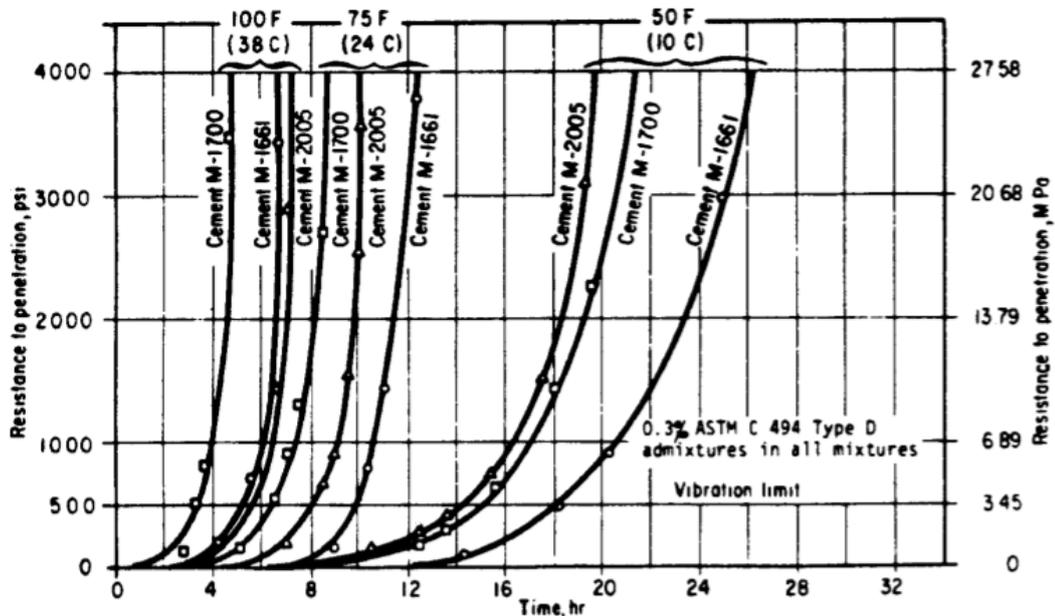


Figura 13. Efecto de la temperatura y el cemento en el tiempo de fraguado para morteros de hormigón.

Fuente: ACI 305R-99.

Las mezclas con aditivos tipo D influyen en el aumento de la velocidad del sangrado del hormigón, inicialmente dicho efecto puede evitar el secado superficial del elemento colocado en temperaturas altas y con baja presencia de humedad. Pero con el transcurso del tiempo y sin un control adecuado, podría presentarse asentamientos diferenciales que resultarían en fisuras alrededor el acero de refuerzo u otros materiales adheridos a la superficie. Además, se reduce la resistencia y la capacidad de deformación a esfuerzo de tensión en el elemento, aumentando el efecto por contracción plástica.

Las mezclas con aditivos tipo G presentan una gran importancia para condiciones de vertido en climas cálidos debido a que producen hormigones con mayor fluidez, lo que resulta en productos con mayor asentamiento y menor ganancia de calor por fricción interior. Las propiedades mejoradas del hormigón fluido conceden una rápida colación y consolidación de la mezcla, lo cual reduce el tiempo entre el procedimiento de mezclado y el acabado final. Sin embargo, la pérdida de asentamiento en el hormigón es más elevada en comparación con el uso de aditivos retardantes habituales.

En ciertos lugares se ha implementado el uso de aditivos de control del fraguado extendido en la construcción que presentan climas cálidos, el propósito de este aditivo es de suspender el proceso de hidratación en el hormigón recién mezclado, además de disminuir los residuos de la mezcla en el tambor. A diferencia de los aditivos retardantes, los de control de fraguado detienen el proceso de hidratación en las etapas del aluminato y silicato, mientras que los retardantes afectan exclusivamente las etapas de silicato que extiende, pero sin detener, el proceso de hidratación en el cemento Portland. La dosificación apropiada para los aditivos de control de fraguado se determina en función de muestras que consideren el tiempo requerido de la obra para establecer correctamente el tiempo de fraguado.

Generalmente, Todo aditivo utilizado en el hormigón debe ser evaluado para determinar el desempeño y su influencia en las propiedades establecidas dentro de la construcción para climas cálidos. Se debe considerar los efectos característicos que se produce en la trabajabilidad, resistencia

inicial, colocación, acabado y en lo que respecta a la reutilización de encofrados o moldes. Dichas características intervienen en la elección tanto del aditivo como en su dosificación adecuada.

Hormigón en estado fresco

Mezclado

Se debe combinar todos los componentes del hormigón hasta que se logre un producto homogéneo, lo cual se debe descargar en su totalidad antes de preparar otra dosificación en la mezcladora.

La norma INEN 1855-2 indica varios requisitos para el mezclado del hormigón en obra, la cual debe ser transportado por cualquier medio disponible ya sea por carretillas o métodos de bombeo con el propósito de minimizar la segregación y conservar la uniformidad en la mezcla. Además, la frecuencia en que se carga los materiales a la mezcladora y el periodo estimado para el procedimiento de mezcla debe ser el adecuado para asegurar que el producto sea homogéneo.

El periodo óptimo para el proceso de mezclado debe ser menor que 1.5 minutos, pero para mezcladores de gran capacidad se puede aumentar el tiempo límite requerido a 1.83 minutos. Luego de descargar el hormigón, se debe realizar la fundición en tiempo aproximado de 30 minutos o antes de que la mezcla pierda trabajabilidad. Sin embargo, dicho periodo puede prologarse mediante la aplicación de aditivos.

Para hormigón premezclado se debe revisar la norma INEN 1855-1 para la mezcla y entrega requerida del producto a la ubicación de la obra, ya sea mediante la aplicación de una central mezcladora, planta fija o mezclado en camión. Además, se debe considerar los límites de operación como la capacidad y la velocidad de rotación de los equipos implementados por el fabricante.

Trabajabilidad y consistencia

La trabajabilidad dentro del entorno constructivo se considera como la facilidad que presenta la mezcla para ser manipulada, transportada y vertida adecuadamente, además, del grado que ofrece para resistir la segregación.

El grado de trabajabilidad necesario depende de la dosificación y propiedades mecánicas de los materiales, además del equipo empleado durante los procesos de mezclado, transporte y colocación del hormigón. Sin embargo, este es una expresión relativa, pues en el hormigón existen varias condiciones que son favorables y otras que impiden que sea trabajable, por lo tanto, se indica que este término es una propiedad física para el hormigón en estado fresco, sin considerar los posibles escenarios que presentan cada construcción.

Un factor esencial para la trabajabilidad es la consistencia que presenta la mezcla del hormigón. Este es un término aplicado para referirse al comportamiento de la mezcla con respecto a su contenido de humedad, incluyendo los diferentes grados de fluidez que presenta la mezcla ya sea seca o la más húmeda posible. De tal manera que se puede clasificar los diferentes tipos de consistencia:

- **Consistencia seca:** presenta en su dosificación la mínima cantidad de agua para mantener a las partículas de los agregados y cemento unidas.
- **Consistencia rígida:** presenta un ligero incremento en su contenido de agua que en la seca.
- **Consistencia húmeda:** presenta en su composición un alto contenido de agua, resultando en un producto más fluido.

Hidratación, segregación, exudación y sangrado

la hidratación es una propiedad adherente que se presenta en la pasta del cemento Portland, debido al proceso químico entre el agua y el cemento. existen varios elementos que influyen en dicho proceso como lo son el clínker, la finura de los agregados, la temperatura, el yeso y la cantidad de agua utilizada en la mezcla.

El tiempo de fraguado en la mezcla depende de la velocidad de reacción entre los componentes del cemento y el agua, este procedimiento indica la transición del estado líquido a un estado más rígido en la pasta de cemento, siendo una característica esencial para establecer el tiempo necesario de transporte y colocación del hormigón.

La segregación se presenta debido a la escasez de uniformidad en la mezcla, lo que resulta en el desprendimiento de los agregados y la pasta de cemento.

En cambio, la exudación en la mezcla se da por la falta de uniformidad en la pasta del cemento, produciendo una mayor concentración de agua en la superficie del elemento de hormigón.

El proceso del sangrado en el hormigón se presenta cuando parte del agua dosificada se eleva hasta la superficie del elemento debido a la capilaridad y por la insuficiente retención de los sólidos. La otra parte del agua queda retenida pero segregada debajo de los agregados gruesos.

El calor de Hidratación

La hidratación de los compuestos en el cemento es exotérmica, la cual libera energía de hasta 120 cal/g. la conductividad térmica del hormigón es relativamente baja, desarrollándose como un aislante. En el interior de una mezcla de gran volumen, la hidratación puede inducir al incremento de la temperatura, además, en el exterior de la mezcla de hormigón la cantidad de calor se reduce, causando un fuerte gradiente de temperatura y con el enfriamiento interior puede provocar grietas significativas en el hormigón.

El calor de hidratación se puede definir como la cantidad de calor, expresada en calorías por gramo, que se desprende al finalizar el proceso de hidratación expuesta a una temperatura establecida. Para medir el calor de hidratación se determina la cantidad diferida entre el calor de la mezcla del cemento hidratado y no hidratado, empleando un compuesto de ácidos nítricos y fluorhídricos.

La temperatura es uno de los factores más influyentes en la tasa de desarrollo de calor, según se indica en la tabla 27 donde presenta las variaciones de calor en 72 horas para diferentes temperaturas. En general, lo esencial a determinar para efectos prácticos es la tasa de desprendimiento de calor y no del total de hidratación, debido a que, para el mismo calor producido a periodos más prolongados, se lo puede disipar al presentarse un bajo incremento de la temperatura. Habitualmente se mide dicha tasa de desarrollo mediante un calorímetro adiabático.

Tabla 27. Calor de hidratación desarrollado a diferentes temperaturas.
Fuente: Neville, 1995.

Tipo de cemento	Calor de hidratación desarrollado a:							
	4°C (40°F)		24°C (75°F)		32°C (90°F)		41°C (105°F)	
	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g
I	154	36.9	285	68.0	309	73.9	335	80.0
III	221	52.9	348	83.2	357	85.3	390	93.2
IV	108	25.7	195	46.6	192	45.8	214	51.2

El calor de hidratación también depende de la composición química del cemento, ya que cada componente individual de la mezcla es una suma de la cantidad de calor que se produce por la hidratación. En la tabla 28 se indican los valores convencionales para los compuestos en el cemento.

Tabla 28. Calor de hidratación de los componentes individuales.
Fuente: Neville, 1995.

Compuesto	Calor de hidratación	
	J/g	cal/g
C ₃ S	502	120
C ₂ S	260	62
C ₃ A	867	207
C ₄ AF	419	100

En las primeras etapas de hidratación, los diversos compuestos del cemento presentan diferentes velocidades para realizar el proceso de dichas etapas. Por lo tanto, la tasa de desprendimiento de calor y el calor total dependerán de la composición del cemento, siendo una opción adecuada reducir las proporciones de estos compuestos, esencialmente el C₃A y C₃S, para minimizar los efectos del calor en edades tempranas del hormigón.

La finura del cemento es otro factor que interviene en la tasa del desarrollo de calor, debido a que el aumento en la finura va a acelerar tanto las reacciones de hidratación de los componentes como el calor desprendido. Sin embargo, los efectos producidos por la finura no son significativas para edades posteriores en el hormigón. Se indica que “como regla general, hay un aumento de 5°C a 9°C (10°F a 15°F) de temperatura para cada 45 kg (100 lb) de cemento Portland, resultante de la hidratación del cemento” (ACI comité 211, 1997).

El calor desarrollado por los procesos de hidratación va a incrementar la temperatura en el hormigón ya sea en menor o mayor rango, siendo necesario considerar el volumen vertido de la mezcla, las condiciones ambientales de la zona, la cantidad y el tipo de cemento aplicado para su elaboración, como se presenta en la figura 14.

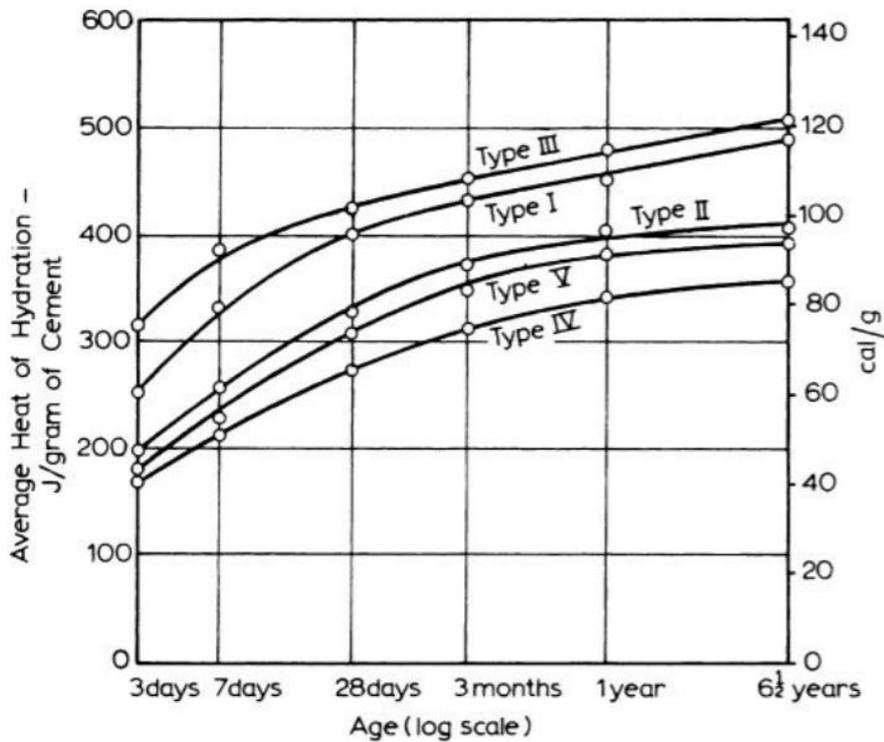


Figura 14. Desarrollo del calor de hidratación para diferentes tipos de cementos curados a 21°C.
Fuente: Neville, 1995.

Ensayo de asentamiento con el Cono de Abrams

El método del Cono de Abrams es un procedimiento bastante aplicado en la mayoría de obras. Esta prueba se la define como una medida para determinar la consistencia mas no la trabajabilidad, sin embargo, es adecuado para indicar las variaciones de uniformidad en una mezcla.

El equipo para realizar la prueba es un molde de 30 cm de altura que se coloca sobre una superficie llana con una abertura de menor diámetro en la parte superior, luego se lo relleno mediante 3 capas de hormigón y cada una de ellas requiere compactarlas 25 veces usando una varilla de acero usualmente de 16 mm de diámetro. Para la parte superior se debe remover el exceso de la mezcla mediante un movimiento en forma de corte. Es esencial

que el molde este sujetado firmemente contra su base durante la ejecución de la prueba. Luego del llenado con hormigón se procede a retirar de manera lenta el cono para que la mezcla se desplome.

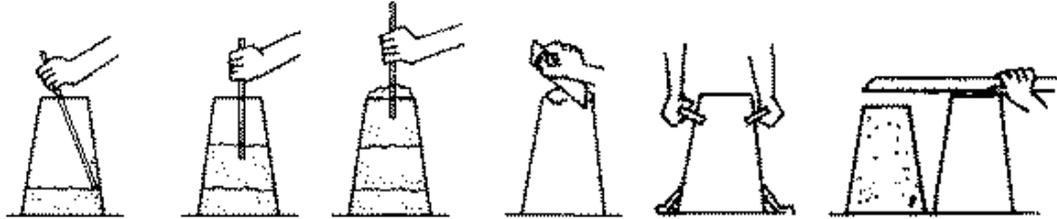


Figura 15. Ensayo de asentamiento aplicando el Cono de Abrams.
Fuente: Luis Becerra, 2013.

El asentamiento de la mezcla se mide con respecto a punto más alto desplomado, aunque la norma ASTM indica que se debe medir en relación al centro original desplazado de la mezcla. Para reducir los efectos que se produce por fricción, el interior del molde se debe humedecer antes de empezar la prueba.

Si después de realizar el ensayo la mezcla no se desploma uniformemente, sino que se desliza mediante un plano inclinado, entonces se indica que el asentamiento que se presenta es por cizallamiento, como se muestra en la figura, lo que significa que la prueba debe realizarse nuevamente. Pero, si dicha situación continúa, entonces se indica que la mezcla carece de cohesión.

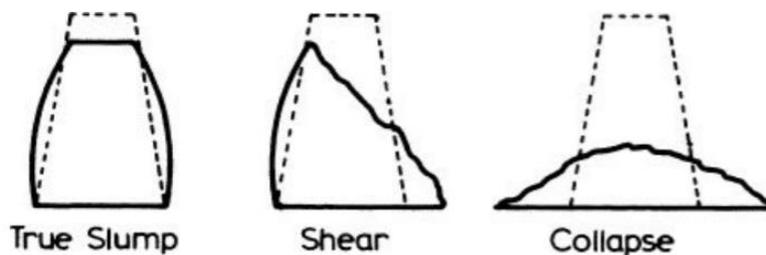


Figura 16. Resultados de asentamiento en la mezcla al retirar el molde.
Fuente: Neville, 1995.

Los valores aproximados para clasificar la consistencia en la mezcla se presentan en la tabla 29 según los resultados que indica la prueba, si el

asentamiento aumenta puede significar un incremento repentino del contenido de humedad en la mezcla o también por una alteración en el agregado utilizado.

Tabla 29. Descripción de la trabajabilidad y consistencia en función de la magnitud del asentamiento.

Fuente: Neville, 1995.

Asentamiento (mm)	Consistencia	Trabajabilidad
0 a 5	Seca	Nula
10 a 40	Blanda	Muy baja
50 a 90	Plástica	medio
100 a 150	Fluida	Alta
mayor a 160	Líquida	Muy alta

La norma INEN presenta unos valores de tolerancia permitida para la ejecución de la obra, las cuales se aplican cuando las especificaciones del proyecto se establecen como un asentamiento nominal.

Tabla 30. Tolerancias para condiciones de asentamiento nominal en la mezcla.

Fuente: NTE INEN 1855-1, 2016.

Asentamiento especificado	Tolerancias
50 mm o menos	± 15 mm
entre 50 mm y 100 mm	± 25 mm
mayor que 100 mm	± 40 mm

Pérdida del asentamiento y factores que afectan la trabajabilidad

La pérdida en el asentamiento de la mezcla es producida por la reducción tanto en su consistencia como en su trabajabilidad, resultando en un asentamiento y resistencia menor en el hormigón. Por lo tanto, se implementan aditivos plastificantes en la dosificación para minimizar los efectos producidos. Pero como se había indicado anteriormente, la efectividad de los aditivos depende de varias condiciones, en especial, las temperaturas ambientales.

Uno de los factores más importantes que afectan al trabajabilidad es el contenido de agua en la mezcla, debido a que, si aumenta la humedad dosificada, el producto es más trabajable, pero esto presenta inconvenientes en el desarrollo de su resistencia. cuando se incorpora aire en la dosificación,

la demanda de agua se reducirá, pero el efecto del aire en la mezcla, depende a su vez de las proporciones de la misma, como se presenta en la figura 17.

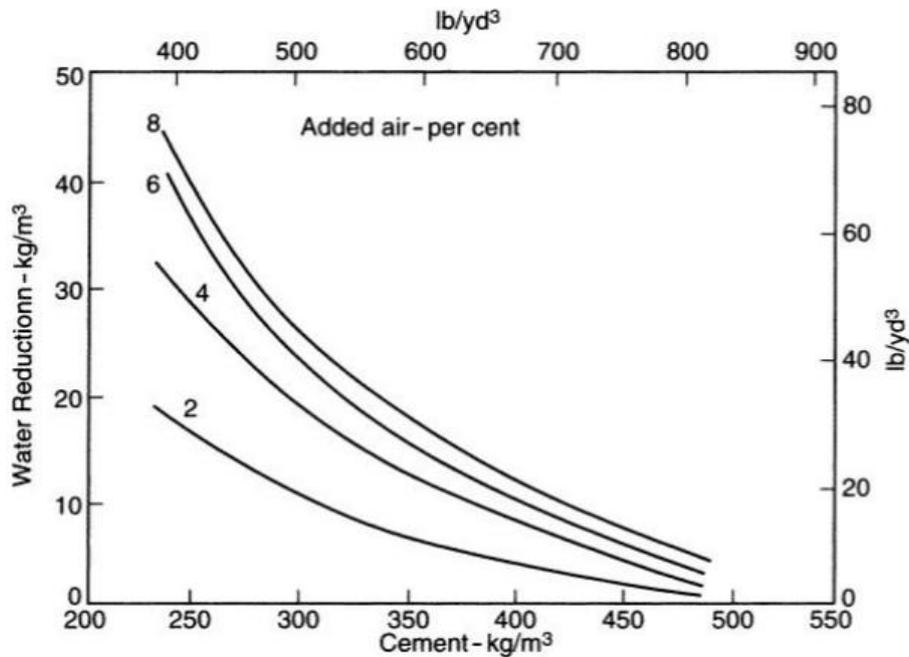


Figura 17. Reducción del requerimiento de agua en la mezcla al incorporar aire.
Fuente: Neville, 1995.

Otro factor que afecta a la trabajabilidad es el tamaño máximo del agregado, debido a que si se presenta mayor relación agua-cemento, el agregado requerido es más fino para adquirir una trabajabilidad máxima. Sin embargo, se indica que para una trabajabilidad satisfactoria se deben establecer proporciones en la mezcla donde los agregados que presentan una gravedad específica variable, como en el caso de mezclas con agregados livianos, se deben evaluar en base al volumen absoluto de cada partícula en la mezcla. La influencia de los agregados en la trabajabilidad se reducirá con el aumento en la dosificación de la mezcla y es posible que se reduzca por completo cuando la relación agregado-cemento sea más baja que 2.

Dicha indicación es requerida para considerar algunos efectos que se presentan. Una baja relación agregado-cemento constituye una mayor superficie en los sólidos y para una misma cantidad de agua, la trabajabilidad que resulta va a ser menor. Una solución para contrarrestar tal efecto, es la utilización de agregados ligeramente más gruesos.

Hormigón endurecido

Curado húmedo

El curado es una serie de métodos cuyo propósito es proteger al hormigón, ya sea en el instante del vertido o después del acabado, además al aplicar un adecuado procedimiento va a permitir un óptimo desarrollo de la resistencia y propiedades requeridas como la durabilidad y la impermeabilidad en el hormigón.

El curado evita la posibilidad de pérdidas en la humedad inicial además de controlar la temperatura del hormigón. En caso de que la humedad relativa del hormigón disminuya, el desarrollo de su resistencia y el proceso de hidratación continúa por un breve periodo de tiempo y después se detiene cuando dicha humedad baja hasta 80%.

El propósito de aplicación es para que el procedimiento de hidratación en el cemento pueda continuar el mayor tiempo necesario conforme a los establecido en el proyecto. Esto es esencial debido a que el desarrollo de la resistencia depende de dicha hidratación, el cual es un proceso que debe proceder lentamente y no de manera repentina.

Existen varios métodos para contener la humedad en el hormigón, una de ellas es la aplicación constante de agua para compensar la cantidad perdida, la cual consiste en un sistema de riego para las superficies que presenten mayor vulnerabilidad. Su procedimiento debe realizarse periódicamente al inicio del curado e ir disminuyendo su aplicación a medida que el hormigón se endurezca.

Otro método para la evitar la pérdida abundante de humedad es mediante la aplicación de láminas de polietileno y papel reforzado que sean a prueba de agua ya que estarán frecuentemente humedecidas por un periodo prolongado. Además, se puede utilizar esferas de algodón o yutes humedecidas con aspersor, pero se debe prevenir el secado de los mismos porque procederán a absorber el agua el hormigón.

La utilización de arena o aserrín humedecidos pueden aplicarse en el curado de elementos llanos como las losas, pero se debe prevenir que el

material implementado no presente agentes orgánicos o restos de hierro contaminantes.

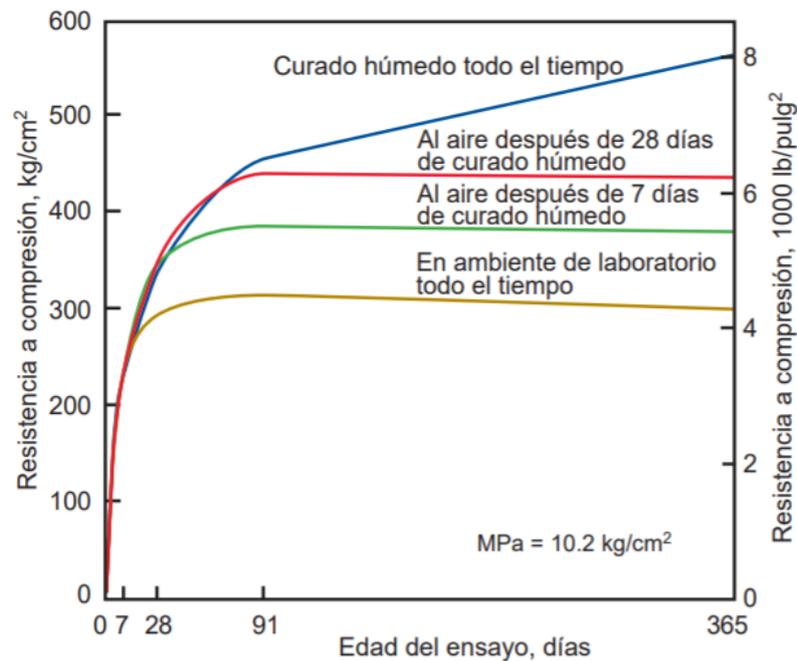


Figura 18. Desarrollo de la resistencia del hormigón con respecto al tiempo de curado.
Fuente: Portland Cement Association, 2004.

Velocidad de secado del hormigón

El hormigón que ha sido vertido presenta un contenido abundante de agua. sin embargo, al desarrollarse el secado desde la superficie hacia el interior de la mezcla, presentará un incremento de la resistencia que se prolongará siempre y cuando la humedad relativa este por encima del 80%. Mientras que la superficie del hormigón el proceso de secado es más rápido, en el interior va a tardar más tiempo en secarse.

La velocidad de secado se ve afectada por el tamaño y la forma de los elementos de hormigón, si presentan una mayor área superficial con respecto al volumen del elemento, el proceso de secado se realiza con mayor rapidez que los elementos de mayor volumen de hormigón con áreas superficiales reducidas.

Resistencia a la compresión y flexión

Se definen como la máxima resistencia que presenta la muestra de hormigón sometidas a esfuerzos ya sean de compresión o tensión para el caso de flexión. La resistencia a compresión es esencial para el desarrollo de

proyectos estructurales, siendo que el hormigón es bastante débil para resistir fuerzas a tensión, se aplica una armadura de acero para reforzar y otorgar capacidad de deformación al elemento.

La resistencia a la compresión dependerá del aporte de la pasta de cemento y de la trabazón presente en los agregados mas no tanto la resistencia que brindan los agregados. Se considera común que la resistencia a compresión en el hormigón presente valores entre 210 kg/cm² y 350Kg/cm². Además, para que se clasifique como hormigón de alta resistencia debe presentar valores de al menos 420 kg/cm².

Para la resistencia a flexión o módulo de ruptura en un hormigón de peso normal los valores pueden considerarse entre 1.99 y 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia obtenida a la compresión.

La norma INEN presenta parámetros de aprobación para la resistencia de hormigón bajo condiciones de compresión, indicadas en la tabla 31, y a flexión, mostradas en la tabla 32, desarrollado para unidades de Megapascales cuando se desconoce la desviación estándar.

Tabla 31. Resistencia promedio requerida a compresión (f'cr).
Fuente: NTE INEN 1855-1, 2016.

Resistencia Especificada (f'c)	Resistencia Promedio Requerida (f'cr)
Menor de 21 MPa	f'c + 7,0
Entre 21 y 35 MPa	f'c + 8,5
Mayor de 35 MPa	f'c + 10,0

Tabla 32. Resistencia promedio requerida a tracción por flexión (MRr).
Fuente: NTE INEN 1855-1, 2016.

Resistencia Especificada (MR)	Resistencia Promedio Requerida (MRr)
Menor de 2,5 MPa	MR + 0,92
Entre 2,5 y 4,0 MPa	MR + 1,11
Mayor de 4,0 MPa	MR + 1,31

CAPITULO IV

DESARROLLO DE METODOLOGÍA, DISEÑO DE MEZCLA Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Generalidades

Para este capítulo se indicarán los análisis y resultados de los diferentes especímenes que se realizaron en el laboratorio de suelos y hormigón CONSTRULADESA S.A, tanto para el estado fresco como endurecido de la mezcla. El diseño de la mezcla se realizó para hormigones con resistencias de diseño de 400 kg/cm^2 y 450 kg/cm^2 , utilizando 12 cilindros de 4" x 8" para cada dosificación según lo indicado por la norma ASTM.

Materiales

Cemento

Se utilizó para el desarrollo del proyecto cemento de proveedor local tipo GU que corresponde a uso general, el cual cumple con los parámetros establecidos en la norma NTE INEN 2380 con una densidad de 2850 kg/m^3 .

Agregado fino

Se utilizó arena proveniente del río Chimbo para las dos dosificaciones planteadas, aplicando los ensayos respectivos del material, mostrados en la tabla 33.

Tabla 33. Ensayos realizados al agregado fino.
Fuente: Autor.

ENSAYO	NORMA
Granulometría	ASTM C 136
Gravedad específica de masa saturada con superficie seca	ASTM C 128
Porcentaje de absorción	ASTM C 128
Peso volumétrico suelto (P.V.S)	ASTM C 29

Debido a las constantes precipitaciones que presenta la temporada, se optó por extender y cubrir el material para un secado natural y mejor almacenamiento del mismo, como se presenta en la imagen 1.



**Imagen 1. Secado natural y protección de la arena del río Chimbo.
Fuente: Autor.**

Granulometría del agregado fino

Para realizar el ensayo de clasificación del agregado fino se implementaron tamices de diferentes tamaños según lo indica la norma ASTM C 136, luego el material retenido en cada uno se va pesando para calcular un porcentaje con respecto al peso total de la muestra ensayada. Los resultados obtenidos se presenta la tabla 34 y en función de dichos datos se obtuvo un gráfico denominado curva granulométrica.

Luego de establecer los resultados que indica la figura 19 se procedió a limpiar la arena por el tamiz 3/8" para remover cualquier partícula de gran tamaño que contenga el material, de tal manera que la distribución del agregado fino sea acorde con las especificaciones indicadas de la norma ASTM C 33 para agregados de hormigón.

Tabla 34. Ensayo de caracterización del agregado fino para hormigón.

Fuente: Autor.

Tamiz INEN (ASTM) N°	Tamiz mm	Pesos retenidos	% Retenidos Parciales	% Retenidos Acumulados	% Pasantes Acumulados	Especificaciones A.S.T.M. C 33
3/8"	9.5	433.27	8.67	8.67	91.33	100
No. 4	4.75	263.94	5.28	13.94	86.06	95 a 100
No. 8	2.36	293.82	5.88	19.82	80.18	80 a 100
No. 16	1.18	318.73	6.37	26.20	73.80	50 a 85
No. 30	0.60	956.18	19.12	45.32	54.68	25 a 60
No. 50	0.30	1419.32	28.39	73.71	26.29	5 a 30
No. 100	0.15	1035.86	20.72	94.42	5.58	0 a 10
FONDO		278.88	5.58	100.00	0.00	
$\epsilon =$		5,000.00	$m_o =$		2.82	

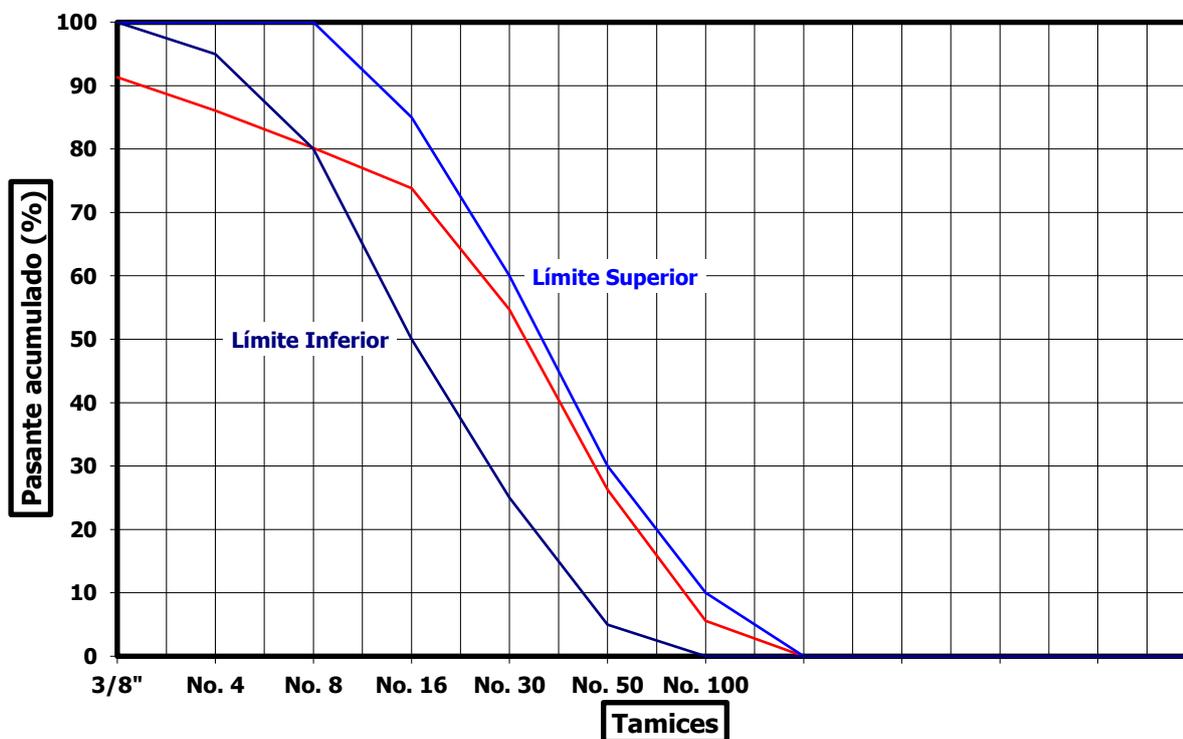


Figura 19. Curva granulométrica del agregado fino.

Fuente: Autor.

El módulo de finura sirve como una medida adicional para el tamaño del agregado fino, el cual se lo determina mediante la sumatoria de los porcentajes de retenidos acumulados dividido para 100. El resultado calculado debe estar limitado entre los valores de 2.3 a 3.1.

Módulo de finura

$$MF = \frac{(\sum \text{Peso retenido acumulado})}{100}$$

$$MF = \frac{(8.67 + 13.94 + 19.82 + 26.20 + 45.32 + 73.71 + 94.42)}{100}$$

$$MF = 2.82$$

El módulo de finura resultante es 2.82, cumpliendo con el límite presentado anteriormente. Si el valor es cada vez mayor se indica que el material es más grueso y si fuese menor significaría que es más fino.

Gravedad específica de masa saturada con superficie seca del agregado fino

Denominado comúnmente como gravedad específica, es la relación del peso de la muestra al aire y el volumen de un material con el peso de un volumen similar de agua. Luego de haber realizado el pesado correspondiente del material, se presentan los resultados necesarios para el cálculo de la gravedad específica según criterios de la norma ASTM C 128.

$$A = \text{Peso de la muestra (SSS)} = 500.0 \text{ gr}$$

$$B = \text{Peso picnómetro + agua} = 784.5 \text{ gr}$$

$$C = \text{Peso + agua + arena} = 493.7 \text{ gr}$$

$$G. \text{ específica} = \frac{A}{B + A - C} \times 1000$$

$$G. \text{ específica} = \frac{500.0}{784.5 + 500.0 - 493.7} \times 1000$$

$$G. \text{ específica} = 2675.23 \text{ kg/m}^3$$

Porcentaje de absorción

Para determinar la absorción del material fino, fue necesario que la arena estuviese sumergida en agua aproximadamente 24 horas para observar el potencial absorbente del agregado fino, según los criterios de ASTM C 128. Luego, se procedió a colocar en horno el tiempo suficiente para eliminar la humedad y secar por completo la muestra. Los resultados obtenidos se presentan a continuación para su correspondiente cálculo.

A = Peso de la muestra (SSS) = 500.0 gr

D = Peso seco en la estufa = 493.7 gr

$$\% \text{ Absorción} = \frac{A - D}{D} \times 1000$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500.0 - 493.7}{493.7} \times 1000$$

$$\% \text{ Absorción} = 1.28\%$$

Peso volumétrico del agregado fino

El peso volumétrico se denomina como la relación existente entre el peso de una determinada muestra y el volumen que ocupa el mismo, expresado generalmente en unidades de kg/m^3 , el proceso del ensayo depende esencialmente de la capacidad compresiva del agregado, así como de la forma, tamaño y distribución de las partículas.

Sin embargo, para la arena no fue necesario compactarla debido a que un agregado con partículas más pequeñas ocupa fácilmente los vacíos existentes en una muestra, mientras que los agregados con partículas más grandes requieren de compactación hasta lo permitido por la norma que se haya aplicado.

Para el caso de los agregados finos, se realizó el procedimiento en laboratorio mediante lo establecido en la norma ASTM C 29. Presentando a continuación los resultados necesarios para el cálculo del peso volumétrico suelto que se utiliza en el diseño de mezclas de hormigón.

- Peso volumétrico suelto

A = Peso del recipiente = 5900 gr

B = Peso del recipiente + la muestra = 9114 gr

C = Volumen del recipiente = 0.002124 m^3

$$\text{P. V. S} = \frac{B - A}{C} \div 1000$$

$$P.V.S = \frac{9114 - 5900}{0.002124} \div 1000$$

$$P.V.S = 1513.18 \text{ kg/m}^3$$

Agregado grueso

El tipo de agregado que se utilizó fue piedra chispa de basalto proveniente de la cantera de LICOSA para el desarrollo de las dos dosificaciones planteadas. Posteriormente se realizaron los ensayos correspondientes en el laboratorio según las especificaciones de la norma ASTM, presentadas en la tabla 35.

Tabla 35. Ensayos realizados al agregado grueso.
Fuente: Autor.

ENSAYO	NORMA
Granulometría	ASTM C 136
Gravedad específica de masa saturada con superficie seca	ASTM C 127
Porcentaje de absorción	ASTM C 127
Peso volumétrico suelto (P.V.S)	ASTM C 29
Peso volumétrico varillado (P.V.V)	ASTM C 29

Debido al factor climático y a las condiciones del material se procedió a extender la piedra para realizar los ensayos, almacenar y mantener seco al agregado grueso como se muestra en la imagen 2, de la misma manera que se realizó para el agregado fino mencionado anteriormente.



**Imagen 2. Secado natural y almacenamiento de la piedra entregada por LICOSA.
Fuente: Autor.**

Granulometría del agregado grueso

Los resultados obtenidos luego de pesar los tamices correspondientes según dicta la norma ASTM C 136 se presentan en la tabla 36 y según el análisis se determinó que el tamaño máximo del agregado grueso es $\frac{1}{2}$ " o 12.5 mm.

Según la curva granulométrica resultante mostrada en la figura 20, se indicó que el material ensayado cumple con los requerimientos de gradación para el agregado grueso, según las especificaciones de la norma ASTM C 33 para agregados de hormigón.

Tabla 36. Ensayo de caracterización del agregado grueso para hormigón.

Fuente: Autor.

Tamiz INEN (ASTM) N° mm		Pesos retenidos	% Retenidos Parciales	% Retenidos Acumulados	% Pasantes Acumulados	Especificaciones A.S.T.M. C 33
4"	100	0.00	0.00	0.00	100.00	
3 1/2"	90	0.00	0.00	0.00	100.00	
3"	75	0.00	0.00	0.00	100.00	
2 1/2"	63	0.00	0.00	0.00	100.00	
2"	50	0.00	0.00	0.00	100.00	
1 1/2"	37.5	0.00	0.00	0.00	100.00	
1"	25.0	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.0	0.00	0.000	0.00	100.00	100
1/2"	12.5	161.29	3.230	3.23	96.77	90 a 100
3/8"	9.5	1712.16	34.240	37.47	62.53	40 a 70
No. 4	4.75	2828.78	56.58	94.04	5.96	0 a 15
No. 8	2.36	217.12	4.34	98.39	1.61	0 a 5
No. 16	1.18	0.00	0.00	98.39	1.61	
No. 30	0.60	12.41	0.25	98.64	1.36	
No. 50	0.30	12.41	0.25	98.88	1.12	
No. 100	0.15	12.41	0.25	99.13	0.87	
FONDO		43.42	0.87	100.00	0.00	
$\epsilon =$		5,000.00				

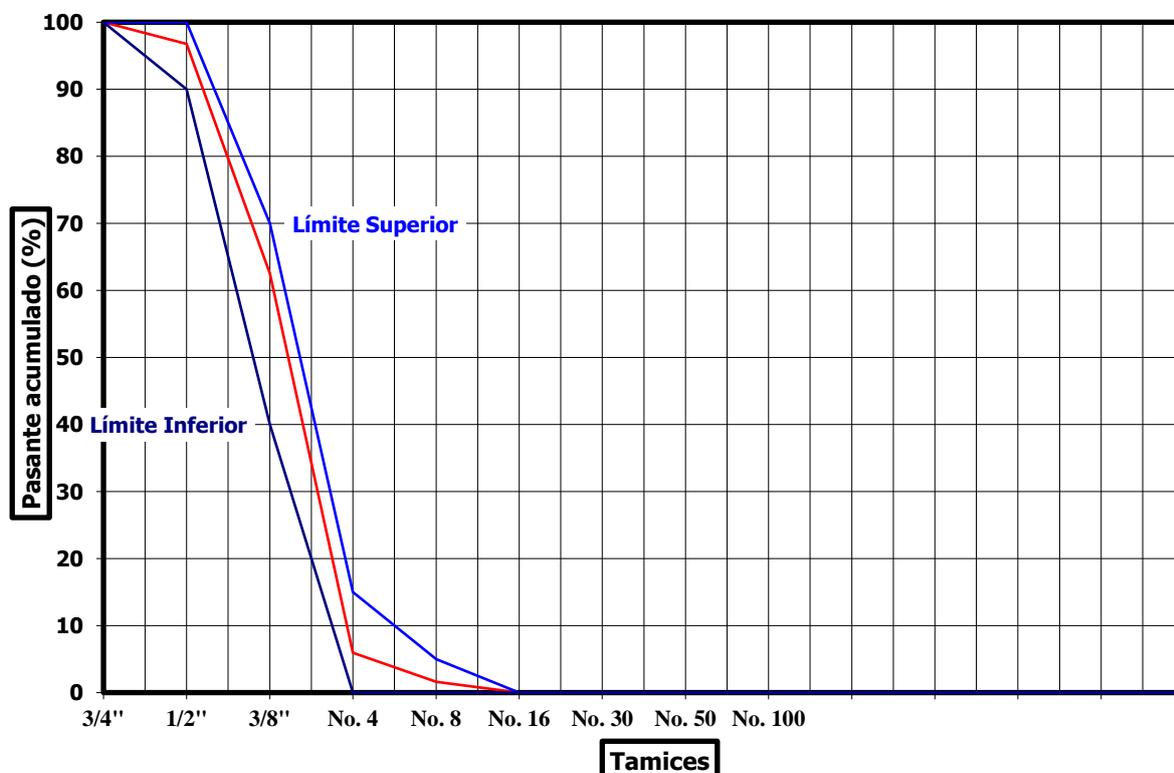


Figura 20. Curva granulométrica del agregado grueso.

Fuente: Autor.

Gravedad específica de masa saturada con superficie seca y porcentaje de absorción del agregado grueso

El proceso se desarrolló de manera similar que el agregado fino, el cual consistió en saturar la mezcla aproximadamente 24 horas, pesar el material y luego en un recipiente se colocó la piedra para determinar el peso de la muestra sumergida en agua. Finalmente se realizó el secado del material en la estufa para ser pesado nuevamente.

Luego de obtener los datos requeridos para determinar la gravedad específica y el porcentaje de absorción del agregado grueso, se implementó la siguiente ecuación bajo los criterios de la norma ASTM C 127.

- Gravedad específica de masa saturada con superficie seca

B = Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca = 1000 gr

Peso de la canastilla sumergida + material = 1815 gr

Peso de la canastilla sumergida = 1157 gr

C = Peso de la muestra, sumergida en agua = 658 gr

$$G. \text{ Específica} = \frac{B}{B - C} \times 1000$$

$$G. \text{ Específica} = \frac{1000}{1000 - 658} \times 1000$$

$$G. \text{ Específica} = 2924 \text{ kg/m}^3$$

Porcentaje de absorción

A = Peso en el aire de la muestra secada en estufa = 990 gr

B = Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca = 1000 gr

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A} \times 1000$$

$$\% \text{ Absorción} = \frac{1000 - 990}{990} \times 1000$$

$$\% \text{ Absorción} = 1.01\%$$

Peso volumétrico del agregado grueso

El procedimiento es similar al que se realizó con el agregado fino, sin embargo, ahora se implementó el uso del varillado correspondiente para determinar el peso del material compactado según las especificaciones que indica la norma ASTM C 29.

Luego de obtener los datos correspondientes se procedió a determinar los pesos volumétricos aplicando las fórmulas que se presentan a continuación.

- Peso volumétrico suelto (P.V.S)

$$A = \text{Peso del recipiente} = 5898 \text{ gr}$$

$$B = \text{Peso del recipiente} + \text{la muestra} = 8985 \text{ gr}$$

$$C = \text{Volumen del recipiente} = 0.002124 \text{ m}^3$$

$$P.V.S = \frac{B - A}{C} \div 1000$$

$$P.V.S = \frac{8985 - 5898}{0.002124} \div 1000$$

$$P.V.S = 1453.39 \text{ kg/m}^3$$

- Peso volumétrico varillado (P.V.V)

$$A = \text{Peso del recipiente} = 5898 \text{ gr}$$

$$B = \text{Peso del recipiente} + \text{la muestra} = 9264 \text{ gr}$$

$$C = \text{Volumen del recipiente} = 0.002124 \text{ m}^3$$

$$P.V.V = \frac{B - A}{C} \div 1000$$

$$P.V.V = \frac{9264 - 5898}{0.002124} \div 1000$$

$$P.V.V = 1584.75 \text{ kg/m}^3$$

Aditivo

El aditivo utilizado para las dos dosificaciones implementadas fue el SF-106 de la marca ADITEC, la ficha técnica del producto recomienda para su dosificación usar de 400cc a 800cc por cada saco de cemento de 50 kg. Para el desarrollo del proyecto se utilizó el valor medio siendo 600cc.

Además, recomienda no añadirlo directamente al cemento o a los agregados secos, por lo que se lo adicionó con la última dosis del agua de amasado.



**Imagen 3. Aditivo líquido superplastificante de la marca ADITEC para elaboración de hormigón.
Fuente: Autor.**

Tipo de hielo aplicado en la mezcla

El hielo se consiguió en una planta de fabricación para camaroneras, debido a que la zona costera es una de los mayores exportadores del producto, lo que aumenta la producción de hielo ya sea triturado, escamas, bloques o escarcha. El modo de obtención empleado para el desarrollo del proyecto es hielo en escamas por saco, los cuales presentan una capacidad de 25 kg, para el desarrollo del proyecto se adquirió dos sacos e inmediatamente se procedió a almacenarlos adecuadamente como se demuestra en la Imagen 4.



**Imagen 4. Almacenamiento del hielo en escamas que se utilizó en la elaboración de hormigón.
Fuente: Autor.**

Diseño y elaboración de la mezcla

Para el diseño de las dosificaciones de 400 y 450 kg/cm² se utilizó el método del ACI 211.1 y mediante los datos obtenidos de los ensayos a los materiales del hormigón se presenta un resumen en la tabla, además, se indica las características necesarias para el desarrollo de los diseños de la mezcla.

- Tamaño máximo del agregado ensayado: 1/2”
- Cemento aplicado: tipo GU de uso general
- Consistencia plástica y trabajable

**Tabla 37. Resumen de ensayos para los agregados del hormigón.
Fuente: Autor.**

ENSAYO	ARENA	PIEDRA
Gravedad Especifica (kg/m ³)	2675.23	2924.00
Absorción (%)	1.28	1.01
Peso volumétrico suelto (Kg/m ³)	1513.18	1453.39
Peso volumétrico varillado (kg/m ³)	---	1584.75
Módulo de finura	2.82	---

Para efectos comparativos cada dosificación consta de una elaboración sin hielo y con hielo, de tal manera que para su procedimiento se reemplazó el 80% del agua de amasado con dicho material. Finalmente se tomó 12 cilindros por cada preparación que se realizó.

Diseño de hormigón $f'c$: 400 kg/cm²

El método ACI indica que se debe determinar inicialmente la resistencia promedio del diseño, que está en función de la resistencia a compresión propuesta como lo indica la tabla 38.

Tabla 38. Selección de la resistencia promedio sin desviación estándar.
Fuente: ACI Comité 211, 1991.

$f'c$ (kg/cm ²)	$f'cr$ (kg/cm ²)
< 210	$f'c + 70$
210 a 350	$f'c + 84$
> 350	$f'c + 98$

$$f'c = 400 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$f'cr = 400 + 84$$

$$f'cr = 484 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Para determinar el asentamiento se utilizó la tabla 39 que propone el método ACI, considerando que la mezcla debe tener una consistencia fluida y muy trabajable, correspondiendo a un asentamiento mayor a 5”.

Tabla 39. Selección del asentamiento de la mezcla.
Fuente; ACI comité 211, 1991.

CONSISTENCIA	SLUMP	TRABAJABILIDAD	MÉTODOS DE COMPACTACIÓN
SECA	0" a 2"	Poco trabajable	Vibración normal
PLÁSTICA	3" a 4"	Trabajable	Vibración ligera Picado con barra
FLUIDA	> 5"	Muy trabajable	Picado con barra

De acuerdo con la tabla 40, se determinó la cantidad de agua necesaria para la elaboración de la mezcla en función del asentamiento obtenido anteriormente y el tamaño máximo de los agregados gruesos, el cual se indicó que es ½”.

Tabla 40. Selección del volumen unitario de agua para la mezcla.
Fuente: ACI comité 211, 1991.

ASENTAMIENTO	Agua, en un m ³ , para los tamaños max nominales de agregado grueso y consistencia indicado.							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1½"	2"	3"	6"
	Hormigones sin aire incorporado							
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	220	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	---

La tabla 41 indica el contenido de aire en la mezcla por los agregados gruesos, utilizando el tamaño máximo del agregado para la dosificación de ½", obteniendo un 2.5% de aire atrapado.

Tabla 41. Contenido de aire atrapado por el agregado grueso.
Fuente: ACI comité 211, 1991.

Tamaño Máximo Nominal	Aire Atrapado
3/8"	3.00%
1/2"	2.50%
3/4"	2.00%
1"	1.50%
1 ½"	1.00%
2"	0.50%
3"	0.30%
6"	0.20%

La tabla 42 presenta los valores correspondientes para la relación agua-cemento en función de la incorporación de aire o no a la mezcla dosificada y del f'cr a 28 días, el cual había sido determinado anteriormente como 484 kg/cm².

Tabla 42. Determinación de la relación agua-cemento de la mezcla.
Fuente: ACI comité 211, 1991.

F'cr 28 días	Relación agua-cemento de diseño en peso	
	Hormigon sin aire incorporado	Hormigón con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.54	0.46
350	0.47	0.40
400	0.42	---
450	0.38	---

Debido a que la resistencia promedio calculada anteriormente no dispone de un valor determinado para la relación agua cemento de la tabla, se seleccionó para el desarrollo del diseño una relación de 0.41.

El contenido de agregado grueso requerido en la mezcla se determinó utilizando la tabla 43, el cual está en función del tamaño máximo del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino, el cual se indicó que es 2.82.

Tabla 43. Determinación del peso del agregado grueso por unidad de volumen del hormigón.

Fuente: ACI comité 211,1991.

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del hormigón, para diversos módulos de fineza del fino.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 ½"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Realizando el proceso de interpolación correspondiente para el valor obtenido del módulo de finura del proyecto.

$$\frac{3.00 - 2.80}{0.53 - 0.55} = \frac{3.00 - 2.82}{0.53 - x}$$

$$x = 0.548$$

Luego se procedió a hacer los cálculos respectivos de la dosificación requerida de los materiales para la elaboración de hormigón, presentando en las siguientes tablas proporcionadas por el laboratorio CONSTRULADESA.

REQUERIMIENTOS TECNICOS

Revenimiento - sin aire incluido (cm)	10 a 17,5
Resistencia específica f'c (Kg/cm²)	= 400.0
Resistencia requerida f'r (Kg/cm²)	= 484.0
Coefficiente volumétrico de la piedra	= 0.548

Cont. de aire (%)	= 2.5
Cont. de agua (Its)	= 228.00 (Para grava Triturada)
Cantidad de cemento (Kg)	= 556.10
Rel. agua/cemento (A/C)	= 0.41 <input type="text" value="sin aire incluido"/>)
Densidad cemento (Kg/m³)	= 2850 Portland tipo GU

CALCULOS

VOLUMEN ABSOLUTO EN 1 m ³ DE HORMIGÓN		
Agua	= 228/1000	= 0.228 m ³
Cemento	= 556.1/2850	= 0.195 m ³
Aire	= 2.5/100	= 0.025 m ³
Piedra	(1584x0.548) /2924	= 0.297 m ³
Volumen total		= 0.745 m ³
Arena	= 1- 0.745	= 0.255 m ³

PESO EN KG. PARA 1 m ³ DE HORMIGON		
Agua		= 228.0 Kg
Cemento		= 556.1 Kg
Piedra	= 1584x0.548	= 868.4 Kg
Arena	= 2675x0.255	= 682.1 Kg
Masa total		= 2,334.6 Kg

PESO VOLUMETRICO DEL CONCRETO (usando agregado S.S.S.)		
Agua		= 228 Kg/m ³
Cemento		= 556.1 Kg/m ³
Piedra	= 868.428 x (0.0101+1)	= 877.2 Kg/m ³
Arena	= 682.1 x (0.0128+1)	= 690.8 Kg/m ³
Masa total		= 2,352.1 Kg/m ³

PESO EN KG. PARA UN SACO DE CEMENTO		
Agua	= 228/11.122	= 20.5 Kg
Cemento	= 556.1/11.122	= 50.0 Kg
Piedra	= 868.428/11.122	= 78.1 Kg
Arena	= 682.1/11.122	= 61.3 Kg

VOLUMEN RELATIVO PARA UN SACO DE CEMENTO		
Piedra	= 78.1 / 1453	= 0.0538 m ³
Arena	= 61.3 / 1513	= 0.0405 m ³

DETERMINACION DE CAJONETAS 0,40 x 0,40 x 0,20 m (vol = 0,032 m ³)		
Piedra	= 0.0538 / 0.032	= 1.68
Arena	= 0.0405 / 0.032	= 1.27

DOSIFICACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE HORMIGÓN CON ADITIVO SF-106 (ADITEC) Ó SIMILAR

DOSIFICACION EN KG PARA 1 m ³ DE HORMIGON		
f'c	= 400.0 Kg/cm ²	
f'cr	= 484.0 Kg/cm ²	
Aditivo	= 6600 cc	
Cemento	= 551.1 Kg	Portland tipo GU
Agua	= 226.0 Lts	
Piedra	= 868.4 Kg	
Arena	= 692.8 Kg	
Revenimiento	10 a 17,5 cm	

DOSIFICACION EN CAJONETAS PARA UN SACO DE CEMENTO		
f'c	= 400.0 Kg/cm ²	
f'cr	= 484.0 Kg/cm ²	
Aditivo	= 600 cc	
Cemento	= 50.00 Kg	Portland tipo GU
Agua	= 20.50 Lts	
Piedra	= 2.0	Cajonetas de 40 x 40 x 16.9 cm
Arena	= 1.5	Cajonetas de 40 x 40 x 17.3 cm
Revenimiento	10 a 17,5 cm	

En la elaboración del hormigón se dosificaron los componentes para 12 cilindros de 4" x 8" incluyendo un porcentaje de residuo en la mezcladora para un hormigón sin hielo y el 80% del volumen de agua reemplazado con hielo, debido a que se realizó el control de revenimiento y por la aplicación de aditivo se redujo 570cc para la mezcla con hielo. Las cantidades resultantes se presentan a continuación.

- Hormigón $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ (sin hielo)

Aditivo: 158 cc

Cemento: 13.20 kg

Agua: 5.45 lts

Piedra: 22.97 kg

Arena: 15.36 kg

- Hormigón $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ (80% de reemplazo con hielo)

Aditivo: 158 cc

Cemento: 13.20 kg

Agua: 1.09 lts – 0.570 lts = 0.52 lts

Hielo: 4.36 kg

Piedra: 22.97 kg

Arena: 15.36 kg

Diseño de hormigón $f'c: 450 \text{ kg/cm}^2$

El procedimiento y criterios a aplicar son similares al del diseño anterior, iniciando con determinar la resistencia promedio de la dosificación utilizando la tabla 38 en función de la resistencia propuesta.

$$f'c = 450 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$f'c = 450 + 84$$

$$f'c = 534 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

El criterio de la tabla 39 del diseño anterior se conserva para este mismo, considerando un asentamiento mayor que 5" para una consistencia fluida y una mezcla muy trabajable. Para la tabla 40 y 41 los valores determinados serán el mismo para este diseño, indicando que la cantidad de agua requerida es aproximadamente 228 con un contenido de aire atrapado del 2.5% debido al agregado grueso.

En la tabla 42 para determinar la relación agua-cemento de la mezcla debido a que no presenta datos para resistencias promedios superior a 450 kg/cm² se eligió un valor por debajo del indicado en la tabla, siendo 0.36 para propósitos conservadores en el diseño. Para el resultado de la interpolación obtenida en función de los datos que presenta la tabla 43 fue considerado el mismo valor para este diseño.

Luego de determinar los datos correspondientes para la dosificación de la mezcla, a manera de resumen, se presentan los cálculos que se realizaron en el laboratorio para el proporcionamiento del hormigón aplicando el método desarrollado.

REQUERIMIENTOS TECNICOS

Revenimiento - sin aire incluido (cm) = 10 a 17,5	Cont. de aire (%) = 2.5
Resistencia específica f'c (Kg/cm²) = 450.0	Cont. de agua (lts) = 228.00 (Para grava Triturada)
Resistencia requerida f'r (Kg/cm²) = 534.0	Cantidad de cemento (Kg) = 640.40
Coeficiente volumétrico de la piedra = 0.548	Rel. agua/cemento (A/C) = 0.36 <small>sin aire incluido</small>
	Densidad cemento (Kg/m³) = 2850 <small>Portland tipo GU</small>

CALCULOS

VOLUMEN ABSOLUTO EN 1 m³ DE HORMIGÓN		
Agua	= 228/1000	= 0.228 m ³
Cemento	= 640.4/2850	= 0.225 m ³
Aire	= 2.5/100	= 0.025 m ³
Piedra	(1584x0.548) /2920	= 0.297 m ³
Volumen total		= 0.775 m ³
Arena	= 1- 0.775	= 0.225 m ³

PESO EN KG. PARA 1 m³ DE HORMIGON	
Agua	= 228.0 Kg
Cemento	= 640.4 Kg
Piedra	= 1584x0.548 = 867.2 Kg
Arena	= 2675x0.225 = 601.9 Kg
Masa total	= 2,337.5 Kg

PESO VOLUMETRIC DEL CONCRETO (usando agregado S.S.S.)	
Agua	= 228 Kg/m ³
Cemento	= 640.4 Kg/m ³
Piedra	= 867.24 x (0.0101+1) = 876.0 Kg/m ³
Arena	= 601.9 x (0.0128+1) = 609.6 Kg/m ³
Masa total	= 2,354.0 Kg/m ³

PESO EN KG. PARA UN SACO DE CEMENTO	
Agua	= 228/12.808 = 17.8 Kg
Cemento	= 640.4/12.808 = 50.0 Kg
Piedra	= 867.24/12.808 = 67.7 Kg
Arena	= 601.9/12.808 = 47.0 Kg

VOLUMEN RELATIVO PARA UN SACO DE CEMENTO	
Piedra	= 67.7 / 1453 = 0.0466 m ³
Arena	= 47 / 1513 = 0.0311 m ³

DETERMINACION DE CAJONETAS 0,40 x 0,40 x 0,20 m (vol = 0,032 m³)	
Piedra	= 0.0466 / 0.032 = 1.46
Arena	= 0.0311 / 0.032 = 0.97

**DOSIFICACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE HORMIGÓN
CON ADITIVO SF-106 (ADITEC) Ó SIMILAR**

**DOSIFICACION EN KG
PARA 1 m³ DE HORMIGON**

f'c	= 450.0 Kg/cm ²
f'cr	= 534.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 7626 cc
Cemento	= 635.4 Kg <input type="text" value="Portland tipo GU"/>
Agua	= 226.2 Lts
Piedra	= 867.2 Kg
Arena	= 612.6 Kg
Revenimiento	10 a 17,5 cm

**DOSIFICACION EN CAJONETAS
PARA UN SACO DE CEMENTO**

f'c	= 450.0 Kg/cm ²
f'cr	= 534.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 600 cc <input type="text"/>
Cemento	= 50.00 Kg <input type="text" value="Portland tipo GU"/>
Agua	= 17.80 Lts
Piedra	= 1.5 Cajonetas de 40 x 40 x 19.6 cm
Arena	= 1.0 Cajonetas de 40 x 40 x 19.9 cm
Revenimiento	10 a 17,5 cm

En la elaboración de la mezcla se dosificó los materiales para 12 cilindros de 4" x 8" incluyendo un porcentaje de residuo que ocupa en la mezcladora para un hormigón sin hielo y el 80% de reemplazo del agua de amasado con hielo. Debido a que se realizó el control de revenimiento y por la aplicación de aditivo se redujo 470cc para la mezcla con hielo. Las cantidades resultantes para dicha elaboración se presentan a continuación.

- Hormigón f'c = 450 kg/cm² (Sin hielo)

Aditivo: 187 cc

Cemento: 15.60 kg

Agua: 5.62 lts

Piedra: 23.18 kg

Arena: 12.48 kg

- Hormigón f'c = 450 kg/cm² (80% de reemplazo con hielo)

Aditivo: 187 cc

Cemento: 15.60 kg

Agua: 1.12 lts – 0.47 lts = 0.65 lts.

Hielo: 4.50 kg

Piedra: 23.18 kg

Arena: 12.48 kg

Curado del hormigón

Para la elaboración y curado de los especímenes de hormigón se implementó los criterios y herramientas que indica la norma ASTM C192, de tal manera que luego del vertido de la mezcla se utilizó una varilla redondeada y un mazo con cabeza de goma para la compactación de los cilindros.

La norma indica que normalmente se debe moldear tres o más muestras para cada edad y condición de ensayo, por lo que se optó por el mínimo establecido por la norma que son 3 especímenes de hormigón. Al día siguiente de su elaboración las muestras fueron desencofradas y posteriormente colocadas en una piscina de curado.



**Imagen 5. Encofrado de los especímenes de hormigón de 400 y 450 kg/cm².
Fuente: Autor.**



Imagen 6. Desencofrado y colocación de las muestras de hormigón en piscina de curado.

Fuente: Autor.

CAPITULO V

ANALISIS DE RESULTADOS

Generalidades

En este capítulo, se presentarán los resultados obtenidos de los ensayos para el hormigón en estado fresco, como la temperatura y el revenimiento de la mezcla con propósito de comparar los resultados con las muestras correspondientes a cada diseño. Además del ensayo correspondiente para el hormigón endurecido, siendo la prueba a la compresión simple de los cilindros curados a los diferentes días establecidos. De la misma, con el propósito de comparar la resistencia del hormigón para cada diseño, evaluando de tal manera la efectividad de la metodología propuesta.

Ensayos al hormigón en estado fresco

Temperatura y revenimiento del hormigón

Como se indicó anteriormente, la temperatura es un factor esencial para la elaboración de la mezcla, debido a que reduce la trabajabilidad y consecuentemente acelera el proceso del fraguado en el hormigón, para evaluar este parámetro se estableció los criterios que recomienda la norma ASTM C 1064, colocando el termómetro durante un aproximado de 2 minutos para el registro de la lectura obtenida.

Para determinar el revenimiento se aplica los fundamentos de la norma ASTM C 143, indicado como método de prueba estándar para el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico. Para el desarrollo del ensayo se utilizó el Cono de Abrams. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 44 y 45 correspondientemente para hormigón de 400 y 450 kg/cm².

Tabla 44. Resultado del ensayo de la mezcla en estado fresco para hormigón de 400 kg/cm².

Hormigón f'c = 400 kg/cm ²	temperatura ambiente (°C)	temperatura del hormigón (°C)	revenimiento (cm)
Patrón (sin hielo)	29	31.6	17
80% reemplazo con hielo	30	14	21

Tabla 45. Resultado de los ensayos de la mezcla en estado fresco para hormigón de 450 kg/cm².

Hormigón f'c = 450 kg/cm ²	temperatura ambiente (°C)	temperatura del hormigón (°C)	revenimiento (cm)
Patrón (sin hielo)	29	32	13
80% reemplazo con hielo	30	16	16

Ensayo del hormigón en estado endurecido

Resistencia a la compresión simple

El procedimiento realizado en el laboratorio se referenció en la norma ASTM C 39, el cual es un método de ensayo que determina la resistencia a compresión de los especímenes de hormigón, siendo necesario que el hormigón presente una densidad mayor a 800 kg/m³ para que los criterios de la norma sean permitidos.

Para la aceptación de los ensayos de rotura, los cilindros deben tener un tamaño de 6" x 12" o de 4" x 8", para el desarrollo del proyecto se eligió los cilindros más pequeños para la mezcla, por su facilidad de elaboración y manejo en el laboratorio.



Imagen 7. Máquina de ensayo utilizado para determinar la resistencia a la compresión de los especímenes de hormigón.

Los resultados de los ensayos obtenidos para 3, 7, 14, 28 días se presentan correspondientemente en las siguientes tablas, además de sus gráficos sobre el desarrollo de su resistencia para la muestra patrón de hormigón convencional sin hielo y del hormigón con 80% de reemplazo del agua con hielo.

- Hormigón $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
3	206.44	80.12	10.10	20.30	4,002.00	2,460.64	262.75	400	65.69
3	216.94	83.32	10.30	20.40	4,100.00	2,412.06	265.49	400	66.37
3	208.78	83.32	10.30	20.40	4,106.00	2,415.59	255.51	400	63.88

Resistencia promedio 3 días (kg/cm²)	261.25	%	65.31
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
7	278.85	81.71	10.20	20.40	4,040.00	2,423.59	347.98	400	87.00
7	280.83	81.71	10.20	20.40	4,044.00	2,425.99	350.45	400	87.61
7	297.68	81.71	10.20	20.40	4,084.00	2,449.99	371.48	400	92.87

Resistencia promedio 7 días (kg/cm²)	356.64	%	89.16
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
14	315.64	81.71	10.20	20.30	4,076.00	2,457.24	393.89	400	98.47
14	318.25	81.71	10.20	20.30	4,130.00	2,489.79	397.15	400	99.29
14	318.70	81.71	10.20	20.20	4,038.00	2,446.38	397.71	400	99.43

Resistencia promedio 14 días (kg/cm²)	396.25	%	99.06
---	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
28	341.73	81.71	10.20	20.20	4,038.00	2,446.38	426.45	400	106.61
28	357.10	81.71	10.20	20.20	4,122.00	2,497.27	445.63	400	111.41
28	337.49	81.71	10.20	20.20	4,068.00	2,464.55	421.16	400	105.29

Resistencia promedio 28 días (kg/cm²)	431.08	%	107.77
---	--------	---	--------

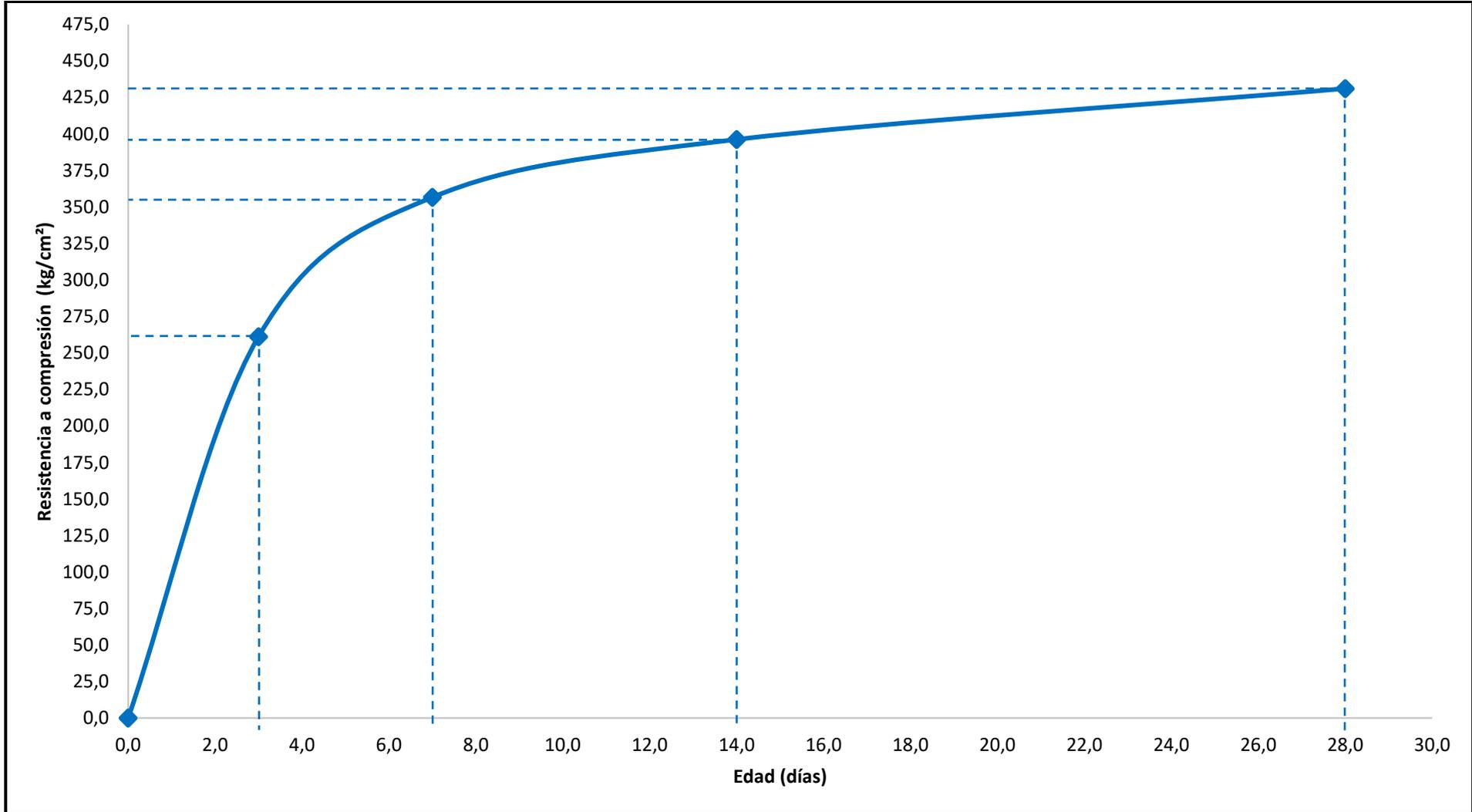


Figura 21. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 400 kg /cm (Patrón sin hielo).
Fuente: Autor.

- Hormigón f'c: 400 kg/cm² (80% reemplazo con hielo).

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
3	219.76	81.71	10.20	20.30	4,082.00	2,460.85	274.24	400	68.56
3	212.01	80.12	10.10	20.30	4,062.00	2,497.53	269.84	400	67.46
3	210.54	83.32	10.30	20.30	4,100.00	2,423.94	257.66	400	64.41

Resistencia promedio 3 días (kg/cm²)	267.25	%	66.81
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
7	291.99	83.32	10.30	20.30	4,088.00	2,416.85	357.34	400	89.33
7	301.14	83.32	10.30	20.20	4,066.00	2,415.74	368.54	400	92.13
7	298.81	81.71	10.20	20.20	4,030.00	2,441.53	372.89	400	93.22

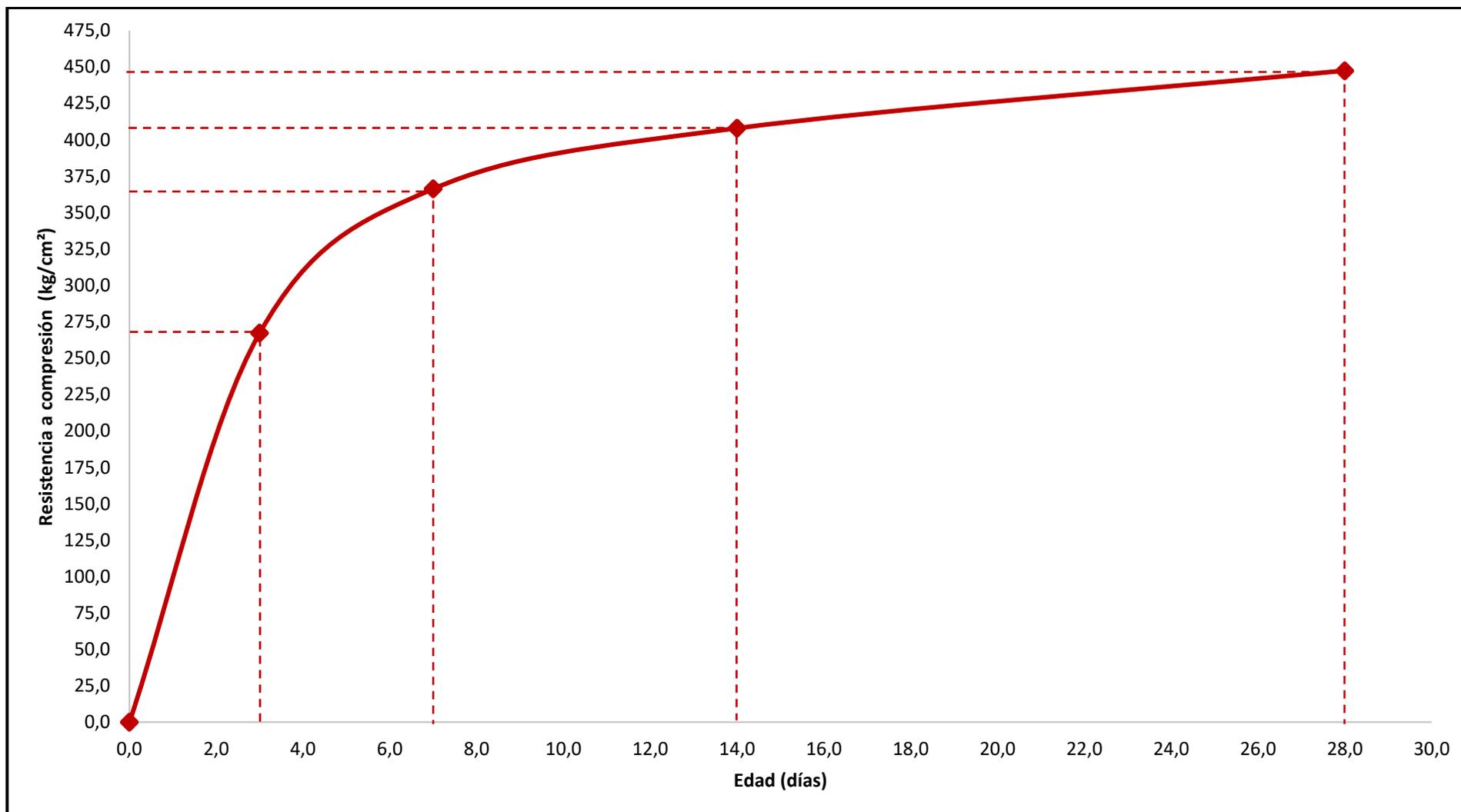
Resistencia promedio 7 días (kg/cm²)	366.25	%	91.56
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
14	327.26	80.12	10.10	20.10	4,016.00	2,493.81	416.52	400	104.13
14	322.74	83.32	10.30	20.20	4,050.00	2,406.24	394.97	400	98.74
14	330.39	81.71	10.20	20.20	4,016.00	2,433.05	412.30	400	103.07

Resistencia promedio 14 días (kg/cm ²)	407.93	%	101.98
---	--------	---	--------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
28	343.73	81.71	10.20	20.20	4,054.00	2,456.07	428.95	400	107.24
28	362.39	81.71	10.20	20.20	4,040.00	2,447.59	452.23	400	113.06
28	369.54	81.71	10.20	20.20	4,088.00	2,476.67	461.15	400	115.29

Resistencia promedio 28 días (kg/cm ²)	447.44	%	111.86
---	--------	---	--------



**Figura 22. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 400 kg /cm (80% de reemplazo del agua con hielo).
Fuente: Autor.**

- Hormigón $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
3	247.58	81.71	10.20	20.30	4,080.00	2,459.65	308.96	450	68.66
3	260.98	81.71	10.20	20.40	4,120.00	2,471.59	325.68	450	72.37
3	264.57	83.32	10.30	20.40	4,092.00	2,407.35	323.78	450	71.95

Resistencia promedio 3 días (kg/cm²)	319.47	%	70.99
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
7	337.02	81.71	10.20	20.30	4,096.00	2,469.29	420.57	450	93.46
7	345.38	81.71	10.20	20.30	4,088.00	2,464.47	431.01	450	95.78
7	339.62	80.12	10.30	20.30	4,072.00	2,407.39	415.63	450	92.36

Resistencia promedio 7 días (kg/cm²)	422.40	%	93.87
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
14	369.36	81.71	10.20	20.30	4,038.00	2,434.33	460.93	450	102.43
14	353.98	81.71	10.20	20.20	4,030.00	2,441.53	441.74	450	98.16
14	368.90	80.12	10.10	20.50	4,064.00	2,474.38	469.52	450	104.34

Resistencia promedio 14 días (kg/cm²)	457.40	%	101.64
---	--------	---	--------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
28	378.26	81.71	10.20	20.20	4,066.00	2,463.34	472.04	450	104.90
28	401.28	81.71	10.20	20.20	4,034.00	2,443.96	500.76	450	111.28
28	389.65	81.71	10.20	20.20	4,020.00	2,435.47	486.25	450	108.06

Resistencia promedio 28 días (kg/cm²)	486.35	%	108.08
---	--------	---	--------

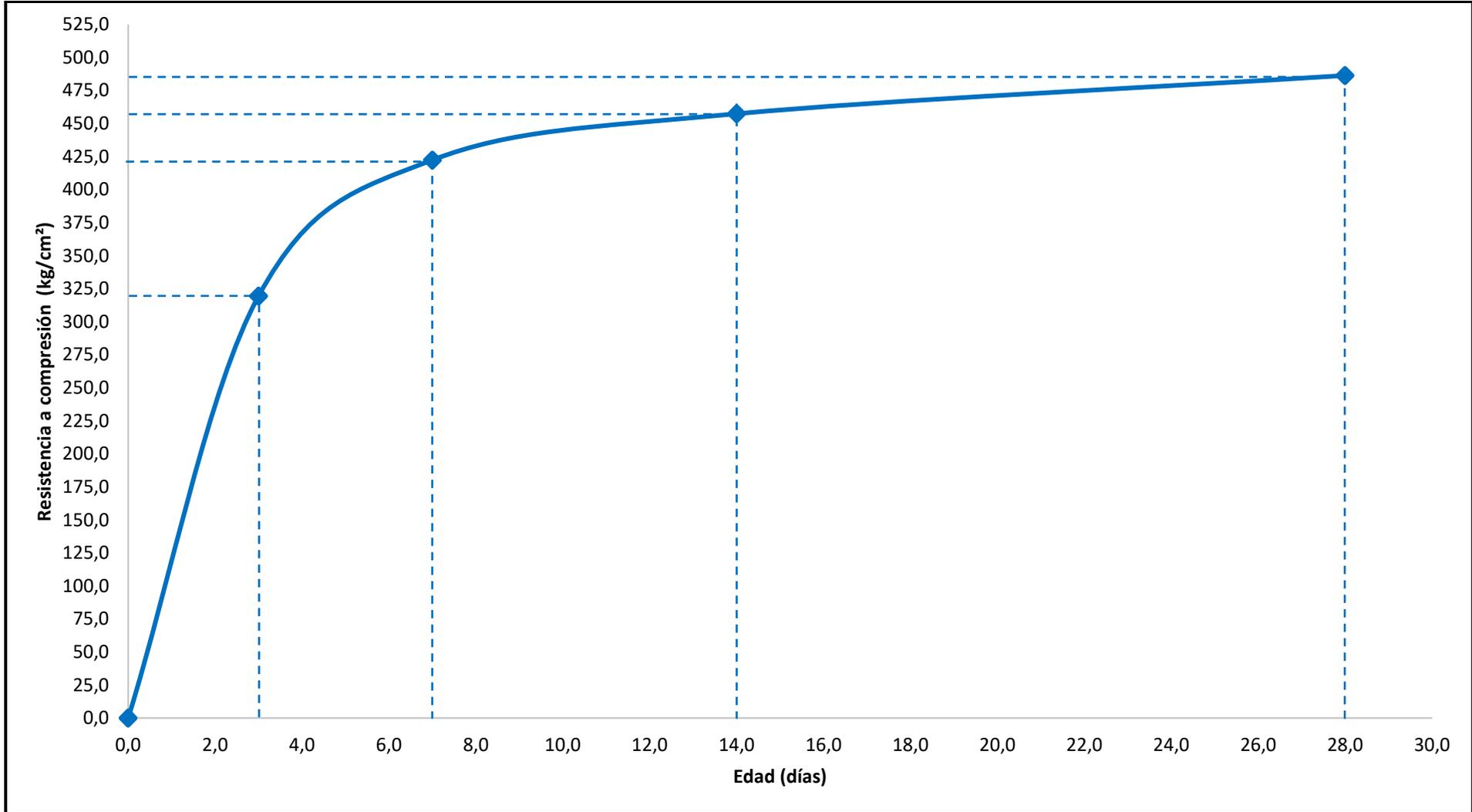


Figura 23. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 450 kg /cm2 (Patrón sin hielo).
Fuente: Autor.

- Hormigón $f_c = 450 \text{ kg/cm}^2$ (80% reemplazo con hielo).

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
3	261.82	81.71	10.20	20.40	4,110.00	2,465.59	326.73	450	72.61
3	250.20	80.12	10.10	20.30	4,110.00	2,527.04	318.44	450	70.76
3	258.41	81.71	10.20	20.40	4,108.00	2,464.39	322.47	450	71.66

Resistencia promedio 3 días (kg/cm²)	322.55	%	71.68
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
7	352.32	83.32	10.30	20.40	4,132.00	2,430.89	431.17	450	95.82
7	355.31	83.32	10.30	20.40	4,062.00	2,389.71	434.83	450	96.63
7	349.13	83.32	10.30	20.40	4,092.00	2,407.35	427.27	450	94.95

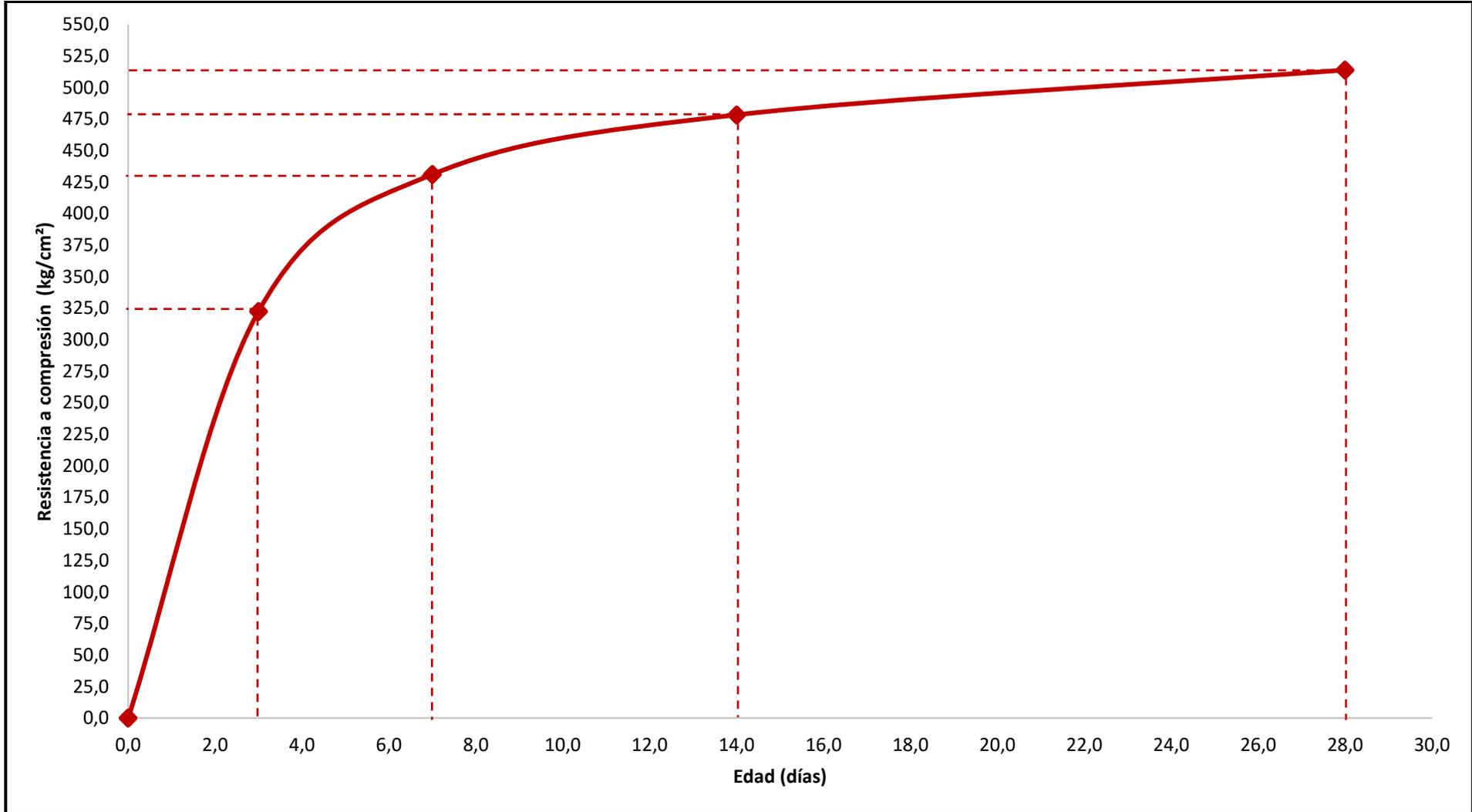
Resistencia promedio 7 días (kg/cm²)	431.09	%	95.80
--	--------	---	-------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
14	386.17	81.71	10.20	20.30	4,124.00	2,486.17	479.81	450	106.62
14	372.49	81.71	10.20	20.30	4,036.00	2,433.12	464.84	450	103.30
14	392.96	81.71	10.20	20.40	4,102.00	2,460.79	490.38	450	108.97

Resistencia promedio 14 días (kg/cm²)	478.34	%	106.30
---	--------	---	--------

EDAD	CARGA	ÁREA	DIÁMETRO	ALTURA	MASA	DENSIDAD	RESISTENCIA	RESISTENCIA ESPECIFICADA	%
(Días)	(KN)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(gr)	(kg/cm ³)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
28	410.96	81.71	10.20	20.40	4,066.00	2,439.19	512.84	450	113.97
28	411.90	81.71	10.20	20.40	4,056.00	2,433.19	514.02	450	114.23
28	412.46	81.71	10.20	20.40	4,082.00	2,448.79	514.72	450	114.38

Resistencia promedio 28 días (kg/cm²)	513.86	%	114.19
---	--------	---	--------



**Figura 24. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón de 450 kg /cm² (80% de reemplazo del agua con hielo).
Fuente: Autor**

Análisis comparativo de los resultados

Mediante los ensayos realizados para el hormigón en estado fresco se indica que el revenimiento aumentó con respecto al de la mezcla patrón al haber reemplazado parcialmente el volumen del agua de amasado con hielo, para el primer diseño propuesto aumento en 4 cm y para el segundo diseño propuesto aumento en 3 cm, además de que disminuyó la temperatura de la mezcla en 17.6 °C y 16°C correspondientemente, por lo tanto, cuando se realizó el control del revenimiento se requirió menos agua de amasado para asemejarlo con el resultado del ensayo para el diseño Patrón sin hielo.

En los ensayos de resistencia a la compresión para el hormigón endurecido, se cumplió con la resistencia promedio para 28 días según lo indicado por el método ACI, además existe una diferencia notable entre cada diseño, para el primer diseño se presentó un incremento en la resistencia del 3.80 % y para segundo diseño presentó un incremento del 5.66% al reemplazar parcialmente el agua de amasado con hielo. A manera de resumen, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizado en el hormigón en la tabla

**Tabla 46. Resumen comparativo para los diseños de hormigón 400 y 450 kg/cm².
Fuente: Autor.**

	f'c = 400 kg/cm ²		f'c = 450 kg/cm ²	
	Sin hielo	80% hielo	Sin hielo	80% hielo
Resistencia promedio a 28 días (kg/cm²)	431.08	447.44	486.35	513.86
%	107.77	111.86	108.08	114.19
Temperatura del homigón (°C)	31.6	14	32	16
Revenimiento (cm)	17	21	13	16

En las figuras 25 y 26 se presentan con propósitos comparativos la evolución de la resistencia a compresión para los diseños de 400 y 450 kg/cm² correspondientes.

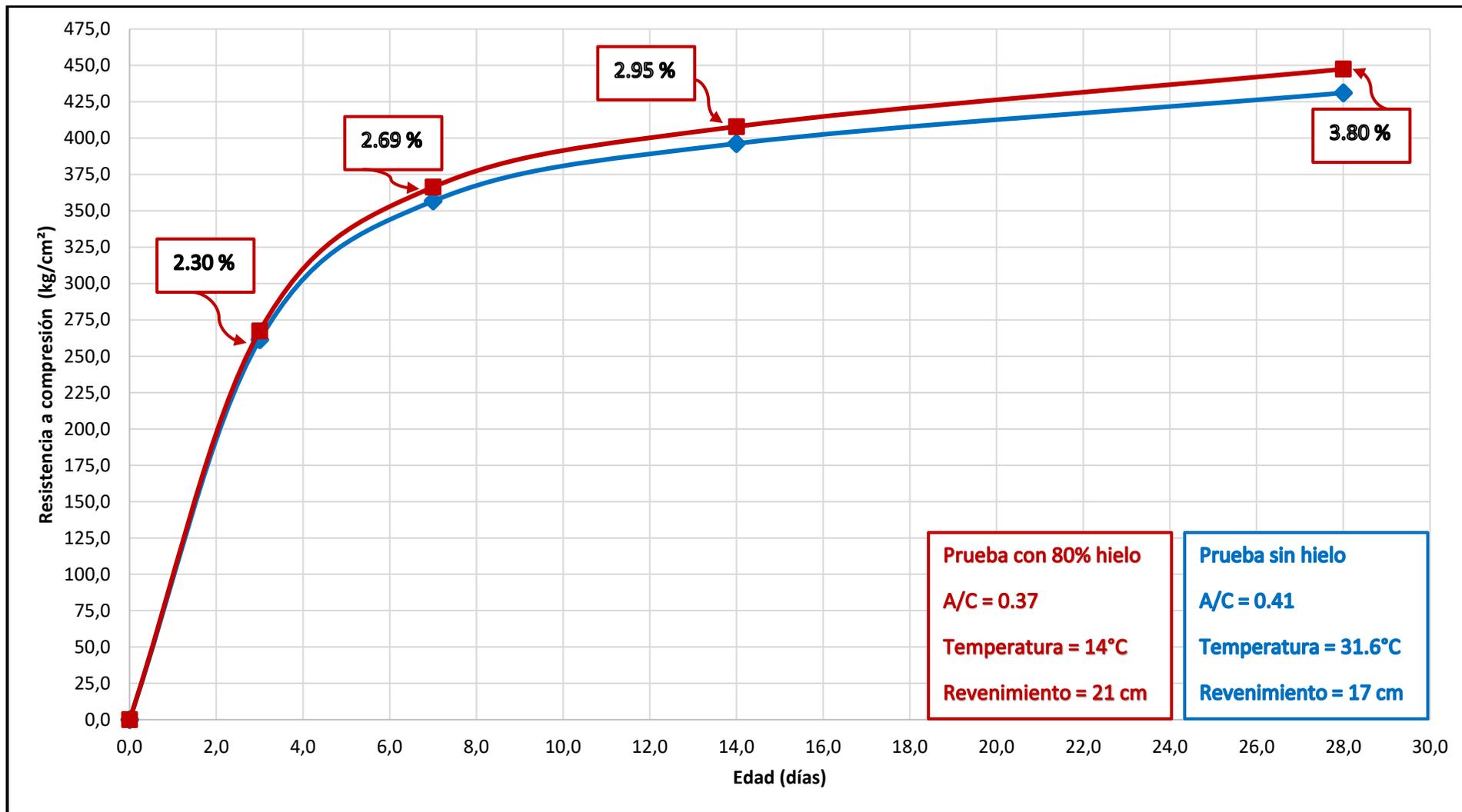


Figura 25. Curvas comparativas sobre la evolución de la Resistencia del hormigón de 400 kg/cm² sin hielo y el 80% de reemplazo del agua con hielo.
Fuente: Autor.

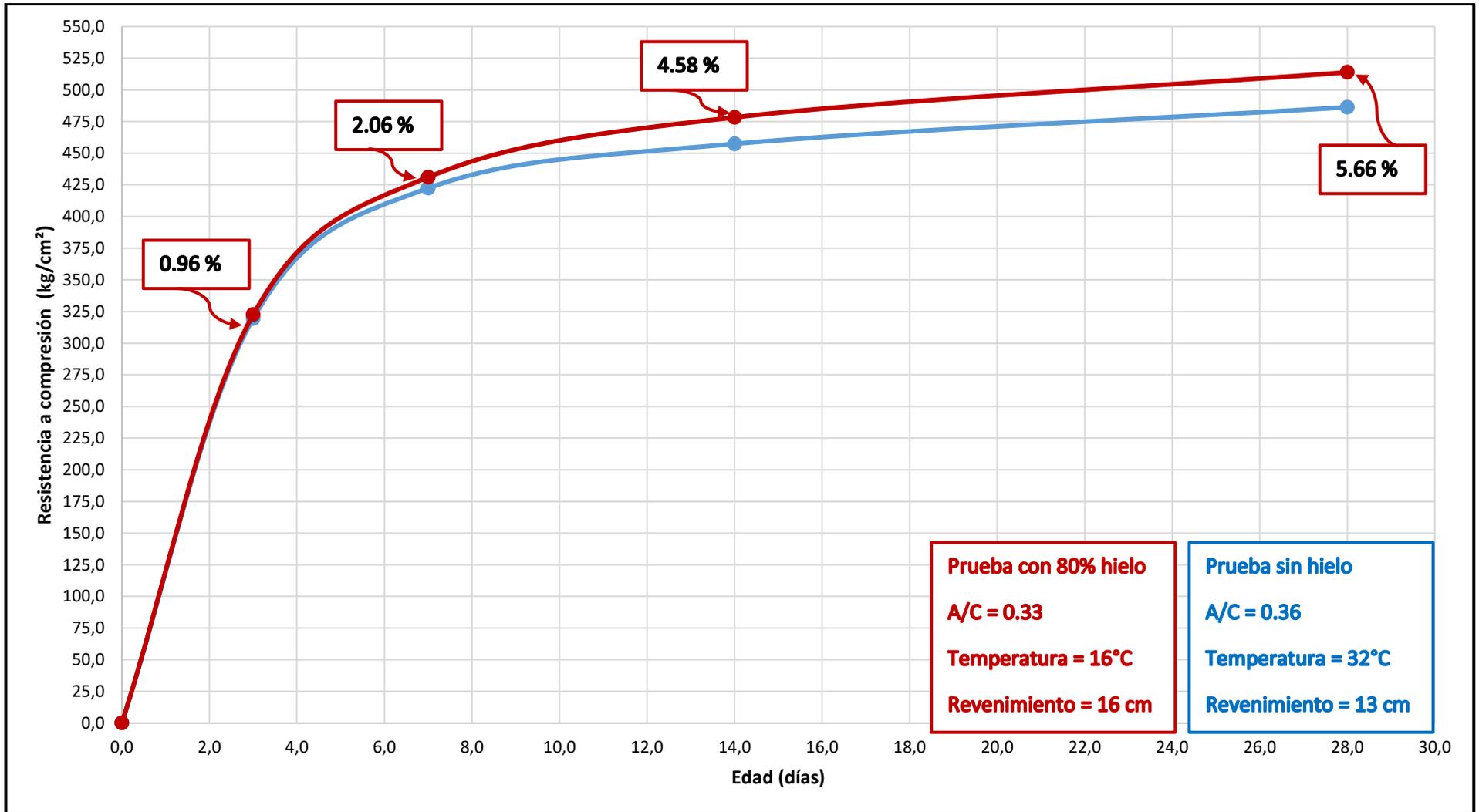


Figura 26. Curvas comparativas sobre la evolución de la Resistencia del hormigón de 450 kg/cm² sin hielo y el 80% de reemplazo del agua con hielo.
Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

En esta primera fase investigativa se sustituyó el 80% del agua de amasado por hielo molido, en diseños de hormigón de 400 y 450 kg/cm² de resistencia a los 28 días. Ambos diseños utilizaron un alto consumo de cemento hidráulico compuesto GU de uso comercial local. Los resultados muestran que, para un revenimiento similar, en cada uno de los diseños se aprecia un incremento sistemático de la resistencia del hormigón que utiliza hielo, cuando este es comparado con el mismo diseño patrón de hormigón, sin hielo.

La temperatura del hormigón mezclado en el Laboratorio en espacio abierto, en los diseños patrón fue de 31-32°C. Tuvo una reducción de 15-16 grados centígrados al utilizarse el 80% de hielo triturado en sustitución parcial del agua de amasado. La temperatura fue medida en el hormigón fresco con termómetro digital de laboratorio, cinco minutos después de concluido el mezclado, tanto para el diseño de 400 kg/cm² como para el diseño de 450 kg/cm².

En las mediciones del revenimiento a través del uso del Cono de Abrams, se observó un incremento notorio del asentamiento en ambos diseños, lo que permitió reducir el agua de amasado en los diseños con hielo. Estas reducciones del agua de amasado redujeron también la relación agua-cemento en ambos diseños, de 0,41 para 0,37 en el diseño de 400 kg/cm² y de 0,36 para 0,33 en el diseño de 450 kg/cm².

De estos resultados se concluye que, el uso de hielo molido en los diseños supra especificados, reducirá el consumo de cemento si se quisiera mantener la resistencia del diseño inicial sin hielo. Los costos del cemento que se logre reducir podrían ser mayores que los costos del hielo de sustitución. Además de que se logrará un sensible incremento en la calidad estructural del hormigón, vaciado en condiciones de calor severo en el litoral ecuatoriano, principalmente si se considera el alto riesgo sísmico y las condiciones de salinidad al que se somete a las estructuras litorales.

Con excepción de Los Ríos, todas las provincias de la región litoral tienen instalada de manera sistemática, la producción de hielo de manera comercial a causa de la industria camaronera, presente en estas provincias. No es obligatorio montar una fábrica de hielo para producir hormigón preenfriado con hielo molido, lo que le otorga a esta región algunas facilidades diferenciadas, para lograr la adición del hielo en el concreto fresco, de manera económica y práctica.

RECOMENDACIONES

En función de los resultados encontrados se propone ampliar la presente investigación: a) para diseños con menor consumo de cemento como 200 y 300 kg/cm², b) analizar la reducción del factor agua-cemento para distintos tamaños de piedra, 3/8", 1/2", 3/4" y 1", cuando se utiliza hielo molido en sustitución parcial del agua de amasado y, c) evaluar la diferencia de los costos entre los diseños patrón y los diseños con adiciones de hielo, para la misma resistencia e igual factor agua-cemento.

El uso de hielo molido incluido como agua de amasado en el hormigón hidráulico, ha sido utilizado tradicionalmente para hormigones masivos. El presente estudio demuestra que el uso del hielo puede resultar una buena estrategia en hormigones urbanos vaciados en climas como el de Guayaquil. Se debe continuar los estudios con inclusiones de fibras vegetales de varios tipos, juntamente con el uso de hielo molido, para resolver problemas frecuentes en el litoral ecuatoriano, alrededor de las fisuras y otras patologías del hormigón endurecido.

BIBLIOGRAFÍA

- Abanto, F. (2009). *Tecnología del concreto*. San Marcos.
- ACI. (1999). *305R-99: Hot weather concreting*. Concrete.org.
- ACI. (2005). *207.4R-05: Cooling and insulating systems for mass concrete (reapproved 2012)*. Concrete.org.
- ASTM. (2012). *C39: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM C39/C39M-12.
- Alvarado, S. A., Guzmán, N. G., & Henríquez, G. E. (2009). *Comportamiento del concreto en climas tropicales para las principales zonas de EL Salvador*. Universidad de El Salvador.
- Chipana, M. M., & Chambi, R. D. (2020). *Influencia del calor de hidratación en concreto a bajas temperaturas, dosificado con cemento comercializados en la ciudad de Juliaca*. Universidad Peruana Unión.
- Covarrubias, J. P. (1988). *Análisis y recomendaciones de hormigonado en climas rigurosos*.
- Cruz, C. M. (2016). *Análisis patológico de la carbonatación de muelles en ambiente salino, caso muelle no 2 de la base naval de Guayaquil*. Universidad de Guayaquil.
- Dixon, D. E., Prestrera, J. R., Burg, G. R. U., Abdun-Nur, E. A., Barton, S. G., Bel, L. W., Conrey, M. T., Cook, J. E., Cordon, W. A., & Lee, S. H. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*.
- Domingo, A. M. (2015). *Apuntes de los temas de termodinámica*.
- Feldman, R. F., & Sereda, P. J. (1970). *Written discussion of "Structures and physical properties of cement paste" by George J. Verbeck and Richard H. Helmuth (Portland Cement Association, Skokie, Ill, U.S.A.)*. Canada.ca. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=31795901-d56e-4e7a-8658-392bfccd99ad>

- García, Á. (2007). *Desarrollo y análisis de pavimentos industriales desde el punto de vista del acabado superficial*. Universidad de Cantabria.
- García, G. (2011). *Estudio del proceso de hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolin, utilizando dos aditivos superplastificantes*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Liebmann, B. (2018). *Using chilled water or ice to slow the cement hydration process in hot weather*. Folsomreadymix.com.
<https://folsomreadymix.com/using-chilled-water-or-ice-to-slow-the-cement-hydration-process-in-hot-weather/>
- Mingshu, T., Min, D., Xianghui, L., & Sufen, H. (1994). *Studies on alkali-carbonate reaction*. ACI Materials Journal, 91(1), 26–29.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). London: Longman.
- NTE INEN. (2012). 152-5: *Cemento Portland. Requisitos*.
- NTE INEN. (2011). 490: *Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos*.
- NTE INEN. (2011). 872: *Áridos para hormigón. Requisitos*.
- NTE INEN. (2016). 1855-1: *Hormigones. Hormigón premezclado. Requisitos*.
- NTE INEN. (2015). 1855-2: *Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos*.
- NTE INEN. (2011). 2380: *Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*.
- Ortiz, J. A. (2005). *Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado*. Universidad Politécnica de Cataluña.

- Quiñones, F. (2014). *Estuarios*. Recursos de agua de Puerto Rico.
http://www.recursosaguapuertorico.com/Estuarios.html?no_redirect=true#:~:text=En%20un%20punto%20en%20el,cambia%2C%20tambi%C3%A9n%20cambia%20su%20calidad.
- Taylor, H. F. (1997). *Química del cemento* (Vol. 2). Londres: Thomas Telford.
- Varela, A. L., & Ron, S. R. (2020). *Geografía y Clima del Ecuador*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
<https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/>
- Whiting, D., & Dziedzic, W. (1992). *Effects of conventional and high-range water reducers on concrete properties*.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Córdova Coronel, Jamil Javier**, con C.C: # **0952974376** autor del trabajo de titulación: **características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado en condiciones de calor severo** previo a la obtención del título de **ingeniero civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 11 de marzo del 2021.

f. _____

Nombre: Córdova Coronel, Jamil Javier

C.C: 0952974376



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA Y SUBTEMA:	Características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado en condiciones de calor severo.		
AUTOR(ES)	Jamil Javier Córdova Coronel		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Colon Gilberto Martínez Rehpani		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	11 de marzo de 2021	No. DE PÁGINAS:	140
ÁREAS TEMÁTICAS:	Tecnología del hormigón, Materiales de construcción, Tecnología de la construcción.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Preenfriado, resistencia, hielo, hormigón, temperatura ambiental, agua, mezcla, revenimiento.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):	<p>La ciudad de Guayaquil presenta varias condiciones ambientales que afectan el desempeño y calidad de los elementos de hormigón, como la alta concentración de salinidad en el medio, la humedad y las altas temperaturas ambientales. Por lo tanto, El desarrollo del proyecto plantea una solución utilizando el hielo triturado en sustitución parcial del agua de amasado para la mezcla de hormigón, demostrando sus beneficios no solo para contrarrestar los efectos climáticos de la ciudad, también para mejorar la calidad y las propiedades de las estructuras de hormigón, además de que Guayaquil presenta una gran ventaja para obtener el hielo triturado, debido a que es uno de los exportadores de camarón más grandes del mundo, existen alrededor de la ciudad varias plantas de fabricación de dicho material comercializándolo en diversos tipos como: triturado, escamas, molido, escarcha y en bloques, haciendo que su obtención sea más sencillo y económico que en algunas otras partes del mundo, donde uno de los inconvenientes más grandes que presenta, es el abastecimiento adecuado de hielo para la aplicación de dicha metodología.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR:	Teléfono: +593 993223545	E-mail: jjcordovacoronel@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Glas Cevallos Clara Catalina		
	Teléfono: +593 984616792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			