

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**CONCRETO ESTRUCTURAL PREENFRIADO CON HIELO
MOLIDO FUNDIDO EN ÁREAS URBANAS PARA AMBIENTES
DE CALOR EXTREMO**

AUTOR:

Garzón Fajardo, Ariana Monserrate

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de

INGENIERO CIVIL

TUTOR:

Martínez Rehpani, Colón Gilberto

Guayaquil, Ecuador

15 de septiembre 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 **Garzón Fajardo Ariana Monserrate**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

f. _____
Ing. Martínez Rehpani Colón Gilberto, M. Sc.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____
Ing. Alcívar Bastidas Stefany Esther, M. Sc.

Guayaquil, a los 15 del mes de septiembre del año 2021



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Garzón Fajardo Ariana Monserrate**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Concreto estructural preenfriado con hielo molido fundido en áreas urbanas para ambientes de calor extremo** 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 15 del mes de septiembre del año 2021

LA AUTORA

f. _____
Garzón Fajardo Ariana Monserrate



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Garzón Fajardo Ariana Monserrate**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Concreto estructural preenfriado con hielo molido fundido en áreas urbanas para ambientes de calor extremo**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 del mes de septiembre del año 2021

LA AUTORA:

f. _____
Garzón Fajardo Ariana Monserrate



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

REPORTE URKUND

URKUND

Urkund Analysis Result

Analysed Document:	Garzón_Ariana_Final.docx (D112904165)
Submitted:	9/19/2021 2:00:00 PM
Submitted By:	clara.glas@cu.ucsg.edu.ec
Significance:	3 %

Sources included in the report:

ALVARADO A, TIVANTA K.docx (D60124785)
<https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-HM-Hormig%C3%B3n-Armado.pdf>
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/22717/1/T-UCE-0011-ICF-287.pdf>
https://nanopdf.com/download/nte-inen-1855-2-hormigones-hormigon-preparado-en-obra_pdf
<https://pdfcoffee.com/catalogo-de-normas-tecnicas-ecuatorianas-nte-inen-pdf-free.html>
http://awsassets.panda.org/downloads/fz08_producto_2_marcelo_castillo_corregido__anexo.pdf
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1855-2.pdf
<http://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2012/1/UNESUM-ECUADOR-ING.CIVIL-2019-95.pdf>
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19001/1/T-UCE-0011-ICF-154.pdf>
<https://1library.co/document/q75187nz-universidad-nacional-autonoma-nicaragua-facultad-ciencias-ingenierias-ingenieria.html>
ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20DE%20CONSTRUCCION/CONCRETO%20HIDRAULICO/CURSO_BASICO_DE_TECNOLOGIA_DEL_CONCRETO.pdf
<http://docplayer.es/142944304-Escuela-politecnica-nacional.html>
<http://ri.ues.edu.sv/15301/1/ELABORACION%20Y%20EVALUACION%20DE%20DISE%20OS%20DE%20MEZCLA%20DE%20CONCRETO%20DE%20ALTA%20RESISTENCIA%20IMPLEMENTANDO%20CEME.pdf>
http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfcib817c/doc/capitulos/capitulo_2.pdf
https://es.slideshare.net/philip_c/pca-40034964

Instances where selected sources appear:

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, por todas las oportunidades y enseñanzas que se han presentado durante el transcurso de mi vida universitaria.

Agradezco a mis padres, hermanos, abuelitas y bisabuelita Julia por todo su apoyo durante esta etapa. Así también a mis tíos que siempre estuvieron presentes mediante un consejo o brindándome su ayuda incondicional: Johnny, Jenny, Ruth, Vicente, Juan, Javier, Carlos, Teodoro, Santiago, Moisés y Dulbar.

Durante esta etapa he podido conocer personas maravillosas que además de ser mis amigos se han convertido en mi familia, han sido incondicionales en toda situación y hemos vivido muchas aventuras juntos, gracias por todo: Bryan, Cindy, Cynthia, Damián, David, Isaac, Jamil, Luis, Naomi, Rodney y Steeven.

Al ingeniero Gilberto Martínez por toda su paciencia y orientación durante el desarrollo del presente trabajo, así mismo por todos los consejos brindados a lo largo de la carrera.

A todos los profesionales que conforman el laboratorio de CONSTRULADESA S.A, por brindarme la oportunidad de llevar a cabo el desarrollo del presente proyecto en sus instalaciones, así como también por todas las recomendaciones y sugerencias para lograr un excelente trabajo de titulación.

DEDICATORIA

Deseo dedicar el presente trabajo de titulación a mis pilares fundamentales: Mercedes, Hernán, Sharick, Yolanda y Antonieta.

Gracias a mi mamá Mercedes por ser mi apoyo incondicional durante mi carrera universitaria, por todas las veces que me diste ánimos para que continúe y nunca me rinda, porque a pesar de que el camino no ha sido fácil tú siempre has creído en mí.

Gracias a mi papá Hernán por todo el esfuerzo que has realizado para brindarme educación, por siempre estar pendiente de mí, apoyándome en todo lo que me propongo y aconsejándome para que entregue lo mejor de mí en todos los aspectos.

Gracias hermanita por siempre escucharme y ser mi principal motivación para desarrollarme tanto personalmente como profesionalmente, deseo poder ser un gran ejemplo para ti.

Gracias abuelitas Yolanda y Antonieta por siempre cuidarme e inculcarme valores, por ser un ejemplo de esfuerzo e inquebrantabilidad.

Las palabras no pueden expresar todo lo que siento, lo que han representado y aportado en mi vida, solo me queda decirles que los amo mucho.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

Ing. Carlos Chon Díaz, M. Sc.

DECANO

f. _____

Ing. Alexandra Camacho Monar, PhD.

COORDINADOR DEL ÁREA

f. _____

Ing. Daniel De la Pared Condo, M. Sc.

OPONENTE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Situación problemática	4
1.3 Objetivo general	5
1.4 Objetivos específicos.....	5
1.5 Alcance.....	5
1.6 Metodología.....	6
2. CAPÍTULO I.....	7
2.1 Afectaciones en las propiedades del hormigón debido a la influencia del clima tropical.....	7
2.1.1 Caracterización climática de la zona de estudio	7
2.1.2 Caracterización ambiental de la zona de estudio	9
2.1.3 Afectaciones en las propiedades del hormigón debido a la influencia del clima tropical	10
2.1.4 Repercusión de la temperatura sobre el hormigón en estado fresco.....	14
2.1.5 Repercusión de la temperatura sobre el hormigón en estado endurecido.....	14
2.1.6 Temperatura en el hormigón	16
2.2 Materiales del hormigón	17
2.3 Agua	17
2.4 Cemento.....	21
2.5 Cemento Portland.....	22

2.6	Cemento Hidráulico Compuesto.....	27
2.7	Cemento Hidráulico por Desempeño.....	32
2.8	Agregados	35
2.8.1	Requisitos y características para los agregados	35
2.9	Reactividad Álcali-Agregado.....	42
2.9.1	Reacción Álcali-Sílice (RAS)	43
2.9.2	Reacción Álcali-Carbonato (RAC)	47
2.10	Aditivos	48
2.10.1	Tipos de Aditivos	49
2.10.2	Aditivos Reductores de Agua	50
2.10.3	Aditivos Retardantes	51
2.10.4	Aditivos Aceleradores.....	53
2.10.5	Aditivos Superplastificantes	54
2.11	Hidratación del Cemento Portland.....	56
2.12	Etapas del Proceso de Hidratación del Cemento Portland	57
2.13	Volumen de los productos durante el proceso de hidratación	60
2.14	Agua retenida durante el proceso de hidratación	62
2.15	Transporte de fluidos en el hormigón	63
2.16	Características físico-químicas durante el proceso de hidratación.....	64
2.17	Problemas en la zona de estudio que pudiesen dificultar la producción de hormigón	67
2.18	Alternativas propuestas por ACI 305R para el control de la temperatura en el hormigón	71

2.19	Métodos de enfriamiento del hormigón propuestos por ACI 305R.....	72
2.19.1	Enfriamiento con agua fría de mezcla	72
2.19.2	Enfriamiento con nitrógeno líquido del agua de mezcla	73
2.19.3	Enfriamiento del hormigón con hielo	73
2.19.4	Enfriamiento del hormigón mezclado con nitrógeno líquido	73
2.19.5	Enfriamiento de agregados gruesos.....	74
2.20	Hormigón en Estado Fresco	74
2.20.1	Densidad del concreto fresco	74
2.20.2	Mezclado.....	75
2.20.3	Trabajabilidad y consistencia del hormigón.....	76
2.20.4	Segregación y sangrado	77
2.20.5	Calor de hidratación	77
2.20.6	Ensayo de asentamiento con el Cono de Abrams.....	80
2.20.7	Pérdida de trabajabilidad y factores que la producen.....	82
2.21	Hormigón Endurecido	83
2.21.1	Curado del hormigón.....	83
2.21.2	Métodos de curado del hormigón	84
2.21.3	Resistencia del hormigón endurecido	85
3.	CAPÍTULO II.....	88
3.1	Desarrollo de la Metodología.....	88
3.2	Materiales	88
3.2.1	Cemento.....	88

3.2.2	Agregado fino	88
3.2.3	Agregado grueso.....	89
3.2.4	Aditivo	89
3.2.5	Hielo	90
3.3	Caracterización de los agregados	90
3.3.1	Agregado Fino.....	90
3.3.2	Agregado Grueso	99
3.4	Diseño y elaboración de mezclas	110
3.4.1	Diseño hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$	111
3.4.2	Diseño hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$	116
3.5	Proceso de Fundición.....	118
3.5.1	Ensayos al hormigón en Estado Fresco.....	120
3.6	Curado.....	122
3.7	Prueba a la compresión simple	123
4.	CAPÍTULO III.....	125
4.1	Resultados.....	125
4.1.1	Temperatura y revenimiento	125
4.1.2	Resistencia a la compresión simple	125
5.	CAPÍTULO IV	134
5.1	Análisis de resultados y discusión	134
	CONCLUSIONES	141
	RECOMENDACIONES.....	142
	REFERENCIAS	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Registro de temperaturas más altas en la ciudad de Guayaquil durante el período 2013-2021.....	8
Tabla 2: Requisitos físicos e inorgánicos para la aceptación del agua potable.....	18
Tabla 3: Requisitos de sustancias orgánicas para la aceptación del agua potable.....	19
Tabla 4: Requisitos microbiológicos para la aceptación del agua potable... ..	19
Tabla 5: Criterio de aceptación de aguas dudosas.....	20
Tabla 6: Límites químicos opcionales para agua de lavado.....	21
Tabla 7: Hormigón expuesto a la acción de sulfatos.....	21
Tabla 8: Norma a emplear de acuerdo al tipo de cemento.....	22
Tabla 9: Componentes principales del Cemento Portland.....	24
Tabla 10: Requisitos químicos de composición normalizada.....	25
Tabla 11: Requisitos químicos de composición opcionales.....	25
Tabla 12: Requisitos físicos normalizados.....	26
Tabla 13: Requisitos físicos opcionales.....	26
Tabla 14: Requisitos químicos aplicables a cementos hidráulicos compuestos.....	29
Tabla 15: Requisitos físicos aplicables a cementos hidráulicos compuestos.....	30
Tabla 16: Requisitos para puzolana para uso en cementos compuestos y para escoria para uso en cementos portland con escoria de altos hornos Tipo IS(<25) y cementos compuestos ternarios Tipo IT(<25).....	31

Tabla 17: Requisitos de la granulometría que deben poseer los áridos para realizar el ensayo de expansión de morteros.....	31
Tabla 18: Requisitos físicos normalizados.....	33
Tabla 19: Requisitos físicos opcionales.....	33
Tabla 20: Límites granulométricos para el agregado fino.....	36
Tabla 21: Requisitos de gradación para áridos gruesos.....	37
Tabla 22: Límites para las sustancias perjudiciales en el agregado fino para hormigón.....	39
Tabla 23: Requisitos degradación para áridos gruesos.....	41
Tabla 24: Hidratación de los componentes del cemento.....	65
Tabla 25: Requisitos para uniformidad del hormigón.....	75
Tabla 26: Calor de hidratación desarrollado tras 72 horas a diferentes temperaturas.....	78
Tabla 27: Calor de hidratación de los compuestos.....	79
Tabla 28: Descripción de la trabajabilidad y magnitud de asentamiento.....	81
Tabla 29: Tolerancias en el asentamiento nominal de la mezcla.....	82
Tabla 30: Resistencia especificada y resistencia promedio requerida a compresión.....	87
Tabla 31: Resistencia especificada y resistencia promedio requerida a tracción por flexión.....	87
Tabla 32: Ensayos realizados al agregado fino.....	91
Tabla 33: Ensayo de clasificación del agregado fino para hormigón.....	92
Tabla 34: Resultados obtenidos del ensayo de desgaste del agregado fino.....	99
Tabla 35: Ensayos realizados al agregado grueso.....	100

Tabla 36: Ensayo de clasificación del agregado grueso para hormigón.	101
Tabla 37: Pesos de la muestra antes y después del ensayo.	108
Tabla 38: Datos obtenidos en el ensayo de Desgaste del agregado grueso.	110
Tabla 39: Resultados de los ensayos realizados a los agregados.....	111
Tabla 40: Resistencia de la compresión promedio sin desviación estándar.	111
Tabla 41: Estimación de agua para la mezcla de acuerdo a distintos parámetros.....	112
Tabla 42: Cantidad de aire atrapado de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado grueso.	113
Tabla 43: Relación entre factor agua/cemento y la resistencia a la compresión promedio.	113
Tabla 44: Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón.	114
Tabla 45: Resultados de temperatura y revenimiento para hormigón de 200 kg/cm ²	125
Tabla 46: Resultados de temperatura y revenimiento para hormigón de 300 kg/cm ²	125
Tabla 47: Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).	126
Tabla 48: Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).	128
Tabla 49: Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).	130
Tabla 50: Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).	132

Tabla 51: Tabla resumen de resultados para los diseños de hormigón 200 y 300 kg/m ²	136
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del proceso de evaporación en el concreto.	12
Figura 2: Efecto sobre la velocidad con que se da el proceso de evaporación de la humedad superficial del hormigón.	13
Figura 3: Afectación en el desarrollo de la resistencia debido a la temperatura.....	16
Figura 4: Composición del hormigón.	17
Figura 5: Minerales reactivos y materiales sintéticos potencialmente perjudiciales.....	43
Figura 6: Daños producidos en estructuras de hormigón debido al RAS.....	44
Figura 7: Reducción de la reactividad álcali-sílice por la arcilla calcinada y el esquisto calcinado.	46
Figura 8: Pérdida de revenimiento en hormigones con reductores de agua convencionales comparados con mezclas de control.	51
Figura 9: Relación entre la temperatura y el tiempo de fraguado del hormigón.....	52
Figura 10: Relación entre la temperatura y el tiempo de fraguado del hormigón.....	53
Figura 11: Pérdida de revenimiento a 32°C en concretos fluidos comparados con mezclas de control.	56
Figura 12: Evolución esquemática del calor en función del tiempo de hidratación del cemento con sus correspondientes etapas o períodos.....	58
Figura 13: Representación de las proporciones volumétricas de la pasta de cemento en diferentes fases de hidratación.	61
Figura 14: Curva desarrollo de resistencias.....	65

Figura 15: Esquema de los diferentes períodos del mecanismo de hidratación de una partícula de cemento.	67
Figura 16 Armado de losa con varillas de acero y encofrado metálico.	69
Figura 17 Cimentación del Juzgado Central de San Diego.	70
Figura 18: Influencia de la temperatura de los ingredientes del hormigón... 72	
Figura 19: Ensayo de revenimiento para la consistencia del concreto.	80
Figura 20: Asentamiento: típico, cizallamiento y colapso.....	81
Figura 21: Pérdida de asentamiento y aumento en la cantidad de agua requerida.....	83
Figura 22: Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto.	84
Figura 23: Resistencia probables de acuerdo a la relación agua-cemento empleando cemento portland.	86
Figura 24: Proceso de extracción del agregado fino.....	88
Figura 25: Obtención del basalto en la cantera de Licosá.	89
Figura 26: Aditivo líquido superplastificante de la marca Aditec.	89
Figura 27: Hielo en forma de escamas empleado en la elaboración de la mezcla.	90
Figura 28: Proceso de secado natural del agregado fino.....	91
Figura 29: Curva Granulométrica del agregado fino.	92
Figura 30: Ensayo de cono al agregado fino para conocer la gravedad específica.....	94
Figura 31: Muestra de agregado fino sumergida en agua.	95
Figura 32: Peso del recipiente con la muestra de agregado fino.	96

Figura 33: Muestras de agregado fino sumergidas en solución de Sulfato de Magnesio.	97
Figura 34: Remoción de la solución de Sulfato de Magnesio.	98
Figura 35: Tamices del laboratorio, empleados para determinar la granulometría que posee el agregado grueso.	101
Figura 36: Curva Granulométrica obtenida para el agregado grueso.	102
Figura 37: Muestra de agregado grueso sumergido en agua.	104
Figura 38: Peso del recipiente con la muestra de agregado grueso.	105
Figura 39: Máquina de Abrasión de Los Ángeles.	107
Figura 40: Esferas colocadas previamente a la realización del ensayo de Abrasión de los Ángeles.	108
Figura 41: Muestras de agregado grueso sumergidas en solución de Sulfato de Magnesio.	109
Figura 42: Concretera empleada en la elaboración de la mezcla.	119
Figura 43: Materiales colocados en la mezcladora.	119
Figura 44: Toma de temperatura de la mezcla de hormigón.	120
Figura 45: Prueba de revenimiento con el Cono de Abrams.	121
Figura 46: Muestras de cilindro tomadas durante el proceso.	121
Figura 47: Colocación de datos en los especímenes.....	122
Figura 48: Especímenes del diseño de 200 kg/cm ² desencofrados.....	122
Figura 49: Especímenes de los distintos diseños colocados en la piscina de curado.....	123
Figura 50: Proceso de pesar y medir los cilindros.	124
Figura 51: Máquina empleada para realizar el ensayo de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón.....	124

Figura 52: Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).....	127
Figura 53: Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).....	129
Figura 54: Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).....	131
Figura 55: Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).....	133
Figura 56: Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).	137
Figura 57: Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).	138
Figura 58 : Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).	139
Figura 59: Curva comparativa del desarrollo del hormigón $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).....	140

RESUMEN

La ciudad de Guayaquil se encuentra inmersa ante distintas problemáticas ambientales que dificultan la correcta elaboración, desempeño y durabilidad de los elementos de hormigón, por lo que es preciso recurrir a alternativas que favorezcan a la mitigación de estas situaciones. El presente proyecto propone la implementación de hielo como sustituto parcial del agua de amasado empleada en la elaboración de la mezcla de hormigón. Esta alternativa no solo favorece a disipar los efectos climáticos de la ciudad, sino que también aumenta la calidad de las estructuras de hormigón. Este material se puede adquirir con facilidad, puesto que en la ciudad se comercializa a gran escala y en distintas presentaciones a causa de la industria camaronera. Así mismo, este posee una tarifa módica, lo cual contribuye a la disminución de costos. Esto debido a que, al aumentar las propiedades del elemento de hormigón, es posible reducir a largo plazo los costes de mantenimiento o reparación.

Palabras Claves:

Hielo, hormigón, fisuras, temperatura, caluroso, resistencia, durabilidad, hormigonado.

ABSTRACT

Guayaquil city is immersed in different environmental problems that hinder the correct elaboration, performance and durability of concrete elements, so it is necessary to resort to alternatives that contribute to the mitigation of these situations. The present project proposes the implementation of ice as a partial substitute for the mixing water used in the preparation of the concrete mix. This alternative not only favors the dissipation of the climatic effects of the city, also increases the quality of the concrete structures. This material can be easily acquired, because it is commercialized on a large scale and in different presentations in the city due to the shrimp industry. It also has low prices, which contributes to the cost's reduction. This is due to the fact that, by increasing the properties of the concrete element, it is possible to reduce maintenance or repair costs in the long term.

Keywords:

Ice, concrete, cracks, temperature, warm, resistance, durability, placing.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El presente tema de investigación tiene como finalidad darle continuidad al trabajo: “Características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado en condiciones de calor severo”, el cual fue elaborado y sustentado el 11 de marzo de 2021 por el Ing. Jamil Javier Córdova Coronel. Como parte del proceso de trabajo, se realizaron ensayos de laboratorio con la finalidad de comprobar que en diseños de $f'c = 400$ y 450 kg/cm^2 , se apreciaría un incremento en resistencia y durabilidad en el hormigón al emplear hielo en sustitución del agua de amasado.

Como método de medición de revenimiento se empleó el Cono de Abrams, mediante el cual se observó un notorio incremento del asentamiento en los dos diseños previamente mencionados, lo que permite la reducción del agua de amasado en los diseños con hielo. Como consecuencia de esto, la relación agua-cemento disminuyó en ambos diseños de la siguiente forma: de 0,41 a 0,37 en el diseño de 400 kg/cm^2 y de 0,36 a 0,33 en el diseño de 450 kg/cm^2 (Córdova, 2021).

En función a los resultados obtenidos para hormigones de mayor consumo de cemento, surgió el presente trabajo investigativo, cuyo enfoque son los diseños con menor consumo de cemento como lo son los de 200 y 300 kg/cm^2 . Así mismo, busca contribuir con la reducción de costos que implica la elaboración de hormigón en áreas urbanas, pero también brindaría la oportunidad de analizar los efectos producidos en la resistencia del hormigón y su durabilidad al substituir el agua de amasado por hielo.

La práctica de reemplazar el agua por hielo ha sido frecuentemente empleada en Ecuador para obras de hormigón masivo, como lo son las presas o grandes cimentaciones. Debido a esto ha surgido la idea de que solo es aplicable en obras de gran tamaño, cuando ante los notables incrementos de temperatura debido al cambio climático y al calentamiento global, se deberían considerar nuevas alternativas que favorezcan al vaciado del hormigón.

Por otra parte, es importante analizar el incremento de la dilatación térmica diferencial que ocurre como producto del calor de hidratación generado por el cemento mientras se efectúan las reacciones químicas exotérmicas. Esta variación de temperatura, también conocida como contracción térmica es la causante del agrietamiento del hormigón.

El agrietamiento es uno de los principales problemas a los que se enfrentan los elementos estructurales, lo que influencia en su deformabilidad, estética y duración. Sin embargo, no ha sido considerado tomar los mismos cuidados que se ejecutan en obras de concreto masivo y aplicarlos en edificaciones de concreto convencional.

Esto ha impactado de forma negativa al mercado constructivo, puesto que el desempeño estructural se ha visto afectado tanto en el aspecto sísmico, como también por la facilidad con que pueden ingresar agentes agresivos que causan daños en los elementos resistivos de varias construcciones. Por lo tanto, es muy importante realizar un control preventivo de grietas en las estructuras de hormigón.

La temperatura final del hormigón puede ser influenciada por distintos aspectos como la tasa en la que ocurre la evaporación del agua y el clima el día del hormigonado. Por consiguiente, el prever la evolución que tendrá la temperatura del hormigón debido al calor de la hidratación en estructuras es un problema de gran complejidad, convirtiéndose así en un parámetro importante en el control tecnológico que debe ser monitoreado.

Cuando es requerido preenfriar el hormigón, se puede emplear hielo para substituir parcial o totalmente el agua de amasado. Pero, también es posible emplear otras opciones como lo son: agua fría, nitrógeno líquido o refrigerar los áridos, con la finalidad de reducir la temperatura inicial en el vaciado del concreto fresco. En el caso del agua de amasado, esta posee mayor facilidad para modificar la temperatura de la mezcla, siendo su implementación una gran alternativa.

El presente trabajo tiene como finalidad observar y examinar la evolución que presente la resistencia a 7, 14 y 28 días, así como también la

temperatura del concreto fresco, para lo cual se va a emplear un diseño que pueda ser aplicado en piezas estructurales y cimentaciones de edificios residenciales en Guayaquil.

Se implementará hielo para substituir el agua de amasado con la finalidad de disminuir la temperatura de la mezcla de hormigón durante el vaciado y a su vez aumentar la resistencia de este. Así mismo, se buscará plantear una propuesta que, después de ser implementada progresivamente, logre mitigar los impactos ambientales previamente mencionados.

1.2 Situación problemática

Durante el proceso de vaciado del hormigón no es posible contar con condiciones ideales de temperatura, generándose una mayor avidez de agua. Así mismo, la pérdida de revenimiento ocurre con mayor rapidez por lo cual se produce la constante tendencia de agregar agua al concreto en el sitio de obra.

En este tipo de situación se ve afectado el tiempo de fraguado, produciéndose en menor tiempo, lo cual dificulta su manejo, compactación y acabado. Todas estas condiciones generan probabilidad de agrietamiento y una considerable dificultad para controlar el contenido de aire incluido.

En su mayoría, las provincias de la región litoral ecuatoriana cuentan con industrias productoras de hielo de manera comercial, debido a que en estas existe un gran auge de producción camaronera. Esto brinda la facilidad para acceder a este producto, por lo que se logra la adición del hielo al concreto fresco de manera económica y práctica.

Por otra parte, la ciudad de Guayaquil presenta como problemática su clima, en el cual es posible encontrar 2 estaciones distintas. Durante el verano o época seca hay ausencia de precipitaciones y las temperaturas son bajas, mientras que durante el invierno o época húmeda las precipitaciones son abundantes y las temperaturas son altas. A pesar de esta variación climática, la norma vigente no presenta ningún tipo de consideración o recomendación a implementar para prevenir la aparición de grietas en los elementos de hormigón.

1.3 Objetivo general

- Analizar la repercusión que tendrá la implementación hielo molido en reemplazo del agua de amasado, en las propiedades de las mezclas para concreto estructural en estado fresco y endurecido, colocado en áreas urbanas con bajas temperaturas de vaciado en condiciones de clima extremo.

1.4 Objetivos específicos

1. Comparar a los 7, 14 y 28 días la resistencia a la compresión simple, en especímenes de hormigones tradicionales de $f'c=200 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$. Las que serán preparadas sin hielo y con hielo en sustitución del agua de amasado, para un revenimiento similar.
2. Comparar la disminución de temperatura que se presente en el hormigón fresco, preparando una mezcla con hielo triturado en sustitución del agua de amasado y otra sin hielo, evaluando los cambios que se manifiesten en el revenimiento del hormigón.
3. Comparar la consistencia del hormigón en estado fresco, siendo este preparado con hielo en sustitución del agua de amasado y sin hielo, empleando el ensayo del Cono de Abrams.

1.5 Alcance

Se aspira identificar qué incidencia producirá la implementación de hielo molido en diseños de concreto estructural, con la finalidad de mejorar la durabilidad que posean los elementos estructurales elaborados en Guayaquil bajo condiciones de temperatura extrema.

Así mismo, se evaluaría el porcentaje de incremento que presente la resistencia a la compresión simple, la disminución del cemento requerido para un similar revenimiento y resistencia.

También se considerará que la aplicación de hielo molido en las dosificaciones de hormigón, conllevaría a la reducción de fricción entre las partículas, provocado una disminución en la cantidad de agua de amasado requerida para la elaboración de la mezcla. El hacer uso de este fenómeno

físico natural, beneficiaría en la reducción de costos, puesto que sería requerida una menor cantidad de cemento.

1.6 Metodología

Se deberá realizar un levantamiento bibliográfico global que contenga información pertinente sobre el uso de hormigón estructural con sustitución parcial o total del agua de amasado por hielo molido. La realización de los ensayos pertinentes se llevará a cabo de acuerdo con las normas vigentes. Se empleará como referencia el código para la ejecución de Hormigón en Clima Caluroso ACI 305R-10.

2. CAPÍTULO I

2.1 Afectaciones en las propiedades del hormigón debido a la influencia del clima tropical

2.1.1 Caracterización climática de la zona de estudio

Se considera al término temperatura como un parámetro importante en distintas disciplinas, puesto que representa la “magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin”(Real Academia Española, s.f., definición 1). Ante esto, se podría decir que la temperatura ambiental representa gran relevancia al momento de ejecutar una obra civil, puesto que se debe estar familiarizado con las características meteorológicas que posee el lugar en que se desarrolla el proyecto.

En Ecuador, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es el encargado de brindar el servicio meteorológico e hidrológico. Este fue creado en 1961 con la finalidad de proporcionar información sobre el tiempo, clima y recursos hídricos para salvaguardar la vida humana y los bienes ante la ocurrencia de desastres naturales (INAMHI, 2019).

En términos generales, la región Costa se encuentra caracterizada por un clima tropical árido en la zona suroeste, mientras que en la zona centro-sur existe una variación de seco a húmedo, entretanto en la zona norte tiende a ser muy húmedo. Así mismo, esta cuenta con dos estaciones definidas: húmeda o invierno y seca o verano. La primera se suscita entre los meses de diciembre hasta mayo, mientras que la segunda tiene lugar entre junio y noviembre (Ron & Varela, 2020).

Al encontrarse ubicada la ciudad de Guayaquil en la región Costa es preciso realizar un análisis de los efectos que se suscitan debido a la temperatura ambiental que posee esta, puesto que ha sido afectada por grandes variaciones en los últimos años. En la tabla 1 se pueden observar las temperaturas más altas que se han presentado en la ciudad durante los últimos años, estos datos han sido proporcionados por el INAMHI mediante los distintos boletines mensuales.

Tabla 1

Registro de temperaturas más altas en la ciudad de Guayaquil durante el período 2013-2021.

Año	Fecha	Temperatura Máx. (°C)
2021	23 de marzo	32,3
2020	22 de octubre	34
	9 de mayo	34,6
	9 de enero	35,4
	28 de diciembre	34,8
2019	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
	5 de mayo	33,8
2018	22 de abril	34,4
	1 de febrero	33,1
	8 de enero	35,1
	3 de abril	33,3
2017	28 de marzo	33,4
	11 de febrero	34,4
	3 de enero	36,2
	26 de diciembre	35,4
2016	12 de noviembre	34,7
	25 de junio	34,4
	22 de mayo	34,7
	2 de enero	34,2
	29 de diciembre	35,2
2015	12 de septiembre	34,3
	29 de abril	34,2
	2 de marzo	34,7
	3 de febrero	34
	12 de enero	34,9
	25 de diciembre	34,9
2014	8 de noviembre	33,4
	18 de octubre	34,6
	13 de septiembre	34
	3 de marzo	34,5
	2 de enero	33,7

Año	Fecha	Temperatura Máx. (°C)
2013	6 de diciembre	34,5
	6 de octubre	33,8
	21 de septiembre	33,8
	30 de mayo	33,5
	6 de abril	33,5
	4 de enero	34,5
2012	29 de diciembre	34,6
	26 de noviembre	34,9
	5 de octubre	34,9
	3 de mayo	33,4
	12 de abril	33,3
	1 de enero	33,2

Nota. Se puede observar un incremento en las temperaturas máximas registradas en la ciudad de Guayaquil. Tomado de *Boletines Climatológicos mensuales del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*. Estación: Guayaquil Aeropuerto. Fuente: (INAMHI, 2021)

Acorde a la organización independiente sobre climatología Climate Central (2018), la temperatura promedio global se encontraba 1.12 °C menor durante el período 1881-1910, pero debido al cambio climático causado por el aumento de los gases de efecto invernadero, la temperatura continuará elevándose. Ante esto, la ciudad de Guayaquil no se encontrará exenta de sufrir variaciones en su temperatura.

Debido a esto, durante los últimos años el INAMHI ha elaborado distintos boletines de alerta, en los que informa acerca de estas amenazas meteorológicas que principalmente están acompañadas de altos y extremadamente altos índices de radiación ultravioleta.

2.1.2 Caracterización ambiental de la zona de estudio

La ciudad de Guayaquil resalta en el Ecuador territorial debido a su privilegiada zona costera, la cual se sitúa sobre el Golfo de Guayaquil brindándole idoneidad para desempeñarse como puerto principal del país. Aledaños a esta se localizan dos cuerpos de agua importantes, como lo son: la Ría Guayas y el Estero Salado.

La Ría Guayas tiene como origen dos afluentes que son: el Río Daule y el Río Babahoyo, este desemboca en el Océano Pacífico. Por su parte, el Estero Salado según Cheme (2020) se trata de un cuantioso brazo de mar

que posee una trayectoria mayor a 50 km, entre sus ramificaciones se suscitan constantes flujos y reflujos de las mareas oceánicas, lo que favorece la presencia de amplia diversidad de flora y fauna en las riberas del manglar.

En el Estero Salado, encontramos valores altos y bajos de salinidad; ya que esto depende de la intrusión del agua marina durante los períodos del flujos y reflujo de la marea y de agua dulce producto de las escorrentías generadas durante la época de lluvias, los valores de salinidad estadísticamente son altos, este parámetro no se encuentra normado dentro de la Legislación ecuatoriana. (Alvarado Alvarado et al., 2017, p. 690)

Acorde a lo previamente mencionado, el poseer una elevada concentración de salinidad en el ambiente, afecta notablemente a la industria constructiva de la ciudad de Guayaquil. Esto debido a que la salinidad contribuye al proceso de corrosión en elementos de hormigón o acero. En el caso de los elementos de hormigón, esta problemática suele estar asociada a la presencia de fisuras. Martínez (2020) plantea que cuando estas sobrepasan los 0.3mm se convierten en una ventana que permite el ingreso de agentes corrosivos.

2.1.3 Afectaciones en las propiedades del hormigón debido a la influencia del clima tropical

Los compuestos empleados para la elaboración del hormigón le proporcionan a este características físicas y químicas, las cuales pudiesen presentar notables variaciones debido a la influencia de un factor relevante como lo es el clima. Estas afectaciones pudiesen manifestarse tanto en el momento de la preparación de la mezcla, en el transcurso del vertido o a lo largo de su desempeño.

En el caso de los climas tropicales, es importante considerar que se pueden suscitar de manera simultánea distintas condiciones ambientales que perjudiquen las propiedades del hormigón, como lo son: elevados índices de radiación solar, altas velocidades del viento, grandes variaciones en la temperatura ambiente y la humedad relativa que posea el aire. Por lo

cual, es imprescindible no minimizar la incidencia negativa que estos pudiesen causar.

Generalmente, los ensayos de laboratorio que se realizan al hormigón suelen llevarse a cabo a una temperatura controlada y constante. La temperatura normalizada establecida va desde 18 °C hasta 21°C. Por lo tanto, gran parte de la información que se posee acerca de las propiedades del hormigón fresco y endurecido se basa en el comportamiento que tiene este a esas temperaturas. Pero, debido a que la construcción moderna se ejecuta en lugares con climas muy cálidos o muy fríos, el rango de temperatura se ha ampliado considerablemente (Neville, 2011).

Ante los criterios previamente mencionados, es importante tomar en consideración la implementación de medidas de prevención en aquellos casos donde se presentasen temperaturas extremas. Estas deberían ser empleadas durante todas las etapas como lo son: elaboración de la dosificación, preparación de la mezcla, transporte, vaciado, curado e incluso durante el almacenamiento de los elementos a emplearse. Todo esto con la finalidad de evitar que se vea comprometido el rendimiento del hormigón.

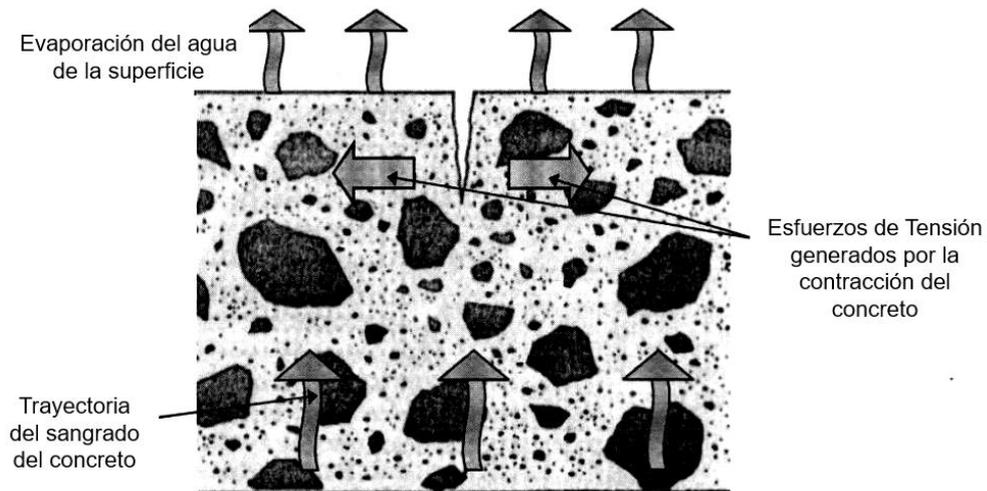
En el caso específico de altas temperaturas, los problemas que se pueden suscitar están relacionados con un aumento en la velocidad de hidratación del cemento y con el incremento de la tasa de evaporación de la humedad del hormigón recién mezclado. El aumento de la velocidad de hidratación se relaciona directamente con la temperatura ambiente y altas velocidades de viento, pero también intervienen la composición y finura del cemento, los aditivos a emplear y los materiales cementantes seleccionados. La combinación de estos, conllevarían a su vez a una elevada probabilidad de que el elemento presente agrietamiento por contracción plástica.

El agrietamiento por contracción plástica se presenta en la superficie del hormigón fresco. Este acontecimiento surge cuando el agua presente en la superficie se evapora con una mayor velocidad que con la que se presenta el agua de sangrado del hormigón. Como consecuencia, se produce una contracción debido al rápido secado que ha tenido el elemento

y esta desarrolla esfuerzos de tensión. Como resultado se manifiestan este tipo de fisuras o grietas. Este proceso se puede visualizar en la figura 1.

Figura 1

Esquema del proceso de evaporación en el concreto.



Adaptado de: (Alvarado Funes et al., 2009, p. 101)

La normativa ACI 305R es la guía establecida para identificar problemas asociados al hormigonado en climas tropicales y a su vez describe las prácticas que se pueden llevar a cabo ante estos posibles efectos adversos. Los procedimientos a llevar a cabo dependerán del tipo de construcción, las características de los materiales empleados y la experiencia que posea la industria local.

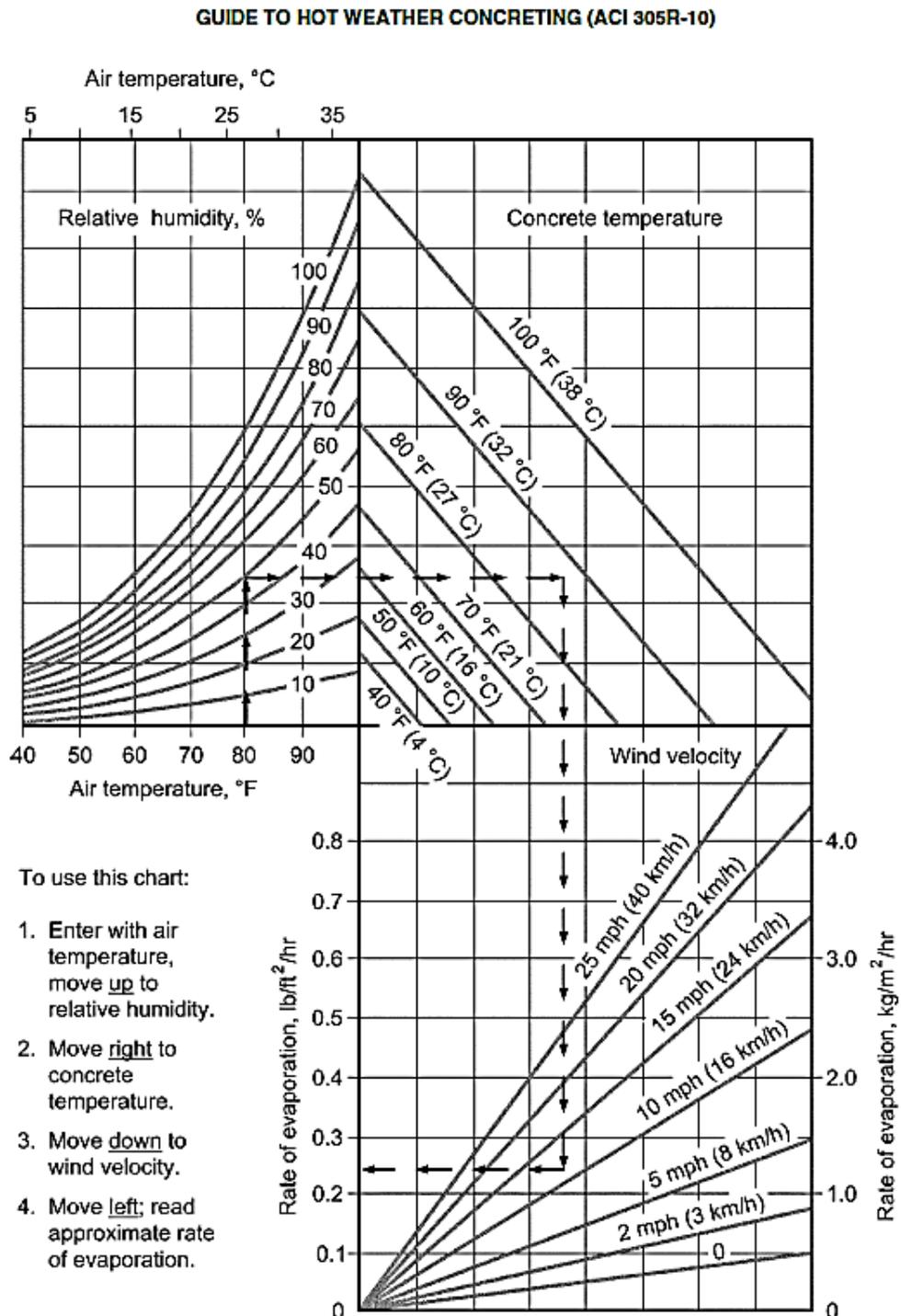
La norma cuenta con una metodología para estimar la pérdida de agua sobre la superficie del hormigón, la cual se basa en métodos hidrológicos habituales para estimar la tasa de evaporación del agua de lagos y embalses. El nomograma empleado para este proceso se presenta en la figura 2, el cual es eficiente para conocer el potencial de evaporación por condiciones ambientales y no como estimador de la tasa real de pérdida de agua del hormigón.

De acuerdo a ACI 305R-10 (2010) es fundamental que se controle la velocidad del viento a 20 pulg. (0.5 m) por encima de la superficie de evaporación, debido a que la velocidad del viento aumenta proporcionalmente con la altura sobre la superficie y varía con el tiempo. En

el caso de que las lecturas sean realizadas desde una altura superior, lo que se obtendrá será una sobrestimación de la tasa de evaporación.

Figura 2

Efecto sobre la velocidad con que se da el proceso de evaporación de la humedad superficial del hormigón.



Nota. El presente nomograma proporciona un método gráfico de estimación de la pérdida de humedad superficial para diversas condiciones meteorológicas. Fuente: (ACI Committee 305, 2010, p. 5)

Así mismo, ACI 305R-10 (2010) recomienda tomar precauciones contra el agrietamiento por contracción plástica una vez que la tasa de evaporación se aproxime a $1\text{kg/m}^2/\text{h}$. Sin embargo, existe la probabilidad de que se produzcan agrietamientos cuando la tasa de evaporación exceda los $0.5\text{kg/m}^2/\text{h}$. Esto se podría asociar con el retraso en el tiempo de fraguado del hormigón.

2.1.4 Repercusión de la temperatura sobre el hormigón en estado fresco

Debido a que las condiciones en obra no pueden ser controladas mientras se lleve a cabo el proceso de preparación o vaciado, el hormigón en estado fresco puede verse sometido a una temperatura ambiente elevada, lo cual repercute en sus propiedades y ocasiona que se presenten problemas como se muestra a continuación:

- Acelera el tiempo de fraguado, disminuyendo la trabajabilidad del hormigón.
- Requerimiento de mayor cantidad de agua.
- Aumento de la temperatura del hormigón fresco.
- El proceso de hidratación ocurre más rápido.
- Mayor probabilidad de que el elemento presente agrietamiento por contracción.
- Dificultad para controlar el contenido de aire.

Es común en nuestro medio que las plantas de hormigón premezclado se encuentren distantes a la ubicación donde se desarrolla el proyecto, además de que el tráfico pesado representa una gran problemática que dificulta y ralentiza el transporte. Ante esto, se encuentra arraigada la tendencia de agregar agua a la mezcla para evitar que se desarrolle el fraguado inicial, pero esto trae como consecuencia que ocurra pérdida en el revenimiento y disminuya la calidad del hormigón.

2.1.5 Repercusión de la temperatura sobre el hormigón en estado endurecido

Al encontrarse el hormigón sometido a una temperatura ambiental alta durante el contacto inicial entre el cemento y el agua reduce la duración del

período de latencia, lo que causa que la estructura general de la pasta de cemento hidratada se establezca muy pronto. Aunque esta acción favorezca al incremento de resistencia a temprana edad, puede afectarla negativamente a partir de los 7 días.

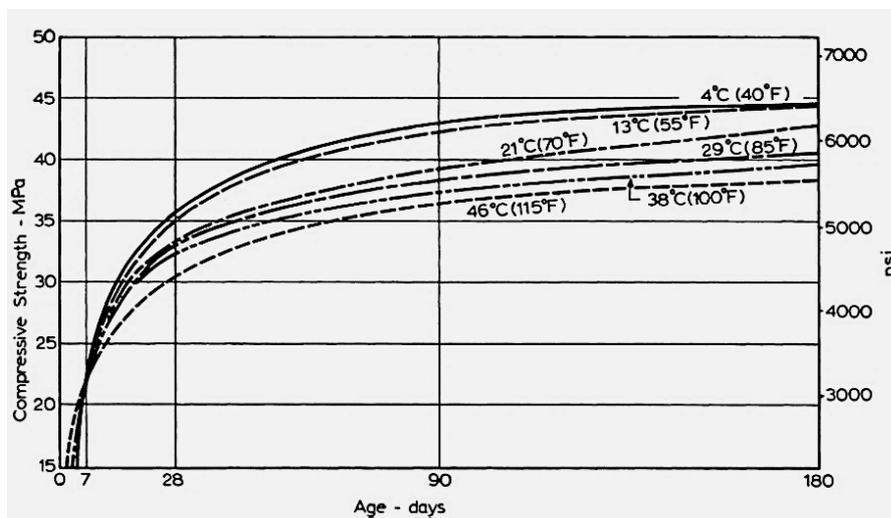
Según Neville (2011) al suscitarse una hidratación inicial rápida aparentemente forma productos con un estructura física más pobre, la cual probablemente sea más porosa, de tal forma que una proporción de estos siempre permanecerá sin rellenar. Esto afectaría a la resistencia que posea el elemento.

Verbeck y Helmuth (citado por Neville, 2011) sugirieron que la rápida tasa de hidratación inicial a temperaturas más altas retrasa la hidratación posterior y produce una distribución no uniforme de los productos de hidratación dentro de la pasta. La razón de esto es que, a una alta tasa inicial de hidratación no hay tiempo suficiente para la difusión de los productos de hidratación fuera de la partícula de cemento y para una precipitación uniforme en el espacio intersticial. Como resultado se crea una alta concentración de los productos de hidratación, lo que retrasa la hidratación posterior y afecta negativamente la resistencia a largo plazo.

Acorde a lo antes mencionado, se presenta en la figura 3 una gráfica sobre el efecto que tiene la temperatura en el desarrollo de la resistencia del hormigón. Se puede visualizar que aquellos que presentaron mayores resistencias los primeros días al encontrarse sometidos a elevadas temperaturas, a largo plazo obtuvieron una menor resistencia.

Figura 3

Afectación en el desarrollo de la resistencia debido a la temperatura.



Nota. Todas las muestras fueron sometidas a un rango de temperatura de 4 a 46°C durante 2 horas, luego fueron selladas y curadas a una temperatura de 21°C. Adaptado de:(Neville, 2011, p. 1189)

2.1.6 Temperatura en el hormigón

En climas cálidos, la normativa ACI 305R considera que no es práctico recomendar una temperatura máxima del hormigón, puesto que esta puede servir para ciertos casos y ser irreal para otros. Sin embargo, aconseja que la temperatura del hormigón es favorable cuando se encuentra entre los 24°C y 38°C. Al seleccionar el límite de temperatura a emplear, se debe considerar la zona en que se ejecutará el proyecto. A su vez, las muestras a ensayar deberán encontrarse a la misma temperatura establecida.

En el caso particular de Ecuador, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-HM, 2015) considera que el control de temperatura de colocación del hormigón fresco premezclado debe cumplir con lo especificado en la norma NTE INEN 1855-1, mientras que para el hormigón elaborado en obra se debe emplear la norma NTE INEN 1855-2. No obstante, estas sugieren recurrir a la normativa ACI 305R para los casos en los cuales la temperatura del hormigón se aproxime a los 32°C.

2.2 Materiales del hormigón

Vieira (2015) define al hormigón como un material compuesto de una matriz a base de cemento, la cual se produce al mezclar agua, un aglutinante y partículas de áridos. El aglutinante suele conformarse por cemento y adiciones. Los agregados son material granular, concretamente arena y partículas de roca triturada o redondeada. Normalmente, se le adicionan otros componentes en menor cantidad conocidos como aditivos, con el objetivo de mejorar algunas características del hormigón. En la figura 4 se presenta un esquema con los principales constituyentes del hormigón.

Figura 4

Composición del hormigón.



Adaptado de: (Kosmatka et al., 2004, pp. 1, 25, 77, 103, 135)

Cada uno de los elementos empleados en la composición del hormigón aportarán en el desempeño y durabilidad que poseerá este, por lo cual es fundamental realizar el debido control de calidad estos. En Ecuador, la norma INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) es la encargada de proporcionar las especificaciones y requerimientos de calidad que deben cumplir los materiales a emplearse.

2.3 Agua

El agua es un elemento sustancial para la elaboración de hormigón, puesto que puede ser empleada tanto para combinarse con el cemento y

producir la pasta aglutinante como también para llevar a cabo el proceso de curado de los elementos de hormigón.

Al momento de escoger el agua de amasado, se deben respetar los parámetros establecidos para controlar su calidad, puesto que esta podría contener sustancias o materiales orgánicos que resulten perjudiciales para el hormigón y el acero de refuerzo. Esta puede ser agua potable o cualquier tipo de agua natural que no contenga sabor u olor marcado (NEC-SE-HM, 2015).

En el caso del agua potable, la norma que presenta los requisitos a cumplir es la denominada NTE INEN 1108. Los parámetros que esta analiza para su uso constructivo son los físicos, inorgánicos, orgánicos y microbiológicos que se encuentran detallados en las tablas 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 2

Requisitos físicos e inorgánicos para la aceptación del agua potable.

Parámetro	Unidad	Límite máximo permitido
Características físicas		
Color	Unidades de color aparente (Pt-Co)	15
Turbiedad	NTU	5
Olor	-	no objetable
Sabor	-	no objetable
Características inorgánicas		
Antimonio, 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
Níquel, Ni	mg/l	0.07
Nitratos, NO ₃	mg/l	50
Nitritos, NO ₂	mg/l	0.2
Plomo, Pb	mg/l	0.01
Radiación total (Po,Ra,Th, U, Pu)	Bq/l	0.1
Radiación total (Co, Sr, I, Cs, Pb)	Bq/l	1.00
Selenio, Se	mg/l	0.01

Nota. En la tabla se muestran los rangos permitidos para cada uno de los parámetros. Fuente:(NTE INEN, 2011a, p. 2)

Tabla 3

Requisitos de sustancias orgánicas para la aceptación del agua potable.

Parámetro	Unidad	Límite máximo permitido
Sustancias orgánicas		
Hidrocarburos policíclicos aromáticos HAP	mg/l	0.0007
Benzo (a) pireno		
Hidrocarburos:		
Benceno	mg/l	0.01
Tolueno	mg/l	0.7
Xileno	mg/l	0.5
Estireno	mg/l	0.02
1,2 dicloroetano	mg/l	0.03
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
Epiclorohidrina	mg/l	0.0004
Hexaclorobutadieno	mg/l	0.0006
1,2 Dibromoetano	mg/l	0.004
1,4-Dioxano	mg/l	0.05
Ácido Nitrilotriacético	mg/l	0.2

Nota. En la tabla se muestran los rangos permitidos para cada uno de los parámetros. Fuente:(NTE INEN, 2011a, p. 2)

Tabla 4

Requisitos microbiológicos para la aceptación del agua potable.

Parámetros	Límite máximo permitido
Coliformes fecales:	
Tubos múltiples NMP/100 ml	< 1.1
Filtración por membrana UFC/100 ml	< 1
Cryptosporidium, número de ooquistes/100 litros	Ausencia
Giardia, número de quistes/100 litros	Ausencia

Nota. En la tabla se muestran los rangos permitidos para cada uno de los parámetros. Fuente:(NTE INEN, 2011a, p. 2)

En caso de que no se disponga de agua potable, NTE INEN 1855-1 (2016) y- NTE INEN 1855-2 (2015) sugieren que el agua a emplear en la mezcla debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Tanto para hormigón premezclado como preparado en obra, el agua a emplear no debe poseer color y debe encontrarse limpia. No debe poseer agentes nocivos como: aceites, ácidos, sales, materiales orgánicos y otras sustancias. En el caso de que llegase a contener sustancias en cantidades que la manchen o que le produzcan

olores/sabores inusuales y cuya calidad sea cuestionable, se deben emplear los criterios de aceptación proporcionados en la tabla 5 donde se mencionan los ensayos, límites y métodos a usar.

- Para emplear en el hormigón premezclado agua que provenga de operaciones de lavado u otros procesos de elaboración, esta debe cumplir con los criterios de aceptación de la tabla 5, pero se le deberán realizar controles trimestrales en caso de que se sospeche de la existencia de cambios en sus características. Así mismo, se deberá comprobar que cumple con los criterios presentados por la tabla 6, donde se establecen los límites químicos que pueden ser requeridos por el usuario.
- En el caso del hormigón preparado en obra se debe analizar la concentración de sulfatos solubles (SO₄), en la tabla 7 se encuentran los límites para establecer el grado de exposición.

Tabla 5

Criterio de aceptación de aguas dudosas.

Ensayos	Límites	Método de ensayo
Hormigón Premezclado ^a		
Resistencia a la compresión % mínimo de control a 7 días	90	NTE INEN 1573 NTE INEN 1576
Tiempo de fraguado, desviación del testigo h:min	Desde 1:00 antes hasta 1:30 después	ASTM C403
Hormigón Preparado en Obra ^b		
Resistencia a la compresión % mínimo de control a 7 días	90	NTE INEN 488
Tiempo de fraguado, desviación del testigo h:min	Desde 1:00 antes hasta 1:30 después	NTE INEN 158

Fuente: ^a NTE INEN 1855-1 (2016, p. 5). ^b NTE INEN 1855-2 (2015, p. 5).

Tabla 6

Límites químicos opcionales para agua de lavado.

Requisitos químicos, concentración máxima en el agua de mezclado, ppm	Límites	Método de ensayo
Cloruro de Cl, ppm		
Hormigón pretensado o en losas de puentes	500	NTE INEN 160
Otros hormigones armados en ambientes húmedos o contenido embebido aluminio u otros metales disímiles, o construidos con encofrados metálicos galvanizados perdidos.	1000	NTE INEN 160
Sulfato como SO ₄ , ppm	3000	NTE INEN 160
Álcalis como Na ₂ O + 0.658 K ₂ O, ppm	600	NTE INEN 160
Sólidos totales, ppm	50000	ASTM C1603

Nota. ppm=partes por millón. Fuente:(NTE INEN, 2016, p. 6)

Tabla 7

Hormigón expuesto a la acción de sulfatos.

Grado de Exposición	Sulfato Soluble en agua (SO ₄) en el suelo, %	Sulfato (SO ₄) en el agua ppm	Tipo de cemento Pórtland o compuesto ASTM	Relación agua-cemento máxima
Leve	0.00-0.1	0-150	---	---
Moderado	0.10-0.20	150-1500	Tipo II IP (MS) IS (MS) Tipo I + puzolana	0.5
Severo	0.02-2.00	1500-10000	Tipo V Tipo II + escoria (>60%) Tipo II + puzolana	0.45
Muy Severo	Sobre 2.00	Sobre 10000	Tipo V + puzolana Tipo V + escoria (>60%)	0.45

Nota. La tabla presenta el tipo de cemento y relación agua-cemento recomendada. Fuente:(NTE INEN, 2015, pp. 5-6)

2.4 Cemento

El cemento representa entre el 10% y el 15% del volumen de la mezcla de hormigón, puede ser descrito como un material con propiedades adhesivas y cohesivas. Mediante el proceso llamado hidratación, el cemento y el agua forman una pasta que sirve de aglutinante para los fragmentos minerales en un conjunto compacto.

En la rama constructiva el término “cemento” es empleado para referirse a los materiales de unión utilizados con piedras, arenas, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son la cal, por lo que en construcción es conocido como cemento calcáreo. Por otra parte, cuando es requerido fabricar hormigón con propiedad de fraguar y de endurecerse bajo el agua debido a reacciones químicas, este es denominado como cemento hidráulico.

En Ecuador, para la evaluación y aceptación del cemento, se deben cumplir las especificaciones técnicas y requisitos físicos-químicos presentados en la norma NTE INEN. Estas están establecidas acorde al tipo de cemento requerido. En la tabla 8 se presenta la norma respectiva al tipo de cemento y la norma empleada como referencia.

Tabla 8

Norma a emplear de acuerdo al tipo de cemento.

Título de la Norma	Norma Nacional	Norma Referente
Cemento Portland. Requisitos.	NTE INEN 152	ASTM C 150
Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos.	NTE INEN 490	ASTM C 595
Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para Cementos Hidráulicos.	NTE INEN 2380	ASTM C 1157

Nota. La tabla presenta el tipo de cemento y relación agua-cemento recomendada. Fuente:(NEC-SE-HM, 2015, p. 96)

2.5 Cemento Portland

Históricamente el desarrollo del cemento portland es atribuido a Joseph Aspdin, un albañil inglés que en 1824 obtuvo la patente para este producto. Recibió el nombre de cemento portland debido a la similitud de color entre el hormigón elaborado con este material y la caliza natural que era explotada de la isla de Portland. Sin embargo, en 1845 I. C. Johnson de White and Sons quemó el cemento crudo a una temperatura extremadamente alta y llegó al punto de vitrificarlo, así surgió un cemento portland como ahora lo conocemos (Kosmatka et al., 2004).

Para la elaboración del cemento portland se deben emplear las cantidades apropiadas de compuesto, este puede ser de: calcio, sílice, alúmina y hierro. La materia prima seleccionada se deberá extraer de la zona de explotación, para luego ser transportada a la triturada primaria. Como siguiente paso se la muele y mezcla con otros ingredientes previamente establecidos en la dosificación, para así obtener la composición requerida, que puede ser presentada de manera seca o húmeda.

Para el caso del material seco, luego de ser dosificado este es transportado a través de la torre del precalentador hasta llegar al horno rotatorio. Cuando la mezcla cruda atraviesa este, lo hace a una tasa controlada por la velocidad de rotación y la inclinación que posee el horno. Dentro de este, la temperatura llega aproximadamente a los 1400 °C, y se producen cambios químicos que convierten al material crudo en clinker.

Una vez se encuentra frío el clinker, se lo pulveriza y le es agregada una pequeña cantidad de yeso. Se incorpora yeso con la finalidad de regular el tiempo de fraguado. Como resultado final de todo este proceso, se obtiene un polvo extremadamente fino de color grisáceo que es el Cemento Portland.

De acuerdo a la norma NTE INEN 152-5 (2012), el alcance de esta aplica para 10 tipos de cemento portland, los cuales se detallan a continuación:

- **Tipo I:** Puede ser utilizado mientras no se requieren propiedades especiales, es decir que es de uso general. Apropiado para ambientes no agresivos.
- **Tipo IA:** Posee características similares al Tipo I, pero a este se le incorpora aire.
- **Tipo II:** Requerido cuando es necesaria una moderada resistencia a los sulfatos, aunque también se puede emplear en estructuras que no tengan exposición a ambientes agresivos. Un ejemplo de ambiente agresivo es la exposición al agua de mar.
- **Tipo IIA:** A este cemento se le pueden dar los mismos usos que el de Tipo II, con la diferencia de que este cuenta con incorporador de aire.

- **Tipo II (MH):** Cemento de uso general, que puede ser empleado si es requerido disminuir el calor de hidratación y proporcionar resistencia aceptable a los sulfatos.
- **Tipo II (MH) A:** Posee características similares al Tipo II (MH), pero a este se le incorpora aire.
- **Tipo III:** Cemento empleado cuando se requiere un incremento de resistencia inicial o a edades tempranas. Es empleada comúnmente en estructuras que serán puestas en servicio rápidamente.
- **Tipo IIIA:** Posee características similares al Tipo III, pero cuenta con aire incorporado.
- **Tipo IV:** Cemento empleado si se requiere un bajo calor de hidratación, pero el desarrollo de su resistencia ocurre a una tasa más lenta. Por lo general se emplea en estructuras de hormigón masivo como por ejemplo las presas de agua.
- **Tipo V:** Cemento empleado cuando se requiere alta resistencia a la acción de los sulfatos. Este requerimiento puede suscitarse porque la estructura se encuentra sobre un suelo con alta concentración de sulfatos o expuesta al agua de mar. Para el correcto desempeño de este tipo de cemento es fundamental una relación agua/cemento baja.

De manera general, son 4 compuestos principales los que constituyen el cemento, los cuales se presentan en la tabla 9 con el respectivo nombre del compuesto, su composición y abreviatura.

Tabla 9

Componentes principales del Cemento Portland.

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviación
Silicato Tricálcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferroaluminato Tetracálcico	4CaO Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	C ₄ AF

Fuente:(Neville, 2011, p. 79)

En cuanto a los requisitos químicos establecidos por la norma NTE INEN 152-5 (2012) se dispone que el cemento portland de cada uno de los

10 tipos previamente mencionados, deberá cumplir con los requisitos de composición establecidos en la tabla 10.

Tabla 10

Requisitos químicos de composición normalizada.

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	I y IA	II y IIA	II(MH) y II(MH)A	III y IIIA	IV	V
Óxido de aluminio (Al_2O_3), % máximo	INEN 160	---	6.0	6.0	---	---	---
Óxido férrico (Fe_2O_3), % máximo	INEN 160	---	6.0	6.0	---	6.5	---
Óxido de magnesio (Fe_2O_3), % máximo	INEN 160	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Trióxido de azufre (SeO_3), % máximo							
Cuando (C_3A) es 8% o menor	INEN 160	3.0	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
Cuando (C_3A) es mayor del 8%		3.5			4.5		
Pérdida por calcinación, % máximo	INEN 160	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Residuo insoluble, % máximo	INEN 160	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Silicato tricálcico (C_3S), % máximo	Ver Anexo A	---	---	---	---	35	---
Silicato dicálcico (C_2S), % máximo	Ver Anexo A	---	---	---	---	40	---
Aluminato tricálcico (C_3A), % máximo	Ver Anexo A	---	8	8	15	7	5
Suma de $C_3S + 4.75C_3A$, % máximo	Ver Anexo A	---	---	100	---	---	---
Ferroaluminato tetracálcico más dos veces aluminato tricálcico ($C_4AF + 2(C_3A)$), o solución sólida ($C_4AF + C_2A$), cuando sea aplicable, % máximo	Ver Anexo A	---	---	---	---	---	25

Fuente:(NTE INEN, 2012, p. 3)

Por otra parte, en la tabla 11 se indican los requisitos químicos opcionales que son aplicados solo cuando son particularmente requeridos.

Tabla 11

Requisitos químicos de composición opcionales.

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 sulfatos
Álcalis equivalentes ($Na_2O + 0.658K_2O$), % máximo	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	Cemento con bajo contenido de álcalis

Fuente:(NTE INEN, 2012, p. 3)

Así mismo, los 10 tipos de cemento portland deben cumplir con los requisitos físicos normalizados establecidos en la tabla 12, mientras que en la tabla 13 se indican los requisitos físicos opcionales que son aplicados solo cuando son particularmente solicitados.

Tabla 12

Requisitos físicos normalizados.

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):										
Ensayo 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										
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										
Tiempo de fraguado, minutos; no mayor										
	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375

Fuente:(NTE INEN, 2012, p. 4)

Tabla 13

Requisitos físicos opcionales.

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	290	--	--	250	--
			70	70			60	
28 días, máximo kJ/kg (cal/g)								
	--	--	--	--	--	--	290	--
							70	
Resistencia no menor que los valores mostrados:								
Resistencia a compresión, MPa								
28 días								
	28	22	28	22	--	--	--	--
			22	18				
Resistencia a los sulfatos, Máximo % de expansión, 14 días								
	--	--	--	--	--	--	--	0.04
Ensayo de Gilmore:								
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

Fuente:(NTE INEN, 2012, p. 4)

De manera complementaria, en cuanto al almacenamiento, la normativa establece que el cemento debe ser conservado de tal manera que se pueda acceder con facilidad a este al momento de realizar la debida

inspección e identificación, de preferencia en una edificación hermética que lo proteja de la humedad y minimice el fraguado en almacenamiento.

2.6 Cemento Hidráulico Compuesto

La química general de los cementos hidráulicos compuestos es similar a la de los cementos portland. Estos contienen cemento portland mezclado con materiales tales como cementos de escoria, cenizas volantes, humo de sílice, piedra caliza puzolanas naturales crudas o calcinadas, o combinaciones de dos de ellas, si se trata de una mezcla ternaria (ACI Committee 225, 2016).

En caso de emplear cemento compuesto, es recomendable realizar ensayos para constatar que la combinación seleccionada sea compatible, para que evitar que se produzcan efectos contraproducentes en el desempeño, durabilidad y resistencia del hormigón a elaborar.

En Ecuador, este tipo de cemento se encuentra normalizado por la NTE INEN 490 (2011c) la cual indica la siguiente clasificación:

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

La norma emplea una nomenclatura para referirse a los cementos compuestos, en esta se debe colocar el sufijo (X) acorde a la clasificación previamente indicada, donde (X) representa el porcentaje utilizado de escoria o puzolana en el producto. Este se debe expresar como un número entero en masa del producto compuesto final.

Para el caso de los cementos compuestos ternarios, la nomenclatura a seguir considera los sufijos (AX) y (BY) que se coloca acorde a la designación del Tipo IP de cemento, que consiste en lo siguiente:

- **A:** Para el cemento de escoria se emplea "S", mientras que el de puzolana se representa con "P". Esto va acorde al que se encuentre presente en mayor cantidad en la masa.
- **X:** Este representa el porcentaje empleado del constituyente A.

- **B:** En este “S” representa el cemento de escoria, por su parte “P” representa a la puzolana.
- **Y:** Representa el porcentaje empleado del constituyente B.

Se presentan con números enteros a “X” y “Y” acorde a la masa del producto compuesto final, si estos fueran iguales, entonces se debe colocar en primer lugar el que posea mayor contenido de puzolana. A continuación, se muestran ejemplos de nomenclatura proporcionados por NTE INEN 490:

- **Cemento compuesto binario:** Se encuentra compuesto por 80% de cemento portland y 20% de cemento de escoria.
- **Cemento compuesto binario:** Compuesto por 85% de cemento portland y 15% de puzolana.
- **Cemento compuesto ternario:** Compuesto por 70% de cemento portland, 20% de cemento de escoria y 10% de puzolana.
- **Cemento compuesto ternario:** Compuesto por 65% de cemento portland, 25% de puzolana y 10% de otra puzolana.
- **Cemento compuesto ternario:** Compuesto por 60% de cemento portland, 20% de cemento de escoria y 20% de puzolana.

La norma emplea una nomenclatura sencilla para el caso de cementos compuestos binarios y ternarios, los cuales son aplicados a un rango establecido de productos o en cementos de composición ternaria, solo si uno de sus constituyentes se encuentra dentro de un rango específico. A continuación, se muestran ejemplos de nomenclatura simplificada:

- En el caso de que se pueda aplicar al rango de productos se puede tomar como ejemplo: el SO_3 este se presenta con un contenido máximo del 3% en la tabla 14 y, se representa de la siguiente forma: en cementos compuestos binarios con contenidos de cemento de escoria $<70\%$ indicado como IS(<70); en cementos compuestos ternarios que cuentan con un contenido de puzolana menor que el contenido de escoria, donde el contenido del cemento de escoria es menor al 70%, se indica como IT(P $<$ S $<$ 70).

- Otro caso que pudiese ocurrir es que los requisitos se puedan aplicar solamente a uno de los constituyentes dentro de un rango específico. Como ejemplo: cuando el contenido de cemento de escoria es <25% se debe basar únicamente en el contenido del compuesto mencionado, sin considerar el contenido de puzolana, por lo cual al emplear la nomenclatura simplificada se indicaría como Tipo IT(S<25).

Tabla 14

Requisitos químicos aplicables a cementos hidráulicos compuestos.

Tipo de cemento	IS (<70), IT(P<S<70)	IS (≥70), IT(S≥70)	IP, IT(P≥S)
Óxido de magnesio (MgO), % máximo	--	--	6
Sulfato, reportado como (SO ₃), % máximo	4	4	4
Sulfuro, reportado como S ²⁻ , % máximo	2	2	--
Residuo insoluble, % máximo	1	1	--
Pérdida por calcinación, % máximo	3	4	5

Fuente:(NTE INEN, 2011c, p. 5)

Por otra parte, los requerimientos físicos con los que deben cumplir los cementos hidráulicos compuestos se presentan en la tabla 15.

Tabla 15

Requisitos físicos aplicables a cementos hidráulicos compuestos.

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) (MS), IT(P<S<70)(MS), IP (HS), IT (P≥S) (HS)	IS (≥70), IT(S≥0)	IP (LH), IT(P≥S) (LH)
Finura	Se debe informar la cantidad retenida al tamizar en húmedo en el tamiz de 45 µm (No. 325) y la superficie específica medida con el aparato de permeabilidad al aire, m ² /kg.				
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 peso 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	--	--

Fuente:(NTE INEN, 2011c, p. 6)

La norma también sugiere que, en el caso de la puzolana, la escoria granulada de altos hornos o el cemento de escoria que será añadido al cemento, esta debe ser ensayada en el mismo estado de finura que aquel en el cual va a ser mezclado. La puzolana debe cumplir con los requisitos de finura y del índice de actividad presentado en la tabla 16, al igual que el cemento de escoria que va a ser utilizado para cementos portland de escoria de altos hornos Tipo IS(<25) o cementos compuestos ternario Tipo IT(S<25).

Tabla 16

Requisitos para puzolana para uso en cementos compuestos y para escoria para uso en cementos portland con escoria de altos hornos Tipo IS(<25) y cementos compuestos ternarios Tipo IT(<25).

Puzolana y Escoria, según sea aplicable	IS (<25), IT(S<25)
Finura	
Cantidad retenida en el tamiz de 45 μm (No. 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

Fuente:(NTE INEN, 2011c, p. 7)

Tabla 17

Requisitos de la granulometría que deben poseer los áridos para realizar el ensayo de expansión de morteros.

Pasa	Retiene en	Masa %
4.75 - mm (No. 4)	2.36 - mm (No.8)	10
2.36 - mm (No. 8)	1.18 - mm (No.16)	25
1.18 - mm (No. 16)	600 - μm (No.30)	25
600 - μm (No.30)	300 - μm (No.50)	25
300 - μm (No.50)	150 - μm (No.100)	15

Fuente:(NTE INEN, 2011c, p. 8)

2.7 Cemento Hidráulico por Desempeño

Este tipo de cemento surgió en los años 90, cuando se crearon las especificaciones ASTM C 1157 para el desempeño de los cementos hidráulicos. Esta es empleada genéricamente para los cementos hidráulicos que cuentan con cemento portland, cemento portland modificado y cemento hidráulico mezclado. El cumplir con esta normativa asegura que el cemento cuenta con un correcto desempeño físico (Kosmatka et al., 2004).

Localmente, la norma encargada de establecer los requisitos de desempeño para los cementos hidráulicos para aplicaciones generales y especiales es la NTE INEN 2380.

Se define como cemento hidráulico al cemento que fragua y endurece por reacción química con agua y es capaz de hacerlo aún bajo el agua. Así mismo, la NTE INEN 2380 establece los requisitos de desempeño que deben cumplir los cementos hidráulicos y clasifica a los cementos de acuerdo a sus propiedades específicas sin considerar restricciones sobre su composición o la de sus constituyentes. (Holcim Ecuador S.A, 2015, p. 6)

Acorde a la norma NTE INEN 2380 (2011b), la clasificación de este tipo de cemento es la siguiente:

- **Tipo GU:** Empleado para construcción en general, cuando no se requieren uno o más de los tipos especiales.
- **Tipo HE:** Proporcionan alta resistencia inicial.
- **Tipo MS:** Posee moderada resistencia a los sulfatos.
- **Tipo HS:** Posee alta resistencia a los sulfatos.
- **Tipo MH:** Proporciona moderado calor de hidratación.
- **Tipos LH:** Brinda calor de hidratación.

Como complemento, la norma presenta la opción del cemento tipo R, el cual aplica para cualquiera de los tipos principales previamente mencionados y que cuenta con baja reactividad con áridos reactivos alcali-sílice. La simbología a emplear cuando es requerida esta opción, es la de colocar la letra de designación luego del título del tipo principal, por ejemplo:

Tipo MS(R). Este tipo de cemento debe ser ensayado y cumplir con los requisitos establecidos por la tabla 18.

Por otra parte, la norma no presenta especificaciones de la composición química para este cemento, pero si propiedades físicas opcionales que se encuentran detalladas en la tabla 19.

Tabla 18

Requisitos físicos normalizados.

Tipo de cemento	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Finura	El porcentaje retenido en el tamiz de 45 µm (No. 325) por vía húmeda y el área de la superficie específica medida con el aparato de permeabilidad al aire, m ² /kg.					
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat						
Inicial, no menos de, minutos	45	45	45	45	45	45
Inicial, no más de, minutos	420	420	420	420	420	420
Contenido de aire en el mortero, volumen % máximo	Informar el contenido de aire al fabricante.					
Resistencia a la compresión, mínimo, MPa:						
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, máximo (cal/g)	--	--	--	--	290	250
28 días, kJ/kg, máximo (cal/g)	--	--	--	--	70	60
28 días, kJ/kg, máximo (cal/g)	--	--	--	--	--	290
28 días, kJ/kg, máximo (cal/g)	--	--	--	--	--	70
Expansión en barra de mortero						
14 días, % 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	--	--

Fuente:(NTE INEN, 2011b, p. 3)

Tabla 19

Requisitos físicos opcionales.

Tipo de cemento	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Opción R. Baja reactividad con áridos reactivos álcali-sílice. 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, penetración final, % mínimo	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la compresión						
28 días, Mpa, mínimo	--	--	28	--	22	--
Contracción por secado Se deben suministrar al comprador datos sobre la contracción por secado						

Fuente:(NTE INEN, 2011b, p. 3)

Los métodos de ensayo para verificar el cumplimiento con la norma son los siguientes:

- **Análisis Químico:** Se debe emplear la NTE INEN 160 para analizar los óxidos presentes en el cemento, tal que constituyan al menos el 98% de la masa total.
- **Finura:** Se debe emplear NTE INEN 196, por su parte para conocer la cantidad retenida en el tamiz de 45 µm (No. 325) mediante NTE INEN 957.
- **Expansión en autoclave:** Se utiliza NTE INEN 200, excepto para aquellos cementos que de manera anticipada se ha provisto que a 1 día de edad tendrán una resistencia menor a 3.4 Mpa.
- **Tiempo de Fraguado:** Se requiere la NTE INEN 158, esta solo proporciona el tiempo de fraguado inicial.
- **Contenido de Aire:** Emplear NTE INEN 195 y utilizar la densidad real del cemento que se calcula con NTE INEN 156.
- **Resistencia a la Compresión:** Emplear NTE INEN 488, los ensayos se deben realizar a las edades especificadas en la tabla 18.
- **Calor de Hidratación:** Para llevar a cabo este ensayo se debe utilizar la norma NTE INEN 199.
- **Resistencia a los Sulfatos:** Se debe implementar la norma NTE INEN 2503 para su ejecución.

2.8 Agregados

Debido a que los áridos ocupan al menos tres cuartas partes del volumen del hormigón, es de considerable importancia la calidad que proporcionan estos. Por lo que se considera que las propiedades de los áridos influyen en la durabilidad y el rendimiento estructural que tendrá el hormigón. En un principio se consideraba a los agregados como un material inerte, pero este ha demostrado poseer propiedades físicas, químicas y térmicas que repercuten en el desempeño del hormigón (Neville, 2011).

Los agregados principalmente se encuentran divididos en: finos y gruesos. Los agregados finos suelen ser llamados arena, el tamaño de sus partículas se encuentra entre 75µm y 4.75mm. Por su parte los agregados gruesos cuentan con un tamaño mínimo de 4.75mm. Estos pueden ser explotados directamente de roca natural o ser elaborados de manera artificial (NEC-SE-HM, 2015).

Los más representativos son los agregados naturales, que provienen de la mezcla entre rocas y minerales, estos han sido sometidos a tratamientos mecánicos para lograr triturarlos y molerlos. En el caso de las rocas, estas son clasificadas de acuerdo a su origen, pueden ser: ígneas, sedimentarias o metamórficas.

NEC-SE-HM (2015) recomienda que los áridos a emplear en el proyecto constructivo deben cumplir con las especificaciones establecidas en NTE INEN 872. Así mismo, que los agregados deben encontrarse limpios, sanos, poseer consistencia dura, granulometría uniforme. Evitar la presencia de agentes perjudiciales tales como: terrones de arcilla, carbón mineral y chert.

2.8.1 Requisitos y características para los agregados

La norma NTE INEN 872 (2011e) presenta las características a evaluar en los agregados finos y gruesos, estas son:

Análisis Granulométrico

Este proceso consiste en dividir la muestra de agregado en fracciones, cada una de estas posee partículas del mismo tamaño. Para este

procedimiento se emplean tamices de ensayo estándar, los cuales poseen aberturas cuadradas cuyas dimensiones están normalizadas.

La norma, proporciona los límites correspondientes para agregados finos y gruesos. Para el caso del agregado fino, los porcentajes se encuentran establecidos en la tabla 20, aquí se indica el porcentaje requerido para el pasante de cada tamiz.

Tabla 20

Límites granulométricos para el agregado fino.

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

Fuente:(NTE INEN, 2011e, p. 2)

En el caso de que el árido fino no cumpla con los requisitos de gradación, la norma indica que puede ser aceptado siempre que el proveedor demuestre que el árido fino en consideración, le brinda propiedades relevantes al menos similares a las que tuviese de ser elaborado con los ingredientes preestablecidos. La finalidad de estas sugerencias, es evitar que se presenten dificultades con la trabajabilidad, bombeo o exudación excesiva en el hormigón.

Por otra parte, el agregado grueso debe cumplir con los requisitos acorde al número de tamaño especificado, estos se pueden observar en la tabla 21. En caso de que el agregado grueso no cumpla con lo establecido con los requisitos de gradación, pueden ser empleados, pero deben ejecutarse pruebas previas de desempeño que demuestren resultados favorables.

Tabla 21

Requisitos de gradación para áridos gruesos.

Número de tamaño	Tamaño 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	37.5mm	25 mm	19 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	--	--	--	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--	--
357	de 50 a 4.75	--	--	--	100	95 a 100	--	35 a 70	--	10 a 30	--	0 a 5	--	--	--
4	de 37.5 a 19	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--
467	de 37.5 a 4.75	--	--	--	--	100	95 a 100	--	35 a 70	--	10 a 30	0 a 5	--	--	--
5	de 25 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 a 4.75	--	--	--	--	--	100	95 a 100	--	25 a 60	--	0 a 10	0 a 5	--	--
6	de 19 a 9.5	--	--	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	--	--	--
67	de 19 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

Fuente:(NTE INEN, 2011e, p. 5)

Se podría mencionar que el principal motivo de que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, es favorecer a que se elabore una correcta proporción de estos. Lo cual a su vez influiría en la demanda de agua y de cemento, la trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, durabilidad y contracción del hormigón. Es decir, que al no presentarse exceso de cualquier agregado y poseer una curva granulométrica suave, contribuiría a un desempeño satisfactorio del hormigón (Kosmatka et al., 2004).

Sustancias Perjudiciales en el Agregado

En los agregados se pueden encontrar sustancias perjudiciales, tales como: impurezas orgánicas, limos, arcillas, carbones minerales, ciertas calizas, yesos, esquistos, entre otros. Estos representan un peligro potencial, puesto que pueden ser químicamente reactivos con el hormigón de cemento portland, esto produce cambios significativos entre ellos: variación en el volumen de la pasta y agregados, interferencia en la hidratación normal del cemento y otros daños secundarios (Kosmatka et al., 2004).

Según Neville (2011) existen 3 categorías de sustancias perjudiciales que se pueden presentar en los agregados, los cuales se detallarán a continuación:

- **Impurezas orgánicas:** Los áridos naturales pueden ser fuertes y resistentes, pero su desempeño puede verse afectado en el caso de contener impurezas orgánicas, puesto que estas interfieren con las reacciones de hidratación. Esta materia orgánica suele estar compuesta por material vegetal en descomposición y se presenta en forma de marga orgánica. A pesar de que no toda la materia orgánica es perjudicial, es recomendable realizar los respectivos ensayos de resistencia para garantizar el adecuado rendimiento del hormigón.
- **Arcilla y otros materiales finos:** La arcilla puede presentarse en forma de recubrimiento superficial del agregado e interferir en la unión entre estos con la pasta de cemento. Esta unión es esencial para garantizar que la resistencia y durabilidad del hormigón sea satisfactoria. Por otra parte, los dos tipos de material fino que pueden estar presentes en el agregado son: el limo y el polvo de la trituradora,

los cuales si se encuentran en cantidades excesivas pudiesen aumentar el requerimiento de agua para la mezcla. Algunos pueden ser eliminados mediante lavado o durante el procesamiento del árido, mientras que otros logran mantener su adherencia al agregado.

- **Contaminación por sal:** La arena obtenida en la orilla del mar, de un estuario o de un río, contiene sal y debe ser procesada para su uso. El método más sencillo para su procesamiento es emplear agua dulce para lavar la arena, aunque se debe proceder con cautela, puesto que esta puede contener grandes cantidades de sal. El cloruro aumenta el peligro de corrosión, por lo cual en caso de que no se pueda evitar su presencia, es recomendable emplear como referencia los límites máximos de concentración aceptable para estos. Otras afectaciones que produce la elevada concentración de sal son: absorción de la humedad del aire, depósitos blancos en la superficie del hormigón y eflorescencias.

Límites establecidos por la norma NTE INEN 872

En la tabla 22 se pueden observar los límites establecidos por la norma para los agregados finos. Esta también indica que, si el agregado fino no cumple con el ensayo de impurezas orgánicas, se puede emplear solo si la resistencia del mortero relativa a los 7 días no es menor al 95%. En adición, la norma presenta flexibilidad siempre que la decoloración presente en el agregado fino, se deba principalmente por la presencia de pequeñas cantidades de carbón, lignito u otro tipo de partículas discretas similares.

Tabla 22

Límites para las sustancias perjudiciales en el agregado fino para hormigón.

Detalle	Porcentaje de la muestra total, en masa. Máximo
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	3
Material más fino que 75 µm:	
Hormigón sujeto a abrasión	3
Todos los demás hormigones	5
Carbón y lignito	
Donde es importante la apariencia superficial del hormigón	0.5
Todos los demás hormigones	1

Fuente:(NTE INEN, 2011e, p. 3)

Por otra parte, en la tabla 23 se encuentran los límites establecidos para los agregados gruesos. La norma sugiere que, si no se especifica la clase de agregado, se le debe aplicar los requisitos de la clase 3S, 3M o 1N para condiciones de intemperismo severo, moderado o nulo. Así mismo establece que, si los resultados de los ensayos exceden a los límites establecidos en la tabla 23, se puede emplear el material con la condición de que se demuestre que el hormigón elaborado con estos ofrece un desempeño satisfactorio o similar al esperado.

También menciona que, si el agregado será empleado en hormigón que estará sujeto a: humedecimiento, exposición prolongada a la humedad ambiental o en contacto con terreno húmedo, se deberá evitar la presencia de materiales que sean posean propiedades reactivas con los álcalis del cemento puesto que puede causar expansión excesiva al hormigón. En caso de incumplir esto, se podrá emplear el material solo si se utiliza cemento que contenga menos del 0.6% de álcalis calculado como equivalente de óxido de sodio o incorporar un material que demuestre no causar expansión nociva.

Tabla 23

Requisitos degradación para áridos gruesos.

Designación de clase	Tipo o ubicación de la construcción de hormigón	Máximo permisible, %						
		Terrones de arcilla 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 intemperie, losas de pisos interiores que van a ser revestidas.	10	--	--	1	1	50	--
2S	Pisos interiores sin revestimiento	5	--	--	1	0.5	50	--
3S	Muros de fundación sobre el nivel del terreno, muros de retención, estribos, pilares, vigas principales y vigas expuestas a la intemperie.	5	5	7	1	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	5	5	1	0.5	50	18
5S	Hormigón arquitectónico expuesto.	2	3	3	1	0.5	50	18
Condición de intemperismo moderado								
1M	Zapatas, fundaciones, columnas y vigas no expuestas a la intemperie, losas de pisos interiores que van a ser revestidas.	10	--	--	1	1	50	--
2M	Pisos interiores sin revestimiento	5	--	--	1	0.5	50	--
3M	Muros de fundación sobre el nivel del terreno, muros de retención, estribos, pilares, vigas principales y vigas expuestas a la intemperie.	5	8	10	1	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	5	7	1	0.5	50	18
5M	Hormigón arquitectónico expuesto.	3	3	5	1	0.5	50	18
Condición de intemperismo nulo								
1N	Losas sujetas a la abrasión del tráfico, tableros de puentes, pisos, senderos, pavimentos.	5	--	--	1	0.5	50	--
2N	Todas las demás clases de hormigón.	10	--	--	1	1	50	--

Fuente:(NTE INEN, 2011e, p. 5)

Acerca de los métodos de ensayos, NTE INEN 872 sugiere realizar los siguientes:

- **Granulometría - módulo de finura:** Para la ejecución se debe emplear la norma NTE INEN 696.
- **Cantidad de material más fino a 75 μm :** Se deberá emplear la norma NTE INEN 697.
- **Impurezas orgánicas:** Recurrir a NTE INEN 855.
- **Efecto de las impurezas orgánicas sobre la resistencia:** Aplicar NTE INEN 866.
- **Solidez:** Usar NTE INEN 863.
- **Terrones de arcilla y partículas desmenuzables:** Seguir NTE INEN 698.
- **Lignito - carbón:** Emplear la norma NTE INEN 699.
- **Densidad aparente (Masa unitaria) de escoria:** Utilizar NTE INEN 858.
- **Degradación del árido grueso:** Recurrir a NTE INEN 860 y NTE INEN 861.
- **Chert:** Aplicar NTE INEN 699.

2.9 Reactividad Álcali-Agregado

Algunos minerales presentes en los áridos pueden reaccionar con los hidróxidos de sodio y potasio del hormigón. La reactividad Álcali-Agregado (RAA) puede producirse como reacción Álcali-Sílice (RAS) o reacción Álcali-Carbonato (RAC). Debido a que comúnmente los agregados contienen minerales de sílice reactivos, la reacción Álcali-Sílice es la principal causa de deterioro grave de las estructuras de hormigón (Owsiak et al., 2015). Se considera que la reactividad es potencialmente perjudicial siempre que ocurra una expansión considerable.

Debido a lo antes mencionado, es de suma importancia llevar a cabo los ensayos respectivos para detectar la presencia de estos minerales. En la figura 5 se presentan algunos de los minerales potencialmente perjudiciales que pueden desencadenar este tipo de reacciones.

Figura 5

Minerales reactivos y materiales sintéticos potencialmente perjudiciales.

Sustancias Reactivas			
Álcali-Sílice	Andesitas	Cuarzo deformado	Metragrauvacas
	Argilitas	Cuarzosas	Ópalo
	Calcedonia	Dacita	Pizarras opalinas
	Cherts	Esquistos	Pizarras silíceas
	Cherts Calcedónicos	Filitas	Riolitas
	Calizas silíceas	Gneis granítico	Vidrio sílico natural
	Calizas dolomitas	Grauvacas	Vidrio sílico sintético
	Cristobalita	Material volcánico vitrificado	Tridmita
	Álcali- Carbonato	Calizas dolomíticas	Dolomitas finamente graduadas

Adaptado de:(Kosmatka et al., 2004, p. 120)

2.9.1 Reacción Álcali-Sílice (RAS)

Costa (2015) define la Reacción Álcali-Sílice como una reacción deletérea que ocurre entre los álcalis contenidos en el cemento con algunos agregados potencialmente reactivos a la sílice. Esta se produce cuando los iones hidroxilo (OH) rompen los enlaces Si – O – Si del agregado y forman silicatos aniónicos (SiO). La carga negativa en estos silicatos se equilibra con los iones alcalinos cargados positivamente. El producto de esta reacción, en presencia de agua, son los geles de hinchamiento de los silicatos alcalinos.

Estos geles pueden formarse en: los planos de debilidad, en los poros del agregado o en su superficie. Como consecuencia, se reduce la resistencia mecánica, puesto que producen tensiones internas y estas a su vez conducen al agrietamiento del elemento. Además, pueden destruir la unión entre el agregado y la pasta de cemento hidratada (Neville, 2011).

Los indicadores de RAS pueden ser: red de grietas, juntas cerradas o lascadas, desplazamiento relativo de diferentes partes de la estructura o la aparición de erupciones en la superficie. Como el deterioro por RAS es lento, el riesgo de falla catastrófica es bajo. La RAS puede causar problemas de funcionalidad o utilización y puede

exacerbar otros mecanismos de deterioro, como aquellos que ocurren en la exposición a congelación, a descongelantes y a sulfatos. (Kosmatka et al., 2004, pp. 121–122)

En la imagen 1 se pueden observar dos manifestaciones que indican la presencia de RAS. La 1^a) se trata de un muelle volante gravemente afectado por RAS, en este se ha presentado un agrietamiento con patrón aleatorio. Por su parte, en la 1b) debido a la exudación de gel en la superficie del elemento de hormigón se observa decoloración.

Figura 6

Daños producidos en estructuras de hormigón debido al RAS.



Nota. a) Muelle volante con indicios de RAS b) Gel de exudación en la superficie del hormigón. Adaptado: (Owsiak et al., 2015, p. 25)

A pesar de que esta reacción fue reconocida como una potencial fuente de problemas para el hormigón en la década de 1940 y que en muchos países cuentan con la presencia de áridos reactivos, donde Ecuador no es la excepción, en gran número de situaciones resulta muy complicada realizar el debido diagnóstico de esta afectación. Uno de los motivos puede ser que no se visibiliza gran expansión perjudicial.

Owsiak et al. (2015) considera que la humedad presente en los elementos de hormigón facilita la migración de los iones de sodio y potasio a los sitios de la reacción, donde el gel de silicato alcalino absorbe la humedad, esto conduce a la expansión. Como complemento menciona que el hormigón con una humedad relativa superior al 80% tiende a verse

afectado por RAS expansivo y destaca que al emplear una relación agua/cemento más baja se puede limitar la permeabilidad. Así mismo sugiere el uso de aditivos minerales y otras alternativas para favorecer en la reducción del movimiento de humedad y los álcalis en el hormigón.

De acuerdo a Neville (2011) las formas reactivas de la sílice son: el ópalo, la calcedonia y la tridimita. Se puede encontrar estos materiales reactivos en: cherts opalinos o calcedónicos, calizas silíceas, riolitas, dacita, andesita y filitas.

Según Owsiak et al. (2015) los agregados que contienen cantidades superiores a las mencionadas a continuación, pueden ser considerados como reactivos potenciales:

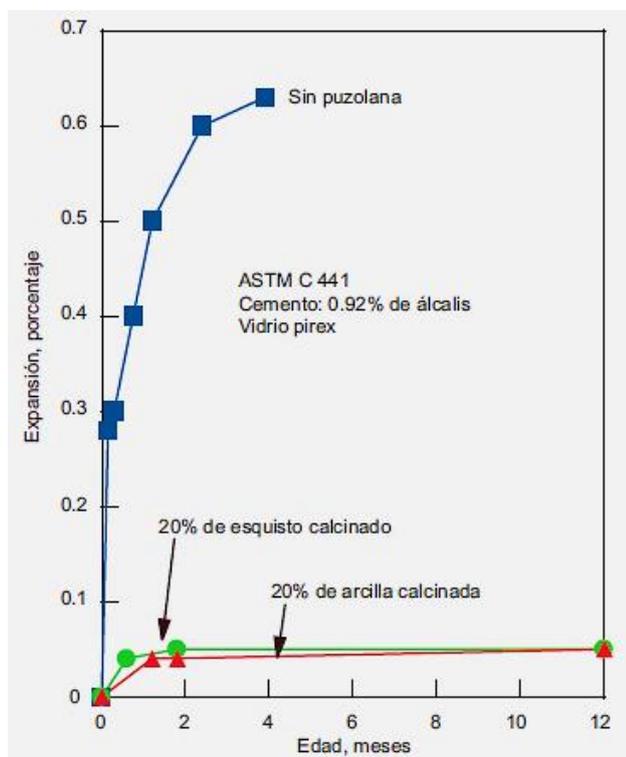
- **Ópalo:** Mayor al 0.5% de la masa.
- **Chert y Calcedonia:** Superior al 3%.
- **Tridimita y Cristobalito:** Por encima del 1%.
- **Cuarzo Colado o Microcristalino:** Superior al 0.5%. Por lo general se encuentra en granitos, gneises graníticos, rocas sedimentarias, filitas, limolitas, arenas y gravas naturales.
- **Vidrio Volcánico Natural:** Mayor al 3%.

Para controlar la Reactividad Álcali-Sílice se pueden añadir materiales cementantes suplementarios como, por ejemplo: humo de sílice, escoria granulada de alto horno, ceniza volante, esquisto calcinado, arcilla calcinada, entre otras puzolanas. En algunos casos, al implementarse cenizas de bajo contenido de calcio F se ha podido reducir en un 70% la expansión por reactividad. Por otra parte, las cenizas de C también favorecen a la reducción de reactividad pero en un menor porcentaje (Kosmatka et al., 2004).

Ante lo previamente mencionado, se puede observar en la figura 7 el efecto que causa emplear arcilla calcinada y esquisto calcinado en el control de la reactividad álcali-sílice. En este se compara la expansión que presenta el elemento sin el uso de puzolana y con el uso de esta, donde la expansión se reduce considerablemente en el segundo caso.

Figura 7

Reducción de la reactividad álcali-sílice por la arcilla calcinada y el esquisto calcinado.



Adaptado de:(Kosmatka et al., 2004, p. 90)

Para poder realizar la debida evaluación potencial de expansión perjudicial producida por la reactividad Álcali-Sílice en Ecuador, NTE INEN 872 (2011e) sugiere los siguientes métodos:

- **Método químico:** Usar NTE INEN 868, indica las cantidades de sílice disuelta y de reducción en la alcalinidad para cada una de las 3 porciones de ensayo de la muestra del árido. Se realiza de forma rápida y proporciona información invaluable, pero no es favorable para rocas lentamente reactivas ni para áridos que contienen carbonatos o silicatos de magnesio. Si los agregados presentan características perjudiciales, deben ser ensayados de acuerdo a la Norma NTE INEN 867 o a la ASTM C 1293.
- **Método de la barra de mortero para combinaciones árido-cemento:** Se emplea NTE INEN 867, proporciona información sobre la posibilidad de se presente una expansión potencialmente perjudicial cuando se emplea cemento alto en contenido de álcalis.

Los límites establecidos pueden no ser conservadores en el caso de áridos lentamente reactivos, para lo cual se recomienda emplear ASTM C 1260 o ASTM C 1293.

- **Método de la barra de mortero para determinar la potencial reactividad alcalina del árido:** Usar la norma ASTM C 1260, mediante esta se busca predecir o detectar materiales que desarrollarán expansiones perjudiciales lentamente a largo plazo.
- **Método del prisma de hormigón para determinar la reactividad álcali-sílice:** Se emplea como guía la norma ASTM C 1293, con este se evalúa los áridos independientes o sus combinaciones con puzolanas o escoria. Busca determinar el potencial de expansión álcali-sílice, usar prismas de hormigón expuestos a las condiciones sugeridas por la norma NTE INEN 867.
- **Método de la barra de mortero para determinar la efectividad que poseen las adiciones minerales para prevenir la excesiva expansión del hormigón causado por la reacción álcali-sílice:** Emplear NTE INEN 2565, esta evalúa los materiales cementantes en barras de mortero que emplean vidrio de borosilicato altamente reactivo como árido.
- **Método acelerado de la barra de mortero para determinar la potencial reactividad álcali-sílice de combinaciones de materiales cementantes y áridos:** Se emplea como guía la norma ASTM C 1567, esta evalúa cementos compuestos con adición de puzolanas, también combinaciones específicas de áridos y materiales cementantes.

2.9.2 Reacción Álcali-Carbonato (RAC)

Según Joshaghani (2017) la reacción álcali-carbonato ocurre por la interacción de los álcalis de cemento con la caliza dolomítica arcillosa. Esta reacción no es tan común como la álcali-sílice, pero se puede sospechar de que se trata de una reacción RAC cuando las rocas dolomíticas arcillosas se encuentran mezcladas con otros tipos de dolomita o caliza.

Se pueden encontrar cristales grandes y dispersos de dolomita en las rocas reactivas, estos suelen estar rodeados por una matriz de granos finos

de arcilla y calcita. Se conoce comúnmente al carbonato de calcio-magnesio como dolomita, mientras que la calcita representa la forma mineral del carbonato de calcio. Cuando ocurre la dedolomitización o ruptura de la dolomita, esta se transforma en brucita y carbonato de calcio. Debido a la reacción producida en la dedolomitización y la cristalización causada por la brucita, se presenta una expansión (Kosmatka et al., 2004).

Como método de control para el RAC, Kosmatka et al. (2004) sugiere que se empleen las siguientes precauciones:

- Limitar el tamaño del agregado: Emplear el de menor tamaño posible.
- Mezclar el agregado: Utilizar como guía el apéndice de la norma ASTM C 1105.
- Seleccionar una cantera específica para la extracción del agregado.

Para poder realizar la debida evaluación potencial de expansión perjudicial producida por la reactividad Álcali-Carbonato en Ecuador, NTE INEN 872 (2011e) recomienda los siguientes métodos:

- **Método del cilindro de roca para determinar la reacción álcali-carbonato:** Emplear NTE INEN 871, es de gran utilidad en la selección preliminar de la fuente de los áridos. Mediante esta es posible indicar la presencia de material con potencial de expansiones.
- **Método prisma de hormigón para determinar la reacción álcali-carbonato:** Emplear la norma ASTM C 1105, para evaluar combinaciones específicas de materiales en el hormigón, si el árido es considerado propenso a desarrollar expansión perjudicial durante su servicio debido a la reacción álcali-carbonato.

2.10 Aditivos

A pesar de que los aditivos no son un componente esencial en la elaboración de la mezcla de hormigón, se han convertido en un elemento relevante.

Los aditivos son capaces de aportar beneficios físicos y económicos al hormigón. Estos beneficios incluyen: la posibilidad de utilizar el hormigón en circunstancias complejas, permite la implementación de una gama de

ingredientes más amplia en la mezcla, aunque no siempre son baratos no representan un gasto adicional puesto que su uso puede suponer un ahorro, en la mejora de la durabilidad sin el uso de medidas adicionales. A pesar de que los aditivos son favorables para el hormigón, no supone un remedio para la mala calidad de este (Neville, 2011).

2.10.1 Tipos de Aditivos

De acuerdo a Neville (2011) los aditivos son un producto químico que se añade a la mezcla de hormigón en cantidades no mayores al 5% en masa de cemento durante el proceso de mezclado. Su composición puede ser orgánica o inorgánica y su clasificación se realiza por su función. Pueden utilizarse en estado sólido o líquido, aunque son más habituales en estado líquido puesto que pueden dispersarse más rápido y de una manera uniforme. El aditivo puede ser vertido en el agua de amasado o diluido, pero debe ser agregado a la mezcla de manera simultánea con el agua de amasado

La norma ASTM C 494/C 494M (2005) clasifica a los aditivos de la siguiente forma:

- **Tipo A:** Aditivo reductor de agua.
- **Tipo B:** Aditivo retardante.
- **Tipo C:** Aditivo acelerador.
- **Tipo D:** Aditivo reductor de agua y retardante.
- **Tipo E:** Aditivo reductor de agua y acelerador.
- **Tipo F:** Aditivo reductor de agua de alto rango o superplastificante.
- **Tipo G:** Aditivo reductor de agua de alto rango o superplastificante y retardante.

La norma también señala que los efectos producidos por los aditivos pueden variar debido a: las propiedades y proporciones de los demás ingredientes que se encuentren en la mezcla, la dosificación y las temperaturas extremas. Con respecto a la temperatura, esta puede afectar el rendimiento que tenga el aditivo, es por esto que se deben llevar a cabo pruebas a priori para conocer el comportamiento que tendrá el aditivo seleccionado.

2.10.2 Aditivos Reductores de Agua

Como se mencionó previamente, este tipo de aditivo se encuentra clasificado como Tipo A, pero al agregársele propiedades retardantes este pasaría a considerarse de Tipo D. Lo mismo sucede con los aditivos de Tipo E, que en este caso se le proporcionan propiedades acelerantes.

Este tipo de aditivos tienen como función reducir el contenido de agua en la mezcla, que normalmente va en un rango de 5% a 10%, pero que puede llegar hasta un 15%. La implementación de este tipo de aditivos tiene como función principal reducir la relación agua/cemento sin que sea afectada la trabajabilidad de la mezcla o a su vez mejorar la trabajabilidad de la mezcla para una relación agua/cemento preestablecida (Neville, 2011).

Con los aditivos reductores de agua normalmente se obtiene un aumento de la resistencia porque se disminuye la relación agua/cemento. En concretos con los mismos contenidos de cemento y de aire y revenimiento (asentamiento), la resistencia a los 28 días de un concreto contiene un reductor de agua (y reducción de la cantidad de agua) que puede ser del 10% al 25% mayor que la resistencia de un concreto sin aditivo. A pesar de la reducción del contenido de agua, los aditivos reductores de agua pueden aumentar la retracción por secado. (Kosmatka et al., 2004, p. 138)

En base a lo previamente mencionado, aunque este tipo de aditivo genere retracción por secado, este suele ser poco significativo si es comparado con otros factores más relevantes que causan fisuración por contracción en el elemento de hormigón.

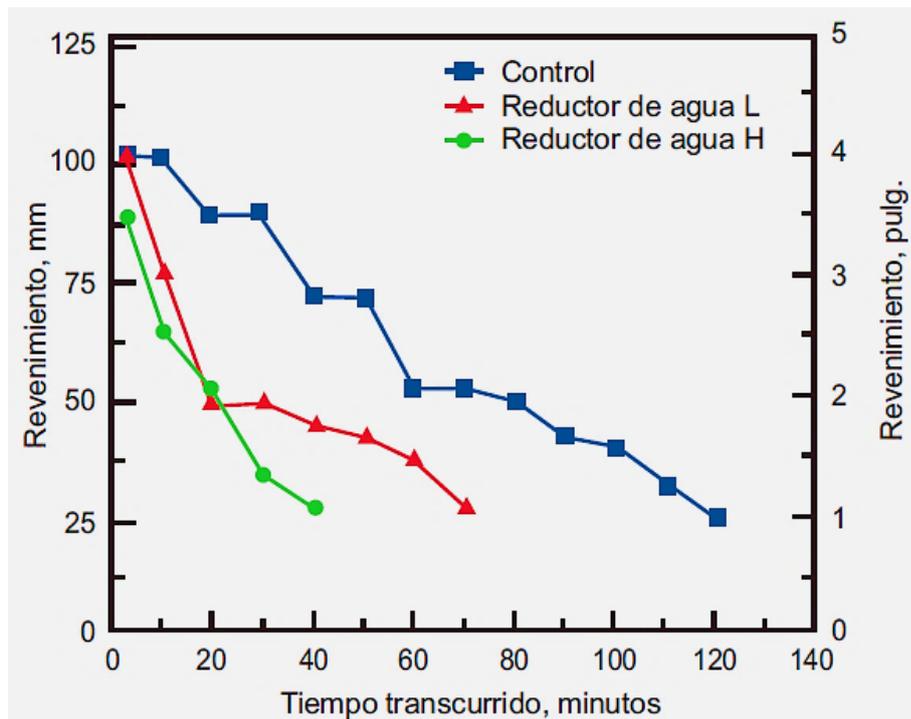
Por otra parte, ACI Committee E-701 (2013) menciona que el emplear dosificaciones muy altas de este tipo de aditivo puede provocar un retraso excesivo en el tiempo de fraguado del hormigón, por lo cual es necesario realizar pruebas para garantizar que el hormigón resultante cumpla con los requisitos del proyecto.

Así mismo, Kosmatka et al. (2004) sugiere que cuando se añada el aditivo se debe reducir el contenido de agua porque de no realizarlo, la

mezcla tendrá un mayor revenimiento. Esta pérdida de revenimiento conllevaría en una reducción de la trabajabilidad y disminuiría el tiempo de colocación del concreto, esto se puede observar en la figura 8 donde se comparan hormigones de control con hormigones que contienen aditivos reductores de agua.

Figura 8

Pérdida de revenimiento en hormigones con reductores de agua convencionales comparados con mezclas de control.



Adaptado de: (Kosmatka et al., 2004, p. 138)

2.10.3 Aditivos Retardantes

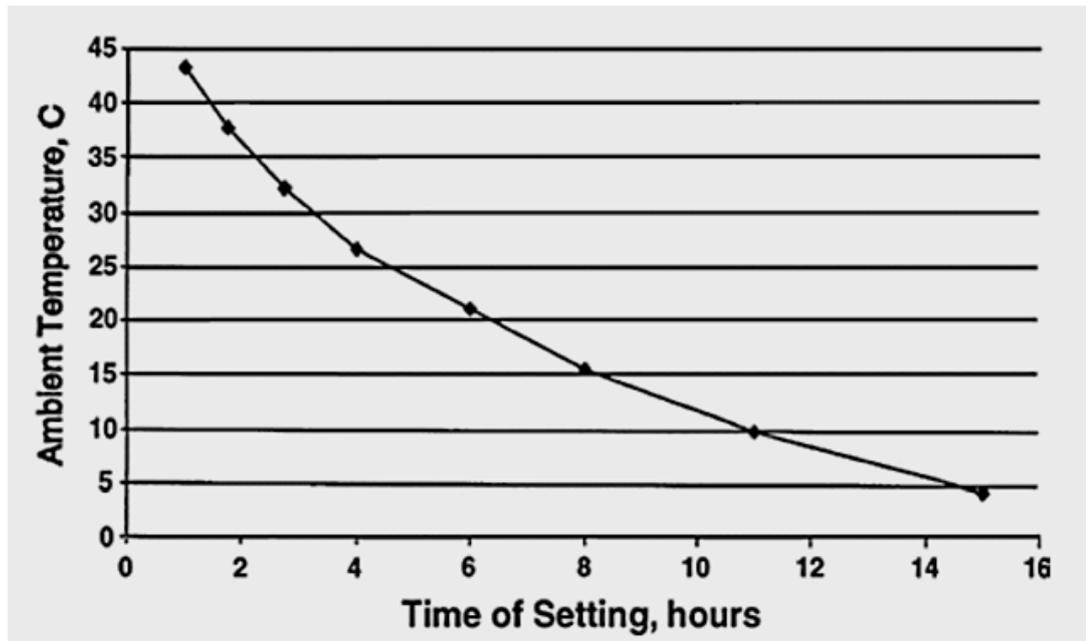
Los aditivos retardantes o tipo B proporcionan un retraso en el fraguado de la pasta de cemento. También poseen la capacidad de ralentizar el endurecimiento de la pasta, aunque algunas sales pueden acelerar el fraguado mientras inhiben el desarrollo de la resistencia. Este tipo de aditivo no altera la composición ni la identidad de los productos de hidratación (Neville, 2011).

ACI Committee E-701 (2013) considera que los aditivos retardantes cumplen con el propósito básico de compensar los efectos no deseados provocados por la alta temperatura. Tales efectos pudiesen ser: aceleración del fraguado y reducción de la resistencia a la compresión a los 28 días. Así

mismo permiten mantener el hormigón trabajable durante todo el proceso de colocación y consolidación. En la figura 9 se puede observar la relación entre la temperatura y el tiempo de fraguado del hormigón, cabe destacar la importancia de la implementación de este tipo de aditivos en climas cálidos.

Figura 9

Relación entre la temperatura y el tiempo de fraguado del hormigón.



Adaptado de: (ACI Committee E-701, 2013, p. 8)

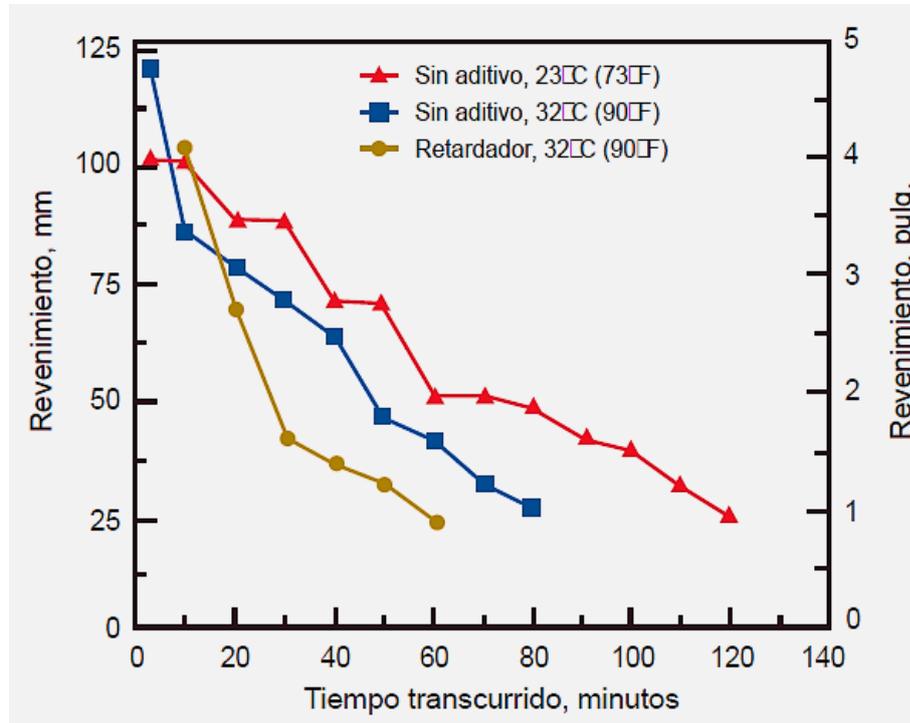
A su vez, ACI Committee E-701 (2013) menciona algunos de los beneficios de los aditivos retardantes que son los siguientes:

- Mayor flexibilidad en la duración del tiempo de fraguado y prevención en la formación de juntas frías.
- Proporciona facilidad de llevar a cabo el proceso de acabado en climas cálidos.
- Posibilita que el encofrado se deflexione completamente antes de que ocurra el fraguado inicial del hormigón.

Otro uso que se le puede dar a este tipo de aditivos es disminuir la pérdida de revenimiento causada por ambientes con altas temperaturas. En caso que la adición de este cause un aumento en la tasa de pérdida del revenimiento, esto causará que la trabajabilidad del elemento tenga una menor duración (Kosmatka et al., 2004). En la figura 10 se puede observar la problemática previamente descrita.

Figura 10

Relación entre la temperatura y el tiempo de fraguado del hormigón.



Adaptado de: (Kosmatka et al., 2004, p. 143)

Por su parte, Neville (2011) sugiere que se debe tener cuidado al emplearlo puesto que en cantidades incorrectas pueden inhibir totalmente el fraguado y endurecimiento del hormigón, es por esto que se deben realizar pruebas previas para determinar la dosificación correcta a emplear en el proyecto. También menciona que en climas cálidos el efecto retardante disminuye a temperaturas más altas, e inclusive pueden perder su efectividad alrededor de los 60°C.

2.10.4 Aditivos Aceleradores

Los aditivos aceleradores o Tipo C tienen como función principal acelerar el desarrollo de la resistencia temprana del hormigón, es decir su endurecimiento, pero también tienen la capacidad de acelerar el fraguado de este. Estos pueden ser implementados cuando el hormigón debe ser colocado a temperaturas bajas, para la elaboración de hormigón prefabricado o en trabajos de reparación urgente (Neville, 2011).

De acuerdo a ACI Committee E-701 (2013) algunos de los beneficios que presenta este tipo de aditivos son:

- Reducción del sangrado.
- Posibilidad de realizar un acabado más temprano.
- Mejor protección contra la exposición temprana a la congelación y descongelación.
- La estructura puede ser puesta en servicio mucho más pronto.
- Disminuye el tiempo de protección que se le debe proveer al hormigón para que desarrolle una calidad predeterminada.

El principal compuesto químico empleado en este tipo de aditivos es el cloruro de calcio, este es el acelerador más eficaz y económico, pero posee gran potencial para provocar corrosión en el acero de refuerzo por lo que su uso ha sido limitado. Así mismo, promueve un aumento de la contracción por secado, decoloración y descascaramiento.

Kosmatka et al. (2004) recomienda no adicionar al hormigón una cantidad de cloruro de calcio mayor al 2% de la masa de material cementante y su uso prudencial en las siguientes condiciones:

- El elemento de hormigón será curado a vapor.
- En el caso que el elemento de hormigón tuviese distintos metales inmersos y si estos se encuentran conectados a la armadura de refuerzo.
- Cuando se empleen encofrados de acero galvanizado para soportar permanentemente a las losas de hormigón.
- Hormigones coloridos.
- No emplearlo en la construcción de estacionamientos, en concreto pretensado por el riesgo de corroer el acero, hormigones que se han mostrado potencialmente reactivos, hormigón expuesto a suelos o aguas que contengan concentración de sulfatos, de manera general en climas calurosos, ni emplearlo en la colocación de concretos masivos.

2.10.5 Aditivos Superplastificantes

Los aditivos reductores de agua de alto rango o superplastificantes tienen una función similar a los aditivos reductores de agua convencionales, pero estos permiten disminuir el contenido de agua hasta un 30% o más.

Estos no poseen como efecto secundario el retraso excesivo del fraguado (ACI Committee E-701, 2013).

Los superplastificantes poseen una naturaleza distintiva, esta consiste en que el hormigón elaborado con este tipo de aditivo, en estado fresco o endurecido es sustancialmente distinto al elaborado con los otros tipos de aditivos reductores de agua. Se observa que esta mezcla puede alcanzar una relación a/c muy baja o una elevada trabajabilidad. Debido a esto los superplastificantes son clasificados de manera independiente por ASTM C 494-10 (Neville, 2011).

De acuerdo a ACI Committee E-701 (2013) al variar la dosificación y la cantidad de agua a emplear en la mezcla, este aditivo puede ser empleado para preparar:

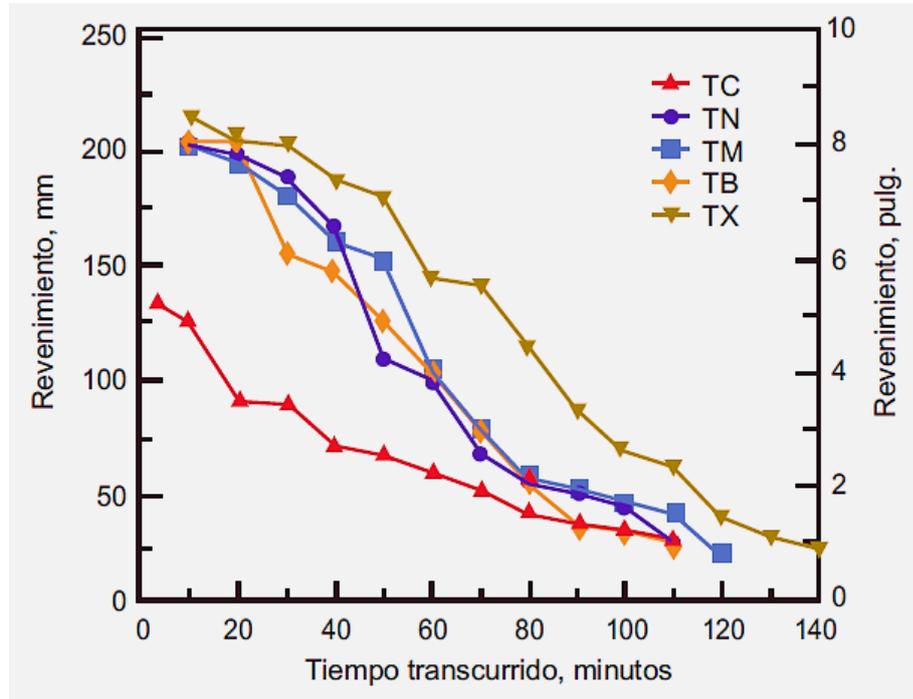
- Hormigón con trabajabilidad normal, pero con una relación a/c más baja.
- Hormigón altamente fluido casi autonivelante, con la misma o una menor relación a/c de un hormigón con trabajabilidad normal.
- Una combinación entre ambos, es decir, un hormigón con un moderado incremento en la trabajabilidad y una reducción en la relación a/c.

El efecto que poseen ciertos superplastificantes para mejorar la trabajabilidad es corto, este puede tener una duración entre 30 y 60 minutos. Luego de este período se presenta una pérdida rápida de revenimiento, esta pérdida también puede agravarse por acción de la temperatura. Para sobrellevar este inconveniente, estos aditivos son añadidos al hormigón mientras se encuentra en la mezcladora (Kosmatka et al., 2004).

Ante lo mencionado previamente, se presenta la figura 11, en donde se puede observar la pérdida de revenimiento después del rango de tiempo que proporciona el aditivo.

Figura 11

Pérdida de revenimiento a 32°C en concretos fluidos comparados con mezclas de control.



Nota. Los concretos fluidos son los denominados: TN, TM, TB y TX, por su parte la mezcla de control es denominada TC. Adaptado de:(Kosmatka et al., 2004, p. 142)

2.11 Hidratación del Cemento Portland

De acuerdo con Costa (2015) cuando se mezcla el cemento con agua se producen una serie de reacciones químicas de hidratación, estas ocurren a diferentes ritmos e influyen entre ellas, lo que provoca cambios físicos, químicos y mecánicos al sistema. Al unirse los compuestos hidratados le otorgan propiedades adhesivas y cohesivas al cemento. El proceso de hidratación conduce a la conversión del sistema agua-cemento en una matriz sólida, desigual y porosa que sirve como aglutinante para los materiales.

La reacción de los compuestos constituyentes del hormigón se produce de manera exotérmica, es decir que se libera calor a medida que transcurre el tiempo de hidratación.

García (2011) considera fundamental la relación agua/cemento en la mezcla, debido a que esta afecta la fluidez que poseerá la pasta elaborada,

así como también el progreso de la hidratación y las propiedades que poseerá la mezcla. Así mismo, contempla la existencia de otros aspectos que influyen en el desarrollo de este proceso, los cuales se mencionarán a continuación:

- La finura que posea el cemento.
- Cómo se encuentra compuesto el cemento y la concentración de iones que posea su estructura.
- La relación agua/cemento empleado para la elaboración de la mezcla.
- La temperatura en que se realice el proceso de curado.
- La implementación de aditivos químicos.
- El uso de adiciones como: escoria granulada de alto horno, humo de sílice y ceniza volante.

Por su parte, Neville (2011) menciona que es posible determinar la evolución del proceso de hidratación del cemento con distintos parámetros, como lo son:

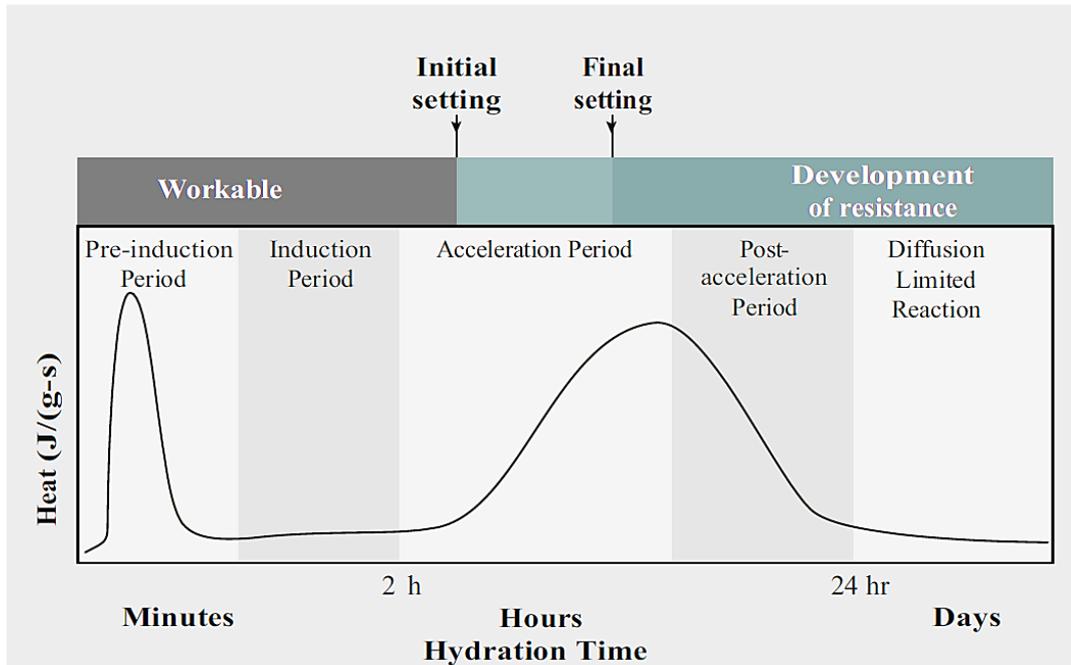
- La cantidad de Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2) presente en la pasta.
- El calor liberado debido al proceso de hidratación.
- La gravedad específica que posee la pasta.
- La cantidad de agua químicamente mezclada.
- La cantidad de cemento no hidratado.
- De manera indirecta también se puede considerar la resistencia de la pasta hidratada.
- Obtener imágenes de la pasta con un microscopio electrónico de barrido.

2.12 Etapas del Proceso de Hidratación del Cemento Portland

El proceso de hidratación del Cemento Portland puede ser dividido en etapas o fases distintas como se puede observar en la figura 12.

Figura 12

Evolución esquemática del calor en función del tiempo de hidratación del cemento con sus correspondientes etapas o períodos.



Adaptado de:(Costa, 2015, p. 20)

(Costa, 2015) describe las etapas del proceso de hidratación de la siguiente forma:

- **Período de Pre-Inducción**

Luego de mezclar el cemento con el agua, existe un breve período en el que se producen reacciones rápidas. En este reaccionan con el agua el Aluminato Tricálcico (C_3A) y el Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF), mientras que el Sulfato de Calcio ($\text{C}\bar{\text{S}}$) da lugar a la formación de una capa de gel amorfo, el cual es rico en alúmina. Este gel se forma alrededor de las partículas de cemento. Así mismo se producen pequeñas partículas alargadas de Ettringita. Durante este período se produce la primera liberación representativa de calor.

- **Período de Inducción**

En esta etapa ocurren reacciones químicas a pequeña escala por lo cual el calor liberado es despreciable.

- **Período de Aceleración o Post- Inducción**

Ocurre un reacceleración en las reacciones de hidratación durante este período, la liberación de calor máxima ocurre un poco antes de que se cumplan las 12 horas de haber realizado la mezcla inicial. Este comportamiento se debe a las reacciones de hidratación de los Silicatos Tricálcicos (C_3S) que forman una capa de gel alrededor de las partículas de cemento, esta recibe el nombre de “C-S-H externo”.

Como consecuencia se produce una pérdida de plasticidad en la pasta de cemento, convirtiéndose en un material rígido no deformable, que se conoce como proceso de fraguado. Cuando finaliza este período alrededor de un 30% del cemento se ha hidratado, y la pasta de cemento ha atravesado tanto el proceso de fraguado inicial como el final.

- **Período de Post- Aceleración**

En este período se produce una disminución gradual en la velocidad de las reacciones de hidratación, lo que provoca que disminuya la liberación de calor de manera progresiva. Por otra parte, los silicatos de calcio continúan hidratándose con un aumento gradual debido a la contribución de los Beta-Silicatos Dicálcicos ($\beta - C_2S$). Se forma el “C-S-H interno” cuando el “C-S-H externo” empieza a depositarse dentro de una envoltura de hidratación.

Después de transcurridas 18 horas de ocurrir la hidratación del cemento, se reinicia una reacción de hidratación secundaria de los aluminatos (C_3A) y (C_4AF), por lo que se forman cristales adicionales de Ettringita más aciculares que los previamente formados. Durante este proceso se libera una cantidad de calor importante.

- **Período de Reacción Limitado por Difusión**

Después de 1-3 días de la hidratación del cemento se ralentizan considerablemente las reacciones debido a la limitación difusional de los compuestos que se encuentran en estado sólido. Se mantiene en formación el “C-S-H interno” y aparece una nueva fase de Monosulfoaluminato de

Calcio hidratado (AF_m). La hidratación del cemento continúa a lo largo de los años, lo que forma esencialmente “C-S-H interno” a partir de Beta-Silicato Dicálcico ($\beta - C_2S$).

2.13 Volumen de los productos durante el proceso de hidratación

Durante el proceso de hidratación, el espacio disponible para los productos que intervienen está conformada por el volumen absoluto del cemento seco junto con el agua añadida a la mezcla. Debido a que la pérdida de agua a causa del sangrado y la contracción plástica es pequeña, se la desprecia. El porcentaje de agua ligada químicamente por los silicatos tricálcicos y dicálcicos suele ser aproximadamente 21% y 24% respectivamente, por su parte para el aluminato tricálcico esta representa un 40% y para el ferroaluminato tetracálcico es un 37% (Neville, 2011).

Sin embargo, los valores previamente mencionados no son exactos debido a que es muy complejo establecer con precisión los porcentajes de agua combinada químicamente.

Neville (2011) sugiere que se considere el agua no evaporable, la cual se determina al establecer condiciones determinadas. En este se define que el agua no evaporable representa el 23% de la masa del cemento sin hidratar, este valor puede disminuir al 18% si se tratase de un cemento Tipo II.

Cabe mencionar, que lo descrito previamente se supuso a través de un ensayo, en el cual el tubo de ensayo se encontraba sellado y no fue afectado por el movimiento de agua hacia afuera o hacia adentro del sistema.

Por otra parte, Neville (2011) considera que en los volúmenes durante el proceso de hidratación están compuestos de la siguiente forma:

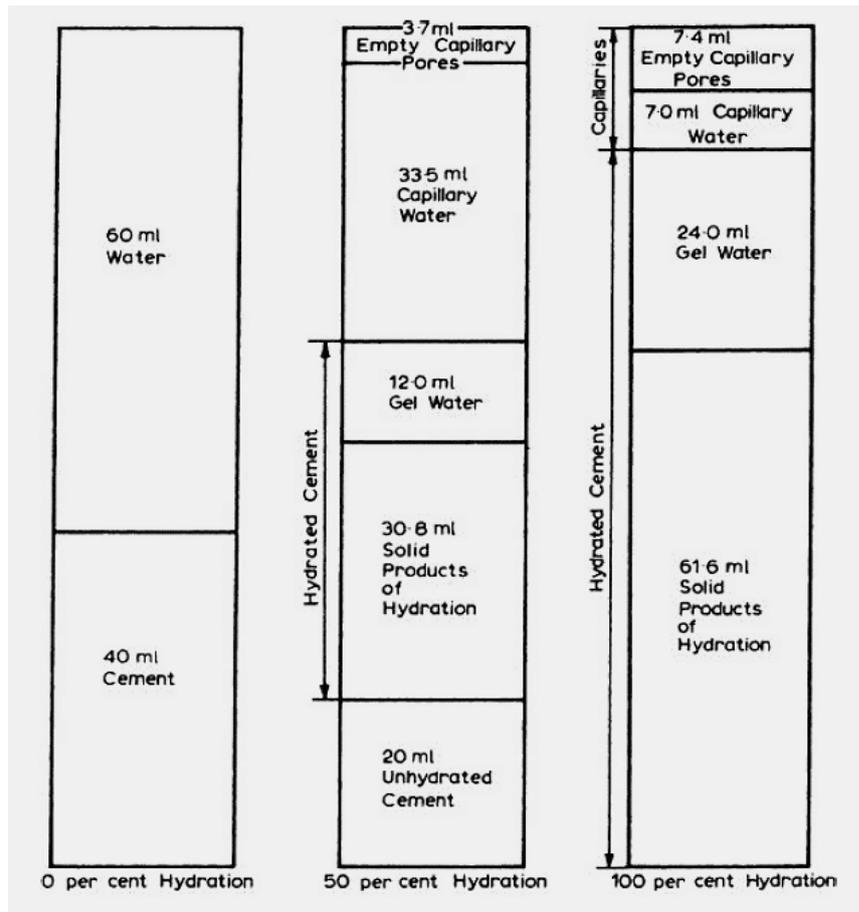
- Antes de la hidratación: el volumen del agua y el volumen del cemento sin hidratar.

- Durante la hidratación: volumen de cemento sin hidratar, volumen de los productos sólidos de hidratación, volumen de agua gelificada, agua capilar y poros capilares vacíos.
- Después de la hidratación: el volumen del agua gelificada, el volumen de los productos sólidos de hidratación, agua capilar y el volumen de los poros capilares vacíos cuyos vacíos se encuentran distribuidos por toda la pasta de cemento hidratada.

En la figura 13 se puede apreciar la variación de los volúmenes durante el proceso de hidratación. El agua capilar surge cuando, el elemento al ser curado bajo agua, absorbe esta agua a través de sus capilares mientras estos se vacían debido a la hidratación. Por esto es de suma importancia el emplear una buena relación agua/cemento, para lograr que todo el volumen del cemento logre hidratarse adecuadamente, pero así mismo evitar que el elemento no contenga un exceso de agua provocado por la presencia de los poros capilares.

Figura 13

Representación de las proporciones volumétricas de la pasta de cemento en diferentes fases de hidratación.



Adaptado de:(Neville, 2011, p. 147)

2.14 Agua retenida durante el proceso de hidratación

Se puede considerar a la pasta de cemento como higroscópica, debido a la capacidad que posee para absorber la humedad del medio que la rodea. Por su parte, el cemento le proporciona un carácter hidrofílico, lo que causa que el contenido real de agua en la pasta de cemento dependa de la humedad ambiental. De manera particular los poros capilares se vacían cuando la humedad relativa es menor al 45%, sin embargo, los poros de gel pueden adsorber agua a humedades ambientales muy bajas (Neville, 2011).

Por lo tanto, se podría decir que el agua logra mantenerse a lo largo de todo el proceso de distintas formas, ya sea como: agua libre, adsorbida, químicamente combinada, gelificada o retenida.

El agua adsorbida es aquella retenida por las fuerzas superficiales de las partículas de gel, parte de esta se mantiene entre las superficies de ciertos planos de un cristal, la cual se recibe el nombre de agua intercalada o

zeolítica. Por otra parte, el agua de red es aquella que forma parte del agua de cristalización, que no se encuentra químicamente asociada con los componentes principales de la red. Mientras que el agua libre es la que se mantiene en los capilares y se encuentra más allá de las fuerzas superficiales de la fase sólida (Neville, 2011).

Aún no es posible determinar cómo se distribuye el agua entre los distintos estados ni predecir cuándo se suscitarán estas divisiones, puesto que la energía que se produce debido a la unión combinada del agua posee una magnitud similar a la energía generada por la unión del agua adsorbida.

Sin embargo, cabe recalcar que como se mencionó con anterioridad, el agua no evaporada está conformada por el agua combinada químicamente y por la que no se encuentra combinada. Por lo cual, esta representaba un 23% de la masa de cemento sin hidratar, en el volumen total presente.

2.15 Transporte de fluidos en el hormigón

El hormigón posee permeabilidad, por lo cual los fluidos tienen la capacidad de ingresar y moverse a través de este, lo que representa un peligro para su durabilidad. Aparte del flujo a través del hormigón, también este puede experimentar difusión, sorción y penetrabilidad. Sin embargo, de manera práctica resulta complejo conocer con exactitud la forma en que se transportarán los distintos fenómenos que pudiesen afectar la durabilidad del hormigón (Neville, 2011).

Al ser de suma importancia la permeabilidad que posee el hormigón, esta no debe ser pasado por alto, puesto que esta puede ser afectada por: la relación agua-cemento, el grado de hidratación del cemento y el período de curado que se le brinde al elemento.

Es común que se confunda permeabilidad con porosidad, pero la porosidad representa la medida del volumen total del hormigón que es ocupada por los poros, esta suele ser representada en porcentaje. Cuando

la porosidad es alta, los poros se encuentran interconectados y favorecen al transporte de los fluidos a través del hormigón. En cambio, si los poros son discontinuos no facilitan el transporte, esto provoca que el hormigón posea baja permeabilidad aunque cuente con una elevada porosidad (Neville, 2011).

Por otra parte, durante el proceso de difusión, el fluido se mueve bajo una divergencia de concentración. Los gases suelen transportarse a través de este medio, de los cuales los más peligrosos para el hormigón son: el dióxido de cloro y el oxígeno. El dióxido de cloro puede provocar carbonatación de la pasta de cemento hidratada, mientras que el oxígeno conduce a la corrosión del acero y puede difundirse 1.17 veces más rápido que el otro (Neville, 2011).

Según Neville (2011), una opción para combatir la difusión del oxígeno es el emplear curado húmedo. Así mismo considera que, la humedad relativa a la que se encuentra sometido el elemento posee gran influencia, puesto que al encontrarse los poros llenos de agua se reduce la difusión.

2.16 Características físico-químicas durante el proceso de hidratación

Como fue mencionado previamente, durante el proceso de hidratación se suscitan múltiples reacciones físicas y químicas, las cuales influyen en el comportamiento que presente la pasta de cemento. Una de las características físicas más representativas es la resistencia, la cual incrementa de acuerdo con la etapa en la que se encuentre el proceso.

La velocidad con que se desarrolla la resistencia de los componentes del cemento fue determinada por los autores Bogue y Lerch. Pero, Ramachandran analizó otros aspectos que no fueron contemplados, como la cantidad de agua en la mezcla y cómo se distribuye el tamaño de las partículas (Córdova, 2021).

En la tabla 24, se puede observar la comparación entre estos dos estudios y sus respectivos resultados. Por otra parte, en la figura 14 se

puede visualizar las curvas de desarrollo de resistencia de cada uno de los componentes del cemento.

Tabla 24

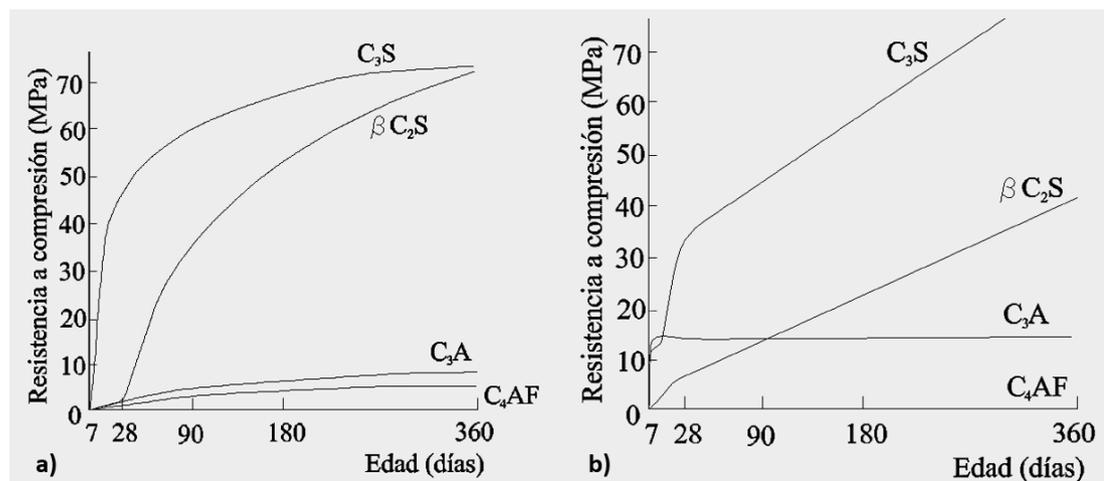
Hidratación de los componentes del cemento.

Tiempo	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	$C_3S = C_2S > C_3A > C_4AF$	$C_3S > C_2S > C_4AF > C_3A$

Fuente:(García Hernández, 2007, p. 16)

Figura 14

Curvas desarrollo de resistencias.



Nota. a) Curva desarrollo de resistencia de cada uno de los componentes del cemento de acuerdo a Bogue y Lerch b) Desarrollo de la resistencia de cada uno de los compuestos del cemento. Adaptado de:(García Hernández, 2007, p. 16)

Al hidratarse los silicatos de calcio, constituyen entre un 50%-60% de las fases sólidas presentes en las pastas de cemento portland endurecidas,

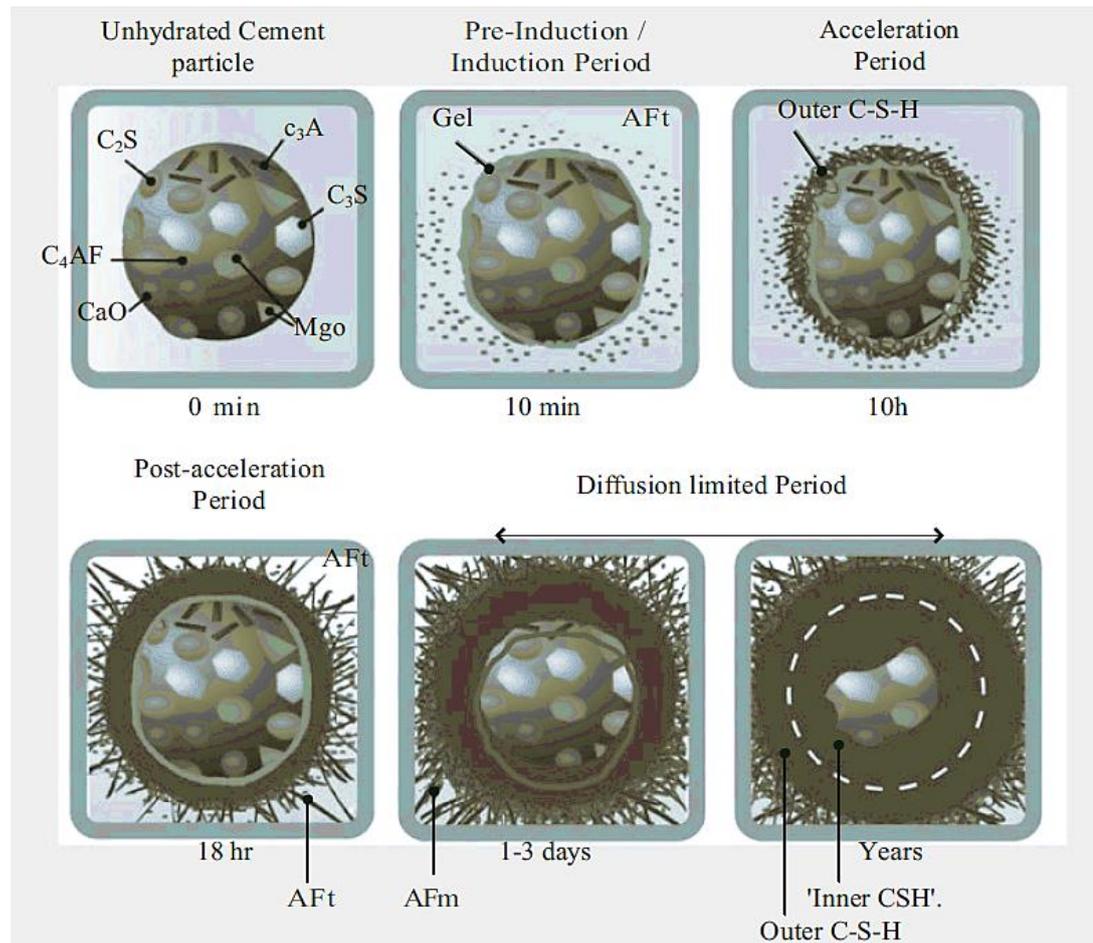
por lo que se consideran los principales responsables de las propiedades aglutinantes y de la elevada resistencia mecánica que desarrollan estos materiales. Cuando el C_3A se hidrata, inmediatamente reacciona y provoca un fraguado rápido, el cual proporciona una resistencia mecánica baja. Este endurecimiento prematuro dificulta la hidratación de los demás componentes, pero la presencia del yeso, favorece el control de hidratación del C_3A (Costa, 2015).

Al controlarse la hidratación del C_3A , surge la Ettringita, esta forma una barrera protectora que permite la hidratación de los otros componentes del cemento. Este proceso se mantiene hasta que la pasta de cemento se endurece y forma una organización microestructural compleja. Esta microestructura determina propiedades como la resistencia a la compresión, estabilidad dimensional, durabilidad, entre otros (Costa, 2015).

En la figura 15 se observa el proceso de hidratación de una partícula de cemento, en el cual su microestructura cambia a medida que transcurre el tiempo.

Figura 15

Esquema de los diferentes períodos del mecanismo de hidratación de una partícula de cemento.



Nota. C_3S = Silicato Tricálcico, C_2S = Silicato Dicálcico, C_3A = Aluminato Tricálcico, C_4AF = Aluminoferrita Tetracálcica, C-S-H= Silicato Cálcico Hidratado, AFt = Trisulfoaluminato Cálcico hidratado, AFm = Monosulfoaluminato de Calcio hidratado. Adaptado de:(García Hernández, 2007, p. 16)

2.17 Problemas en la zona de estudio que pudiesen dificultar la producción de hormigón

Según el reporte elaborado por el Índice del Tráfico Global INRIX (2020), en el año 2019 la ciudad de Guayaquil ocupó el puesto 31 dentro de las ciudades más congestionadas por el tráfico en el mundo. En Ecuador ocupa el puesto #2, después de Quito. Esta problemática, ha conllevado a que la población pierda alrededor de 52 horas debido a la congestión.

Por otra parte, a menudo las fábricas proveedoras de hormigón premezclado se encuentran muy distantes de la ubicación donde se ejecuta el proyecto. Lo cual, en conjunto con la congestión vehicular, provoca que el

transporte tome mucho tiempo. Este retraso evita que la mezcla sea vertida a tiempo y empiece el proceso de fraguado dentro del mixer. Para evitar que la mezcla pierda su trabajabilidad le es agregada agua, pero esto afecta su resistencia y durabilidad.

Otra problemática presente en la ciudad de Guayaquil, es la presencia de salinidad en su ambiente, puesto que cuenta con 10 cuerpos de agua salobre. El viento favorece el ingreso de la humedad salina, dentro de los procesos de fisuración que pudiesen encontrarse al interior de las estructuras de hormigón.

Así mismo, debe considerarse la alta sismicidad que posee la ciudad. Martínez (2020) considera que Guayaquil cuenta con 5 fallas geológicas grandes, las que a su vez operan con gran cantidad de fallas geológicas pequeñas, lo cual pudiese complicar el comportamiento de una estructura que posea fisuras y que estas se encuentren cerca del acero estructural corroído. Además, ante la existencia de suelos licuables que no aportan ningún tipo de soporte durante un sismo, la ciudad pudiese enfrentarse a muchos casos de asentamientos e incluso volcamientos de estructuras.

Cabe mencionar que los suelos licuables poseen la capacidad de amplificar sismos, por lo cual este factor debe ser considerado en los procesos de vaciado del hormigón, para así poder mantener un buen patrón de calidad en los elementos estructurales.

También se debe considerar que la ciudad posee aguas residuales domésticas e industriales en el nivel freático y concentración de sulfatos en los suelos, estos elementos agresivos afectarán al hormigón y al acero, principalmente a las estructuras que se encuentran enterradas y que por esta condición no es sencillo llevar a cabo los procesos de mantenimiento adecuados.

Por último, no se han considerado las repercusiones del aumento en la temperatura que ha experimentado la ciudad, el cual influye en la temperatura de las varillas de acero y los encofrados metálicos de los elementos estructurales, como por ejemplo la losa que se puede observar en

la figura 16. Esto afecta directamente a la mezcla de hormigón cuando se lleva a cabo el proceso de vaciado.

Figura 16

Armado de losa con varillas de acero y encofrado metálico.



Adaptado de:(MECACON S.R.L, 2021)

Este fenómeno no debe ser confundido con las elevadas temperaturas internas producto del calor de hidratación generado por la reacción química del cemento y el agua, puesto que esta problemática solo se suscita en el concreto masivo al poseer piezas de hormigón de grandes dimensiones como la cimentación que se observa en la figura 17.

Figura 17

Cimentación del Juzgado Central de San Diego.



Adaptado de:(Civil Engineering Discoveries, 2018)

Ante lo previamente mencionado, Martínez (2020) sugiere implementar las siguientes recomendaciones para prevenir los efectos que se produzcan en la zona de estudio:

- Preparar el hormigón bajo cubierta o techado.
- Evitar un tiempo de mezclado muy amplio.
- Reducir el tiempo entre el mezclado y el vaciado.
- Realizar el curado lo antes posible.
- Emplear aditivos de preferencia plastificantes.

- Almacenar los áridos lejos del calor y el sol.
- Evitar que el proceso de fundición se lleve a cabo a medio día.
- Evitar cementos de fraguado rápido.

2.18 Alternativas propuestas por ACI 305R para el control de la temperatura en el hormigón

El hormigón puede elaborarse en climas cálidos sin límites máximos de temperatura de colocación y rendir satisfactoriamente cuando se adoptan las debidas precauciones en la dosificación, producción, entrega, colocación, acabado y curado. El principal objetivo de esto es mantener la temperatura del hormigón fresco lo más baja posible (ACI Committee 305, 2010).

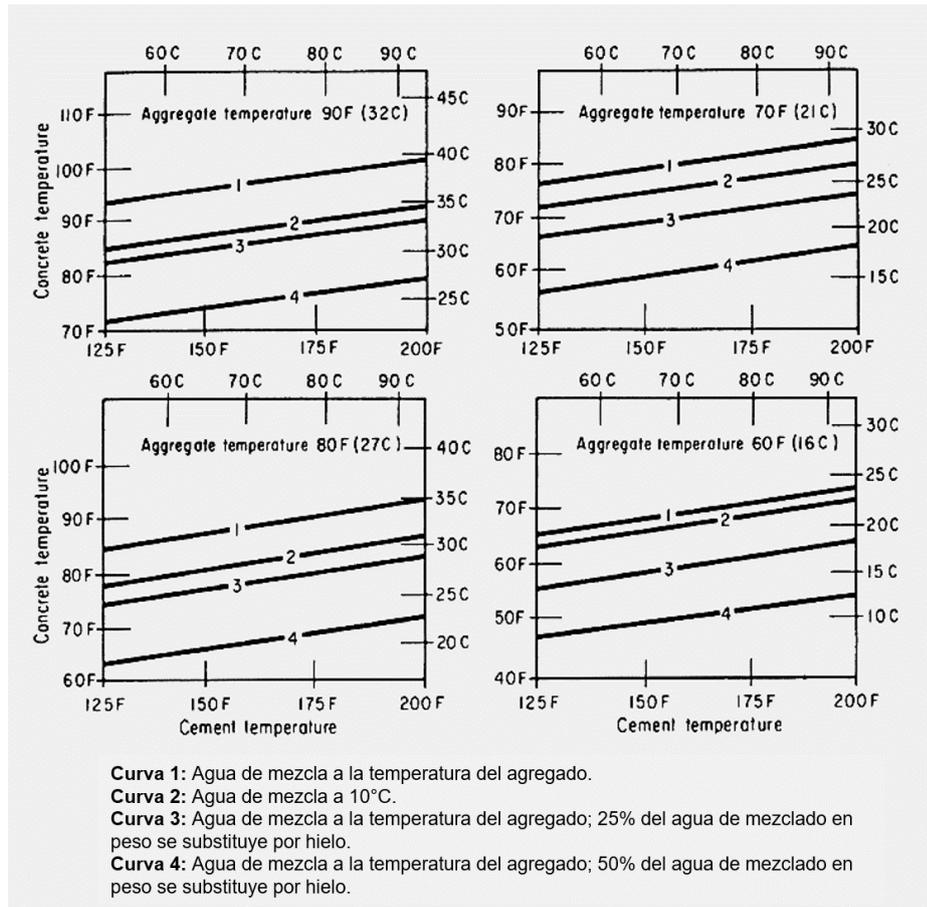
Dado que la mayor parte del hormigón se encuentra constituida por los agregados, la reducción de temperatura en estos provoca una mayor reducción en la temperatura del hormigón. Debido a esto, deben emplearse todos los medios necesarios para mantener los áridos lo más frescos posible. Algunas opciones que se pudiesen implementar son: almacenarlos bajo sombra, aspersión y nebulización de los áridos con agua fría, recubrir los silos y contenedores con pinturas que reflejen el calor para evitar una mayor absorción de este, el paso de agua a través de una torre de enfriamiento evaporativo, entre otros (ACI Committee 305, 2010).

Ante lo mencionado previamente, cabe recalcar que al adicionarle agua a los agregados se deberán llevar a cabo las respectivas pruebas de humedad a estos, para que se encuentren dentro de los rangos adecuados.

En la figura 18 se puede observar cómo influye la temperatura de los elementos que conforman el hormigón sobre la temperatura del mismo.

Figura 18

Influencia de la temperatura de los ingredientes del hormigón.



Adaptado de:(ACI Committee 305, 2010, p. 15)

Así mismo, ACI 305R-10 (2010) también sugiere pintar de blanco las superficies de los mezcladores, para así minimizar la ganancia de calor solar. Esto surge bajo la premisa de en un tiempo de entrega de 1 hora en un día caluroso y soleado, un mezclador blanco se encontraría 1°C más frío que uno de color negro o rojo. Adicionalmente, este aumentará la temperatura del hormigón entre 0.3 y 0.5 °C menos que uno de color amarillo o rojo.

2.19 Métodos de enfriamiento del hormigón propuestos por ACI 305R

2.19.1 Enfriamiento con agua fría de mezcla

De acuerdo con ACI 305R-10 (2010) el hormigón puede enfriarse de manera moderada al utilizar agua de mezclado refrigerada, la máxima reducción de temperatura que se puede alcanzar con esta alternativa es de

aproximadamente 6°C. La cantidad de agua refrigerada ni puede superar a la de amasado, puesto que esta depende de la humedad de los áridos y las proporciones de la mezcla.

2.19.2 Enfriamiento con nitrógeno líquido del agua de mezcla

El agua de mezcla puede enfriarse rápidamente al implementar la inyección de nitrógeno líquido en un tanque de retención aislado. Este sistema permite que se produzca un enfriamiento de hasta 11°C, pero se debe ajustar la proporción de hielo y agua en la mezcla para producir la temperatura deseada en el hormigón (ACI Committee 305, 2010).

2.19.3 Enfriamiento del hormigón con hielo

El hormigón puede enfriarse al utilizar hielo para substituir una parte del agua de mezclado. El hielo empleado puede ser en bloque, triturado o escamas. La cantidad de enfriamiento de este está limitada por la cantidad de agua de amasado disponible para la substitución del hielo. La máxima reducción de la temperatura que se puede alcanzar es de 11°C. El hielo debe pesarse para una correcta dosificación (ACI Committee 305, 2010).

Un obstáculo importante para el uso de hielo en muchas zonas es el suministro insuficiente, por lo cual como alternativa se puede instalar una planta de hielo y a medida que se produzca el hielo, este se pesará, triturará y transportará a la mezcladora.

2.19.4 Enfriamiento del hormigón mezclado con nitrógeno líquido

Esta opción tiene similitud con una de las opciones previamente mencionadas, pero este se aplica directamente en la mezcla de hormigón recién preparada.

ACI 305R-10 (2010) menciona que el límite inferior práctico de la temperatura del hormigón se alcanza cuando el hormigón que se encuentra más cercano a la boquilla de inyección se congela. Es probable que esta situación ocurra una vez que la temperatura deseada del hormigón sea inferior a 10°C. Se ha comprobado que, ante la exposición de grandes cantidades de nitrógeno líquido, el rendimiento del hormigón no ha sido afectado.

Así mismo, indica que el sistema consiste en un recipiente que suministra el nitrógeno y una o varias estaciones de inyección, que puede ser instalado en obra para enfriar el hormigón antes de su colocación. La cantidad de nitrógeno requerida variará en función de las proporciones de la mezcla, los componentes y la cantidad de temperatura que sea requerida reducir. Puesto que 48 m³ de nitrógeno líquido reducen aproximadamente 0.5°C.

2.19.5 Enfriamiento de agregados gruesos

ACI 305R-10 (2010) presenta dos métodos para enfriar los agregados gruesos. El primero consiste en esparcir o inundar con agua fría los agregados, con esto se puede lograr una reducción de temperatura aproximadamente entre 1°C o 0.5°C y es más eficaz cuando las cantidades requeridas se encuentran contenidas en un silo o contenedor para que el enfriamiento pueda realizarse en un corto período de tiempo.

El segundo método implica soplar aire a través del árido húmedo, este flujo de aire mejora el enfriamiento por evaporación y puede disminuir la temperatura del agregado grueso en 1°C. La eficacia de este método depende de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del flujo de aire. Además, si se opta por emplear aire refrigerado, este puede disminuir la temperatura de los áridos a un nivel tan bajo como 7°C.

2.20 Hormigón en Estado Fresco

2.20.1 Densidad del concreto fresco

La densidad o también conocida como masa unitaria, puede determinarse al emplear la norma ASTM C 138-09. De forma teórica, la densidad se obtiene de la suma de las masas de todos los ingredientes de un lote de hormigón, dividida para el volumen llenado por el hormigón. Sin embargo, al conocerse la densidad del hormigón fresco, el rendimiento por lote puede determinarse como la masa de todos los ingredientes de un lote dividida para la densidad (Neville, 2011).

2.20.2 Mezclado

Durante el mezclado, se combinan todos los componentes empleados para la elaboración del hormigón y se forma una mezcla homogénea. La norma NTE INEN 1855-2 (2015) proporciona distintas sugerencias durante la ejecución de este proceso para hormigones preparados en obra.

En primer lugar, los ingredientes del hormigón deben ser mezclados dentro del tiempo o número de revoluciones que fueron especificados, hasta que la masa se encuentre prolijamente mezclada. Por otra parte, para el vaciado o descarga de este se deben cumplir al menor 5 de los 6 requisitos indicados en la tabla 25.

Tabla 25

Requisitos para uniformidad del hormigón.

Ensayo	Requisitos, expresado como la máxima diferencia permitida en resultados de ensayos de muestras tomadas en dos sitios en una bachada de hormigón
*Masa por m ³ , calculada en base a la condición libre del aire, en kg/m ³	16
*Contenido de aire, volumen en % del hormigón	1
*Asentamiento en mm:	
Si el asentamiento promedio es 100 mm, o menos	25
Si el asentamiento promedio está entre 100 mm y 150 mm	40
Contenido de árido grueso porción en masa de cada muestra retenida en el tamiz N.4 (4.75mm)%	6
Masa unitaria de mortero sin aire, basada en el promedio de todas las muestras comparables ensayadas %	1.6
Resistencia a la compresión promedio a los 7 días, para cada muestra, basada en la resistencia promedio de todos los especímenes comparables ensayados, %	7.5

Adaptado de:(NTE INEN, 2015, p. 19)

Así mismo, menciona que para transportar el hormigón elaborado se puede emplear cualquier medio, ya sea: mecánico, carretilla o bomba. Pero, para al momento de seleccionar el transporte, se debe evitar que en este se produzca segregación y pérdida de uniformidad.

En caso de que no se hubiesen llevado a cabo ensayos para determinar el tiempo de duración del proceso de mezclado, la norma indica que para 1m³ o menos, el tiempo no debe ser menor a 90 segundos. En

caso de que se tuviese que mezclar un volumen mayor, se deben incrementar 20 segundos por cada metro cúbico.

Por otra parte, en cuanto al tiempo de vaciado, este debe realizarse en un tiempo de 30 minutos o antes, puesto que la mezcla puede perder la trabajabilidad especificada. Este tiempo de descarga puede verse modificado si se emplean aditivos en la mezcla.

Para el caso del hormigón premezclado, la norma NTE INEN 1855-1 (2016) menciona que los camiones que transportan la mezcla deben contar con dispositivos que cuenten el número de revoluciones que realice el tambor para así evitar que la mezcla sea descargada hasta que haya culminado el tiempo especificado.

El hormigón puede ser mezclado en: la central mezcladora, la mezcla empieza en la planta fija y culmina en el tránsito, mixers. Cualquiera de estas opciones debe ser operadas al establecer los límites de capacidad y la velocidad de rotación de cada equipo.

2.20.3 Trabajabilidad y consistencia del hormigón

La trabajabilidad es la propiedad física que posee el hormigón fresco que determina la facilidad con la que puede ser mezclado, vaciado y compactado. Los hormigones húmedos son más trabajables que los secos, pero, aunque posean la misma consistencia su trabajabilidad puede variar. Por su parte, la consistencia se refiere a la firmeza que posee una sustancia y la facilidad con que esta fluye (Neville, 2011).

La trabajabilidad es vital en el acabado del producto, puesto que esta condiciona que sea posible compactar la máxima densidad con una cantidad de trabajo razonable. La necesidad de compactación se hace evidente de la relación entre el grado de compactación y la resistencia resultante, puesto que la presencia de vacíos en el hormigón puede reducir la resistencia de este hasta en un 30% (Neville, 2011).

Los vacíos que se presentan en el hormigón, son producto de burbujas de aire que quedaron atrapadas o los espacios resultantes por la eliminación de exceso de agua. El volumen que estos posean dependerá de

la relación agua/cemento de la mezcla o de los vacíos dentro del material granular suelto. Debido a esto, se deberá escoger el método de compactación ideal que considere el contenido óptimo de agua que posee la mezcla y así permitir obtener la mayor densidad del hormigón (Neville, 2011).

2.20.4 Segregación y sangrado

De acuerdo con Neville (2011) se puede definir a la segregación como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea, de manera que su distribución ya no es uniforme. En el caso del hormigón, las diferencias en el tamaño de las partículas y la gravedad específica de los componentes de la mezcla, son las principales causas de la segregación. Esto se puede controlar al escoger una granulometría adecuada y con una manipulación cuidadosa.

La segregación puede manifestarse a través de dos formas. En la primera se observa separación de las partículas más gruesas puesto que se asientan más que las finas. Por otra parte, la segunda se manifiesta en mezclas húmedas y ocurre por la separación de la lechada de la mezcla.

En algunos tipos de gradación, puede producirse el primer tipo de segregación si la mezcla está demasiado seca, pero al agregársele agua es posible mejorar la cohesión de esta. Sin embargo, cuando la mezcla se vuelve muy húmeda, se generaría el segundo tipo de segregación.

Por otra parte, el sangrado ocurre mientras se desarrolla una lámina de agua en la superficie del hormigón recientemente vaciado. Este es producido por el asentamiento de las partículas de cemento y agregados mientras que el agua presente en la mezcla sube hacia la superficie. La presencia del sangrado no disminuye la calidad del hormigón, sin embargo, si se produce de forma excesiva la capa superficial se torna débil y con reducida durabilidad (Kosmatka et al., 2004).

2.20.5 Calor de hidratación

Durante la hidratación de los compuestos del cemento se liberan hasta 120 cal/g. Debido a que el hormigón posee una baja conductividad

térmica, este actúa como aislante, por lo cual en su interior el proceso de hidratación puede dar lugar a un gran aumento de la temperatura. Mientras que, al exterior de este se produce pérdida de calor, lo que se establece la aparición de una fuerte gradiente de temperatura (Neville, 2011).

Una vez se ha enfriado el interior del hormigón, en este se pueden producir graves fisuras, las cuales pueden verse influenciadas por la fluencia del hormigón. Sin embargo, en el caso de climas fríos, el calor producido por la hidratación del cemento puede ser ventajoso debido a que este evita que se congele el agua que se encuentra en los capilares del hormigón fresco.

Neville (2011) define el calor de hidratación como la cantidad de calor desprendido tras llevarse a cabo el proceso de hidratación completa a determinada temperatura, el cual se mide en Joules por gramo de cemento no hidratado. El procedimiento para determinar el calor de hidratación consiste en medir el calor de solución del cemento no hidratado y del hidratado, al emplear una mezcla de ácidos nítrico y fluorhídrico, la diferencia entre estos dos representa el calor de hidratación.

Un factor influyente durante el proceso de hidratación es la temperatura, puesto que esta perjudica la velocidad con que se desarrollará el calor. Un ejemplo de este efecto se puede observar en la tabla 26, en el cual se ha desarrollado el calor por 72 horas a distintas temperaturas.

Tabla 26

Calor de hidratación desarrollado tras 72 horas a diferentes temperaturas.

Tipo de Cemento	Desarrollo del calor de hidratación a:							
	4 °C		24 °C		32 °C		41 °C	
	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g
I	154	36.9	285	68	309	73.9	335	80
II	221	52.9	348	83.2	357	85.3	390	93.2
III	108	25.7	195	46.6	192	45.8	241	51.2

Adaptado de:(Neville, 2011, p. 170)

Por practicidad, resulta de mayor relevancia conocer la tasa de evolución del calor, puesto que, si se produce el mismo calor total durante un tiempo prolongado este puede disiparse en mayor medida y como consecuencia se presenta un menor aumento de temperatura. La tasa de

evolución de calor puede medirse al emplear un calorímetro adiabático y las curvas de tiempo-temperatura obtenidas en condiciones adiabáticas (Neville, 2011).

Por otra parte, en los cementos Portland, ha sido observado que aproximadamente la mitad del calor total se desarrolla entre 1 y 3 días, un 75% a los 7 días y entre 83% al 91% en 6 meses. Debido a esto se ha determinado que el valor real del calor de hidratación depende de la composición química que posea el cemento, por lo que se puede calcular a partir de la suma de los calores de hidratación de los compuestos individuales (Neville, 2011).

En la tabla 27 se pueden observar los valores típicos del calor de hidratación que poseen los compuestos.

Tabla 27

Calor de hidratación de los compuestos.

Compuestos	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

Adaptado de:(Neville, 2011, p. 173)

Los compuestos que se hidratan más rápido son los C₃A y C₃S, al disminuir la proporción de estos se puede reducir la elevada tasa de evolución del calor en edades tempranas del hormigón.

Por otra parte, la finura del cemento también influye en la tasa de desarrollo de calor, pues al aumentar la finura se aceleran las reacciones de hidratación. Así mismo, la cantidad de cemento que contiene la mezcla afecta el desarrollo total del calor de la mezcla, pero se puede variar este para ayudar a controlar el desarrollo del calor (Neville, 2011).

2.20.6 Ensayo de asentamiento con el Cono de Abrams

Para conocer el revenimiento o asentamiento que posee la mezcla de hormigón, el ensayo más común a ejecutar es el Cono de Abrams. El equipo a emplear es un molde cónico de metal de 30 cm de alto, con una base de 20 cm de diámetro y en la parte superior 10 cm de diámetro. La varilla de metal para realizar el varillado posee un diámetro de 1.6 cm y una longitud de 60 cm (Kosmatka et al., 2004).

De acuerdo a Kosmatka et al. (2004) el cono húmedo debe ser colocado de forma vertical sobre una superficie plana, firme y que no absorba. Luego, este debe llenarse en tres capas aproximadamente iguales. La primera debe poseer una profundidad de 7 cm, la segunda 16 cm y la última debe colmar el cono. A medida que se aplica cada capa se deben aplicar 25 golpes, finalizado esto se debe enrasar el cono y levantarlo lentamente unos 30 cm durante 5 ± 2 segundos. Mientras la mezcla se hunde, se debe voltear el cono y colocarlo cerca de este.

Para conocer la cantidad asentada, se emplea una regla para medir desde la parte superior del molde hasta donde se encuentra desplazado el hormigón asentado. Si el revenimiento es elevado, el hormigón es más fluido. En la figura 19 se puede observar la diferencia en el revenimiento de la mezcla de hormigón y cómo se lleva a cabo la medición de este.

Figura 19

Ensayo de revenimiento para la consistencia del concreto.



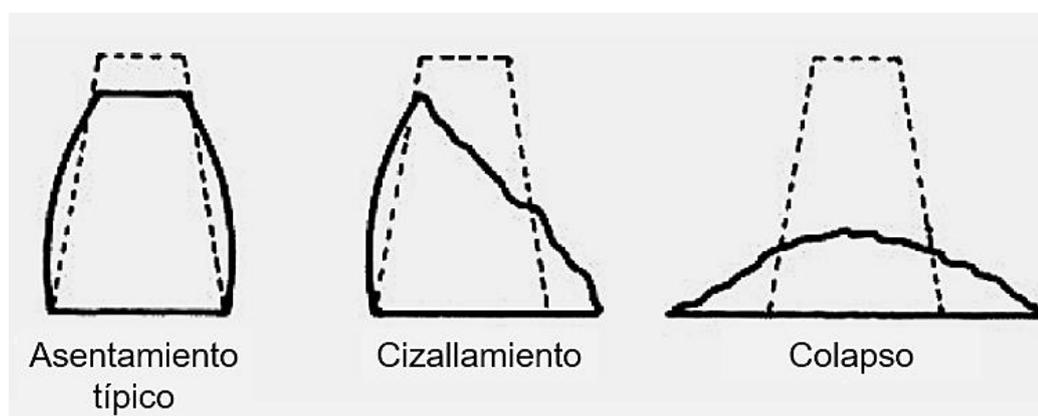
Nota. a) Se observa una mezcla con bajo revenimiento b) Se observa un mayor revenimiento en la mezcla de hormigón. Adaptado de: (Kosmatka et al., 2004, p. 330)

Si en lugar de asentarse uniformemente, una parte del cono se desplaza en un plano inclinado, se puede considerar que ha ocurrido un desprendimiento por cizallamiento por lo cual se debe repetir la prueba. Si persiste este tipo de asentamiento, implicaría que la mezcla posee falta de cohesión. Por otra parte, en una mezcla pobre con tendencia a la dureza, su asentamiento normal puede convertirse en uno de cizallamiento o de colapso (Neville, 2011).

En la figura 20 se presentan los tipos de asentamiento que puede presentar la mezcla de hormigón durante el ensayo con el Cono de Abrams.

Figura 20

Asentamiento: típico, cizallamiento y colapso.



Adaptado de:(Neville, 2011, p. 645)

En la tabla 28 se pueden observar los valores empleados para clasificar la trabajabilidad que poseerá la mezcla de acuerdo al asentamiento presentado durante la ejecución del ensayo con el Cono de Abrams.

Tabla 28

Descripción de la trabajabilidad y magnitud de asentamiento.

Descripción de trabajabilidad	Asentamiento (mm)
Nulo	0
Muy bajo	5 a 10
Bajo	15 a 30
Mediano	35 a 75
Alto	80 a 155
Muy alto	160 hasta el colapso

Adaptado de:(Neville, 2011, p. 647)

Por su parte, la norma NTE INEN presenta las tolerancias en el asentamiento nominal de la mezcla, las cuales pueden ser observadas en la tabla 29. Cabe mencionar que estas aplican tanto para el hormigón premezclado como para el preparado en obra.

Tabla 29

Tolerancias en el asentamiento nominal de la mezcla.

Asentamiento Especificado	Tolerancias
50 mm o menos	± 15 mm
Entre 50 mm y 100 mm	± 25 mm
Mayor que 100 mm	± 40 mm

Adaptado de:(NTE INEN, 2015, p. 6)

2.20.7 Pérdida de trabajabilidad y factores que la producen

De acuerdo con Neville (2011) con el transcurso del tiempo, el hormigón recién mezclado inicia su endurecimiento, esto ocurre porque parte del agua de la mezcla es absorbida mientras que otra se pierde por evaporación. Esto conlleva a una disminución en la trabajabilidad de la mezcla, la cual dependerá de distintos factores, estos pueden ser:

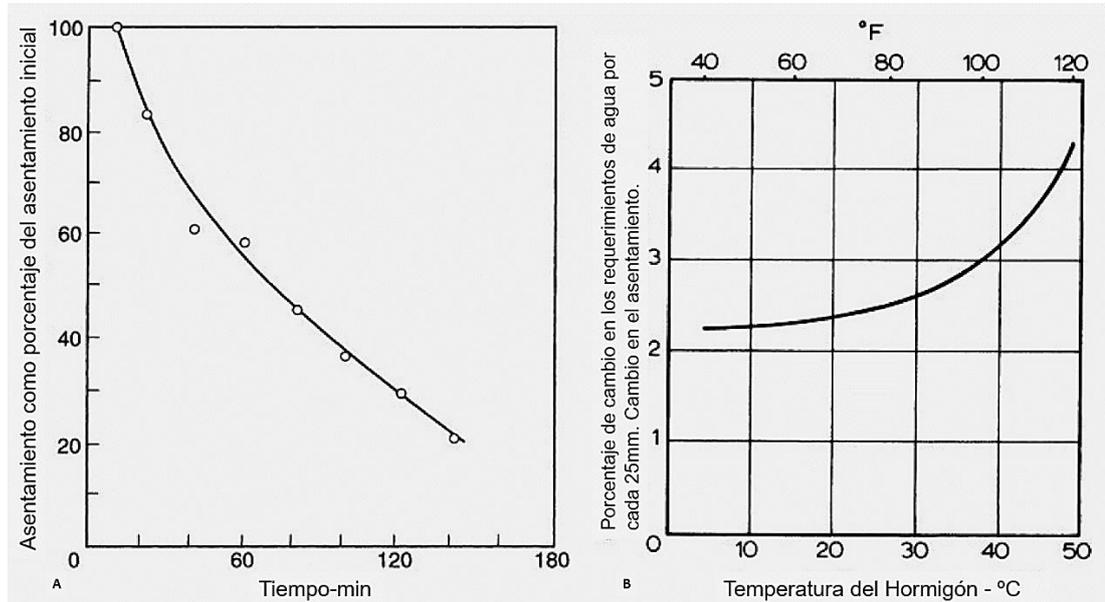
- Mayor trabajabilidad inicial provocará mayor pérdida de asentamiento.
- Las mezclas ricas presentan mayor tasa de pérdida de asentamiento.
- Las propiedades del cemento: la tasa es mayor cuando el contenido de álcalis es alto y el de sulfatos es muy bajo.
- Estado de humedad del árido: si este es muy seco, absorberá mayor cantidad de agua.
- Los aditivos reductores de agua: aunque retrasan la rigidez inicial del hormigón, suelen aumentar la pérdida de asentamiento con el tiempo.
- La temperatura ambiente: en un día caluroso, el contenido de agua de la mezcla tendría que aumentar para mantener la trabajabilidad temprana constante.

En la figura 21 a) se puede observar la relación asentamiento-tiempo para una mezcla de hormigón recién elaborada, mientras que en b) se

muestra que a medida que aumenta la temperatura del hormigón aumenta el porcentaje de agua requerida para que se produzca un cambio de asentamiento.

Figura 21

Pérdida de asentamiento y aumento en la cantidad de agua requerida.



Nota. a)La gráfica indica la pérdida de asentamiento con el tiempo b)La gráfica indica la influencia de la temperatura en la cantidad de agua requerida para cambiar el asentamiento. Adaptado de:(Neville, 2011, pp. 682-685)

2.21 Hormigón Endurecido

2.21.1 Curado del hormigón

Para obtener un buen hormigón, la colocación de una mezcla adecuada debe ir seguida de un curado en un entorno apropiado durante las primeras fases de endurecimiento. El curado es un proceso empleado para favorecer la hidratación del cemento, mediante este se controla la temperatura y el movimiento de la humedad desde y hacia el hormigón, teniendo como objetivo mantenerlo saturado (Neville, 2011).

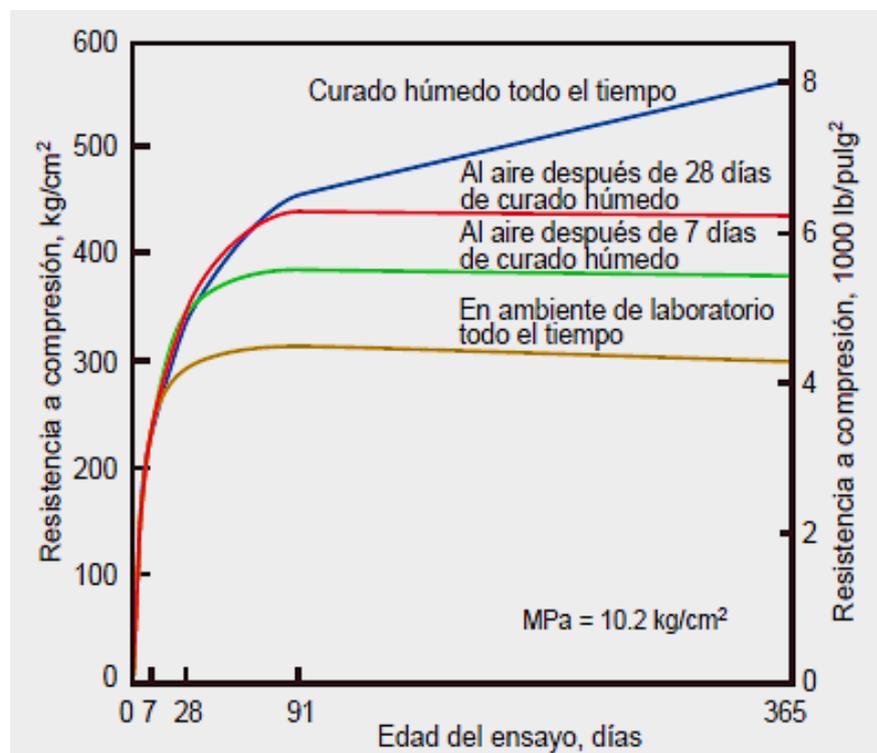
El hormigón presenta aumento en su resistencia a medida que incrementa su edad, pero si la humedad relativa dentro del hormigón disminuye hasta acercarse al 80% o la temperatura del hormigón baja menos de cero, el proceso de hidratación se interrumpe al igual que la ganancia de resistencia. Cuando se vuelve a saturar el hormigón después de un período de secado, el proceso de hidratación inicia nuevamente y

conlleva a que la resistencia vuelva a aumentar. Pero, es preferible que el proceso de curado húmedo se lleve a cabo de forma permanente (Kosmatka et al., 2004).

En la figura 22 se presentan distintas curvas con diferentes procesos de curado y como estos influyen en el desarrollo de resistencia del hormigón.

Figura 22

Efecto del tiempo de curado húmedo sobre el desarrollo de la resistencia del concreto.



Adaptado de:(Kosmatka et al., 2004, p. 261)

2.21.2 Métodos de curado del hormigón

El realizar un curado adecuado beneficia a las propiedades del hormigón, estas pueden variar de acuerdo al método empleado. Según Kosmatka et al. (2004):

El método de curado más eficiente depende de los materiales y métodos de construcción empleados y de la intención de uso del concreto endurecido. En la mayoría de las obras, el curado normalmente envuelve la aplicación de compuestos de curado o la cobertura del concreto fresco con hojas impermeables o yute húmeda. En algunos casos, tales como en el clima caluroso y en el clima frío, se

necesitan cuidados especiales y el uso de otras precauciones. (p. 262)

De acuerdo con Neville (2011) existen dos métodos principales para curar el hormigón, estos son: el curado húmedo y el curado con membrana. En el primero se le proporciona agua al hormigón, para lo cual su superficie debe estar en continuo contacto con esta durante un período de tiempo determinado. Esto puede lograrse mediante inundación permanente, al cubrir el hormigón con arena húmeda, aserrín o paja. En el caso de superficies inclinadas o verticales, se pueden emplear mangueras de remojo.

En cuanto a la calidad de agua a utilizar, debe ser idealmente la misma que fue empleada en la mezcla. Se debe evitar emplear agua de mar porque pudiese causar corrosión en la armadura. Así mismo que no contenga hierro o materias orgánicas, pues estas pudiesen provocar manchas.

Por otra parte, en el segundo método se busca prevenir la pérdida de agua de la superficie del hormigón, al evitar que el agua externa penetre en él. En este se cubre la superficie del hormigón con láminas de polietileno superpuestas, colocadas de forma recta con papel reforzado. Estas láminas pueden ser de color negro o blancas, estas últimas poseen como ventaja la capacidad de reflejar la radiación solar en climas cálidos.

2.21.3 Resistencia del hormigón endurecido

Según Kosmatka et al. (2004), “La resistencia a compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto” (p. 8). Esta usualmente se representa en kg/cm^2 , la edad más representativa es a los 28 días y el símbolo designado para su representación es $f'c$.

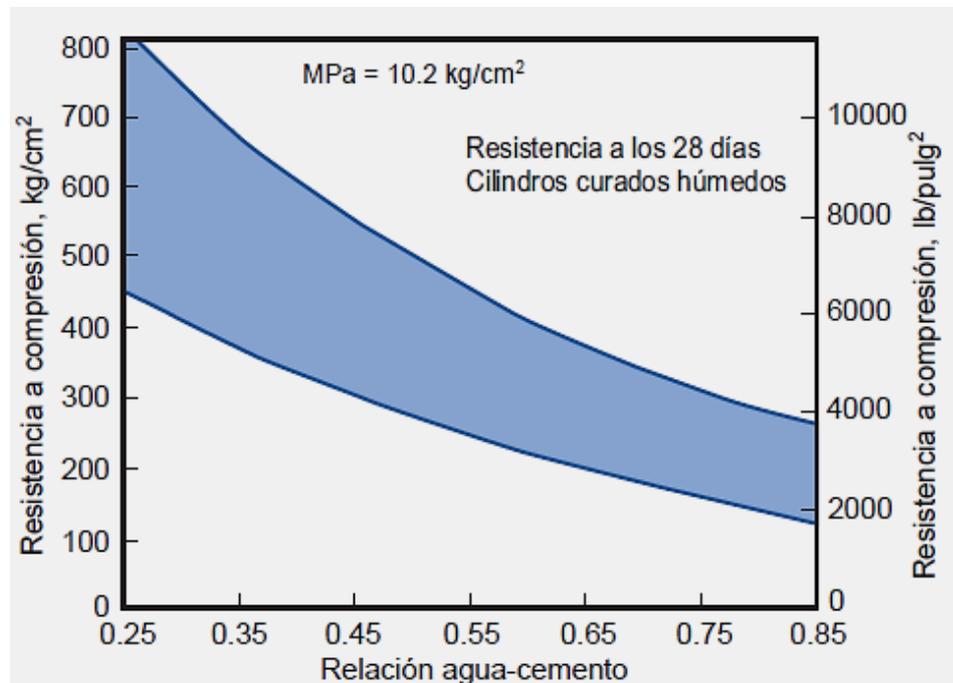
Los ensayos de resistencia suelen realizarse a los 7, 14 y 28 días. Se estima que un 75% de la resistencia ha sido desarrollada a los 7 días, mientras que a los 56 y 90 días se esperan resistencias en un 10% y 15% mayores a la obtenida a los 28 días. La resistencia lograda por el concreto se encuentra en función de varios factores como: la relación agua/cemento,

el método de curado empleado, las condiciones ambientales, cómo se llevó a cabo el proceso de hidratación y la edad que tenga el hormigón (Kosmatka et al., 2004).

En la figura 23 se puede observar cómo la relación agua-cemento influye en las resistencias obtenidas a los 28 días de edad de cilindros curados por método húmedo.

Figura 23

Resistencias probables de acuerdo a la relación agua-cemento empleando cemento portland.



Nota. El estudio se realizó entre 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999. Adaptado de: (Kosmatka et al., 2004, p. 8)

De acuerdo con Kosmatka et al. (2004) la resistencia a la flexión del hormigón suele ser más compleja de obtener, por lo cual se emplea una relación establecida, en la que esta es 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión obtenida en kg/cm^2 .

En el país, la norma establece que para llevarse a cabo los ensayos a compresión deben por lo menos elaborarse 2 especímenes de ensayo. La resistencia se obtendrá al promediar los resultados obtenidos de los especímenes ensayados (NTE INEN, 2015).

Así mismo, la norma NTE INEN presenta una tabla con los valores de resistencia requerida para ensayos de compresión, los cuales se pueden visualizar en la tabla 30. Estos aplican tanto para hormigones elaborados en obra como para los premezclados.

Tabla 30

Resistencia especificada y resistencia promedio requerida a compresión.

Resistencia Especificada (f'c)	Resistencia Promedio Requerida (f'cr)
Menor de 21 MPa	f'c + 7
Entre 21 y 35 MPa	f'c + 8.5
Mayor de 35 MPa	f'c + 10

Adaptado de:(NTE INEN, 2015, p. 13)

De la misma forma, la norma proporciona las resistencias requeridas para ensayos a tracción por flexión, estos se pueden observar en la tabla 31. Estos aplican tanto para hormigones elaborados en obra como para los premezclados.

Tabla 31

Resistencia especificada y resistencia promedio requerida a tracción por flexión.

Resistencia Especificada (MR)	Resistencia Promedio Requerida (MRr)
Menor de 2.5 MPa	MR + 0.92
Entre 2.5 y 4 MPa	MR + 1.11
Mayor de 4 MPa	MR + 1.31

Adaptado de:(NTE INEN, 2015, p. 14)

3. CAPÍTULO II

3.1 Desarrollo de la Metodología

Para el desarrollo de la parte práctica del presente trabajo se utilizaron las instalaciones del laboratorio de suelos y hormigón Construladesa. En la cual se realizaron los ensayos de los materiales, elaboración del diseño para los hormigones de 200 kg/cm² y 300 kg/cm², los respectivos ensayos de hormigón para estado fresco y endurecido, y el análisis de resultados.

3.2 Materiales

3.2.1 Cemento

El cemento empleado es el tipo GU producido por Holcim, este cumple con los parámetros establecidos por la norma NTE INEN 2380 y posee una densidad de 2850 kg/cm³.

3.2.2 Agregado fino

El agregado fino fue obtenido del Río Chimbo en el sitio "Soledad", el proceso de extracción se puede observar en la figura 24.

Figura 24

Proceso de extracción del agregado fino.



Fuente: Autora

3.2.3 Agregado grueso

El agregado grueso a emplear es piedra chispa de basalto, este proviene de la cantera de Licoso ubicada en el Km 25 vía a Daule como se puede observar en la figura 25 .

Figura 25

Obtención del basalto en la cantera de Licoso.



Fuente: Autora

3.2.4 Aditivo

El aditivo empleado es el superplastificante SF-106 de la marca Aditec, como se puede observar en la figura 26. Este además es un reductor de agua de alto rango, por lo cual es clasificado como tipo F. Cumple con los requerimientos establecidos por la norma ASTM C - 494.

Figura 26

Aditivo líquido superplastificante de la marca Aditec.



Fuente: Autora

El fabricante sugiere adicionarlo al hormigón con la última parte del agua de amasado y extender por 5 minutos más el proceso de mezcla. Así mismo, recomienda que el producto no debe añadirse de forma directa al cemento o agregados.

En cuanto a la cantidad de aditivo a utilizar, la ficha técnica señala que se deben emplear entre 400cc a 800cc por cada saco de cemento de 50 kg. Para el proyecto se empleó un valor promedio de 600cc.

3.2.5 Hielo

El hielo empleado fue adquirido en la fábrica Hieblosa, la presentación de este fue en forma de escamas como se puede observar en la figura 27. El saco obtenido poseía una capacidad de 25 kg y fue almacenado en una hielera para que mantenga sus propiedades.

Figura 27

Hielo en forma de escamas empleado en la elaboración de la mezcla.



Fuente: Autora

3.3 Caracterización de los agregados

3.3.1 Agregado Fino

El agregado fino fue sometido a distintos ensayos, los cuales se pueden observar en detalle en la tabla 32.

Tabla 32

Ensayos realizados al agregado fino.

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
Prueba al desgaste por medio de Sulfato de Magnesio	ASTM C 88/ NORMA INEN 863

Fuente: Autora

Para que se seque de manera natural, el material fue extendido en el suelo, como se puede observar en la figura 28.

Figura 28

Proceso de secado natural del agregado fino.



Fuente: Autora

Granulometría del agregado fino

Este método fue realizado en base a la norma ASTM C 136 y tiene como finalidad determinar la gradación de los materiales a emplear, en este caso el agregado fino. Para este se emplearon tamices con distintas aberturas, estos se colocaron de manera decreciente, se de iniciar por el tamiz 3/8" y finalizar con el No. 100.

Después de agitar los tamices con el agregado fino en su interior, fueron pesadas las cantidades retenidas en cada uno de ellos. En la tabla 33

se pueden observar los pesos retenidos por cada tamiz, los retenidos parciales, retenidos acumulados y pasantes acumulados, estos últimos fueron comparados con las especificaciones establecidas por la norma ASTM C 33 para los agregados del hormigón.

A partir de los pasantes acumulados se obtuvo la gráfica de la curva granulométrica presentada en la figura 29, la cual se encuentra dentro de los límites establecidos.

Tabla 33

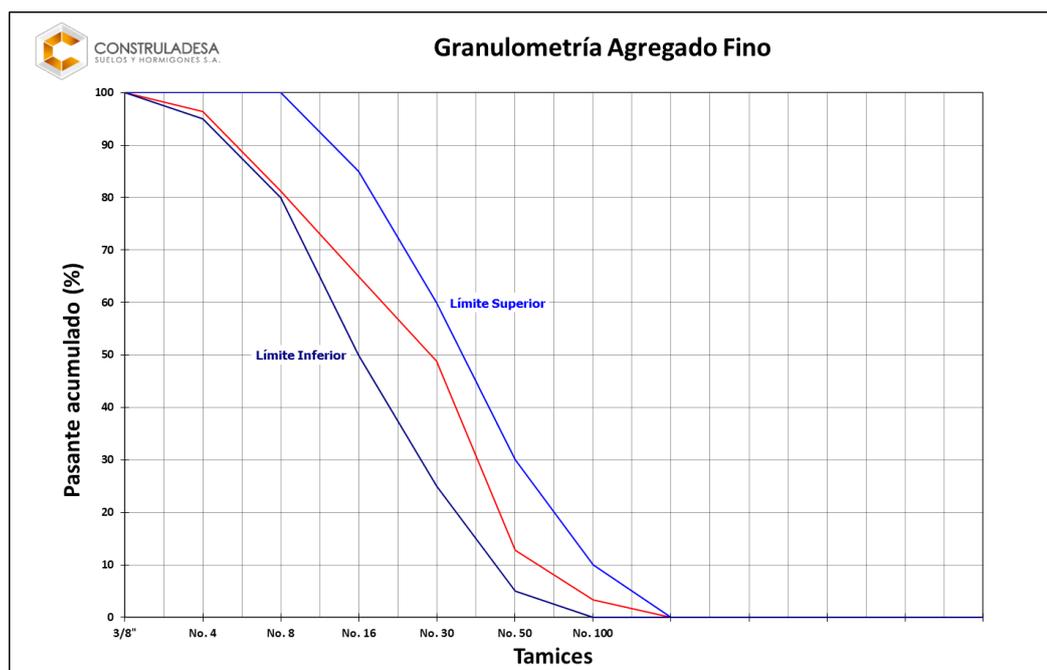
Ensayo de clasificación del agregado fino para hormigón.

Tamiz INEN (ASTM) N°	Pesos retenidos mm	% Retenidos Parciales	% Retenidos Acumulados	% Pasantes Acumulados	Especificaciones A.S.T.M. C 33
3/8"	9.5	0.00	0.00	100.00	100
No. 4	4.75	181.95	3.64	96.36	95 a 100
No. 8	2.36	755.57	15.12	81.25	80 a 100
No. 16	1.18	811.76	16.24	65.01	50 a 85
No. 30	0.60	808.26	16.17	48.85	25 a 60
No. 50	0.30	1805.46	36.11	12.74	5 a 30
No. 100	0.15	468.86	9.38	3.36	0 a 10
FONDO		167.95	3.36	100.00	0.00
ε =	5,000.00	mo :	2.92		

Fuente: Autora

Figura 29

Curva Granulométrica del agregado fino.



Fuente: Autora

Módulo de Finura del agregado fino

El módulo de finura es un índice que entre mayor es su valor, mayor es el grosor que posee el agregado. Este debe ser mayor que 2.3 y menor a 3.1, en caso de que este valor sea excedido, el material debe ser rechazado a menos que se realicen los ajustes pertinentes (Kosmatka et al., 2004).

De acuerdo a la norma ASTM C 125 (2013), el módulo de finura que posee el agregado fino se obtiene al sumar los porcentajes acumulados retenidos de los tamices empleados y dividiéndolos para 100, como se puede observar en la ecuación 1:

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

(1)

$$MF = \frac{3.64 + 18.75 + 34.99 + 51.15 + 87.26 + 96.64}{100} = 2.92$$

Como resultado se obtuvo un módulo de finura de 2.92 para el agregado fino proveniente del Río Chimbo, el cual se encuentra dentro de los límites establecidos.

Gravedad específica de masa saturada con superficie seca del agregado fino

Este ensayo fue llevado a cabo bajo la norma ASTM C 128, en el cual se tomó aproximadamente una muestra de 1000 gr de agregado fino, esta fue saturada durante 24 horas y luego fue extendida sobre el suelo para que se seque. Luego, la muestra fue introducida dentro del cono hasta llenarlo y con el pisón se aplicaron 25 pisonadas.

El cono fue retirado de manera vertical y la muestra mantuvo ligeramente su forma como se puede observar en la figura 30. Una vez que la muestra se desmoronó ligeramente y se comprobó que se encuentra superficialmente seca, se tomaron 500 gr de esta. Como siguiente paso se pesó el picnómetro con agua y finalmente a este se le agregó la muestra de agregado fino.

Figura 30

Ensayo de cono al agregado fino para conocer la gravedad específica.



Fuente: Autora

Para obtener la gravedad específica del agregado fino se empleó la ecuación 2, a continuación, se presentan los respectivos cálculos:

Datos:

A = Peso de la muestra (SSS) = 500 gr

B = Peso picnómetro + agua = 781.90 gr

C = Peso picnómetro + agua + arena = 1095.70 gr

$$G. \text{ Específica} = \frac{A}{B+A-C} * 1000$$

(2)

$$G. \text{ Específica} = \frac{500.00}{781.9 + 500 - 1095.7} * 1000 = 2685 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Porcentaje de Absorción del agregado fino

El presente ensayo tiene como finalidad determinar en qué porcentaje aumenta la masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de sus partículas (ASTM, 2001).

Para determinar el porcentaje de absorción del agregado fino se empleó como referencia la norma ASTM C 128. En primer lugar, la muestra fue sumergida en agua durante 24 horas como se puede observar en la figura 31. Luego, esta fue colocada en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo necesario para eliminar la humedad y secar la muestra por completo.

Figura 31

Muestra de agregado fino sumergida en agua.



Fuente: Autora

La muestra fue pesada una vez finalizado el proceso de secado en el horno. Para conocer numéricamente el porcentaje de absorción que posee esta, se empleó la ecuación 3. El respectivo cálculo numérico se muestra a continuación:

Datos:

A = Peso de la muestra (SSS) = 500 gr

D = Peso seco en la estufa = 493.3 gr

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

(3)

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500.00 - 493.3}{493.3} * 100 = 1.36\%$$

Peso Volumétrico Suelto (P.V.S) del agregado fino

El ensayo de peso volumétrico suelto tiene como finalidad conocer la masa de una unidad de volumen del agregado a analizar, en este se considera el volumen que poseen las partículas individuales y el volumen de los huecos que se encuentran entre estas. Esta se expresa en kg/m^3 y es aplicable en agregados que no excedan los 125 mm de tamaño máximo nominal (ASTM, 2003).

El procedimiento fue realizado acorde a la norma ASTM C 29, para este se pesó el recipiente a emplear, luego se llenó con la muestra a analizar y se la enrasó. Una vez realizado esto, se pesó el recipiente con la muestra, como se puede observar en la figura 32.

Figura 32

Peso del recipiente con la muestra de agregado fino.



Fuente: Autora

Para conocer el peso volumétrico suelto del agregado fino, se empleó la ecuación 4. Los respectivos cálculos se muestran a continuación:

Datos:

A = Peso del recipiente = 6057.00 gr

B = Peso del recipiente + la muestra = 9411.00 gr

C = Volumen del recipiente = 0.002124 m³

$$P.V.S = \frac{B-A}{C} \div 1000 \quad (4)$$

$$P.V.S = \frac{9411.00 - 6057.00}{0.002124} \div 1000 = 1579 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Prueba al desgaste del agregado fino por medio de Sulfato de Magnesio

El ensayo de desgaste tiene como finalidad estimar, mediante soluciones saturadas, el desempeño que tendrá el agregado a la acción de la intemperie (NTE INEN, 2011d).

Para el presente proyecto se empleó como solución el Sulfato de Magnesio y el procedimiento fue realizado acorde la norma NTE INEN 863, la cual es similar a la norma ASTM C 88.

Se partió de la granulometría que poseía el agregado fino, la norma sugiere que se deben tomar 100 gr de muestra retenida por cada tamiz, los empleados fueron los N°8, N°16, N°30 y N°50.

Las muestras fueron colocadas en distintas bandejas, como se puede observar en la figura 33, donde se encuentran sumergidas en la solución de Sulfato de Magnesio. Estas permanecieron sumergidas por un período de 18 horas, luego fue retirada la solución como se observa en la figura 34.

Figura 33

Muestras de agregado fino sumergidas en solución de Sulfato de Magnesio.



Fuente: Autora

Figura 34

Remoción de la solución de Sulfato de Magnesio.



Fuente: Autora

Posteriormente se colocaron en la estufa a una temperatura de 110 °C ± 5 °C. Una vez se secó completamente la muestra, se la dejó enfriar y se le volvió a colocar la solución de Sulfato de Magnesio. Este procedimiento se realizó por 5 días consecutivos.

Una vez finalizado el ensayo, se pesó la muestra para conocer el desgaste que ha sufrido el agregado fino, en la tabla 34 se muestra el detalle del peso antes y después del ensayo correspondiente a cada tamiz.

Tabla 34

Resultados obtenidos del ensayo de desgaste del agregado fino.

GRANULOMETRÍA	TAMIZ		GRANULOMETRÍA PESO ACUMULADO	RETENIDO PARCIAL %	PESO ANTES DEL ENSAYO gr.	PESO DESPUÉS DEL ENSAYO gr.	PÉRDIDA REAL %	PÉRDIDA CORREGIDA %	
	PASA	RETIENE							
3/8"	0.00	3/8"							
Nº 4	52.00	3/8"	Nº 4	52.00	3.64				
Nº 8	216.00	Nº 4	Nº 8	268.00	15.12	100.00	97.80	2.20	0.33
Nº 16	232.00	Nº 8	Nº 16	500.00	16.24	100.00	96.90	3.10	0.50
Nº 30	231.00	Nº 16	Nº 30	731.00	16.17	100.00	96.20	3.80	0.61
Nº 50	516.00	Nº 30	Nº 50	1247.00	36.11	100.00	94.80	5.20	1.87
Nº 100	134.00	Nº 50	Nº 100	1381.00	9.38				
Fondo	48.00	Nº 100		1429.00	3.36				
Total	1,429.00	TOTAL		1429.00				Σ =	3.31



PORCENTAJE DE DESGASTE (%) :	3.31
NORMA A SEGUIR :	INEN 863
OBSERVACIONES :	CUMPLE

Fuente: Autora

Para conocer el porcentaje de pérdida real se restó el peso después del ensayo del peso antes del ensayo. Por otra parte, para obtener el porcentaje de pérdida corregida se empleó la ecuación 5.

$$\text{Pérdida corregida \%} = \frac{\text{Retenido parcial} \times \text{Pérdida real}}{100} \quad (5)$$

3.3.2 Agregado Grueso

El agregado grueso fue sometido a distintos ensayos, los cuales se pueden observar en detalle en la tabla 35.

Tabla 35

Ensayos realizados al agregado grueso.

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
Abrasión de los Ángeles	ASTM C 131
Prueba al desgaste por medio de Sulfato de Magnesio	ASTM C 88/ NORMA INEN 863

Fuente: Autora

Granulometría del agregado grueso

Para llevar a cabo este ensayo, se empleó como referencia la norma ASTM C 136, este tiene como finalidad determinar la gradación del agregado grueso. Se emplearon tamices con distintas aberturas, los cuales se colocaron de manera decreciente, se inició por el tamiz de 1/2" y se finalizó con el No. 100 como se puede observar en la figura 35.

Después de agitar los tamices con el agregado grueso en su interior, fueron pesadas las cantidades retenidas en cada uno de ellos. En la tabla 36 se pueden observar los pesos retenidos por cada tamiz, los retenidos parciales, retenidos acumulados y pasantes acumulados, estos últimos fueron comparados con las especificaciones establecidas por la norma ASTM C 33 para los agregados del hormigón.

A partir de los pasantes acumulados se obtuvo la gráfica de la curva granulométrica presentada en la figura 36, la cual se encuentra dentro de los límites establecidos.

Por otra parte, mediante el análisis realizado se determinó que el tamaño máximo que posee el agregado grueso es de 1/2".

Figura 35

Tamices del laboratorio, empleados para determinar la granulometría que posee el agregado grueso.



Fuente: Autora

Tabla 36

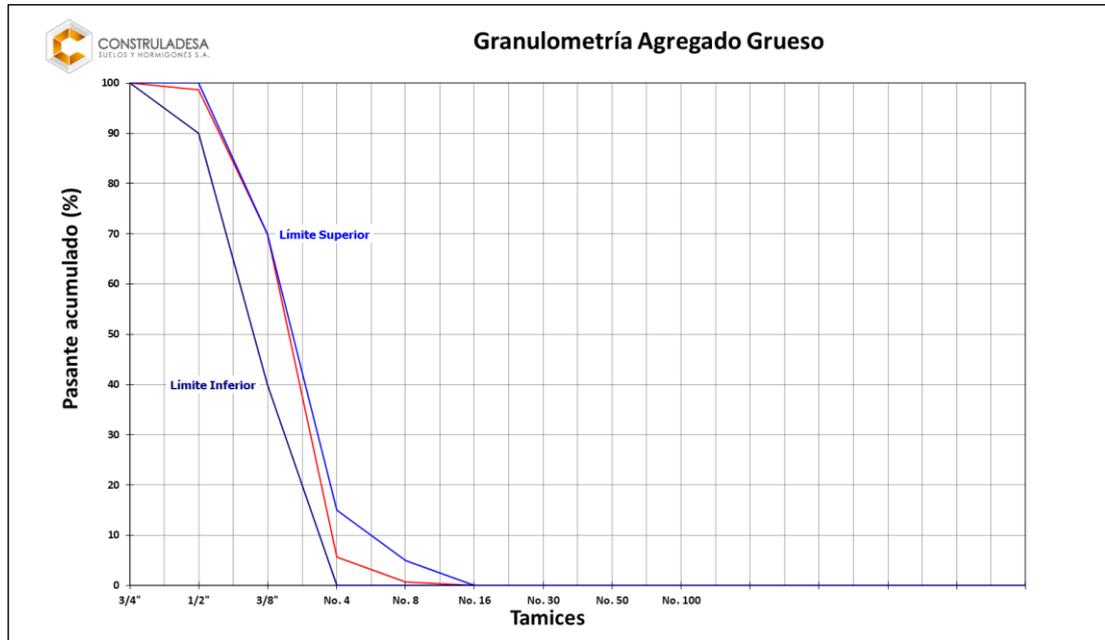
Ensayo de clasificación del agregado grueso para hormigón.

Tamiz INEN (ASTM) Nº	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	67.15	1.340	1.34	98.66	90 a 100
3/8"	9.5	1437.11	28.740	30.09	69.91	40 a 70
No. 4	4.75	3211.67	64.23	94.32	5.68	0 a 15
No. 8	2.36	246.79	4.94	99.25	0.75	0 a 5
No. 16	1.18	8.39	0.17	99.42	0.58	
No. 30	0.60	1.34	0.03	99.45	0.55	
No. 50	0.30	1.18	0.02	99.47	0.53	
No. 100	0.15	2.18	0.04	99.52	0.48	
FONDO		24.18	0.48	100.00	0.00	
Σ =		4,999.99				

Fuente: Autora

Figura 36

Curva Granulométrica obtenida para el agregado grueso.



Fuente: Autora

Gravedad específica de masa saturada con superficie seca del agregado grueso

Este ensayo fue llevado a cabo bajo la norma ASTM C 127, en el cual se tomó una muestra de agregado grueso, esta fue saturada durante 24 horas y luego fue secada superficialmente con una franela. Como siguiente paso se pesaron 1000 gr de la muestra superficialmente seca, los cuales fueron colocados en una canastilla y sumergidos para obtener el peso total.

Una vez se obtuvieron los datos requeridos, se empleó la ecuación 6 para calcular la gravedad específica.

Datos:

$B = \text{Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca} = 1000.00 \text{ gr}$

$\text{Peso de la canastilla sumergida} + \text{material} = 1823.00 \text{ gr}$

$\text{Peso de la canastilla sumergida} = 1163.00 \text{ gr}$

C = Peso de la muestra sumergida en agua = 660 gr

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

(6)

$$G. \text{ Específica} = \frac{1000.00}{1000 - 660} * 1000 = 2941 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Porcentaje de Absorción del agregado grueso

El objetivo del presente ensayo es determinar los cambios de peso que presenta el agregado grueso debido al agua absorbida en los espacios de los poros dentro de las partículas que lo constituyen (ASTM, 1993).

Para determinar el porcentaje de absorción del agregado grueso se empleó como referencia la norma ASTM C 127. En primer lugar, la muestra fue sumergida en agua durante un período de 24 horas, como se puede observar en la figura 37. Luego, esta fue secada superficialmente con una franela, y se procedió a pesar la muestra saturada superficialmente seca.

Como siguiente paso, esta fue colocada en el horno a una temperatura de $110 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo necesario para eliminar la humedad y secar la muestra por completo. Se la dejó enfriar al ambiente y se la pesó.

Figura 37

Muestra de agregado grueso sumergido en agua.



Fuente: Autora

Una vez finalizado todo el proceso, se empleó la ecuación 7 para conocer el porcentaje de absorción, como se muestra a continuación:

Datos:

A = Peso en el aire de la muestra secada en estufa = 983.00 gr

B = Peso en el aire de la muestra saturada con superficie seca = 1000.00 gr

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

(7)

$$\% \text{ Absorción} = \frac{1000.00 - 987}{987} * 100 = 1.73\%$$

Peso Volumétrico Suelto (P.V.S) del agregado grueso

El procedimiento realizado fue similar al del agregado fino, puesto que también se debe ejecutar acorde la norma ASTM C 29. Para este se pesó el

recipiente a emplear, luego se llenó con la muestra de agregado grueso y se la enrasó. Una vez realizado esto, se pesó el recipiente con la muestra, como se puede observar en la figura 38.

Figura 38

Peso del recipiente con la muestra de agregado grueso.



Fuente: Autora

Para conocer el peso volumétrico suelto del agregado grueso, se empleó la ecuación 8. Los respectivos cálculos se muestran a continuación:

Datos:

A = Peso del recipiente = 6057.00 gr

B = Peso del recipiente + la muestra = 9092.00 gr

C = Volumen del recipiente = 0.002124 m³

$$P.V.S = \frac{B-A}{C} \div 1000 \quad (8)$$

$$P.V.S = \frac{9092.00 - 6057.00}{0.002124} \div 1000 = 1429 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Peso Volumétrico Varillado (P.V.V) del agregado grueso

El ensayo de peso volumétrico varillado se realizó acorde la norma ASTM C 29. La muestra se colocó en el recipiente en tres capas de igual altura, en cada capa se aplicaron 25 golpes con una varilla lisa de acero. En la última capa se llenó el recipiente hasta rebosarlo, se aplicó el varillado y se enrasó con la misma varilla. Una vez finalizado el proceso, se pesó el recipiente con la muestra.

Se empleó la ecuación 9 para conocer el peso volumétrico suelto que posee el agregado grueso. Los respectivos cálculos se muestran a continuación:

Datos:

$$A = \text{Peso del recipiente} = 6057.00 \text{ gr}$$

$$B = \text{Peso del recipiente} + \text{la muestra} = 9454.00 \text{ gr}$$

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

$$P.V.S = \frac{B-A}{C} \div 1000 \quad (9)$$

$$P.V.S = \frac{9454.00 - 6057.00}{0.002124} \div 1000 = 1599 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Abrasión de Los Ángeles

El presente ensayo tiene como finalidad conocer la resistencia a la degradación que posee el agregado grueso. Las acciones que se pueden presentar de forma combinada son: abrasión, desgaste, impacto y trituración (ASTM, 2014).

Esto se puede lograr al emplear la máquina de Abrasión de los Ángeles, la cual se puede observar en la figura 39.

El número de esferas que se colocan dentro de la máquina dependen de la granulometría. Estas esferas crean un efecto de impacto y trituración al caer sobre la muestra, mientras el tambor de la máquina gira (ASTM, 2014).

Figura 39

Máquina de Abrasión de Los Ángeles.



Fuente: Autora

El proceso se realizó acorde a la norma ASTM C 131, la cual, a partir de la granulometría sugiere el método a emplear. En el presente proyecto, el mayor tamaño nominal de agregado grueso corresponde al de $\frac{1}{2}$ " , pero debido a que la mayoría de retenidos se encontraban en el tamiz de $\frac{3}{8}$ " , se optó por emplear el método C.

El método seleccionado estipula que se deben tomar 2500 gr de muestra retenida para los tamices $\frac{1}{4}$ " y N°4 respectivamente. Así mismo, determina que la carga a emplear debe estar conformada por 8 esferas de metal, como se puede observar en la figura 40.

La máquina rotó durante un período de 15 minutos, luego la muestra fue extraída y lavada. Como siguiente paso, se colocó el agregado en el horno por un período de 24 horas a una temperatura de 110 °C. Una vez se encontraba totalmente fría la muestra, se procedió a pesarla, obteniéndose así el peso después del ensayo que se puede observar en la tabla 37.

Figura 40

Esferas colocadas previamente a la realización del ensayo de Abrasión de los Ángeles.



Fuente: Autora

Tabla 37

Pesos de la muestra antes y después del ensayo.

MALLAS		PESO ANTES DEL ENSAYO	PESO DESPUÉS POR TAMIZ Nº 12	% DE PÉRDIDA
PASA	RETIENE			
1 1/2"	1"			
1"	3/4"			
3/4"	1/2"			
1/2"	3/8"			
3/8"	1/4"	2500.00		
1/4"	Nº 4	2500.00		
Nº 4	Nº 8			
TOTAL		5000.00	3995.00	20.10



OBSERVACIONES : NORMA A.S.T.M. C-131, CLASIFICACIÓN C, 8 CARGAS ABRASIVAS, TIEMPO 15 MIN.

Fuente: Autora

Para conocer el % de pérdida se empleó la ecuación 10, como se muestra a continuación:

$$\% \text{ De Pérdida} = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100$$

(10)

$$\% \text{ De Pérdida} = \frac{5000.00 - 3995.00}{5000.00} * 100 = 20.10\%$$

Prueba al desgaste del agregado grueso por medio de Sulfato de Magnesio

Se llevó a cabo un proceso similar al realizado con el agregado fino, por lo cual este también se encuentra bajo los parámetros de la norma NTE INEN 863. Así mismo, se empleó como solución Sulfato de Magnesio para sumergir las muestras de agregado grueso, como se puede observar en la figura 41.

Figura 41

Muestras de agregado grueso sumergidas en solución de Sulfato de Magnesio.



Fuente: Autora

En el agregado grueso se emplearon las siguientes cantidades retenidas por tamiz:

- **1/2"** = 670 gr
- **3/8"** = 330 gr
- **Nº 4** = 300 gr

Una vez finalizado el ciclo de los 5 días se pesaron las cantidades retenidas, de tal manera que las correspondientes a los tamices de 1/2" y 3/8" fueron obtenidas del tamiz 5/16". Mientras que, la muestra del tamiz Nº 4 se

obtuvo del retenido del tamiz N° 5. De esta manera se conocieron los pesos después del ensayo, estos pueden ser observados en la tabla 38.

Tabla 38

Datos obtenidos en el ensayo de Desgaste del agregado grueso.

GRANULOMETRÍA	TAMIZ		GRANULOMETRÍA PESO ACUMULADO	RETENIDO PARCIAL %	PESO ANTES DEL ENSAYO gr.	PESO DESPUÉS DEL ENSAYO gr.	PÉRDIDA REAL %	PÉRDIDA CORREGIDA %	
	PASA	RETIENE							
2 1/2"	0.00								
2"	0.00								
1 1/2"	0.00								
1"	0.00	2 1/2"	1 1/2"	0.00	0.00				
3/4"	0.00	1 1/2"	3/4"	0.00	0.00				
1/2"	40.00	3/4"	3/8"	896.00	28.74	1,000.00	985.00	1.50	0.43
3/8"	856.00	3/8"	N° 4"	1,913.00	64.23	300.00	293.00	2.33	1.50
N° 4	1,913.00								
N° 8	147.00	TOTAL		2978.20			Σ =	1.93	
Fondo	22.20								
Total	2,978.20								



PORCENTAJE DE DESGASTE (%) :	1.93
NORMA A SEGUIR :	INEN 863
OBSERVACIONES :	CUMPLE

Fuente: Autora

Para conocer el porcentaje de pérdida real se restó el peso después del ensayo del peso antes del ensayo. Para obtener el porcentaje de pérdida corregida se empleó la ecuación 11.

$$\text{Pérdida corregida \%} = \frac{\text{Retenido parcial} * \text{Pérdida real}}{100} \quad (11)$$

3.4 Diseño y elaboración de mezclas

Se empleó como referencia la norma ACI 211 para la elaboración de los diseños de las dosificaciones de 200 y 300 kg/cm². A continuación se presentan los componentes a considerar en el diseño de la mezcla:

- Cemento a emplear: Portland tipo GU
- Tamaño máximo del agregado grueso: 1/2"
- Consistencia de la mezcla: plástica y trabajable

Así mismo, se muestra un resumen con los resultados de los ensayos realizados a los agregados, estos se presentan en la tabla 39.

Tabla 39

Resultados de los ensayos realizados a los agregados.

Ensayo	Agregado Fino	Agregado Grueso
Gravedad específica de masa saturada con superficie seca (kg/m ³)	2685	2941
Porcentaje de absorción (%)	1.36	1.73
Peso volumétrico suelto (P.V.S) (kg/m ³)	1579	1429
Peso volumétrico varillado (P.V.V) (kg/m ³)	---	1599
Módulo de Finura	2.92	---
Procedencia	Río Chimbo	Licosa

Fuente: Autora

De acuerdo a la metodología propuesta, cada diseño constará de una dosificación sin hielo y otra con hielo. Como se mencionó previamente, este material reemplazará en un 80% el total de agua de amasado a emplear. Para cada dosificación se tomaron 12 cilindros.

3.4.1 Diseño hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$

De acuerdo con el método propuesto por la norma ACI 211, se debe en primer lugar establecer la resistencia promedio del diseño ($f'cr$), la cual se encuentra en función de la resistencia a la compresión y es empleada con un enfoque conservador. En la tabla 40 se pueden observar los valores a emplear de acuerdo a los rangos de resistencia.

Tabla 40

Resistencia de la compresión promedio sin desviación estándar.

Resistencia a Compresión Especificada, $f'c$ (kg/cm ²)	Resistencia Promedio Requerida, $f'cr$ (kg/cm ²)
< 210	$f'c + 70$
210 - 350	$f'c + 84$
> 350	$f'c + 98$

Adaptado de:(ACI Committee 214, 2011, p. 15)

Se estableció lo siguiente para el presente diseño:

$$f'c = 200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$f'cr = 200 + 70$$

$$f'_{cr} = 270 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Como siguiente paso, se estableció un rango de asentamiento entre 10 y 17.5 cm, puesto que se requiere que la mezcla posea consistencia trabajable y plástica.

A continuación, se procede a emplear la tabla 41 para conocer el requerimiento de agua para elaborar la mezcla, esta se encuentra en función del asentamiento y del tamaño máximo nominal del agregado grueso. Dio como resultado el valor de 228.

Tabla 41

Estimación de agua para la mezcla de acuerdo a distintos parámetros.

Asentamiento		Requerimiento de agua en kg/m ³ para distintos asentamientos y tamaños nominales máximos de agregado grueso							
		9.5 mm (3/8")	12.5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37.5 mm (1½")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")
mm	in	Hormigón sin aire incorporado							
25 a 50	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	--

Adaptado de:(ACI Committee 211, 1991, p. 22)

Por otra parte, la tabla 42 indica la cantidad de aire atrapado en la mezcla, este es establecido de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado grueso. Debido a que para el presente proyecto el tamaño máximo es de 1/2", se obtuvo un contenido de 2.5%.

Tabla 42

Cantidad de aire atrapado de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Cantidad de aire atrapado %
9.5 mm (3/8")	3
12.5 mm (1/2")	2.5
19 mm (3/4")	2
25 mm (1")	1.5
37.5 mm (1½")	1
50 mm (2")	0.5
75 mm (3")	0.3
150 mm (6")	0.2

Adaptado de:(ACI Committee 211, 1991, p. 22)

En la tabla 43 se visualizan los valores correspondientes a la relación agua/cemento, los cuales se encuentran en función de la incorporación o no incorporación de aire y la resistencia deseada a los 28 días, la cual se determinó con anterioridad como 270 kg/cm².

Tabla 43

Relación entre factor agua/cemento y la resistencia a la compresión promedio.

f'cr a 28 días (kg/cm²)	Relación agua/cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.8	0.71
200	0.7	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.4
400	0.43	--
450	0.38	--

Adaptado de:(ACI Committee 211, 1991, p. 22)

Sin embargo, la tabla 43 no presenta valor alguno para la resistencia promedio previamente calculada, por lo cual se estableció una relación agua/cemento de 0.48 para el desarrollo del diseño.

Por otra parte, se empleó la tabla 44 para determinar el volumen de agregado grueso necesario para la mezcla, este se selecciona basándose

en dos características: el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino.

Tabla 44

Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón.

Tamaño Máximo Nominal del Agregado Grueso	Volumen de árido grueso, seco por unidad de volumen de hormigón para diferentes módulos de finura			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 mm (3/8")	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5 mm (1/2")	0.59	0.57	0.55	0.53
19 mm (3/4")	0.66	0.64	0.62	0.6
25 mm (1")	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 mm (1½")	0.75	0.73	0.71	0.69
50 mm (2")	0.78	0.76	0.74	0.72
75 mm (3")	0.82	0.8	0.78	0.76
150 mm (6")	0.87	0.85	0.83	0.81

Adaptado de:(ACI Committee 211, 1991, p. 23)

El módulo de finura del presente proyecto es 2.92, este no se encuentra en la tabla 44, por lo cual se debió interpolar para conocer el valor a emplear. Los cálculos correspondientes se presentan a continuación:

$$\frac{3.00 - 2.80}{0.53 - 0.55} = \frac{2.92 - 2.80}{x - 0.55}$$

$$x = 0.538$$

Como siguiente paso, se llevaron a cabo los cálculos del proporcionamiento de los materiales para la elaboración de la mezcla de hormigón. El laboratorio proporcionó las tablas que se presentan a continuación:

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Revenimiento - sin aire incluido (cm) = 10 a 17,5	Cont. de aire (%) = 2.5
Resistencia específica f'c (Kg/cm²) = 200.0	Cont. de agua (Its) = 228.00 (Para grava Triturada)
Resistencia requerida f'r (Kg/cm²) = 270.0	Cantidad de cemento (Kg) = 475.00
Coefficiente volumétrico de la piedra = 0.538	Rel. agua/cemento (A/C) = 0.480 sin aire incluido ▼
	Densidad cemento (Kg/m³) = 2850 Portland tipo GU

DOSIFICACIÓN DE DISEÑO DE HORMIGÓN
CON ADITIVO SF-106 (ADITEC)
CEMENTO HOLCIM TIPO GU
f'c = 200 Kg/cm²

DOSIFICACIÓN EN KG PARA 1 m ³ DE HORMIGÓN	
f'c	= 200.0 Kg/cm ²
f'cr	= 270.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 5100.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 425.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 204.0 Lts
Piedra 1/2"	= 1108 Kg
Arena	= 644 Kg
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

DOSIFICACION EN CAJONETAS PARA 1 SACO DE CEMENTO	
f'c	= 200.0 Kg/cm ²
f'cr	= 270.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 600.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 50.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 24.0 Lts
Piedra 1/2"	= 3 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 19,0 cm
Arena	= 1,50 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 20,0 cm
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

DOSIFICACIÓN DE DISEÑO DE HORMIGÓN
CON ADITIVO SF-106 (ADITEC)
CEMENTO HOLCIM TIPO GU
f'c = 200 Kg/cm² CON HIELO

DOSIFICACIÓN EN KG PARA 1 m ³ DE HORMIGÓN	
f'c	= 200.0 Kg/cm ²
f'cr	= 270.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 5100.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 425.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 40.8 Lts
Hielo	= 163.2 Kg
Piedra 1/2"	= 1108 Kg
Arena	= 644 Kg
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

DOSIFICACION EN CAJONETAS PARA 1 SACO DE CEMENTO	
f'c	= 200.0 Kg/cm ²
f'cr	= 270.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 600.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 50.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 4.8 Lts
Hielo	= 19.2 Kg
Piedra 1/2"	= 3 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 19,0 cm
Arena	= 1,50 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 20,0 cm
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

Así mismo, se realizó la correspondiente dosificación para la elaboración de 12 cilindros de 4" x 8", en el cual se consideró un porcentaje de desperdicio. Este proceso fue realizado tanto para la mezcla de hormigón sin hielo como para la mezcla en la cual se reemplazó el 80% de agua de amasado con hielo. Durante la elaboración del hormigón, se redujo 152cc de agua para la mezcla con hielo. La dosificación final se muestra a continuación:

- **Dosificación Hormigón f'c = 200 kg/cm² (sin hielo)**

- Aditivo: 122 cc
- Cemento: 10.20 kg
- Agua: 4.90 lts
- Piedra: 26.59 kg
- Arena: 15.46 kg

- **Dosificación Hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (con hielo)**

Aditivo: 122 cc
 Cemento: 10.20 kg
 Agua: 0.98 lts – 0.152 lts = 0.82 lts
 Hielo: 3.92 kg
 Piedra: 26.59 kg
 Arena: 15.46 kg

3.4.2 Diseño hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$

Se aplicó el mismo procedimiento que en el anterior diseño, por lo cual, como primer paso se empleó la tabla 40 para establecer la resistencia promedio para el presente diseño.

$$f'c = 300 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$f'cr = 300 + 84$$

$$f'cr = 384 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Se mantiene el rango de asentamiento para asegurar la trabajabilidad y plasticidad de la mezcla. Así mismo, los valores proporcionados para conocer el requerimiento de agua para elaborar la mezcla y el contenido de aire, se conservan como 228 y 2.5% respectivamente.

Con respecto a la relación agua/cemento, la tabla 43 no presenta valor alguno para la resistencia promedio previamente calculada, por lo que se estableció una relación agua/cemento de 0.42 para el desarrollo del diseño. El volumen de agregado grueso necesario para la mezcla que se obtuvo mediante la tabla 44, se conserva como 0.538.

El laboratorio proporcionó las tablas con el proporcionamiento de los materiales para la elaboración de la mezcla de hormigón, estas se presentan a continuación:

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Revenimiento - sin aire incluido (cm)	10 a 17,5	Cont. de aire (%)	= 2.5
Resistencia específica $f'c$ (Kg/cm ²)	= 300.0	Cont. de agua (lts)	= 228.00 (Para grava Triturada)
Resistencia requerida $f'r$ (Kg/cm ²)	= 384.0	Cantidad de cemento (Kg)	= 538.10
Coefficiente volumétrico de la piedra	= 0.538	Rel. agua/cemento (A/C)	= 0.424 <small>sin aire incluido</small> ▼
		Densidad cemento (Kg/m ³)	= 2850 <small>Portland tipo GU</small>

**DOSIFICACIÓN DE DISEÑO DE HORMIGÓN
CON ADITIVO SF-106 (ADITEC)
CEMENTO HOLCIM TIPO GU
 $f'c = 300 \text{ Kg/cm}^2$**

DOSIFICACIÓN EN KG PARA 1 m ³ DE HORMIGÓN	
$f'c$	= 300.0 Kg/cm ²
$f'cr$	= 384.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 6600.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 550.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 233.0 Lts
Piedra 1/2"	= 1100 Kg
Arena	= 604 Kg
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

DOSIFICACION EN CAJONETAS PARA 1 SACO DE CEMENTO	
$f'c$	= 300.0 Kg/cm ²
$f'cr$	= 384.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 600.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 50.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 21.2 Lts
Piedra 1/2"	= 2,50 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 17,50 cm
Arena	= 1,50 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 14,5 cm
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

**DOSIFICACIÓN DE DISEÑO DE HORMIGÓN
CON ADITIVO SF-106 (ADITEC)
CEMENTO HOLCIM TIPO GU
 $f'c = 300 \text{ Kg/cm}^2$ CON HIELO**

DOSIFICACIÓN EN KG PARA 1 m ³ DE HORMIGÓN	
$f'c$	= 300.0 Kg/cm ²
$f'cr$	= 384.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 6600.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 550.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 46.6 Lts
Hielo	= 186.4 Kg
Piedra 1/2"	= 1100 Kg
Arena	= 604 Kg
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

DOSIFICACION EN CAJONETAS PARA 1 SACO DE CEMENTO	
$f'c$	= 300.0 Kg/cm ²
$f'cr$	= 384.0 Kg/cm ²
Aditivo	= 600.00 cc ADITEC SF-106
Cemento	= 50.0 Kg HOLCIM TIPO GU
Agua	= 4.3 Lts
Hielo	= 16.9 Kg
Piedra 1/2"	= 2,50 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 17,50 cm
Arena	= 1,50 Cajonetas 40,0 x 40,0 x 14,5 cm
Revenimiento	= 10.0 a 17.5 cm

Finalmente, se realizó la correspondiente dosificación para la elaboración de 12 cilindros de 4" x 8", en el cual se consideró un porcentaje de desperdicio. Este proceso fue realizado tanto para la mezcla de hormigón sin hielo como para la mezcla en la cual se reemplazó el 80% de agua de amasado con hielo. Durante la elaboración del hormigón, se redujo 200 cc de agua para la mezcla con hielo. La dosificación final se muestra a continuación:

- **Dosificación Hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (sin hielo)**

- Aditivo: 158 cc
- Cemento: 13.20 kg
- Agua: 5.59 lts
- Piedra: 26.40 kg
- Arena: 14.50 kg

- **Dosificación Hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (con hielo)**

Aditivo:	158 cc
Cemento:	13.20 kg
Agua:	1.12 lts – 0.200 lts = 0.92 lts
Hielo:	4.47 kg
Piedra:	26.40 kg
Arena:	14.50 kg

3.5 Proceso de Fundición

La elaboración de las mezclas de hormigón se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio, el cual cuenta con los implementos adecuados para el correcto desarrollo de este procedimiento.

Para preparar la mezcla se empleó una concretora con capacidad para $\frac{1}{2}$ saco, esta puede ser observada en la figura 42.

En la mezcladora se introdujeron los materiales en el siguiente orden:

- 1) Agregado grueso
- 2) Agregado fino
- 3) 50% del agua de amasado
- 4) Cemento
- 5) 50 % del agua de amasado + aditivo

En el caso de la mezcla con hielo, este fue colocado después del agregado fino. El proceso previamente mencionado, se puede observar en la figura 43.

Figura 42

Concretera empleada en la elaboración de la mezcla.



Fuente: Autora

Figura 43

Materiales colocados en la mezcladora.



Fuente: Autora

3.5.1 Ensayos al hormigón en Estado Fresco

Temperatura y revenimiento del hormigón

Una vez finalizado el proceso de mezclado, el hormigón fresco fue vaciado en una caretila, donde se tomó la temperatura como se puede observar en la figura 44.

Figura 44

Toma de temperatura de la mezcla de hormigón.



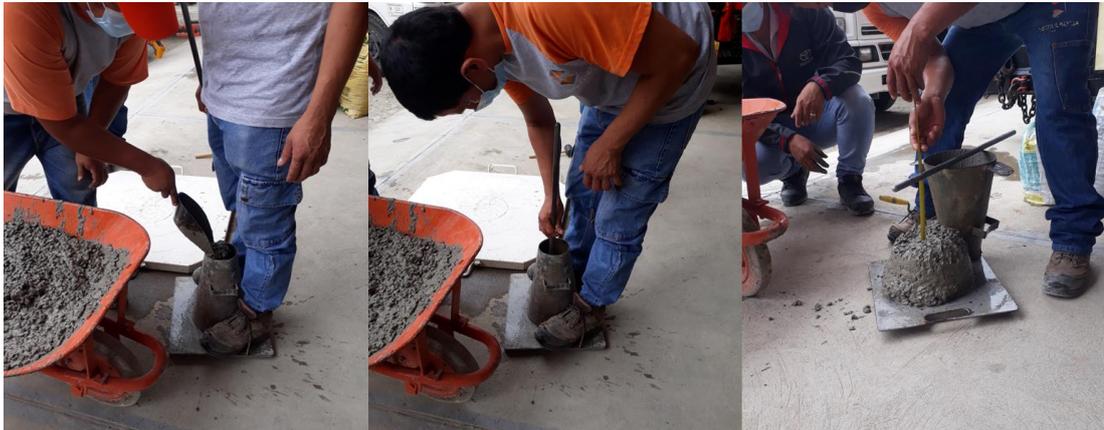
Fuente: Autora

Este proceso se realizó acorde a lo establecido por la norma ASTM C 1064, para este se empleó un termómetro electrónico el cual se mantuvo por un período de 2 minutos para lograr un registro adecuado de la temperatura.

Posteriormente, para conocer el revenimiento de la mezcla en estado fresco, se realizó el ensayo de Cono de Abrams como se puede observar en la figura 45. El procedimiento fue realizado de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM C 143 y tuvo un período de duración de aproximadamente 2 minutos y medio.

Figura 45

Prueba de revenimiento con el Cono de Abrams.



Fuente: Autora

Después de realizados los ensayos pertinentes, las distintas mezclas fueron vertidas en los cilindros, donde fueron compactadas con una varilla lisa con punta semiesférica de 10 mm de diámetro y vibradas con un mazo con cabeza de goma. Todo esto acorde a lo estipulado por la norma ASTM C 192.

Se tomaron 12 muestras por cada mezcla, como se puede observar en la figura 46, debido a que la norma sugiere que se moldeen como mínimo 3 especímenes para cada edad a ensayar.

Figura 46

Muestras de cilindro tomadas durante el proceso.



Fuente: Autora

3.6 Curado

Al día siguiente del proceso de fundición se procedió a marcar los especímenes con los datos correspondientes, esto puede ser visualizado en la figura 47.

Figura 47

Colocación de datos en los especímenes.



Fuente: Autora

Posteriormente, las muestras fueron desencofradas y colocadas en la piscina de curado, esto puede ser observado en las figuras 48 y 49 respectivamente.

Figura 48

Especímenes del diseño de 200 kg/cm² desencofrados.



Fuente: Autora

Figura 49

Especímenes de los distintos diseños colocados en la piscina de curado.



Fuente: Autora

La piscina de curado se mantiene a una temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a que el agua de la piscina se encuentra almacenada, esta se satura con hidróxido de calcio para evitar la lixiviación de las muestras.

3.7 Prueba a la compresión simple

Este método de ensayo se realizó de acuerdo a lo estipulado por la norma ASTM C 39, el cual busca determinar la resistencia a la compresión que poseen los cilindros de hormigón. Este ensayo se limita al hormigón que posee una densidad superior a 800 kg/m^3 .

De acuerdo con la norma, los especímenes a emplear deben contar con un tamaño de 6" x 12" o de 4" x 8", para el presente proyecto se emplearon lo de 4" x 8".

Previo a la ejecución del ensayo, las muestras fueron pesadas y medidas, como se muestra en la figura 50. Luego, los especímenes fueron

colocados en la máquina para llevar a cabo el ensayo, como se puede observar en la figura 51.

Figura 50

Proceso de pesar y medir los cilindros.



Fuente: Autora

Figura 51

Máquina empleada para realizar el ensayo de resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón.



Fuente: Autora

4. CAPÍTULO III

4.1 Resultados

4.1.1 Temperatura y revenimiento

Los resultados obtenidos de temperatura y revenimiento para cada una de las mezclas, se pueden observar en las tablas 45 y 46 respectivamente.

Tabla 45

Resultados de temperatura y revenimiento para hormigón de 200 kg/cm².

Hormigón f'c = 200 kg/cm ²	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura del hormigón (°C)	Revenimiento (cm)
Patrón sin hielo	27	27	15
Con 80% hielo de reemplazo	28	9	14

Fuente: Autora

Tabla 46

Resultados de temperatura y revenimiento para hormigón de 300 kg/cm².

Hormigón f'c = 300 kg/cm ²	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura del hormigón (°C)	Revenimiento (cm)
Patrón sin hielo	27	30.5	16
Con 80% hielo de reemplazo	28	9.5	17

Fuente: Autora

4.1.2 Resistencia a la compresión simple

Los especímenes de las distintas mezclas fueron ensayados a los 3, 7, 14 y 28 días de edad, para lo cual los resultados se presentan de forma resumida en las tablas 47, 48, 49 y 50 respectivamente.

Se emplearon las resistencias obtenidas para la elaboración de las gráficas “Edad vs Resistencia”, las cuales se presentan en las figuras 52, 53, 54 y 55 respectivamente.

- **Hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo)**

Tabla 47

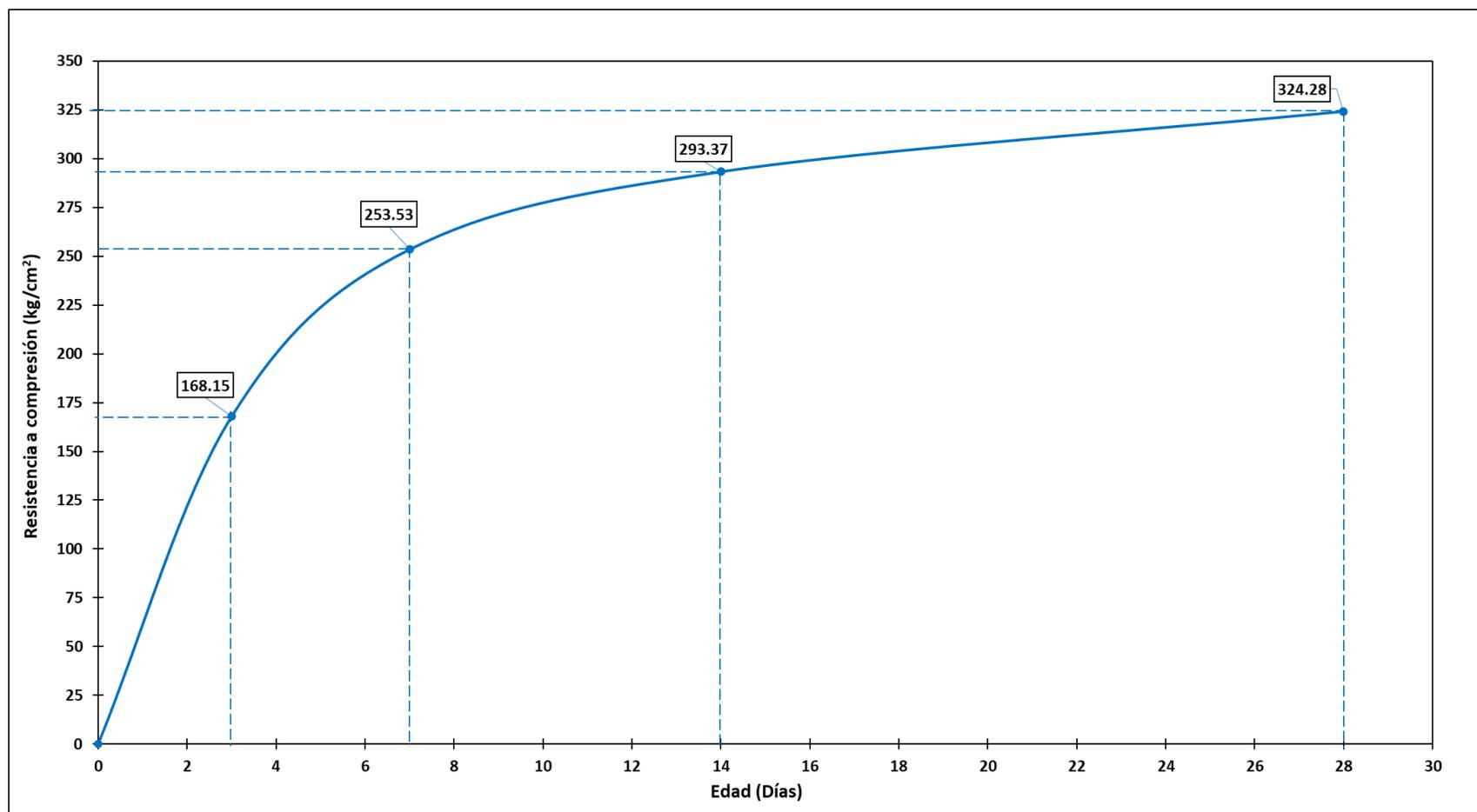
Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).

Edad (Días)	Carga (KN)	Área (cm^2)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (gr)	Densidad (kg/cm^3)	Resistencia (kg/cm^2)	Resistencia Especificada (kg/cm^2)	%	Resistencia Promedio (kg/cm^2)	% Promedio
3	132.77	80.12	10.1	20.4	4132	2528.12	168.98	200	84.49	168.15	84.08
	133.86	81.71	10.2	20.4	4150	2489.59	167.05	200	83.52		
	132.33	80.12	10.1	20.3	4122	2534.42	168.42	200	84.21		
7	203.56	81.71	10.2	20.5	4170	2489.38	254.03	200	127.01	253.53	126.77
	202.71	81.71	10.2	20.4	4164	2497.99	252.97	200	126.48		
	203.22	81.71	10.2	20.4	4162	2496.79	253.60	200	126.80		
14	243.35	83.32	10.3	20.4	4176	2456.78	297.81	200	148.91	293.37	146.68
	232.37	81.71	10.2	20.3	4170	2513.91	289.98	200	144.99		
	234.24	81.71	10.2	20.2	4126	2499.70	292.31	200	146.16		
28	259.24	81.71	10.2	20.3	4142	2497.03	323.51	200	161.76	324.28	162.14
	261.36	81.71	10.2	20.4	4186	2511.19	326.16	200	163.08		
	258.97	81.71	10.2	20.3	4170	2513.91	323.18	200	161.59		

Fuente: Autora

Figura 52

Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).



Fuente: Autora

- **Hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo)**

Tabla 48

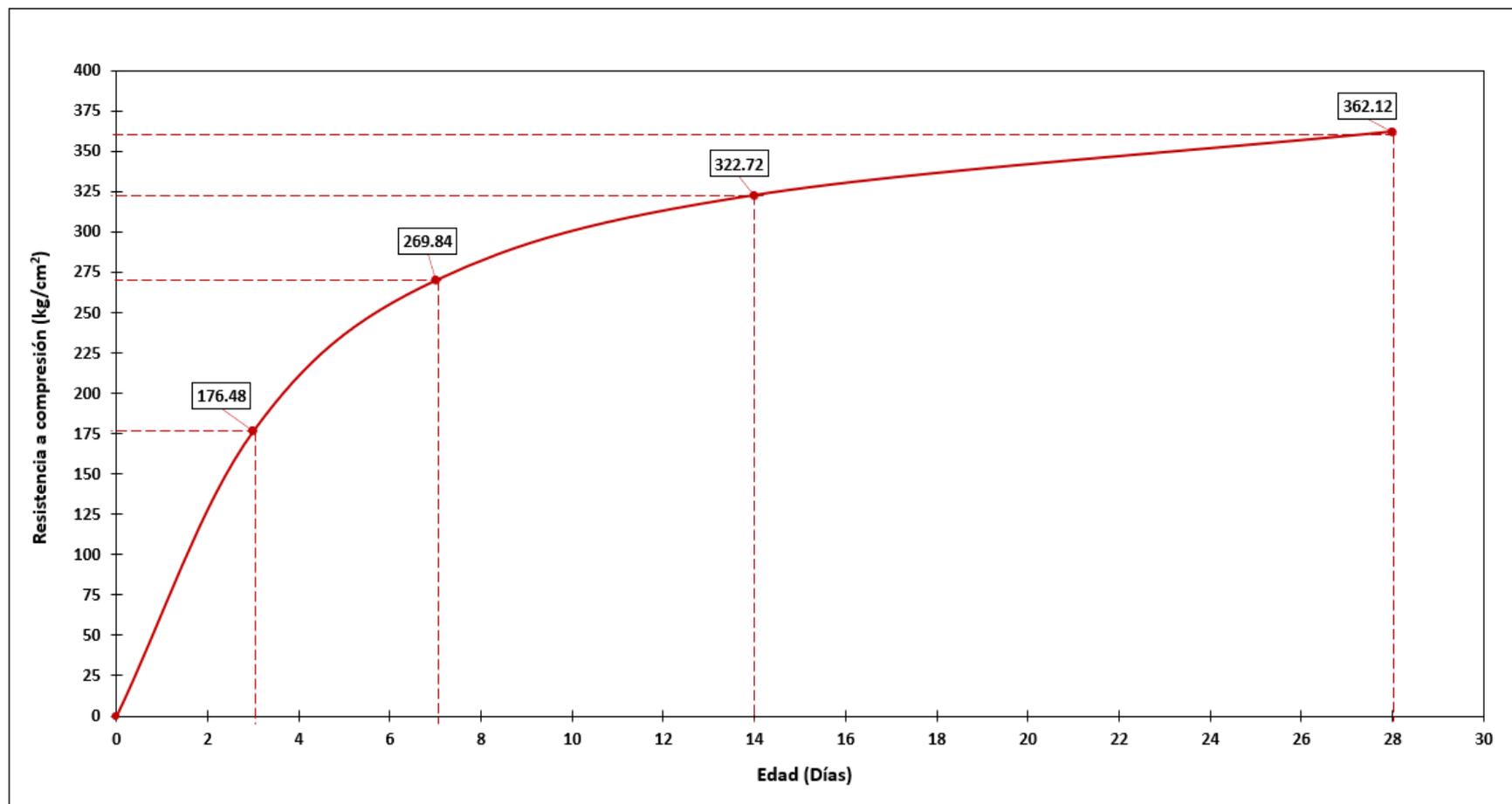
Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).

Edad (Días)	Carga (KN)	Área (cm^2)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (gr)	Densidad (kg/cm^2)	Resistencia (kg/cm^2)	Resistencia Especificada (kg/cm^2)	%	Resistencia Promedio (kg/cm^2)	% Promedio
3	140.44	81.71	10.2	20.5	4170	2489.38	175.26	200	87.63	176.48	88.24
	141.86	81.71	10.2	20.4	4168	2500.39	177.03	200	88.52		
	139.19	80.12	10.1	20.6	4154	2516.90	177.16	200	88.58		
7	215.93	81.71	10.2	20.4	4176	2505.19	269.46	200	134.73	269.84	134.92
	215.91	81.71	10.2	20.4	4156	2493.19	269.44	200	134.72		
	216.86	81.71	10.2	20.5	4122	2460.73	270.63	200	135.31		
14	261.23	81.71	10.2	20.3	4164	2510.29	326.00	200	163.00	322.72	161.36
	257.49	81.71	10.2	20.3	4186	2523.56	321.33	200	160.66		
	252.09	80.12	10.1	20.3	4170	2563.94	320.85	200	160.43		
28	276.67	78.54	10	20.3	4140	2596.66	359.21	200	179.61	362.12	181.06
	290.89	81.71	10.2	20.2	4152	2515.45	363.01	200	181.50		
	286.09	80.12	10.1	20.3	4168	2562.71	364.12	200	182.06		

Fuente: Autora

Figura 53

Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).



Fuente: Autora

- **Hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo)**

Tabla 49

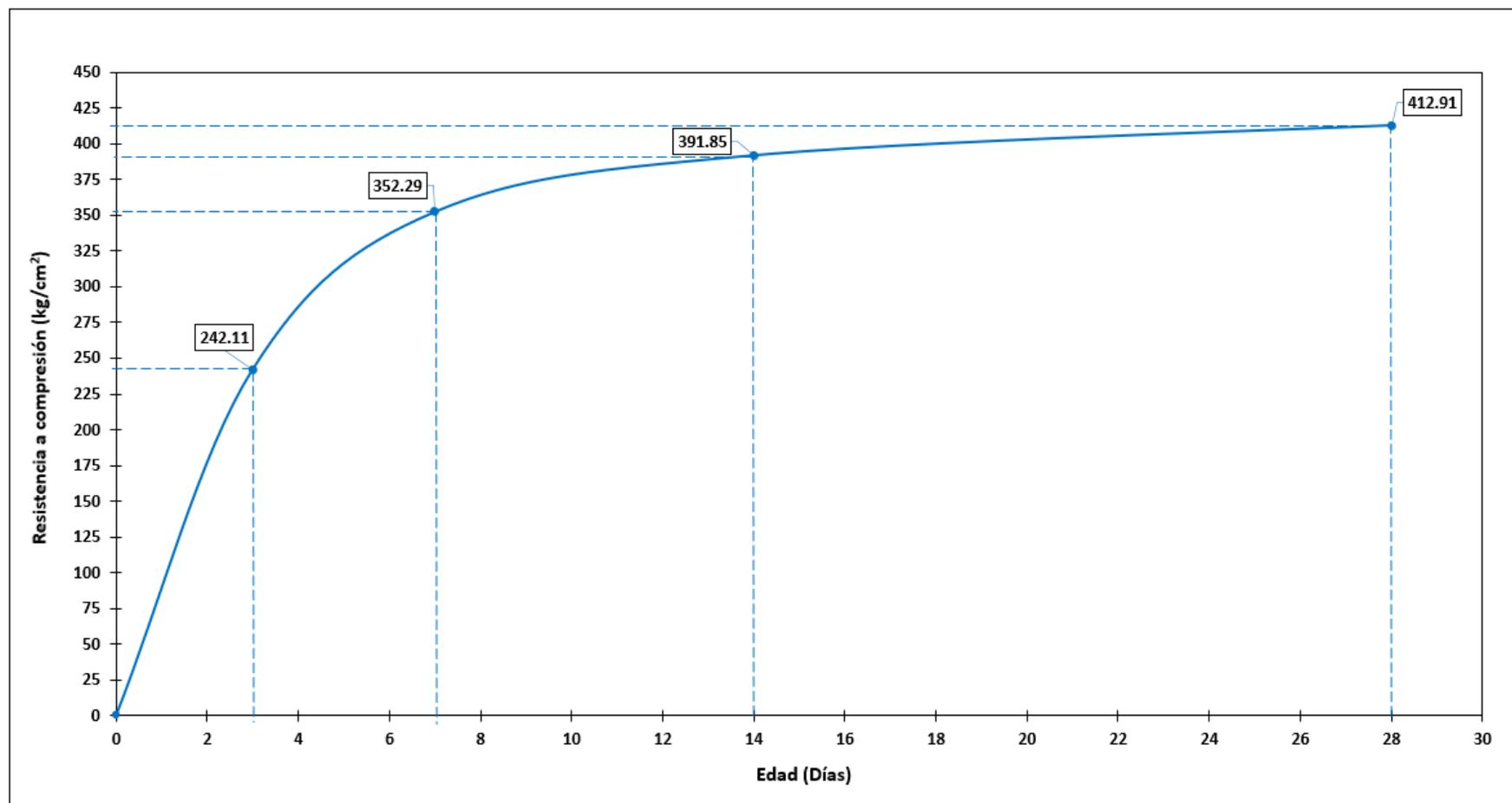
Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).

Edad (Días)	Carga (KN)	Área (cm^2)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (gr)	Densidad (kg/m^3)	Resistencia (kg/cm^2)	Resistencia Especificada (kg/cm^2)	%	Resistencia Promedio (kg/cm^2)	% Promedio
3	191.4	81.71	10.20	20.30	4118	2482.56	238.85	300	79.62	242.11	80.70
	190.4	80.12	10.10	20.30	4128	2538.11	242.33	300	80.78		
	192.6	80.12	10.10	20.30	4108	2525.82	245.13	300	81.71		
7	282.76	81.71	10.20	20.50	4108	2452.37	352.86	300	117.62	352.29	117.43
	283.08	81.71	10.20	20.40	4128	2476.39	353.26	300	117.75		
	281.05	81.71	10.20	20.40	4150	2489.59	350.73	300	116.91		
14	301.96	78.54	10.00	20.40	4096	2556.47	392.05	300	130.68	391.85	130.62
	304.89	80.12	10.10	20.10	4030	2502.51	388.05	300	129.35		
	304.59	78.54	10.00	20.20	4150	2615.81	395.46	300	131.82		
28	322.65	80.12	10.10	20.10	4096	2543.50	410.66	300	136.89	412.91	137.64
	326.11	80.12	10.10	20.00	4070	2539.99	415.06	300	138.35		
	318.11	78.54	10.00	20.10	3986	2524.94	413.02	300	137.67		

Fuente: Autora

Figura 54

Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Patrón sin hielo).



Fuente: Autora

- Hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (con 80% hielo de reemplazo)

Tabla 50

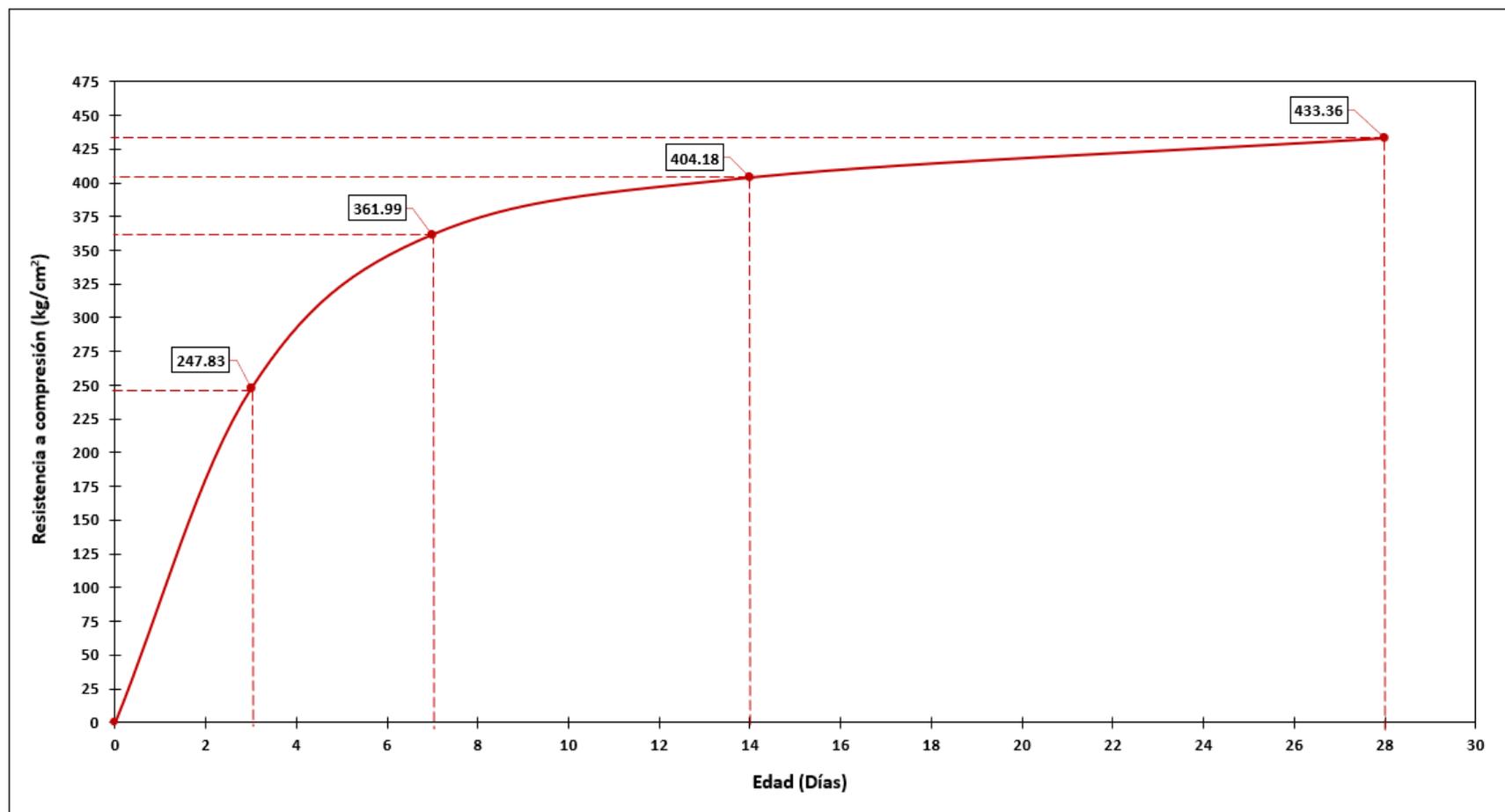
Valores obtenidos a partir del ensayo de resistencia a la compresión $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).

Edad (Días)	Carga (KN)	Área (cm^2)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Masa (gr)	Densidad (kg/cm^2)	Resistencia (kg/cm^2)	Resistencia Especificada (kg/cm^2)	%	Resistencia Promedio (kg/cm^2)	% Promedio
3	197.38	81.71	10.2	20.3	4110	2477.74	246.32	300	82.11	247.83	82.61
	198.12	80.12	10.1	20.3	4058	2495.07	252.16	300	84.05		
	196.34	81.71	10.2	20.3	4080	2459.65	245.02	300	81.67		
7	286.52	80.12	10.1	20.4	4132	2528.12	364.67	300	121.56	361.99	120.66
	285.12	81.71	10.2	20.4	4156	2493.19	355.81	300	118.60		
	287.17	80.12	10.1	20.5	4108	2501.17	365.50	300	121.83		
14	320.8	80.12	10.1	20.2	4032	2491.36	408.30	300	136.10	404.18	134.73
	322.5	81.71	10.2	20.1	4136	2518.22	402.46	300	134.15		
	321.96	81.71	10.2	20.3	4104	2474.12	401.78	300	133.93		
28	343.75	80.12	10.1	20.3	4140	2545.49	437.51	300	145.84	433.36	144.45
	347.16	81.71	10.2	20.4	4132	2478.79	433.23	300	144.41		
	337.34	80.12	10.1	20.4	4108	2513.43	429.35	300	143.12		

Fuente: Autora

Figura 55

Curva del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Con 80% hielo de reemplazo).



Fuente: Autora

5. CAPÍTULO IV

5.1 Análisis de resultados y discusión

La presente investigación ha obtenido resultados prometedores con respecto a la implementación de hielo en concreto estructural.

Como se mencionó previamente, se realizaron ensayos tanto en estado fresco como en estado endurecido, de los cuales los diseños patrón no utilizaron hielo y los otros reemplazaron 80% del agua de amasado por hielo.

La mezcla en estado fresco para el diseño patrón partió con revenimientos de 15 y 16 cm, al implementar hielo se obtuvieron revenimientos de 14 y 17 cm respectivamente. Estas últimas presentaron similitud en su trabajabilidad con las mezclas patrón, puesto que el hielo logró disminuir la fricción entre las partículas.

Las temperaturas iniciales en las mezclas patrón fueron 27 y 30.5 °C, al emplear hielo estas se redujeron a 9 y 9.5 °C, logrando disminuir 18 y 19.5 °C respectivamente. Esta reducción en la temperatura de la mezcla favorece a la disminución de la temperatura en las varillas y encofrado metálico, así mismo se reduce la aparición de fisuras e incrementa la calidad del hormigón.

Por otra parte, los ensayos de resistencia a la compresión ejecutados al hormigón en estado endurecido, indicaron que se alcanzó la resistencia promedio a los 28 días en ambos diseños según lo indicado por el método ACI. Se presentó un incremento en la resistencia de los diseños en los que se empleó hielo, siendo de 10.45% para el diseño de 200 kg/cm² y 4.72% para el de 300 kg/cm².

Ante esto, se puede observar que a medida que disminuye la resistencia promedio a los 28 días, las ramas de la curva de desarrollo de resistencia se separan, aumentando el porcentaje de diferencia entre hormigón con hielo y sin hielo. Esto puede ser observado en las figuras 56 y

57, donde se realiza la respectiva comparación de las curvas de desarrollo de resistencia del hormigón para los diseños de 200 y 300 kg/cm².

Además, al comparar las curvas de desarrollo del presente trabajo con las obtenidas por el Ing. Jamil Córdova que son presentadas en las figuras 58 y 59, se puede comprobar que los porcentajes de incremento de resistencia se mantienen similares.

Es preciso señalar que las resistencias se han desarrollado de manera satisfactoria debido a que todo el proceso fue realizado bajo condiciones controladas, pero estas pudiesen presentar variaciones al ser llevadas a cabo en campo, para lo cual el factor de seguridad empleado en el diseño por el método ACI resguarda que se obtenga la resistencia deseada.

Cabe mencionar que otros factores que deben ser considerados son la eficiencia del trabajo de campo y el clima. El primero se encuentra relacionado con la correcta manipulación de los materiales en obra. El segundo por su parte influenciará en el comportamiento de los agregados, pues en el caso de que estos posean algún grado de humedad, aportarían agua a la mezcla influenciando la relación agua-cemento previamente establecida.

Adicionalmente, es de suma importancia considerar que los beneficios obtenidos tanto en la reducción de temperatura como en el incremento de resistencia, favorecerán a la calidad y durabilidad del elemento de hormigón. Disminuyendo sensiblemente los problemas de corrosión, mejorando el comportamiento sísmico de la estructura y reduciendo significativamente las pérdidas humanas que pudiesen darse durante estos eventos.

Así mismo, se contribuiría al desarrollo sostenible, puesto que al implementar hielo es posible obtener una mayor resistencia sin requerir el incremento de cemento, el cual demanda grandes cantidades de energía y libera CO₂ durante su proceso de fabricación.

De forma resumida, se presentan todos los resultados obtenidos en la tabla 51.

Tabla 51

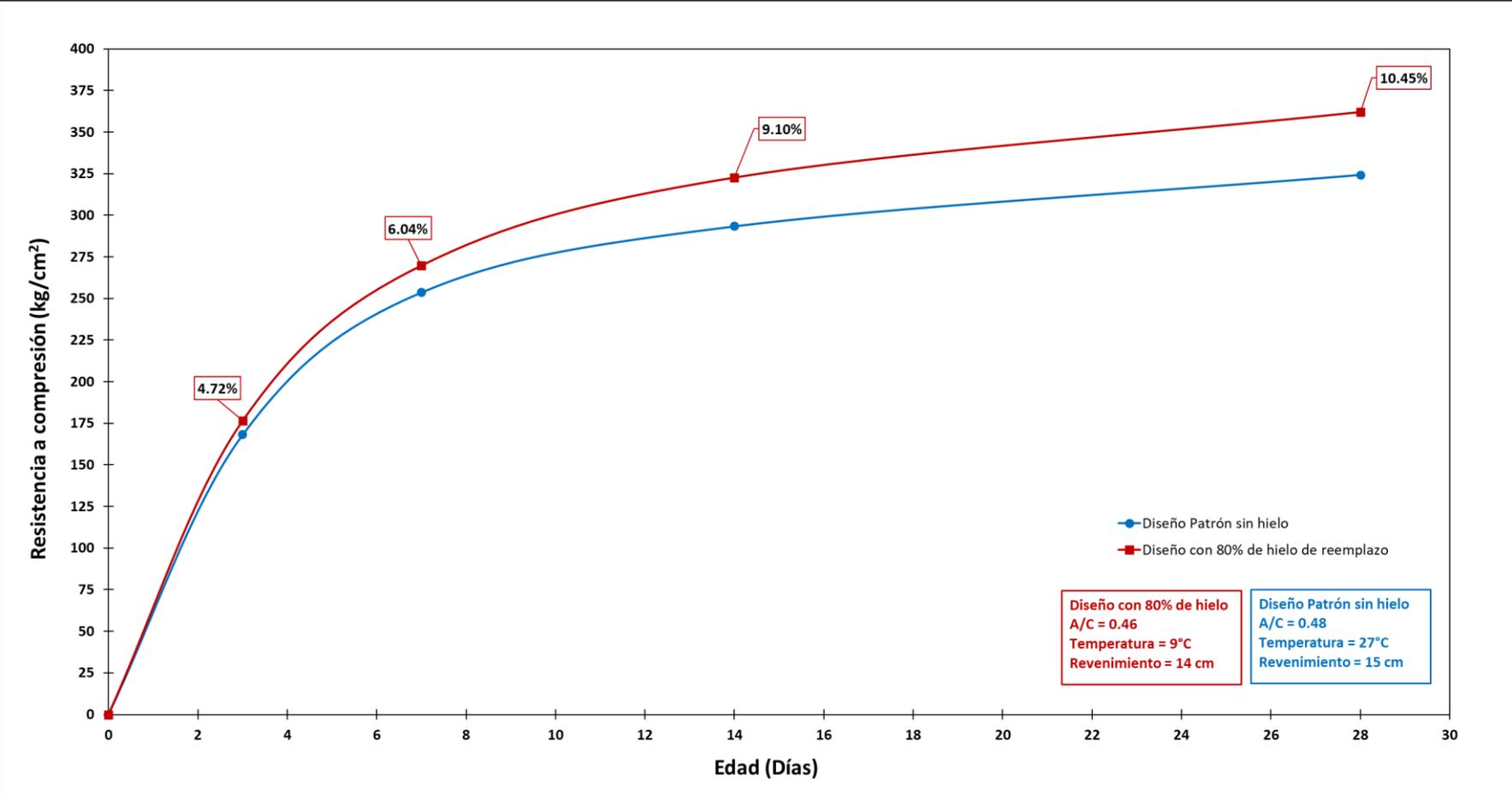
Resultados obtenidos para los diseños de hormigón de 200 y 300 kg/cm².

Parámetros analizados	f'c = 200 (kg/cm ²)		f'c = 300 (kg/cm ²)	
	Sin Hielo	80% Hielo	Sin Hielo	80% Hielo
Resistencia promedio a 28 días (kg/cm ²)	324.28	362.12	412.91	433.36
Temperatura del Hormigón (°C)	27	9	30.5	9.5
Revenimiento (cm)	15	14	16	17
Relación A/C	0.48	0.46	0.42	0.41

Fuente: Autora

Figura 56

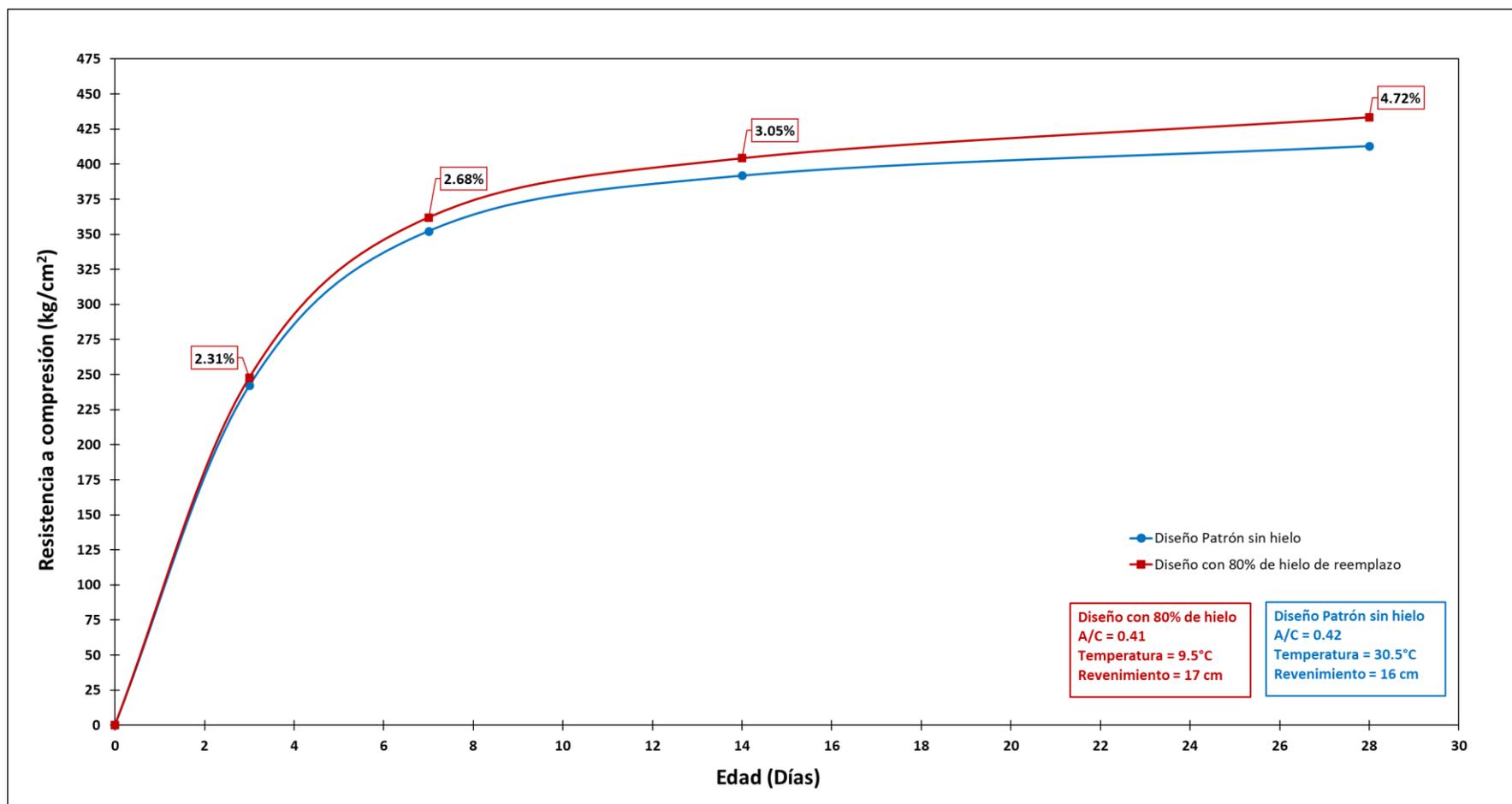
Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).



Fuente: Autora

Figura 57

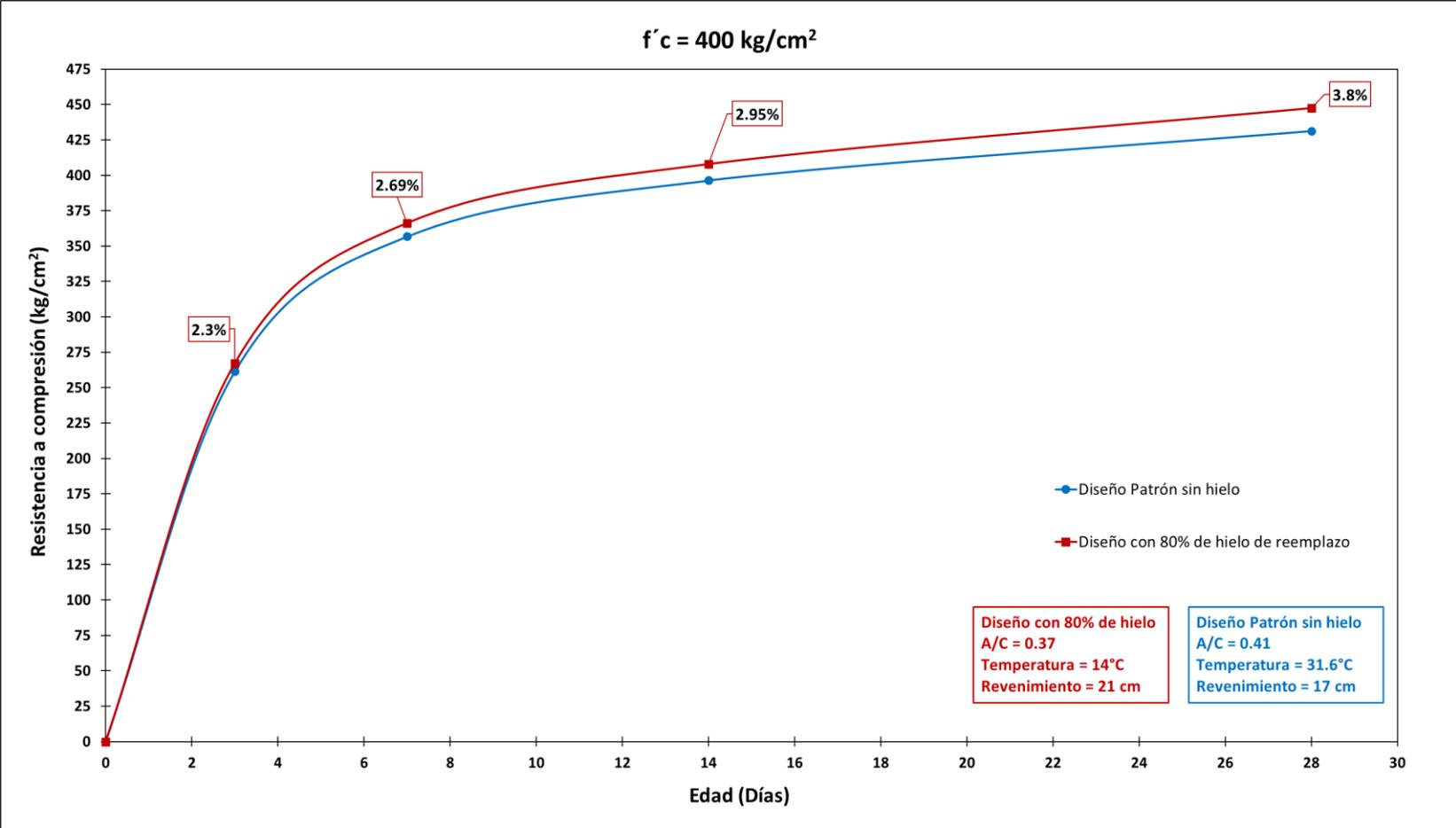
Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).



Fuente: Autora

Figura 58

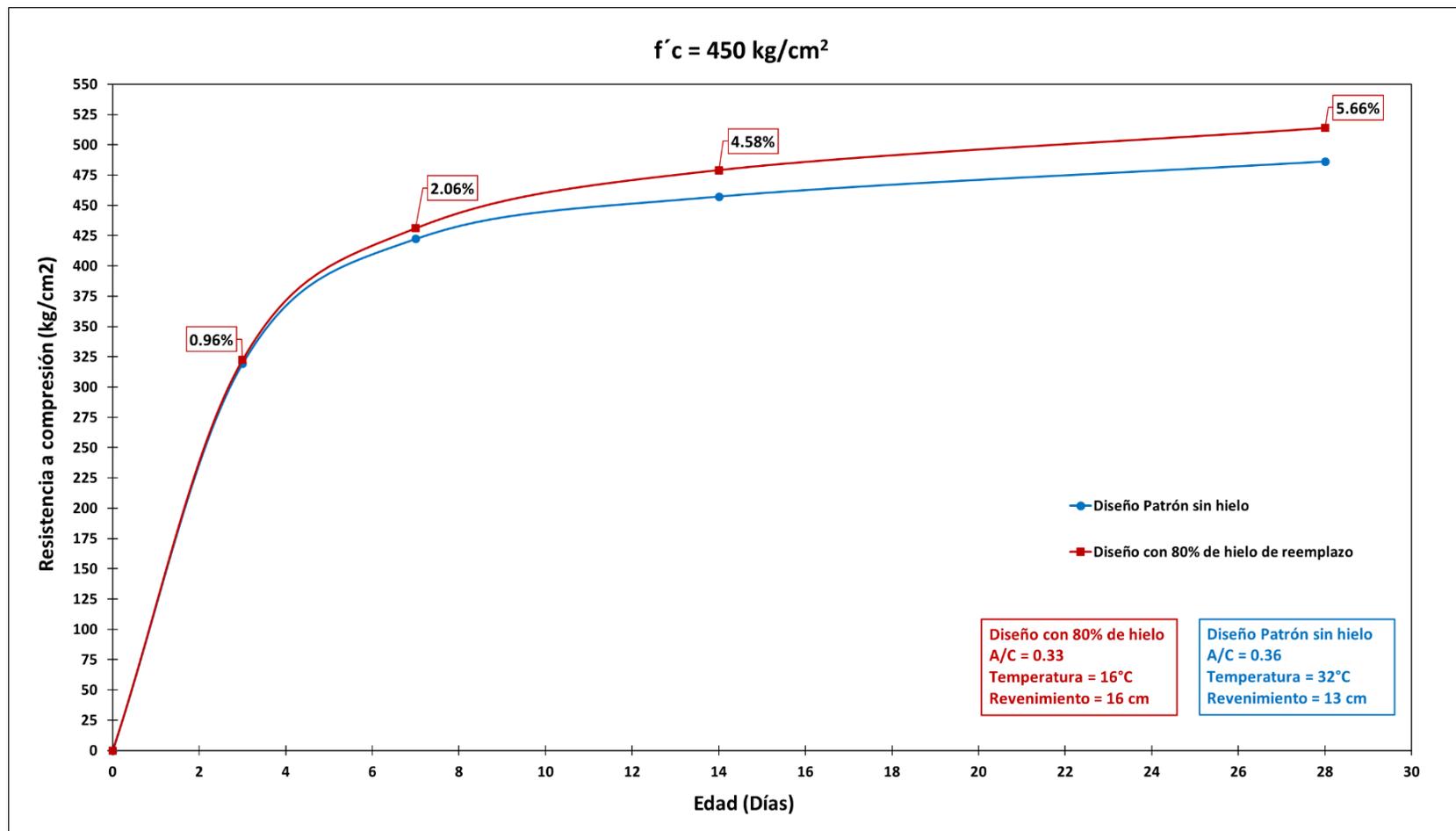
Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).



Adaptado de: (Córdova, 2021, p. 117)

Figura 59

Curva comparativa del desarrollo de resistencia del hormigón $f'c = 450 \text{ kg/cm}^2$ (Sin hielo y con 80% hielo de reemplazo).



Adaptado de: (Córdova, 2021, p. 118)

CONCLUSIONES

De manera resumida, los resultados obtenidos en esta segunda fase investigativa son los siguientes:

Los resultados obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a la compresión simple muestran un incremento de resistencia en los hormigones que emplearon hielo, al ser estos comparados con el diseño patrón sin hielo. El porcentaje de ganancia de resistencia observado es de 10.45% y 4.72% para el diseño de 200 y 300 kg/cm² respectivamente.

Se obtuvo una reducción de temperatura de 18°C para el diseño de 200 kg/cm² y 19.5°C para el de 300 kg/cm². Para medir estos valores con exactitud, se empleó un termómetro digital, el cual fue colocado sobre la mezcla por un período de dos minutos.

Los revenimientos de los diseños patrón de 200 y 300 kg/cm², fueron 15 y 16 cm. Los diseños con 80% de hielo, presentaron revenimientos de 14 y 17 cm respectivamente. En estos últimos, no se requirió en su totalidad el agua de amasado dosificada, lo cual influenció la relación agua-cemento de la siguiente forma: de 0.48 a 0.46 para el diseño de 200 kg/cm² y de 0.42 a 0.41 para el diseño de 300 kg/cm².

Se puede concluir que, ante las distintas problemáticas que presenta la ciudad, las cuales no solo comprometen la eficacia con que se distribuye el hormigón a obra, sino también con un ambiente tan agresivo que impacta negativamente la durabilidad y desempeño de sus elementos estructurales que de forma complementaria se encuentran sometidos a constantes avalos sísmicos, es necesario implementar hielo molido en el concreto estructural.

Este no solo mejoraría la calidad de los elementos estructurales, sino que también aumentaría la resistencia, disminuiría la aparición de fisuras lo cual evitaría los problemas relacionados a la corrosión, incrementando el desempeño sísmico que favorecería a la reducción de pérdidas humanas durante un evento telúrico. Todo esto complementado con la reducción de costos.

RECOMENDACIONES

Acorde a los resultados obtenidos en la primera fase elaborada por el ingeniero Jamil Córdova y en la presente, se propone ampliar la investigación con la finalidad de complementar la información recopilada: a) para observar el comportamiento del hielo en hormigones comerciales o con menor cantidad de cemento, b) analizar la afectación del hielo en sustitución parcial del agua de amasado para en un diseño similar, variando el tamaño máximo nominal de la piedra (3/8", 1/2" , 3/4" y 1").

Así mismo, se debería considerar estudiar a largo plazo el incremento de durabilidad que presenten los elementos de hormigón estructural al substituir el agua de amasado por hielo durante la elaboración de la mezcla. Puesto que, los elementos estructurales de hormigón en la ciudad de Guayaquil, frecuentemente presentan problemas en su estado endurecido.

REFERENCIAS

- ACI Committee 211. (1991). *211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 214. (2011). *214RS-11: Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 225. (2016). *225R-16: Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 305. (2010). *305R-10: Guide to Hot Weather Concreting*. American Concrete Institute.
- ACI Committee E-701. (2013). *ACI Education Bulletin E4-12: Chemical Admixtures for Concrete*. ACI Educational Bulletin.
- Alvarado Alvarado, H., García Larreta, F., Hernández Gaviláñez, L., Mariscal García, R., Mariscal Santi, W., Rodríguez Villacis, J., & Silva Huilcapi, C. (2017). Evaluación de la contaminación físico-química y microbiológica de aguas del estero salado. *Dominio de las Ciencias*, 3(4), 672–691. <https://doi.org/https://doi.org/10.23857/pocaip>
- Alvarado Funes, S., Guzmán Romero, N., & Henríquez Tobías, G. (2009). *Comportamiento del concreto en climas tropicales para las principales zonas de El Salvador* [Tesis de Pregrado, Universidad de El Salvador]. Archivo digital. [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4103/1/Comportamiento del concreto en climas tropicales para las principales zonas de El Salvador.pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4103/1/Comportamiento%20del%20concreto%20en%20climas%20tropicales%20para%20las%20principales%20zonas%20de%20El%20Salvador.pdf)
- ASTM. (1993). C 127: Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. *ASTM International*.
- ASTM. (2001). C 128: Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. *ASTM International*.
- ASTM. (2003). C 29/C 29M – 97. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. *ASTM International*, 97(Reapproved).
- ASTM. (2005). C 494/ C 494M: Standard Specification for Chemical

- Admixtures for Concrete. *ASTM International*.
- ASTM. (2013). C 125: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. *ASTM International*.
- ASTM. (2014). C 131/C 131M-14; Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. *ASTM International*.
- Cheme, A. (2020). *Evaluación de la calidad del agua del Estero Salado zona “Puente Gómez Rendón” en Guayaquil durante los años 2017 y 2020*. [Tesis de Pregrado, Universidad de Guayaquil] Repositorio Institucional de la Universidad de Guayaquil. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/reduq/50940/1/BCIEQ-T-0549>
[Cheme Valencia Alexandra Elizabeth.pdf](#)
- Civil Engineering Discoveries. (2018, 24 de enero). *San Diego Concrete Pour* [Fotografía]. Facebook. <https://www.facebook.com/CivilEngDis/posts/san-diego-concrete-pourthis-massive-concrete-pour-required-a-258-truck-ballet-in/1721863241192197/>
- Climate Central. (2018). *2017 global temperature announcement*. <https://medialibrary.climatecentral.org/resources/2017-global-temperature-review>
- Córdova, J. (2021). *Características del hormigón preenfriado con hielo triturado y vaciado en condiciones de calor severo* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil] Repositorio Digital UCSG. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/16587/1/T-UCSG-PRE-ING-IC-373.pdf>
- Costa, C. (2015). Hydraulic Binders. En M. C. Gonçalves & F. Margarido (Eds.), *Materials for Construction and Civil Engineering* (pp. 1–48). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3>
- García Guillén, 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* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]

Repositorio Académico Digital UANL.
<http://eprints.uanl.mx/id/eprint/2416>

García Hernández, Á. (2007). *Desarrollo y análisis de pavimentos industriales desde el punto de vista del acabado superficial* [Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria] Repositorio Abierto de la Universidad de Cantabria.
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1100/4de7.AGHcap5.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Holcim Ecuador S.A. (2015). *Holcim Fuerte: Cemento Hidráulico tipo GU para la construcción en general*.
https://www.portaldirecta.com/portaldirecta/ec/CEMENTO_GU_G.pdf

INAMHI. (2019). *¿Qué es y qué hace el INAMHI?*. https://1902e919-20df-4c0f-ad07-aaac46b63c08.filesusr.com/ugd/265b70_e082664cac4d4240b4ed132f60045a9.pdf

INAMHI. (2021). *Boletines Climatológicos mensuales*.
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/bolhist/cli/>

INRIX. (2020). *2020 INRIX Global Traffic Scorecard Interactive Ranking & City Dashboard*. <https://inrix.com/scorecard/>

Joshaghani, A. (2017). The effect of trass and fly ash in minimizing alkali-carbonate reaction in concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.034>

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de Concreto* (1a ed.). Portland Cement Association.

Martínez, G. (2020). *Eficacia del proceso constructivo en el manejo de hormigones vaciados en climas calurosos* [Seminario Web]. Ingeniería Civil-UCSG.
<https://www.facebook.com/UCSGIngCivil/videos/2046110852186598>

MECACON S.R.L. (2021). *Losa de Hormigón Armado*.
<https://dehormigon.com.ar/hormigon-armado/losa-de-hormigon-armado/>

NEC-SE-HM. (2015). *Estructuras de Hormigón Armado. En Norma Ecuatoriana de la Construcción*. MIDUVI.

<https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-HM-Hormigón-Armado.pdf>

- Neville, A. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited (5^a ed.). <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614740.19>
- NTE INEN. (2011a). 1108:2011 *Agua Potable. Requisitos*.
- NTE INEN. (2011b). 2380:2011 *Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*.
- NTE INEN. (2011c). 490:2011 *Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos*.
- NTE INEN. (2011d). 863:2011 *Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio*.
- NTE INEN. (2011e). 872-1 *Áridos Para Hormigón. Requisitos*.
- NTE INEN. (2012). 152-5 *Cemento portland, requisitos*.
- NTE INEN. (2015). 1855-2 *Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos*.
- NTE INEN. (2016). 1855-1 *Hormigones. Hormigón Premezclado. Requisitos. 1855*.
- Owsiak, Z., Zapala Sławeta, J., & Czapik, P. (2015). Diagnosis of concrete structures distress due to alkali-aggregate reaction. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 63(1), 23–29. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2015-0003>
- Real Academia Española. (2021). *Diccionario de la Lengua Española*. <https://dle.rae.es/temperatura>
- Ron, S., & Varela, A. (2020). *Geografía y clima del Ecuador*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/GeografiaClima/>
- Vieira, M. (2015). Concrete. En M. C. Gonçalves & F. Margarido (Eds.), *Materials for Construction and Civil Engineering* (1^a ed, pp. 185–235). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Garzón Fajardo Ariana Monserrate**, con C.C: # **(0924443928)** autor/a del Trabajo de Titulación: **Concreto estructural preenfriado con hielo molido fundido en áreas urbanas para ambientes de calor extremo** 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, **15 de septiembre de 2021**

f. _____

Nombre: **Garzón Fajardo Ariana Monserrate**

C.C: **0924449382**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TEMA Y SUBTEMA:	Concreto estructural preenfriado con hielo molido fundido en áreas urbanas para ambientes de calor extremo.		
AUTOR(ES)	Ariana Monserrate Garzón Fajardo.		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Colón Gilberto Martínez Rehpani.		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	DE 15 de septiembre de 2021	No. PÁGINAS:	DE 146
ÁREAS TEMÁTICAS:	Materiales de Construcción, Tecnología del Hormigón, Tecnología de la Construcción.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Hielo, hormigón, fisuras, temperatura, caluroso, resistencia, durabilidad, hormigonado.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras): La ciudad de Guayaquil se encuentra inmersa ante distintas problemáticas ambientales que dificultan la correcta elaboración, desempeño y durabilidad de los elementos de hormigón, por lo que es preciso recurrir a alternativas que favorezcan a la mitigación de estas situaciones. El presente proyecto propone la implementación de hielo como sustituto parcial del agua de amasado empleada en la elaboración de la mezcla de hormigón. Esta alternativa no solo favorece a disipar los efectos climáticos de la ciudad, sino que también aumenta la calidad de las estructuras de hormigón. Este material se puede adquirir con facilidad, puesto que en la ciudad se comercializa a gran escala y en distintas presentaciones a causa de la industria camaronera. Así mismo, este posee una tarifa módica, lo cual contribuye a la disminución de costos. Esto debido a que, al aumentar las propiedades del elemento de hormigón, es posible reducir a largo plazo los costes de mantenimiento o reparación.			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 987482633	E-mail: arianag96@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):			