



ADITIVOS **COMO** SUPERPLASTIFICANTES **REGULADORES DEL HORMIGÓN**

CARLOS MAGNO CHAVARRY VALLEJOS | LILIANA JANET CHAVARRÍA REYES
ANDRÉS AVELINO VALENCIA GUTIÉRREZ | ENRIQUETA PEREYRA SALARDI XAVIER
JOAQUÍN SAMUEL TÁMARA RODRÍGUEZ | ANTONIO LAOS LAURA

**ADITIVOS
SUPERPLASTIFICANTES
COMO REGULADORES DEL
HORMIGÓN**

Aditivos superplastificantes como reguladores del hormigón

© Carlos Magno Chavarry Vallejos
© Liliana Janet Chavarría Reyes
© Andrés Avelino Valencia Gutiérrez
© Joaquín Samuel Támara Rodríguez
© Enriqueta Pereyra Salardi
© Xavier Antonio Laos Laura

© Editorial Tercer Sol

Av. Insurgentes sur 1667, Despacho 1003, Guadalupe Inn, Alcaldía Álvaro Obregón, Ciudad de México, México
www.editorialtercelsol.com

Primera edición

Diciembre 2022

Tiraje: 100 ejemplares

ISBN: 978-607-59446-7-8

Diseño de Portada: Patrick Bonifaz Huamaní

Diseño y diagramación: Rodrigo Medrano Serrano

Publicación sometida a evaluación de pares académicos en sistema doble ciego
(*Peer review double blinded*).

Impreso en México / Printed in Mexico

Queda prohibida la reproducción total o parcial de la presente edición, bajo cualquier modalidad, sin la autorización expresa del titular de los derechos.

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

CARLOS MAGNO CHAVARRY VALLEJOS
LILIANA JANET CHAVARRÍA REYES
ANDRÉS AVELINO VALENCIA GUTIÉRREZ
JOAQUÍN SAMUEL TÁMARA RODRÍGUEZ
ENRIQUETA PEREYRA SALARDI
XAVIER ANTONIO LAOS LAURA



PRÓLOGO

Los aditivos, en tanto materia de estudio, han sido reconocidos como reguladores elementales del hormigón al ser usados para diversos sistemas de construcciones en años posteriores. Los superplastificantes son un compuesto químico de esencialidad en la fabricación de hormigones autocompactantes al presentar características mejoradas durante el mezclado y fraguado. En ese contexto, este aditivo de cuarta generación está formado con base de policarboxilatos que modifican los atributos en condición fresca y endurecida, y cuyo mecanismo de acción se comporta como reductor de agua de alto nivel que oscila un 40 %.

Los superplastificantes no solo se limitan a la reducción de agua, sino a la regulación de agua y cemento que ayudan a mejorar el comportamiento reológico, el bajo factor de porosidad, el mayor tiempo de trabajabilidad, el efecto positivo en la duración y el soporte del hormigón. Estas características permiten optimizar la mezcla de manera adecuada con los componentes del concreto hasta conseguir resultados favorables en los procesos de construcción.

El presente libro titulado *Aditivos superplastificantes como reguladores del hormigón*, de Carlos Magno Chavarry Vallejos, Liliana Janet Chavarría Reyes, Andrés Avelino Valencia Gutiérrez, Joaquín Samuel Támara Rodríguez, Enriqueta Pereyra Salardi y Xavier Antonio Laos Laura, destaca fundamentos teóricos de la industria de la construcción, centrándose en indagaciones claves, y presentan temas necesarios para su entendimiento. En este sentido, se consideran los siguientes tópicos teóricos: un panorama sobre el hormigón, el proceso de fraguado durante la puesta de obra, las propiedades sujetas en el hormigón, los principales elementos de la estructura hormigonada, las nociones de los superplastificantes y, por último, los efectos de los aditivos sobre el hormigón.

Por tal motivo, se considera que este libro es de utilidad tanto para la adquisición de un conocimiento introductorio de los aditivos superplastificantes como para un conocimiento práctico en relación con el tema en cuestión. Este ámbito de la industria es considerado fundamental para los grupos de construcción, ya sea en estudiantes y profesionales de Ingeniería Civil, ya que determinan lineamientos necesarios para la amplia comprensión del material del hormigón. Incluso, está dirigido a los amantes lectores que tienen el interés de conocer nociones teóricas sobre el sistema constructivo.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	13
 CAPÍTULO I	
UNA MIRADA INICIAL SOBRE EL HORMIGÓN	15
1.1. ¿Qué es el hormigón?	16
1.2. Un marco normativo: Norma E-060 y American Concrete Institute (ACI)	19
1.3. El hormigón autocompactante: aspectos medulares	23
1.4. El hormigón y la temperatura	26
1.4.1. El hormigón en climas fríos	27
1.4.2. La consistencia del hormigón en climas cálidos	28
1.4.3. El hormigón frente a las altas temperaturas	29
1.4.4. La temperatura sobre la resistencia e hidratación del hormigón	30
 CAPÍTULO II	
EL FRAGUADO EN EL HORMIGÓN	33
2.1. Concepciones acerca fraguado del hormigón	34
2.2. Proceso de fraguado	35
2.3. Fraguado rápido vs. fraguado lento	39
2.4. Factores que inciden en el fraguado	43
2.4.1. Relación de agua - cemento	43
2.4.2. Humedad	44
2.4.3. Mezclado	46
2.4.4. Endurecimiento	48
2.4.5. Temperatura	48
 CAPÍTULO III	
PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL HORMIGÓN	51
3.1. Un marco introductorio a la gestión en la construcción	52
3.2. Delimitación entre el hormigón fresco y endurecido	56

3.3. Propiedades en el hormigón fresco	58
3.3.1. Trabajabilidad	59
3.3.2. Consistencia	59
3.3.3. Segregación	60
3.3.4. Exudación	61
3.4. Propiedades en el hormigón endurecido	61
3.4.1. Físico-químicas	62
3.4.2. Mecánicas	65
3.4.3. Reológicas	67
3.5. Modificadores del comportamiento reológico del hormigón	68
3.6. Carbonatación en el concreto por pérdida del pH y su reacción	70

CAPÍTULO IV

ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGÓN 73

4.1. Implicaciones sobre la mezcla del hormigón	74
4.2. Agua y aire	75
4.3. Cemento	78
4.4. Los agregados y su diversidad	82
4.5. Los aditivos y su tipología	85
4.6. Materiales suplementarios o complementarios	86

CAPÍTULO V

INTRODUCCIÓN A LOS ADITIVOS

SUPERPLASTIFICANTES 89

5.1. Alcance conceptual sobre los aditivos superplastificantes	90
5.2. Sistema clasificatorio de los plastificantes y superplastificantes	93
5.2.1. Plastificantes de 1. ^a generación	95
5.2.2. Plastificantes de 2. ^a generación	95
5.2.3. Plastificantes de 3. ^a generación	96
5.2.4. Plastificantes de 4. ^a generación	96
5.3. Tres clases de superplastificantes	97
5.3.1. Lignosulfonatos modificados (LS)	98
5.3.2. Condensados de formaldehído	98

5.3.3. Policarboxilatos	99
5.4. Aditivos con base de policarboxilatos	99
5.4.1. Efecto químico de los policarboxilatos	100
5.4.2. Estructura de polímero: naturaleza hidrófila en una cola hidrófoba	102
5.5. Regulación sobre su empleo	103

CAPÍTULO VI

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES CON BASE DE POLICARBOXILATOS: ANÁLISIS DE CASO PARA EL MEJORAMIENTO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL	107
--	------------

6.1. Una mirada evaluativa de la realidad	107
6.2. Resultados de la investigación	112
6.2.1. Superplastificantes con base de policarboxilatos en la resistencia a la compresión	112
6.2.2. Relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas del concreto	118
6.2.3. Temperatura extrema y la consistencia durante el tiempo de fraguado	126
6.2.4. Agregados con superplastificante de policarboxilatos en la propiedad de resistencia a la compresión	135
6.3. Discusión	140
6.3.1. Superplastificantes con base de policarboxilatos en la resistencia a la compresión	140
6.3.2. Relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas del concreto	141
6.3.3. Temperatura extrema y la consistencia durante el tiempo de fraguado	143
6.3.4. Agregados con superplastificante de policarboxilatos en la propiedad de resistencia a la compresión	143

REFLEXIONES FINALES	145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificaciones de los hormigones aplicados en la construcción	18
Tabla 2. Componentes principales del cemento Portland	36
Tabla 3. Fraguado rápido del concreto	41
Tabla 4. Fraguado retardado del concreto	42
Tabla 5. Composición química de los cementos (% en masa)	79
Tabla 6. Composición química del clinker (% en masa)	80
Tabla 7. Clasificación de los agregados según el tamaño de sus partículas	83
Tabla 8. Principales adiciones del cemento	87
Tabla 9. Tipos de aditivos utilizados en la construcción	90
Tabla 10. Muestra de diversas pruebas en el concreto	110
Tabla 11. Tipos de aditivos con relación entre a/c y la resistencia a 28 días	116
Tabla 12. Propiedades físicas y mecánicas de resistencia a la compresión del concreto	118
Tabla 13. Asentamiento del concreto fresco en clima frío	121
Tabla 14. Tiempo de fraguado con % de aditivo en clima frío	124
Tabla 15. Contraste de asentamiento de concreto con aditivo en temperatura media -18 °C a -20 °C	127
Tabla 16. Contraste de asentamiento con aditivo en temperatura media de 20 °C $\pm$ 1 °C	129
Tabla 17. Contraste de ensayos en concreto endurecido a 28 días con aditivo a 20 °C - 25 °C	130
Tabla 18. Contraste de ensayo en concreto endurecido a los 28 días con aditivo a -5 °C $\pm$ 1 °C	132
Tabla 19. Contraste de asentamiento con aditivos en temperatura media (20 °C a 25 °C)	134
Tabla 20. Tamaño máximo nominal y asentamiento con aditivo sobre la base de policarboxilato	136
Tabla 21. Tamaño máximo nominal y resistencia a la compresión con aditivo policarboxilato	137
Tabla 22. Relación entre agregado fino/grueso y asentamiento con aditivo policarboxilato	138
Tabla 23. Porcentaje de aditivo policarboxilato y la resistencia a la compresión de 28 días	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayos de fluidez sobre el hormigón autocompactante	25
Figura 2. Proceso de fraguado del hormigón	35
Figura 3. Medición de la consistencia del concreto a través de la prueba de asentamiento	60
Figura 4. Mecanismo de acción de la naturaleza hidrófila de cola hidrófoba	102
Figura 5. Estructura del polímero	103
Figura 6. Indicador de asentamiento vs. la dosificación de superplastificante (%)	113
Figura 7. Propiedad de resistencia del concreto a 28 días en diferente relación entre a/c	115
Figura 8. Asentamiento del concreto vs. el porcentaje de aditivo	119
Figura 9. Resistencia a la compresión vs. la edad del concreto	122
Figura 10. Porcentaje de aire vs. la adición de aditivos	123

PRESENTACIÓN

Uno de los retos que ha afrontado el ser humano es el proceso de construcción, desde sus principios hasta la actualidad, el cual ha alcanzado mayores planes de inversión aplicado en todos los países desarrollados para la mejora de ciudades urbanizadas y globales. Por ejemplo, desde las construcciones convencionales hasta conseguir fabricaciones de edificios con estilo arquitectónico renacentista sobre la base de concreto y con alturas impensables de construir.

Los cementos son materiales de construcción que actúan como sustancias adhesivas capaces de unir fragmentos de materia soldada en un todo compacto. Esto abarca una elevada cifra de compuestos muy diferentes que tienen poco en común, excepto su adhesividad que permite cementar la mezcla del concreto. La innovación de la química e ingeniería ha generado la aparición de nuevos insumos de construcción, cuya imaginación del hombre ha conseguido construcciones de modernidad como adornos de piedra, tallados, diseños, y entre otros. De esta manera, se consiguen beneficios en la producción de aditivos en relación con la mejora de las características reológicas y la optimización del concreto.

Estos nuevos insumos de construcción son los aditivos y están siendo comercializados en el mercado global para mantener las características de consistencia y resistencia de las edificaciones cementantes. Existen una serie de aditivos —como plastificantes, superplastificantes, inclusores de aire, retardador y acelerador de fraguado, etc.—, en la cual cada uno varía en su composición química de surfactantes, sales solubles, minerales insolubles y la última generación de polímeros. Los objetivos esenciales de los aditivos se desprenden para mejorar la trabajabilidad, controlar la propiedad de resistencia, predecir la resistencia térmica, acelerar o retardar el periodo de fraguado, disminuir la segregación de los materiales cementantes y aumentar el proceso de durabilidad de la estructura armada.

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Los aditivos superplastificantes son uno de los productos químicos capaces de reducir el agua durante el mezclado del concreto, pues poseen polímeros aniónicos que actúan en la reacción de hidratación de las partículas de cemento. La nueva innovación tecnológica del concreto ha desarrollado superplastificantes con base de policarboxilatos, siendo el aditivo de alto rango (40 %) en su mecanismo de acción y superando otros polímeros de generaciones anteriores.

CAPÍTULO I

UNA MIRADA INICIAL SOBRE EL HORMIGÓN

Con el surgimiento de las primeras ciudades y el desarrollo urbano, poco a poco aparecieron las construcciones modernas de casas, departamentos, obras públicas e infraestructuras específicas con el fin de conseguir el progreso del país. En los últimos tiempos, ante los grandes daños en las edificaciones de adobe causados por los terremotos, se dosifica de la mejor manera las construcciones de ladrillo y concreto que dan aporte a edificaciones sólidas antisísmicas.

En ese contexto, el crecimiento económico ha conseguido generar la necesidad prioritaria de invertir en infraestructura; lo cual provoca una alta solicitud de servicios en el área de la construcción. Asimismo, los materiales son básicos en toda edificación y se obtiene la mayor sostenibilidad de dichas construcciones, e inciden en el comportamiento de adecuación de edificaciones constructivas.

Los ladrillos, las piedras chancadas, los cementos, las maderas, las varillas de fierro y hormigones son materiales necesarios para la construcción. De mayor interés de estudio es el hormigón. Este material es el más importante e indispensable en el sector de la construcción, ya que muestra mayor demanda y requerimiento de carácter especializado al encontrarse en continuo avance de la tecnología. En la actualidad, la mezcla de hormigón refleja, principalmente, una construcción convencional trabajada en tiempos remotos. En este sentido, es oportuno mencionar los diseños insertos de aditivos en la mezcla de este material con el fin de modificar las características mecánicas y físicas del estado del concreto. De esa manera, se permite mejorar el rendimiento en las construcciones.

El hormigón, al ser un material versátil y trabajable durante su aplicación, se convierte en la primera opción para su empleo, el cual destaca sus características más esenciales: (a) la resistencia, (b) durabilidad, (c) bajo mantenimiento para la conservación de ser un material indispensable en la construcción. Asimismo, este material está integrado por agregados finos y gruesos, cemento y agua. Sin embargo, provoca considerables efectos negativos al medio ambiente por las transmisiones de dióxido de carbono, siendo irreparables e insostenibles para el país.

1.1. ¿Qué es el hormigón?

Es una sustancia fundamental, ya que conforma todas las construcciones, principalmente la estructura, lo cual es importante en la vida del edificio, su perdurabilidad y la habitualidad. Cabe destacar que hay una distinción entre los conceptos de concreto y hormigón, puesto que ambas palabras son usadas en la literatura científica y parecen ser iguales. Efectivamente, ambas provienen de la cultura anglosajona, pues por concreto o hormigón se entiende a toda unión de partículas diversas para formar una masa blanda y compacta, cuya distinción se relaciona con las proporciones y el modo de ser usado.

En este sentido, el hormigón se refiere a la mezcla de cemento o cualquier otro material hidráulico, en añadidura de agregados fino y/o grueso y agua, con o sin implemento de aditivos. Particularmente, la pasta de agua junto al cemento compone casi del 25 % al 40 % del grado volumétrico total del hormigón. En contraparte, el volumen total del cemento está constituido normalmente entre el 7 % y 15 %, el agua comprende del 14 % al 21 %, y el agregado, del 60 % al 80 % del volumen total de este material (Estrada y Páez, 2014).

Entonces, es un material conformado desde áridos naturales y/o artificiales de diversos tamaños que son aglomerados por una combinación de conglomerante (cemento, cal, entre otros) y agua. En muchos casos, su composición es completada con la aportación de otros productos como aditivos y adiciones. Bajo ese contexto, posee la particularidad de que se empieza de

componentes sueltos y diversos, cuya mezcla proporciona una sustancia en estado pastoso, utilizándose. De esta manera, por transformaciones físico-químicas (fraguado), se transforma en una materia densa, fuerte y duradera.

Como señala Segura (2011), es conocido por ser un material estructural compuesto desde la mezcla homogénea de diversos agregados como arena o grava, con el suplemento de cemento y agua. Cabe resaltar que es opcional utilizar aditivos superplastificantes. La mezcla de los elementos del hormigón produce un aglomerado plástico que permite ser moldeado y compactado con relativa facilidad. Sin embargo, esta masa gradualmente pierde su característica de horas después, convirtiéndose en cuerpo sólido y, finalmente, en un hormigón endurecido.

Tabla 1

Clasificaciones de los hormigones aplicados en la construcción

Clasificación de hormigones	
Por su sistema de armado	
Hormigón en masa	Se refiere al hormigón que no tiene armadura metálica.
Hormigón armado	Es aquella que dispone de una cuantiosa armadura en su interior cuya función es resistir los impulsos de tracción y flexión.
Hormigón pretensado	Es un hormigón armado en el cual toda la armadura fue pensada previamente. Posterior a ello, se hormiga.
Por su composición	
Hormigón de áridos ligeros	Los áridos artificiales, como bien natural, están en una densidad muy baja de los hormigones ordinarios.
Hormigón de áridos pesados	Estos áridos son de alta densidad y se destinan fundamentalmente a las centrales nucleares.
Hormigón ordinario	Este está formado por áridos ligeros y pesados, agua y cemento.
Hormigón ciclópeo	Este hormigón está integrado por áridos pesados de enormes piedras, además de arena, cemento y agua para rellenar la cimentación
Hormigones especiales	
Hormigón con fibras	Aquellos hormigones que incorporan fibras discretas, cortas y aleatorias distribuidas en su masa. Esto mejora con respecto a la fisura por retracción plástica y es resistente al fuego.
Hormigones refractarios	Su mezcla está conformada por materias primas, aditivos y agentes ligantes que resisten a las altas temperaturas sin descomponerse dicho hormigón.

Nota. Adaptado de Mehta y Monteiro (1998); Umacon (2017).

En la Tabla 1, se aprecian las clasificaciones del hormigón que describen su concepto y noción. Asimismo, se clasifica según su sistema de armado que implica tres tipos; el hormigón de masa, el hormigón armado y el hormigón pretensado; según su composición: el hormigón de áridos ligeros y pesados,

ordinarios, ciclópeo y otras diversidades más; y, finalmente, hormigones especiales: el hormigón con fibra, autocompactado y refractarios.

1.2. Un marco normativo: Norma E-060 y American Concrete Institute (ACI)

La población se encuentra sometida a la necesidad de emplear técnicas diversas que avalen la continuidad de las estructuras constructivas. En este sentido, se ha desarrollado el área de la Ingeniería estructural que conforma la Ingeniería civil al diseñar y calcular la estructura interna en elementos de las edificaciones preestablecidas. Ello con la finalidad de conseguir firmes y resistentes estructuras antisísmicas. Esta rama de la Ingeniería, continuamente, ha estudiado el comportamiento que ejercen las estructuras en la construcción, siendo importante la intervención primaria del acero y el hormigón en su fluidez activa.

En la actualidad, surgen investigaciones de la comparativa de hormigones siendo actualizados por medio del avance tecnológico, e incluso diversas instituciones como la American Concrete Institute (ACI), la American Society of Civil Engineers (ASCE), la American National Standards Institute (ANSI), entre otros que actualizan los factores de estudios que participan en el sistema interno de las edificaciones. Estos componentes brindan soporte propio a las obras públicas planificadas.

Los profesionales de la construcción incluyen diversas técnicas en su campo de estudio que por razones múltiples no consideran las nociones del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) ni el marco normativo que trabaja dicho sector. Este vacío criterio implica un desconocimiento del control de calidad en las edificaciones, el cual impone gradualmente en el marco normativo que impera en los países a nivel mundial.

Durante el mandato del expresidente Alejandro Toledo, en el 2002, se promulgó la Ley 27792 en la que se establece la creación del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), cuya ley determina

la organización orgánica básica y las funciones. Asimismo, establece las competencias funcionales que comprende legislar y determinarla política nacional del sector de urbanismo y construcción; dirigir y supervisar determinadas políticas de difusión según las áreas; manifestar los programas nacionales; fiscalizar el cumplimiento de las normas preestablecidas, entre otros (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2022).

De acuerdo con las directrices de la Dirección Nacional de Construcción, el MVCS se divide en cuatro direcciones: Dirección Nacional de Vivienda, Dirección Nacional de Urbanismo, Dirección Nacional de Construcción y Dirección Nacional de Saneamiento, siendo de mayor interés la tercera como enfoque de estudio en el marco normativo de las edificaciones. Tal efecto, se encarga de sugerir programas de políticas y normas en relación con la construcción de infraestructuras de obras, así como promover el desarrollo, supervisar su aplicación en el campo y estimular la iniciativa de mejorar las condiciones de edificaciones. De esa manera, es consecuente con el nivel de vivienda de la población en general.

El plan operativo institucional (POI) de dicha dirección es de legislar e incentivar el desempeño eficiente del mercado de construcciones. Para ello, toma como guía el lineamiento de la construcción segura antisísmica y saludable en las condiciones habitacionales en el sistema constructivo. Asimismo, resulta necesario indagar el marco normativo de las edificaciones para acatar los lineamientos.

Como preámbulo a este reglamento, se sostiene que las obras de edificaciones deben controlar la calidad arquitectónica, en el cual alcanza llegar a una reparación práctica y artística según el objetivo de la construcción. Asimismo, que se cumplan con los logros de disposiciones de seguridad, el soporte al fuego, la eficacia del procedimiento edificante al ser aplicado en una zona urbana, y el cumplimiento del marco normativo vigente. El área de normalización tiene a su cargo el desarrollo de las normas técnicas del RNE y la facultad de aprobar los sistemas constructivos no convencionales. Este tipo de reglamento se elabora por medio de comités técnicos, cuya formación integran instituciones, consultores y universidades que involucran.

A través del Decreto Supremo 015-2004-VIVIENDA, se lleva a cabo la aprobación del índice y la organización del RNE que conforman las normas técnicas para las facultades constructivas de la ciudad. Estas normas son (a) generalidades, (b) habilitaciones urbanas y (c) edificaciones (Decreto Supremo 011-2006-VIVIENDA, 2006).

a. Generalidades

b. Habilitaciones urbanas

- Tipos de habilitaciones
- Componentes estructurales
- Obras de saneamiento
- Obras de suministro de energía y comunicaciones

c. Edificaciones

- Arquitectura
- Estructuras
- Instalaciones sanitarias
- Instalaciones eléctricas y mecánicas

El RNE se refiere a la norma técnica rectora que instituye los derechos y las funciones de los agentes que intervienen en el proceso de edificación, cuyo fin sea garantizar la calidad de las construcciones preestablecidas. Los principios que rigen el RNE son funcionalidad, seguridad, habitabilidad, accesibilidad y adecuación en la construcción.

Como enfoque de estudio, se describe el marco normativo de E-060 concreto armado que se encuentra suscrito en el RNE. Este acuerda condiciones generales y requerimientos ínfimos para encargarse del diseño, análisis, edificación, control de calidad y revisión de las estructuras de hormigones de tipo armado, reforzado y simple en las construcciones. Ante la elaboración de

planos y detalles técnicas de algún proyecto constructivo, el encargado debe cumplir con dicha norma. Su prioridad está sujeta en discrepancia con otras diversas normas en referencia.

Los planos y las especificaciones técnicas deberán ser efectuadas por la firma del ingeniero civil colegiado, siendo el único con poder autoritario de la aprobación de modificaciones. Además, los planos del proyecto estructural deben cumplir con las informaciones siguientes: detalles del anclaje, resistencia mínima a compresión del hormigón, secuencia de aplicabilidad de las fuerzas en el postensado, relaciones de las normas disponibles en el diseño, etc. Con respecto a la supervisión de la obra, el supervisor tiene la obligación de cumplir con la norma, el cual ejecuta por medio de cuaderno de obra al registrar las situaciones técnicas.

Además, brinda términos de notaciones y definiciones de uso genérico en dicha norma. El apartado tres, describe los materiales que componen el concreto. En los siguientes capítulos se abordan los requisitos de la durabilidad, la calidad del concreto, encofrados y juntas de construcción, los requisitos de resistencia del material, la flexión y carga axial, muros, losas en dos direcciones, las zapatas, el concreto prefabricado, el concreto preesforzado, las disposiciones para el diseño antisísmico, el alcance del concreto estructural simple, entre otros tópicos descriptivos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2009).

La ACI es una organización sin fines de lucro educativo técnico para la población norteamericana que desarrolla normas técnicas del manejo y práctica del hormigón reforzado. Fundado en 1904, cuya sede central se encuentra en Michigan, USA. Esta organización se exhibe como foro de discusión de asuntos vinculados al hormigón y el desarrollo de soluciones a los posibles problemas constructivos. Asimismo, es ejecutado por medio de reuniones y convenciones como el *Diario ACI*, *Hormigón Internacional* y publicaciones técnicas.

En ese contexto, la ACI es una entidad con autoridades líderes alrededor del mapa para el desenvolvimiento y distribución de estándares basados en los acuerdos, los programas educativa y de capacitación, los programas de certificación para personas y organizaciones participantes en la organización, la edificación y los componentes del hormigón al compartir el pacto de indagar en su mejor funcionamiento. Este instituto está centrado en la base de su reglamento propio aprobado por los miembros participantes en general. La junta de dirección es el área responsable de la administración general de este organismo, incluso de cumplir el rol de desarrollar políticas que fomenten los objetivos establecidos. Al reunirse dos veces cada año, examina cuestiones de presupuesto, revisiones de políticas, desarrollo de actividades preestablecidas y criterios administrativos..

1.3. El hormigón autocompactante: aspectos medulares

La alta prestación de los hormigones ha ido creciendo desde su implantación en el mercado internacional por las grandes ventajas a corto y largo plazo de su empleabilidad en las edificaciones. El mercado industrial de materiales prefabricados de hormigón cada vez más está activando el desarrollo sostenible del país y la fabricación de otros tipos de hormigones que son empleados por las nuevas tecnologías. Esto trae el compromiso en desarrollar materiales de propiedades resistentes a favor del mantenimiento de la durabilidad, siendo perjudicial las posibles fisuras a consecuencia de la retracción del hormigón.

Por medio del avance tecnológico, los materiales de construcción —como fibras estructurales, aditivos y tipos de cemento— han conseguido desarrollar variedades de hormigones especiales que permiten que haya prestaciones mejoradas adaptables a los requerimientos actuales de la construcción. En los diversos tipos de hormigones especiales destacan: el hormigón de alta calidad, el hormigón autocompactante, el hormigón reforzado con fibras y otros (Paredes, 2021).

A inicios de los 80, surgió el asunto del soporte en la conformación del hormigón que comenzó a ser relevante en Japón. La población japonesa observó la posible resolución para edificar estructuras de larga duración, lo que provocó la fabricación de un hormigón con la capacidad de fluir al interior del encofrado, llenando de manera natural su volumen, así como se consolida bajo el accionar de su propio peso, sin realizar compactación interna ni externa. De esta manera, surgió el hormigón autocompactante. A esto se suma la aportación del docente japonés Okamura, ante la exigencia de elaborar este tipo de material en 1986.

Así, el hormigón autocompactante es un material de fluido fresco y de compresión elevada al compactarse con su propio peso, sin estar sometido a segregación y compactación del hormigón. Ello es posible cuando el autocompactado tiene una mezcla uniforme con los componentes cementantes y áridos derivados. Es decir, dispone la propiedad de afanzarse con su propio peso sin dependencia de ser compactada mediante actores que ayudan con el encofrado estrecho y armado (Arcila et al., 2022).

El término de trabajabilidad es característico del campo de la construcción, siendo utilizado para hormigones de estado fresco. Asimismo, se relaciona con la facilidad que consigue al obtener un hormigón adecuado de compactado. En ese contexto, tiene un alto rango de trabajabilidad, pues no es requerido el trabajo externo para su proceso de compactación. De este modo, está sometido a cumplir con parámetros de trabajabilidad el cual garantice su autocompatibilidad: (a) capacidad de relleno, (b) aguante a la separación y (c) capacidad de paso, respectivamente.

En primer lugar, la capacidad de relleno es la disposición que tiene el material para circular y rellenar completamente casi todos los huecos en el encofrado a través del accionar exclusivo de su propio peso. En segundo lugar, el aguante a la separación es la cualidad de mantener homogéneamente su composición anterior, durante y posterior de su elaboración, de tal manera que le permita alcanzar una uniforme distribución de los agregados en toda su

masa plástica. En tercer lugar, la capacidad de paso se refiere a la característica de discurrir entre las armaduras y el encofrado por el accionar de su propio peso y sin separación alguna.

Teniendo en cuenta a Huamaní (2018), las ventajas son importantes porque brindan beneficios en favor al hormigón especial. Estas ventajas son insuperable calidad de los elementos hormigonados, gran hermetismo y resistencia de las estructuras, ahorro en personal y equipos, mayor rapidez de ejecución, mayor reducción de ruido por la ausencia de las maquinarias de vibradores, perfecciona la durabilidad de las estructuras al no dejar espacios vacíos y mejora el proceso de compactación por la adherencia de los materiales mezclados.

Existen diferentes ensayos que se han realizado en los hormigones frescos autocompactantes, los cuales determinan el cumplimiento o no de los requerimientos de la trabajabilidad. Estas son ensayo de escurrimiento, ensayo de caja “L”, ensayo de embudo “V” y ensayo de anillo “J”.

Figura 1

Ensayos de fluidez sobre el hormigón autocompactante



De escurrimiento

Método específico ideado para los hormigones. El escurrimiento y el tiempo se usan para la fluidez y la velocidad de flujo del hormigón autocompactante en ausencia de instrucciones.



De caja L

Sirve para determinar la capacidad de paso del hormigón autocompactante para fluir a través de aberturas estrechas, incluso los espacios entre las barras de refuerzo sin segregación.



De embudo V

Funciona para determinar la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón autocompactante. Consiste en medir el tiempo que tarda el hormigón en fluir fuera de un embudo de forma V.



De anillo J

Denominado como anillos japoneses, el cual determina la evaluación de la resistencia del hormigón al insertar refuerzos de acero sin la separación de los agregados del hormigón fresco.

El primero, de escurrimiento, se tiene al Cono de Abrams por medio de una placa base que lleva una serie de figuras circulares, además del cronómetro y la cinta métrica para medir el escurrimiento que se produce en la masa plástica. El segundo, el ensayo de la caja “L”, determina la medición del traslado del hormigón autocompactante hacia las aberturas estrechas de la caja en forma de “L”. El tercero, el ensayo de embudo “V” tiene la propiedad de medir el relleno, la densidad de la masa y la medición del paso del hormigón en estado fresco. Ello permite valorar la capacidad del fluido en las zonas armadas bajo su propio peso. Y finalmente, el cuarto, el ensayo de anillo “J” tiene la capacidad de evaluar la resistencia del hormigón por medio de barras de armadura bajo la condición de flujo libre.

Por consiguiente, este tipo de hormigón es utilizado en mayor proporción por una serie de características inherentes; su calidad es mejor que los hormigones convencionales al obtener elementos constructivos de mayor compactación, resistentes a las agresiones físicas y químicas, que protegen mejor a las armaduras por su mayor compacidad y presentan cambios en la educación ambiental a través de la sensibilización medioambiental.

1.4. El hormigón y la temperatura

La edificación de pavimentos rígidos y la fase del fraguado del hormigón al encofrado están afectadas fuertemente por los efectos climáticos durante la ejecución de la obra, en consideración de la superficie grande de exposición que presentan las construcciones. En ese contexto, el proceso de hormigonado en baja temperatura (clima frío) y alta temperatura (clima cálido), así como otros acontecimientos —como lluvia, vientos fuertes— generan la necesidad de saber cómo la temperatura impacta al pavimento de concreto recién fraguado.

Uno de los problemas que frecuentemente identifica el constructor sucede cuando al hormigonar se encuentra con una temperatura ambiental muy baja o muy alta, lo que afecta seriamente a las propiedades y/o características propias del hormigón endurecido. Estas primeras horas y días de secado, cuya reacción de hidratación del cemento se está produciendo y consecuentemente sucede la conversión del estado plástico a estado sólido, es susceptible de

sufrir alteraciones por este efecto de la temperatura muy baja en tiempo de frío o de grandes calores en tiempo caluroso. A continuación, se abordarán las características que actúan en el hormigón estructural en relación con la temperatura, en climas fríos, en climas calurosos, y la resistencia e hidratación.

1.4.1. El hormigón en climas fríos

Se considera clima frío cuando el tiempo de ambiente promedio es inferior a 5 °C por más de 3 días consecutivos; por el contrario, si el tiempo de ambiente promedio permanece por encima de los 10 °C, ya no se considera clima frío.

Ahora, para la puesta en práctica del hormigón, bajo estas condiciones del clima, debe considerarse los siguientes aspectos. Primero, la temperatura de la materia plástica del hormigón —al momento de verterla en el encofrado— no debe ser menor a los 5 °C, ya que al producir la reacción de hidratación y desprender el calor ante una temperatura muy baja es susceptible de congelarse. Segundo, se prohíbe verter el concreto sobre el encofrado al ser inferior a 0 °C porque la humedad recibida del encofrado se congela en su interior. Tercero, se debe suspender el hormigonado siempre que se prevea que en las 48 horas siguientes el vertido de este material baje la temperatura ambiente por debajo del 0 °C (Ministerio de Fomento de España, 2010).

Ante las bajas temperaturas, el material se comporta como una roca similar que desprende su porosidad y grado de saturación en el agua. Esta permite que las características determinen comportamientos específicos frente al clima frío. Entonces, al escurrirse el agua incrustada en los capilares de sí misma, incrementa de volumen interior y coacciona un resultado de cuña que corta al material.

Por ello, la defensa contra ese efecto de fisura es la adecuada confección de compactación posible del hormigón y la dosificación después del fraguado. Asimismo, el empleo de aireación mejora considerablemente la resistencia ante climas helados, puesto que las burbujas pequeñas de aire ocluido, que ejercen la función de cámaras de expansión, anulan el efecto destructivo de la presión interna producida por el agua al momento de congelarse.

1.4.2. La consistencia del hormigón en climas cálidos

Se entiende por tiempo caluroso al producirse una mezcla de elevadas temperaturas bajo la humedad concerniente y alta velocidad del viento; es decir, a las condiciones de exposición a la elevada temperatura ambiente de la radiación solar a lo largo del procedimiento de mezclado, transporte, fraguado y curado del material.

Asimismo, para la puesta en práctica del hormigón se deben considerar efectos puntuales: como primer apartado, los materiales del hormigón y el encofrado deben estar en segura protección del sol —el cemento, la arena y agua deben estar resguardados contra los rayos del sol—. Segundo, efectuado el emplazamiento del hormigón, se protegerá del sol y del viento para eludir la desecación de la masa plástica de hormigón. Después, se debe hormigonar en horas de la tarde cuando la temperatura es menos calurosa y, finalmente, se debe suspender el hormigonado cuando la temperatura es superior a 40 °C o haya un exceso de viento (Ministerio de Fomento de España, 2010). Calo (2014) sostiene los siguientes problemas asociados con el clima caluroso: surge menor tiempo disponible para el traslado de colocación, hay mayor demanda de agua con pérdidas de resistencia, hay mayor riesgo de fisuras en el pavimento y se ejerce una menor eficiencia de los aditivos reductores de agua.

Ante el riesgo de la fisuración de origen térmico, es imprescindible adoptar medidas que deben ser implementadas durante la edificación. Por ejemplo, realizar riegos periódicos para mantener saturados a los agregados del hormigón, mantener humedecida la base cementante antes del llenado del hormigón para evitar la absorción de la mezcla, instalar pantallas contra los rayos del sol para la disminución del tiempo en el área, mantener el cuidado del curado de fisura del hormigón y realizar la mezcla con la mínima porción de agua para la adecuada colocación del hormigón.

1.4.3. El hormigón frente a las altas temperaturas

Las altas temperaturas como el fuego y calor son acciones de mayor destrucción que afectan a las estructuras de los materiales cementantes de las edificaciones. Asimismo, las prolongadas exposiciones a temperaturas elevadas dañan drásticamente la constitución química, el contenido de pasta del hormigón y la estructura física de las edificaciones. Además, surgieron efectos primarios como la hidratación del hormigón endurecido y la falla por fractura del material de la superficie en extremo calor, propiciando la descomposición irreversible del soporte mecánico y la impermeabilidad estructural de la construcción.

Tal como indican Xargay et al. (2016), los efectos de la alta temperatura varían según el grado de calor que alcanza la edificación. Cuando se encuentra por debajo de 200 °C, origina la expulsión de agua alojadas sobre la red de poros estructurales interconectados del hormigón. No obstante, esto ocasiona daños a las características físicas del hormigón, como la permeabilidad y la durabilidad de la construcción. En contraparte, cuando se halla por encima de 200 °C, ocurre una deshidratación de la pasta del concreto, lo cual genera el aumento de tamaño de la porosidad edificada. En tanto, al superar los 500 °C de temperatura, los agregados pesados (como las piedras) se degradan paulatinamente y ocasionan cambios irreversibles en la composición general del material.

En este sentido, es prioridad prevenir el alcance de las altas temperaturas del hormigón, por lo cual se debe emplear técnicas de protección en las construcciones: la aplicación de morteros cementantes en la superficie debilitada de la estructura, colocar paneles con lana de roca y fibras de polipropileno en la masa plástica del concreto, disponer de barreras térmicas para la protección de la superficie estructural, entre otros.

1.4.4. La temperatura sobre la resistencia e hidratación del hormigón

La temperatura influye de forma principal en el soporte del hormigón, sobre todo en etapas iniciales de las edificaciones, la cual confluye como una de los elementos que mayor afectación a la transformación resistente del material durante el tiempo. De este modo, los hormigones fabricados, al obtener temperaturas altas en el proceso de fraguado, alcanzan menor resistencia a tiempos prolongados de la construcción, siendo mayor su resistencia a corto tiempo.

En la industria constructiva de infraestructuras cementadas se refleja la falta de soporte que surge en climas cálidos que en las altas temperaturas. Una temperatura alta del ambiente exige mayor demanda de agua en el hormigón. En tanto, un aumento de la temperatura de la mezcla en estado fresco provoca el aumento en su velocidad de la pérdida fluida e hidratada más rápido del cemento. Ello suscita un apresuramiento en el proceso del fraguado y una baja resistencia. Cabe mencionar que la temperatura ha adquirido efectos sobre la resistencia del hormigón, ya que está sujeto a otros efectos como la velocidad de la hidratación, el elemento estructural del hormigón, el rápido proceso de vaporización y la resultante deshidratación del material. Frente a tiempos altos, el nivel de resistencia a corto tiempo mejora, pero posteriormente empeora porque la pasta del cemento es menos uniforme en su porosidad.

La dosificación a mayor cantidad del cemento es un indicador esencial de que no hay pérdida de resistencia existente por las altas temperaturas, siendo apoyada por suministros de aditivos reductores de agua. Para ello, hay investigaciones empíricas que han tratado de reconocer los resultados de la temperatura en el aguante del hormigón. En este sentido, en la investigación de Mouret et al. (2003) se estudia el deterioro de la resistencia del hormigón en clima cálido, el cual busca evidencias de que el incremento del agua es el encargado de la falta de aguante del hormigón. Como conclusión, se determinó que la baja resistencia depende, en mayor medida, del contenido combinado de aire y agua de la pasta a granel de concreto fresco.

Es necesario mencionar las etapas del procedimiento de hidratación del concreto. Sobre ello, se refiere a las reacciones simultáneas que están sujetas sobre los compuestos anhidros con el agua. Es decir, es una reacción química que se produce al incorporar agua a un compuesto cualquiera (Mehta y Monteiro, 1998). En la primera etapa, el mezclado se produce la disolución y la rápida reacción de los aluminatos y los sulfatos (compuestos químicos del cemento Portland), liberando alto calor. Por ello, dicha mezcla reacciona junto con el agua y forma el gel CASH, limitando el acceso de agua a los aluminatos. En la segunda etapa, el adormecimiento se realiza una serie de acciones como el transporte, la colocación, la compactación, el acabado y la textura del hormigón fresco. Se suscita reacciones que generan calor bajo, ya que el gel aún controla los efectos de los aluminatos, además los silicatos como alita y belita se disuelven lentamente, liberando iones de calcio.

En la tercera etapa, el endurecimiento causa que la saturación colmada de iones incite la formación de nuevos compuestos; estos elevan la temperatura y provocan la expansión térmica. Asimismo, algunos de estos compuestos son los cristales de hidróxido de calcio y el silicato de calcio hidratado, los cuales se adhieren a la extensión de los agregados y otorgan soporte al hormigón. La mezcla de estos compuestos define el fraguado inicial, el cual el concreto empieza a rigidizarse, donde se debe aplicar el curado que consiste en preservar el concreto humectado para garantizar la humectación del cemento restante. Esto culmina con el fraguado final; el concreto tiene suficiente resistencia para soportar cargas externas.

En la cuarta etapa, el enfriamiento alcanza el pico de calor del concreto y su temperatura empieza a disminuir consecuentemente, donde el hormigón se contrae, generando fisuras debido a los esfuerzos internos de tracción. Por ello, se debe aplicar de modo correcto el curado para la disminución de dicho efecto. En la quinta etapa, la densificación es lo que sucede paulatinamente y por muchos años. En esta fase, la belita reacciona y produce silicato de calcio hidratado e hidróxido de calcio, los cuales densifican aún más el concreto.

En cuanto a la hidratación del cemento, la temperatura influye sobre el proceso de hidratación. La temperatura alta actúa sobre el incremento de la celeridad de la hidratación en cortas edades. No obstante, los niveles de hidratación y el desenvolvimiento del aguate del hormigón son disminuidos a largo tiempo. Por ello, la temperatura influye sobre el proceso de la hidratación, pues suscita que ocurran modificaciones en la solubilidad de los elementos del hormigón y la composición de los productos hidratantes.

Por consiguiente, aplicado en las edificaciones, constituye el material base de las obras cementantes. En ese sentido, se comprende que la interacción de este aspecto en relación con las construcciones modernas incentiva la resistencia estructural de las edificaciones. Ello se percibe con el crecimiento de este sector a nivel internacional.

Así como se observan efectos favorables, el ACI converge en la importancia de ser uno de los compuestos de construcción de mayor consumo en todo el mundo para las edificaciones de mayor resistencia ante los sismos. También se contemplan variedades de hormigones que son utilizados en relación al estilo arquitectónico establecido. Ante esta situación, se subraya que la temperatura interviene a surgir alteraciones que afecta a la resistencia de las edificaciones y seguidamente dañan las variaciones en la conformación estructural y física del hormigón.

CAPÍTULO II

EL FRAGUADO EN EL HORMIGÓN

El concreto y el mortero son componentes para las edificaciones de larga durabilidad conocida. Estos materiales se mueven alrededor del ámbito constructivo a nivel mundial, por lo que el consumo es uno de los indicadores esenciales para el desarrollo sostenible del país.

Asimismo, el concreto o hormigón está integrado por un conjunto de elementos internos como el cemento, los agregados finos y gruesos, el agua y los aditivos superplastificantes. En primer lugar, es un elemento primordial en la construcción compuesto por arcilla y otras sustancias calcáreas sujetas a calcinación. En segundo lugar, el agua cumple el rol de participar en las transformaciones de hidratación del cemento y brindar el aporte de trabajabilidad necesario al concreto. En tercer lugar, los agregados están compuestos por dos áridos, por un lado, finos (arena). Por otro lado, pesados (piedras); estos confieren la propiedad de resistencia y durabilidad del hormigón. En cuarto lugar, siendo opcional en su integración del hormigón, los aditivos producen las modificaciones deseables para favorecer las características del hormigón con respecto a la durabilidad o la regulación del proceso del fraguado.

Ahora, el fraguado del hormigón es algo necesario que se aplica en la construcción, pero solo pocos tienen el conocimiento de este proceso sobre su definición y cómo se hace para la obtención óptima de los resultados. La construcción de los pavimentos, el proceso de durabilidad y el control de los agrietamientos conlleva el proceso posterior del fraguado del concreto para garantizar la resistencia de las edificaciones.

Cuando se mezcla el hormigón con sus componentes se convierte en un fluido más o menos denso en función de la calidad, el cual produce una reacción química de hidratación. Dicha reacción ha sido efectuada por el desenvolvimiento de fraguado del concreto durante el llenado de la mezcla plástica. De este modo, el proceso del fraguado es un factor primordial, puesto que se adquiere la resistencia del endurecimiento hasta alcanzar los niveles considerables del diseño de las edificaciones.

2.1. Concepciones acerca fraguado del hormigón

El concreto es una mezcla de compuestos que incluyen agregados finos y grueso, cemento y agua. Todo este conjunto de materiales se debe revolver hasta crear una mezcla homogénea que dará por resultado este material. Cuando el concreto y el agua entran interactúan, se origina una transformación química que establece el endurecimiento progresivo de la combinación (Ramos, 2021). Al decir que existe una reacción química denominada exotérmica se refiere que se produce desprendimiento de energía como la luz o el calor. En cuestión de tiempo, la mezcla comienza a perder su propiedad plástica, la cual le permite moldearse y es ahí donde comienza el estado del fraguado inicial.

Se entiende por fraguado al traslado de la masa de la condición plástico al sólido. Cuando se mezcla el agua con el cemento se hace un fluido más o menos denso. Entonces, en función de la calidad que se adicione, empezará a producirse esa reacción química de hidratación. Se dice que se está fraguando cuando esa masa líquida ha comenzado a plastificarse. Por contraparte, el fraguado termina cuando la masa pasa a estado sólido. Esta reacción química es exotérmica; es decir, desprende gran cantidad de calor.

Por otro lado, el endurecimiento es la progresiva, paulatina y lenta adquisición de resistencias a lo largo del tiempo, siendo la misma reacción química que la hidratación de los componentes del cemento, pero a lo largo del tiempo.

Figura 2

Proceso de fraguado del hormigón



Nota. Tomado de Becosan (2019).

2.2. Proceso de fraguado

El cemento es el componente de construcción de mayor uso demandante existente a nivel mundial, pero es el más complejo por su variedad de compuestos en su conformación. Su fabricación implica el calentamiento de la mezcla de un conjunto de materias primas como caliza, arcilla y otros adicionales a temperatura alta, provocando una fusión parcial. Cuando el cemento se encuentra finamente molido, es utilizado para la construcción al mezclarse con el agua hasta formar una pasta de cemento que fragua y, en seguida, se endurece a través de reacciones químicas y proceso de hidratación. Antes de ahondar el proceso de fraguado, primero se brindará un panorama sobre el cemento y su reacción química de hidratación, ya que el cemento Portland actúa como regulador de fraguado del hormigón.

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Este es un material pulverizador que tiene la característica de formar una pasta conglomerante al añadir agua, y es capaz de endurecerse con aire y el curado de agua. El cemento Portland es el más utilizado producto, el cual es obtenido por la pulverización del clínker Portland en las construcciones. En la Tabla 2, se observan las materias primas y elementos principales del cemento Portland para su elaboración.

Tabla 2

Componentes principales del cemento Portland

Materias primas	
Componentes	Formula química
Óxido de aluminio	Al_2O_3
Óxido de silicio	SiO_2
Cal libre (óxido cálcico)	CaO
Óxido de hierro	Fe_2O_3
Óxido de azufre	SO_3
Óxido de potasio	K_2O
Óxido de sodio	Na_2O
Componentes principales	
Silicato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Silicato bicálcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$
Aluminato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Ferrito aluminato tetracálcico	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
Ferrito bicalcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
Óxido de magnesio	MgO

Nota. Adaptado de Rivva (2000); Mehta y Monteiro (1998).

La elaboración del cemento se realiza por dos procesos: vía seca y vía húmeda. En el primero, los materiales se trituran y, a continuación, se secan de modo rotatorio. Al mezclarse se muelen por medio de molinos tubulares hasta obtener harina cruda. En el segundo, la obtención de la harina cruda efectúa la agregación de agua para formar la pasta.

La relación entre los componentes conforma el eje primordial para las disposiciones químicas ejercidas al momento de funcionar con la harina en crudo y fijar el control al momento de la mezcla. Por ello, es pertinente actuar con cuidado en la graduación de crudos, ya que al conseguir mínimas modificaciones en las cantidades preestablecidas de los elementos se alteran las propiedades del cemento.

El cemento, al mezclarse con agua, origina reacciones químicas que suscitan ciertas variaciones en la organización de la pasta del cemento. De este modo, se conserva la mezcla de masa plástica durante determinado tiempo y, luego de varias horas, ocurren varios sucesos para su endurecimiento. Este proceso se conoce como fraguado del concreto. Estos sucesos son el incremento de la densidad de la pasta al conseguir una alta temperatura (fraguado inicial); la pasta es fija y se convierte en un material rígido cementante (fraguado final); y el soporte de la pasta del cemento aumenta con el transcurso del tiempo, el cual lleva a cabo el proceso de endurecimiento. Entonces, el fraguado se emplea para la determinación del periodo que necesita la mezcla del hormigón para obtener una dureza fija de la pasta.

El cemento fraguado está compuesto por silicatos cálcicos hidratados complejos, cuyo componente denomina la tobermorita, así como de otros componentes menores. Este componente brinda al cemento mayor consistencia, durabilidad y aguante mecánico al culminar con su fase de fraguado final y endurecimiento. En la hidratación del cemento coexisten procedimientos de diversos tipos: (a) reacciones químicas de hidratación, (b) procedimientos de disolución y cristalización y, luego, (c) el proceso de ligazón debido a la fuerza de adherencia entre las partículas. Estos procesos ayudan a conocer el proceso de fraguado.

Cuando se combina cierta cantidad de cemento con agua para formar la pasta plástica, se asevera determinadas reacciones que conlleva el proceso de fraguado y su solidificación de la combinación cementante al ser empleado en el encofrado de la obra. Es decir, la reacción química es el proceso de hidratación.

Los componentes son compuestos anhidros que reaccionan al agregar elementos de hidratos al agua, al solubilizar cierta fracción de estos componentes y almacenar gradualmente los sólidos disueltos de manera que conserve el continuo equilibrio con los elementos hidratados. Su velocidad de hidratación depende de la naturaleza y estado físico de los compuestos del cemento.

Por otra parte, la reacción de hidratación de los principales componentes del cemento, reaccionan de modo diferente. En primer lugar, los silicatos tricálcicos (C_3S) producen un alto grado de velocidad de hidratación, lo cual beneficia su rápido endurecimiento al ser hidratados. Desarrolla un alto desprendimiento del calor de 120 cal/g, y su endurecimiento desprende importancia en las edades tempranas con altas resistencias mecánicas del cemento. Por ello, su reacción de hidratación forma tobermorita y portlandita. En segundo lugar, los silicatos bicálcicos (C_2S) generan una lenta reacción a la velocidad de hidratación, lo que perjudica la rapidez del endurecimiento. Además, desarrolla un bajo desprendimiento de calor de 62 cal/g y aporta pocas resistencias en edades tempranas, pero mayores a largo plazo.

En tercer lugar, el aluminato tricálcico (C_3A) fragua constantemente dada a su alta solubilidad, donde se debe agregar un regulador de fraguado. Tiene como desprendimiento de calor alto de 207 cal/g, pero aporta poca resistencia al cemento. Por ello, su reacción de hidratación forma estringtonita. En cuarto lugar, el ferrito aluminato tetra cálcico (C_4AF) tiene una velocidad de hidratación muy lenta y no aporta resistencias apreciables, pero brinda color verde al cemento (Rivva, 2000; Mehta y Monteiro, 1998).

Así, las partículas del cemento (dichos componentes descritos) son muy pequeñas, por lo que al mezclarse con el agua se hidratan superficialmente. Frente a ello, se forman cristales que vuelven a hidratar sus capas superficiales hasta formar cristales más pequeños. De este modo, la formación de los silicatos y de otros componentes hidratados es el motivo del principio del proceso de fraguado y el tiempo depende de la cantidad de hidratos que se forman primero en la compactación del cemento. Tal como indica Ho et al., como se citó en Fonseca y Díaz, 2020, la mezcla del agua con el cemento

produce reacciones de hidratación hasta formar una pasta. A continuación, el proceso de endurecimiento se genera por la creación de silicatos de calcio y aluminatos hidratados por la propiedad conglomerante hidráulica que se adhiere a las partículas del cemento.

Finalmente, los componentes principales del cemento Portland —el silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico y ferrito aluminato tetra cálcico— aportan las características fundamentales del cemento para que estos productos, una vez fraguados, se vuelvan sólidos, duraderos y resistente mecánicamente en el encofrado.

2.3. Fraguado rápido vs. fraguado lento

La composición del hormigón fue variando con el paso del tiempo, de generación a generación, mientras se buscaban materiales adicionales nuevos para obtener reacciones químicas y físicas en la mezcla. Estas reacciones generan cambios activos durante el fraguado de la mezcla del hormigón, por ejemplo, mayor fluidificación de la mezcla, retardo del fraguado, capacidad alta de impermeabilidad al endurecer el concreto, tiempo acelerado del fraguado, disminución de exudación, entre otras reacciones.

El material base del hormigón es el cemento, por el cual al añadir aditivos superplastificantes al fraguado ayudan a la dispersión de partículas pequeñas en la pasta, aumentando la trabajabilidad en la obra de construcción. Sin embargo, no todos los aditivos son buenos; ya que —al agregar aditivos químicos— pueden causar efectos secundarios no deseables, por ejemplo, producir un fraguado lento, pérdida de depresión y riesgo alto de contracción. En ese contexto, los efectos negativos son ocasionados por la interacción del cemento y los compuestos de la mezcla. Entonces, depende de las características del cemento y los aditivos reductores de agua, incluso de las condiciones ambientales.

Mayo y Sanz (2019) clasifican dos tipos de cementos naturales: cementos naturales rápidos y cementos naturales lentos. En el primero, los cementos rápidos se originan por calcinación de margas con arcillas de cantidad

moderada, generando un tiempo fraguado rápido de 30 minutos. En el segundo, los cementos lentos se producen por calcinación de materia prima con arcilla de cantidad elevada, por el cual se obtiene un tiempo de fraguado lento entre 30 a las 12 horas siguientes.

Cemex es la empresa mexicana que ocupa el primer lugar en la generación y/o producción del cemento a nivel mundial, conformando mercados multinacionales de desarrollo. En este sentido, es líder en materiales de construcción como el concreto, cemento, agregados y soluciones urbanizadas. Su intención es potenciar el mercado industrial para satisfacer las exigencias de edificaciones de la población mundial. Asimismo, como señala García y Pérez (2020), la empresa Cemex tiene conciencia ligada a la responsabilidad social que consiste en salvaguardar el medioambiente al brindar acciones de desarrollo para la emisión atmosférica, el ruido del ambiente contaminado y las aguas residuales.

El fraguado rápido o acelerado se refiere al concreto en estado fresco que tiene en su propiedad menores tiempos de manejabilidad de uso. Inclusive es de mayor rapidez, cuya resistencia es similar al concreto bombeable. De igual manera, brinda beneficios que aporta a la obra: dispone de un monitoreo de calidad de las materias primas al estar sometida a la vigilancia en el proceso de producción, y permite un acabado rápido para generar mayor rendimiento en la obra constructiva.

Tabla 3

Fraguado rápido del concreto

Caracteres	Unidad	Fraguado acelerado	Baja permeabilidad
Tamaño máximo de la grava	Pulgadas (milímetros)	5= 1	(25.4)
		2= 3/4	-19
		3= 1/2	(12.7)
		1= 3/8	(9.51)
Edad de especificación	Días	8	
Asentamiento de diseño	Cm	Clima frío: 10 Clima cálido: 13.15	
Tiempo de manejabilidad	Horas	Clima frío: 1.5 Clima cálido: 1.0	
Tiempo de fraguado	Horas	Inicial	
		Clima frío: 6	
		Clima cálido: 5	
		Final	
		Clima frío: 8	
		Clima cálido: 7	
Densidad	Kg/m ²	2200 a 2550	
Contenido de aire	%	máximo 2 %	4.5

Nota. Tomado de Cemex Colombia (s. f.).

Se observa en la Tabla 3 cómo las especificaciones técnicas de Cemex Colombia conforman el fraguado rápido de concreto y están ligadas a las características propias del tiempo donde se indican los siguientes aspectos: el tamaño máximo de grava, la edad de especificación, el establecimiento del proyecto, el tiempo de trabajabilidad, el tiempo de fraguado, la viscosidad y el contenido de aire. Con respecto al tiempo, el fraguado rápido está presente en dos fases: la fase inicial que en clima frío fragua 6 horas; en contraparte en

**ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO
REGULADORES DEL HORMIGÓN**

clima cálido, en 5 horas; en fase final, el clima frío tiene 8 horas de fraguado, y en clima cálido, 7 horas en fraguarse la mezcla.

Cuando se menciona fraguado lento o retardado se refiere al concreto en estado fresco que tiene mayores tiempos de manejo de uso, incluso el proceso de fraguado es más lento que el hormigón tradicional. Ello le permite al obrero realizar una colocación adecuada del producto y reducir las juntas frías del material. Se aplica el fraguado lento cuando la colocación del hormigón se encuentra expuesto a altas temperaturas del ambiente.

Tabla 4

Fraguado retardado del concreto

Caracteres	Unidad	Características del concreto lento	
		(sin aire incluido)	(con aire incluido)
Tamaño máximo de la grava	pulgadas (milímetros)	5= 1	(25.4)
		2= 3/4	-19
		3= 1/2	(12.7)
		1= 3/8	(9.51)
Edad de especificación	días	28	
Asentamiento de diseño	cm	Clima frío: 10	
		Clima cálido: 13.15	
Tiempo de manejabilidad	horas	Clima frío: 3.5	
		Clima cálido: 3.0	
Tiempo de fraguado	horas	Inicial	
		Clima frío: 10	
		Clima cálido: 8	
		Final	
		Clima frío: 12	
		Clima cálido: 10	
Densidad	kg/m ²	2200 a 2550	
Contenido de aire	%	máximo 2 %	4.5

Nota. Tomado de Cemex República Dominicana (s. f).

En la Tabla 4, se visualizan los detalles técnicos de Cemex República Dominicana que representan las características propias del fraguado lento de concreto donde se señalan los siguientes aspectos: el tamaño máximo de grava, la edad de especificación, el establecimiento del proyecto, el tiempo de trabajabilidad, el tiempo de fraguado, la viscosidad y el contenido de aire. Con respecto al tiempo, el fraguado retardado está presente en dos fases: fase inicial que en clima frío fragua en 10 horas; en contraparte, en clima cálido, en 8 horas; en fase final, el clima frío tiene 12 horas de fraguado, y en clima cálido la mezcla tarda 10 horas en fraguarse.

2.4. Factores que inciden en el fraguado

Se conocen los siguientes factores que inciden en el tiempo del proceso de fraguado del hormigón, siendo los más destacables: la relación del agua con el cemento, la humedad, el proceso de mezclado, el proceso de endurecimiento y la temperatura.

2.4.1. Relación de agua - cemento

Es muy importante en las construcciones debido a que estos materiales impactan en el soporte que se obtiene del concreto mezclado. Por ejemplo, relacionar la cantidad exacta que requiere el arroz al ser cocido. Sin embargo, al echar agua en exceso este queda apelmazado, en cambio queda crudo cuando no termina su cocción. Lo mismo sucede con la mezcla del hormigón. Este requiere la dosis exacta de agua y cemento en su preparación. Guevara et al. (2012) señalan que la relación agua/cemento es de mayor magnitud porque el agua se encuentra altamente ligada a las propiedades del material final obtenido, el cual —con la adición— el hormigón aumenta la fluidez de la masa plástica, incluso su plasticidad y trabajabilidad en la obra. Sin embargo, la mezcla empieza a disminuir la resistencia porque obtiene mayor volumen de espacios de agua libre.

En este contexto, si se echa mayor cantidad de agua al concreto, tiene menor resistencia y durabilidad del mezclado a lo largo del tiempo porque las partículas de agua requieren cada una de en el cemento. Un problema de

mayor seriedad en la construcción es el surgimiento de grietas en el proceso de endurecimiento, siendo causante el exceso de agua incorporado en el mezclado del hormigón.

Por otro lado, si se echa menor cantidad de agua al concreto, hay mayor resistencia, pero menor trabajabilidad porque existe mayor dificultad que cuando se utiliza el concreto para el fraguado. Por ende, la trabajabilidad es una de las causas en las cuales se agrega mayor cantidad de agua al concreto.

Esta relación va depender de la resistencia del concreto que se quiere alcanzar. Primero, si se quiere obtener mayor resistencia, se tiene que utilizar menor cantidad de agua y un aditivo para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. El segundo factor que modifica esta relación son los materiales con que se trabaja. Por un lado, los materiales obtenidos de industrias concretteras y, por otro lado, los materiales obtenidos cercanos a la zona de construcción, incluso las condiciones de climas se incluyen

2.4.2. Humedad

Las losas de pavimento de hormigón son los sistemas más utilizados en la construcción para todo tipo de edificaciones, siendo los más frecuentes los muros y las paredes de hormigón. Unos optan por dejar la superficie libre de hormigón; otros en mantener curado y acabado la superficie del hormigón al usar su revestimiento. En este sentido, es necesario resaltar que el origen de la humedad, las variaciones sujetas a esta durante el tiempo de solidificación y los factores que inciden en el secado son importantes conocerlos para percibir una aplicación correcta del acabado susceptible a la humedad.

Cuando se alude a la humedad, se refiere a la cantidad de vapor de agua que impregna al interior de un cuerpo inerte o vivo, es decir, el agua que absorbe el hormigón endurecido. Existen dos tipos: humedad relativa relacionada con la capacidad del aire al almacenar agua, el cual interviene el punto de saturación y determinado nivel de temperatura; humedad absoluta es la aglomeración del vapor de agua en el volumen de aire antes de su condensación.

En una baja humedad proporcional de aire, el hormigón acelera su rapidez de evaporación, generando pérdida de docilidad del material e incrementando el periodo de fraguado. Por ende, los minúsculos capilares del material hormigonado responden a que haya una poca saturación de agua con un contenido en humedad baja, presentando complicaciones de poseer una superficie seca. Tecnopol (2018) sostiene que la fuente de humedad es el contenido de agua requerido para la reacción química interna que se maneja durante la mezcla. Existen otras fuentes de humedad después de esparcir la mezcla en el encofrado:

Curado en húmedo. Se considera al método más eficaz para asegurar la hidratación continua del hormigón endurecido. En cambio, cuando se busca un menor tiempo de secado del concreto, es necesario asegurarse la no absorción de agua.

Exposición a la intemperie. Si el tiempo de secado del concreto es crítico, se recomienda proteger la superficie contra la humectación, sobre todo de las condiciones climáticas como las lluvias en el hormigón endurecido y la infiltración de agua por las fisuras.

Condensación. Ante la presencia del aire húmedo contra el concreto endurecido frío, induce la condensación de humedad absorbida por el propio material. Esto afecta la estructura interna del concreto.

El control de la humedad es imprescindible en el funcionamiento adecuado de cualquier edificación que sea desarrollada, siendo importante para la protección de efectos adversos en el hormigonado, así como sus sistemas mecánicas y físicas. La humedad es uno de los problemas de mayor frecuencia que destruye el diseño y mantenimiento de las construcciones modernas. En ese contexto, Environmental Protection Agency (2016) manifiestan que estos problemas de controlar la humedad residen en dos aspectos: tener un control de agua frecuentemente durante la construcción edificada e implementar acciones efectivas de control especificados por los profesionales de diseño de construcción.

Los recubrimientos sensibles a la humedad y la falta de adherencia del concreto como los *pinholes* (puntos de alfiler) son problemas serios que propician la demora del secado insuficiente del hormigón. De acuerdo con este criterio, se expresan consejos para evitar tener problemas con la humedad en el concreto endurecido. Primero, se debe respetar el periodo de secado del concreto, el grado de emisión de vapor de humedad. Segundo, manejar revestimientos transpirables frente al curado. Tercero, utilizar productos que formen la equilibrada unión entre el soporte y el hormigón. Cuarto, verificar que los compuestos desmoldantes sean eliminados. Quinto, reparar las imperfecciones de la superficie para obtener un adecuado secado del material.

2.4.3. Mezclado

Antes de emplear el mezclado del concreto, la superficie debe estar encofrada con el armado de vigas y viguetas de fierros al ser edificada. A continuación, se procede a colocar los frisos en todo el contorno para aligerar el llenado. Asimismo, en la verificación de fierros y la instalación de tuberías es importante encontrarlo en buen estado para empezar con el proceso de mezclado. La mezcla es la agregación de varias sustancias sin cambiar su estado de propiedades. En ese contexto, la combinación del concreto es la integración de sus ingredientes pertenecientes a este material, cuya intención es obtener una masa uniforme y homogénea.

Aceros Arequipa (2020) describe tres objetivos por los cuales se realizan el mezclado: (a) cubrir completamente las partículas de los compuestos del hormigón con el agregado del cemento; (b) desarrollar una distribución uniforme de los compuestos agregados en la mezcla; y (c) conseguir que la mezcla adquiera similitud en cada tanda de llenado. De este modo, la función principal del mezclado del hormigón es revestir la superficie de los compuestos con el cemento, el cual se obtiene una masa homogénea para su fácil trabajabilidad en la obra. Así, hay dos modos de realizar el proceso de mezclado del hormigón: modo manual y modo mecánico; incorporar maquinaria pesada para su accionar. Este último, se emplea para obras grandes como el llenado de techo y piso.

Los mezcladores de maquinaria pesada se dividen en dos categorías. Por un lado, mezcladores por lotes y, por otro lado, mezcladores continuos. En el primero, la máquina produce un lote de hormigón en el cual debe vaciarse por completo el material después de cada mezcla, limpiando y recargando nuevamente con los componentes del concreto, por ejemplo, la mezcladora de tambor y mezclado de plato. En el segundo, la maquinaria elabora hormigón a una rapidez constante, por el cual los componentes ingresan de modo continuo por un extremo y el hormigón fresco sale por el lado interno. Se utiliza para conseguir un tiempo corto de trabajo, periodo prolongado de descarga y sitios remotos en entregas pequeñas.

Ahora, el proceso de mezcla involucra conocer el método de mezcla, el cual incluye la carga, el tiempo de carga y la descarga de la mezcla. Cuando se refiere al método de carga es la orden de carga de los elementos echados en la mezcladora, cuya duración depende del tiempo transcurrido con relación a que se mezclen los elementos secos del hormigón antes de añadir agua. Por otra parte, en el tiempo de carga se examina al momento en que se echa el primer elemento hasta que todos estén en el mezclador. Se divide en dos divisiones: mezcla en seco que implica la incorporación de agregados secos como la arena, piedra y cemento; y mezcla en húmedo que, la agregación de los componentes más la proporción del agua. Entonces, se define al periodo transcurrido entre la carga de los compuestos y la descarga en estado final del hormigón. Por último, la descarga de la mezcla conforma el incremento de la producción sin cambio de la homogeneidad del concreto (Ferraris, 2001; Aragón, 2006).

Es necesario mencionar que, para conseguir un adecuado proceso de mezclado, se debe conseguir una buena hidratación de cemento que mejore la homogeneidad de los reactivos y acelera el fraguado del hormigón. Por ello, el proceso de vaciado de la mezcla debe ser continuo en su trabajo, en el cual no debe detenerse el trabajo después que inicie el preparado de la mezcla hasta terminar con el fraguado final.

La nivelación del concreto es importante para obtener el plano de equilibrio del llenado de la mezcla, donde se debe pasar una regla de aluminio sobre la superficie fraguada. Finalmente, el proceso de curado del hormigón implica el riego de agua a los bordes del cemento final para evitar problemas de fisuras y/o grietas, así como alcanzar una adecuada resistencia del concreto endurecido.

2.4.4. Endurecimiento

La pasta de cemento se refiere a la estructura rígida que se forma con los productos sólidos del hormigón al reaccionar el agua con el cemento anhidro. Este producto de reacción genera masas densas que reciben el nombre de gel de cemento (Benítez et al., 2016). Por ello, el proceso del endurecimiento del hormigón depende, en mayor medida, de la pasta plástica formada por el agua y cemento, el cual ejecuta una reacción química que origina la creación de gel de cemento en contraste de hidratar los componentes del material cementante. Esta reacción es muy lenta a medida que posibilita la evaporación del agua solicitada para que el cemento se hidrate, disminuyendo la resistencia final del fraguado.

De este modo, es importante el mantenimiento de la humedad del hormigón después del fraguado final. Asimismo, se debe evitar la evaporación de agua para conseguir el humedecimiento del cemento, al cubrirlo con el hormigón actual descimbrado con productos especiales hallados en el mercado.

2.4.5. Temperatura

El hormigón sin protección en clima caluroso está sujeto a generar agrietamientos por la retracción de la masa plástica durante los periodos tempranos. Con respecto al clima frío, el proceso de curado de modo insuficiente del hormigón impide rigurosamente la velocidad de la resistencia. Asimismo, la remoción prematura de la construcción de arcos (conocido como cimbrado) ha causado en tiempos remotos graves consecuencias de desastres estructurales de las edificaciones, perjudicando el aspecto económico y humanitario de la sociedad.

Elaboración de hormigón en clima frío. Generalmente, se asegura de que existe poca hidratación del cemento y obtención de resistencia si en caso el hormigón se congela y conserva su temperatura por debajo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. De este modo, el concreto en estado fresco debe estar protegido contra el efecto destructor del congelamiento hasta el tiempo en que se obtenga la resistencia adecuada y el nivel de congestión del haya sido suficiente disminuido por la fase de hidratación.

Sin efectos externos del sol, el calor de la hidratación del hormigón es adecuado para conservar temperaturas ante el proceso de curado, siempre y cuando el concreto haya sido entregado a una adecuada temperatura, así como las varillas y el cimbrado sean tomados en consideración durante el fraguado.

Elaboración de hormigón en clima caliente. Para desafiar la problemática de construcción en el hormigón normal de la estructura, es necesario conocer la noción de clima caluroso o caliente. Es considerado como cualquier combinación sujeta a elevada temperatura del aire, rapidez del viento y baja humedad atmosférica que dilata la deterioración de la propiedad del hormigón fresco y/o endurecido, obteniéndose un resultado anormal en su resistencia edificada.

El aumento del hundimiento del suelo, la presencia de agrietamiento y la disminución del tiempo de fraguado en el hormigón fresco vuelve necesario el requerimiento del agua con cemento mezclado para conseguir la consistencia otorgada por el clima caluroso. También, se requiere frecuentemente efectuar el retemplado en climas calurosos, ya que este incide en el material cementante para recuperar la consistencia de la masa plástica antes de que inicie el desarrollo de fraguado del concreto. En el rango de valor de $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $46\text{ }^{\circ}\text{C}$, el fraguado del hormigón, al llegar a altas temperaturas, alcanza resistencias mayores a edades tempranas, pero después de 28 días a más esta resistencia disminuye paulatinamente (Mehta y Monteiro, 1998).

El tiempo de fraguado es un proceso que pertenece a la propiedad física del hormigón, cuyo objetivo es establecer el periodo de tiempo en que el cemento interactúa con el agua hasta que deja de ser masa plástica (conocido

como fraguado inicial) y el tiempo solicitado para que el hormigón obtenga grados de dureza (conocido como fraguado final). El fraguado inicial señala el periodo en que la masa plástica no vibra como antes, ya que adquiere la resistencia suficiente, siendo dañada su estructura al retardar el tiempo del transporte y colocación del material. En contraparte, el fraguado final implica la consistencia alcanzada a un valor apreciable en su aspecto físico.

Por consiguiente, el fraguado del hormigón, aplicado en la industria de construcción, constituye la creación de las edificaciones cementantes. En ese sentido, se comprende al procedimiento de endurecimiento y falta de la masa plástica del concreto, produciéndose por la desecación de la reacción química entre el agua y los componentes.

La integración de los compuestos del hormigón fortalece las edificaciones antisísmicas para obtener resistencia en la estructura cementada. Ello percibe el crecimiento de las construcciones modernas como edificios, casonas, coliseos y puentes en mejoría de buenas infraestructuras a nivel mundial. Ante esta situación, se subraya que el beneficio de construcciones modernas repercute en países desarrollados para mayor crecimiento en el sector industrial de materiales de construcción. De este modo, hay estudios que evidencian que surgen elementos que inciden en el procedimiento del fraguado.

CAPÍTULO III

PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL HORMIGÓN

El cemento es el compuesto base y vital en las edificaciones, pues posibilita la creación del concreto. Con la fusión de los agregados (finos y pesados) no es posible la integración del cemento para formar el concreto porque este material es el responsable de generar la unificación en una sola mezcla de mayor consistencia durante el fraguado final. Incluso, el cemento tiene componentes esenciales que participan en el desarrollo de la pasta al realizar la etapa de hidratación. Esto permite el endurecimiento de la masa plástica.

Los agregados son compuestos que se miden por unidad cúbica del hormigón, siendo el componente inmóvil del relleno al ser reconocido por investigaciones de ámbito de construcción en la actuación del concreto. Además de ser un compuesto de reducido precio, los agregados —tanto finos como arena y pesados como piedras— imparten al concreto determinados beneficios o daños en el llenado de la mezcla; ante un exceso o disminución se altera la resistencia del hormigón endurecido.

Los componentes del hormigón cumplen en conjunto funciones esenciales para la preparación de la mezcla, la cual es usada para la puesta en obra en los encofrados. Al obtener una masa plástica, al estar en estado fresco, presenta propiedades esenciales del concreto. Las destacadas son trabajabilidad, consistencia, segregación y exudación.

Estas propiedades en estado fresco son visibles en el momento en que se realiza el transporte y puesta en obra hasta que se transforma en un elemento plástico y sólido. Posteriormente, irá adquiriendo resistencias mecánicas y físicas presentes en el hormigón endurecido.

El hormigón tiene la capacidad de soportar esfuerzos grandes de compresión, el cual depende de sus atributos, funciones de sus componentes y reológicas de la correlación de cada uno de los compuestos. Entre sus características está la masa unitaria, las propiedades térmicas, mecánicas, etc. Es decir, las propiedades físicas y químicas, mecánicas y reológicas del concreto emana sobre la pasta endurecido y los agregados.

3.1. Un marco introductorio a la gestión en la construcción

La industria de la construcción es un sector de gran importancia en la vida social de una nación, considerado el motor base que incentiva el avance progresivo de la población. Por ejemplo, en tiempos remotos los humanos realizaban actividades basadas en la construcción por necesidad de tener una casa propia y laborar en puestos de trabajo constructivos. De este modo, el impacto de la construcción es significativo para conseguir el progreso del país. Por una parte, positivo, al no ser destruidas estas construcciones por la resistencia antisísmica. Por otra parte, negativo, ya que afecta el medio ambiente y el desarrollo de fisuras del concreto endurecido.

En este sentido, se mencionan algunas razones que indican la importancia de la industria de la construcción en el país a nivel mundial:

- a. Se consigue la satisfacción necesaria de desarrollar infraestructuras modernas que beneficien el progreso de la globalización.
- b. Consume alta demanda de recursos públicos y privados por la alta inversión efectuada en las obras.
- c. Constituye una fuente de trabajo para ejercer el proyecto de obra.
- d. Genera actividad indirecta de otros sectores de la economía como empresas de ingeniería, arquitectura, proveedores de materiales, entre otros.

No obstante, no en todos los países latinoamericanos se ejerce la industria de la construcción, ya que algunos presentan atrasos indiscutibles frente a países desarrollados, como los países de Asia y otros. Fazinga et al. (2019) sostienen que el proceso de la construcción tiene un alto nivel de variabilidad que perjudica abruptamente el desarrollo del tiempo y el costo de inversión, el cual genera desperdicio de personal en la producción y las fluctuaciones económicas decrecientes.

El ámbito de la construcción conforma las actividades de producción vinculadas a los procesos de la construcción, incluso relacionadas con la producción de materias primas. Estando encaminada a las edificaciones de obra, se clasifica en dos grupos: la industria ligera y la industria pesada. En la primera se percibe a las viviendas de hogar, las reparaciones de edificaciones y construcciones de centros comerciales pequeños. En la segunda, implica mayor esfuerzo de mano de obra porque requiere de mayor inversión como edificaciones de embalses, autopistas, puentes, fábricas y servicios de acueducto.

Además, el sector de la construcción está conformado por tres etapas: producción primaria, transformación y construcción. La primera etapa, producción primaria, aborda a toda actividad que se encarga de la sustracción de los minerales que son aprovechados para los insumos de esta industria como los agregados, el cal, el sílice, etc., conformando los materiales. La segunda etapa, la transformación, se interesa por las actividades de manufactura que producen los materiales de construcción en agregación de la materia prima como el cemento, las varillas, los ladrillos, entre otros. La tercera etapa, la construcción, abarca las actividades que conforman la instalación, las edificaciones de viviendas, las obras urbanizadas e infraestructuras de tamaño grande (Robles y Velásquez, 2013).

Entonces, el director de construcción, al encargarse de una obra, desempeña una función primordial en las edificaciones, ya que asegura que los proyectos de construcción circulen sin ningún problema de inicio a fin. Cuando se refiere a la gestión de la construcción es la planificación de proyectos, la coordinación

con el equipo de trabajo y el control total del proceso de construcción desde el inicio hasta el acabado final de la obra. Sus objetivos residen en crear un proyecto que cumpla con las necesidades primarias en su presupuesto a un riesgo y tiempo, con la buena calidad de materiales y seguridad de todo el equipo.

Los maestros a mando de los proyectos obtienen su puesto al ser evaluados mediante la realización de su gestión eficaz, la cual ejercen en la obra. Para ello, es prioridad el desarrollo de la formación profesional de equipos para conseguir el éxito de la gestión. Esto brinda una construcción de calidad alta, con el continuo progreso de la edificación, y el constante trabajo de los obreros al cumplir con el proyecto preestablecido.

Con respecto a los conocimientos, la autoridad superior encargada de los proyectos debe requerir, necesariamente, de conocimientos y saberes referidos al campo de la construcción para la garantía de un exitoso trabajo de obra. Estos conocimientos son conocer los ámbitos del proceso de construcción en relación con la gestión de un proyecto para su edificación, atender las exigencias necesarias de la elaboración de un proyecto, comprender qué responsabilidades tienen el equipo de trabajo, entender los procedimientos para brindar soluciones a los conflictos de obreros, adquirir conocimientos suficientes sobre el marco normativo de la construcción, y aplicar mecanismos efectivos de control para asegurar el desempeño de los objetivos del proyecto de construcción.

Existen prioridades sobre la administración operacionales de construcción, las cuales conllevan a la preocupación de profesionales que se desempeñan en este sector. Algunas de estas prioridades son reducir el costo de presupuesto lo menos posible sin perder eficiencia en la realización de las tareas, conservar la buena condición de los compuestos, conseguir mayor velocidad de producción constructiva para la satisfacción de los clientes sin afectar la estructura interna de la obra, la flexibilidad de sugerir cambios en plazos de la obra, y proveer un desempeño eficiente en cada obra realizada para garantizar la confiabilidad del trabajo.

Ante las construcciones convencionales y/o tradicionales, la industria de la construcción debe proyectar actualizaciones modernas junto de la mano del avance tecnológico. Igual como ocurre con la industria automotriz al desarrollar vehículos modernos. Por ello, Barrio et al. (2011) sostienen las siguientes tendencias de innovación en la construcción:

- a. Contar con nuevos materiales como productos de construcción.
- b. Diseñar nuevos tipos de edificaciones con tecnologías como la prefabricación.
- c. Desarrollar procesos para hacer la construcción más eficiente.
- d. Disminuir los tiempos de construcción.
- e. Generar un mercado de la construcción desde la sostenibilidad.
- f. Desarrollar sistemas de calidad.
- g. Innovar la robótica y la domótica.

Es necesario mencionar sobre la gestión de calidad y seguridad. Las empresas constructoras deben implementar la coordinación de seguridad y salud en el trabajo por el alto índice de accidentes propios de la actividad y el elevado riesgo que surge frecuentemente. Así, es preocupante el riesgo de realizar trabajos en altura, la labor de excavaciones subterráneas y la operación mecánica de izado (Nuñez, 2021). Por eso, las actividades esenciales involucradas en la industria de la construcción deben implementar sistemas de gestión de calidad para apoyar, gestionar y controlar todas las organizaciones dedicadas a esta actividad.

De esta manera, la gestión de la calidad y seguridad en la construcción desarrolla los conceptos y herramientas que permiten concebir los procedimientos que integran el sistema como los elementos esenciales para

su desarrollo; ya que las organizaciones nacionales y los profesionales de la construcción deben alcanzar estándares de competitividad internacional y mejoramiento continuo interno para su sostenibilidad mediante la implementación y gestión de las normas internacionales como ISO 9000, OHSAS 18000 e ISO 14000.

3.2. Delimitación entre el hormigón fresco y endurecido

El concreto en estado fresco se presenta como la suspensión concentrada de componentes sólidos —agregados de arena y de piedras— formado en un líquido de viscosidad —conocida como la pasta de cemento—; este refleja una mezcla heterogénea integrada de compuestos de partículas en el agua.

Para comprender y examinar adecuadamente las características de los componentes de la construcción, se las sujeta a ciertas pruebas empíricas llamadas ensayos, los cuales posibilitan conocer si son aptos para la construcción. Asimismo, son procesos experimentales que permiten realizar la medición de una serie de valores mediante los cuales los resultados determinan las características de un material. Cabe precisar que se realizan por medio de probetas, las cuales son trozos de material con figura irregular o geométrica muy diversa, y sirven para medir con mayor precisión los atributos del concreto.

Los métodos de ensayos para determinar las propiedades del concreto varían según las normas por los trabajos realizados por el Comité Europeo de Normalización (CEN) al encargarse de la creación de normativas sobre los materiales de construcción. En la norma EN 206, el CEN redacta sobre la conformación, los atributos y la durabilidad del concreto, asimismo sus cualidades, el cual admite para los diversos sistemas de ensayos (García et al., 2009). A continuación, se señalan cuatro ensayos de calidad en el concreto fresco:

Medición del asentamiento con el cono de Abrams. Brinda información sobre la consistencia del hormigón fresco y permite estimar cuán sencilla es la colocación de la mezcla. Para ello, se emplea el cono de Abrams y una varilla

de acero al colocar y compactar el concreto en tres capas uniformes. Luego, se retira el cono y se evalúa el asentamiento de la mezcla.

Ensayo para determinar el peso unitario y densidad. Es importante controlar la mezcla cuando es requerido. Se necesita un modelo rígido el cual se rellena y compacta metódicamente. Su dimensión debe ser inferior a 10 cm ni a cuatro veces el tamaño máximo del agregado. La capacidad y la masa marcarán un fallo no mayor de 0.1 % al compactarse en las probetas enmoldadas.

Ensayo para determinar el contenido de aire. Establece la cantidad de aire que contiene el concreto al estar combinado, sin estimar el aire que contiene las partículas de los agregados. Es importante, ya que el aumento de la dosis de aire se produce como una reducción del soporte por el incremento de vacíos en el mortero. Según García et al. (2009), este ensayo consiste en determinar la alteración elástica que percibe el concreto en estado fresco mediante una presión y requerimientos establecidos. Incluso, contrasta esta desproporción de un volumen conocido de aire con la misma compresión. Utiliza una cuba de tapa hermética y algunos accesorios para ejecutar la presión conocida.

Ensayo para determinar la temperatura. La temperatura es un elemento muy importante que impacta en la calidad, el tiempo de fraguado y el soporte del hormigón. Al no tener un manejo de la temperatura, es difícil pronosticar su reacción reológica. Así, se utiliza para comprobar que el material efectúe con los requisitos especificados para la temperatura.

El concreto en estado endurecido es la segunda fase de proceso, por lo cual el cemento se transforma como piedra. A través de la reacción de hidratación de las partículas, la masa plástica se convierte en una masa rígida. Este proceso origina al fraguado hasta que el concreto obtenga resistencia y endurecimiento. A continuación, se mencionan tres ensayos de calidad en el concreto endurecido:

Ensayo para determinar el número de rebote. Denominado como ensayo de esclerometría porque es una prueba no destructiva que se ejecuta para examinar la homogeneidad de elementos de concreto y establecer comparativamente regiones de baja calidad o concreto deteriorado. Además, el soporte del concreto *in situ*, empleando una correlación previamente establecida para este tipo de material (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2009).

Ensayo de determinación de tracción por hundimiento de probeta cilíndrica. Es un método experimental que es utilizado para la medición del aguantante a tracción del concreto, cuyo ensayo se realiza por medio de probetas cilíndricas moldeadas. Consiste en someter a la resistencia de compresión diametral una probeta de forma cilíndrica en el cual se aplica la carga uniformemente a lo largo de la generatriz hasta conseguir la rotura del concreto.

Ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Permite obtener resultados como ejemplo para el manejo de calidad del concreto, proporciones, mezclado y operaciones de colocación. Se indica en condición humedad a la edad de 24 horas.

3.3. Propiedades en el hormigón fresco

El concreto en estado fresco es un material heterogéneo, en el cual la unión de varios compuestos se identifica entre sí. Hay tres fases: la fase sólida con la unión de los componentes secos; la fase líquida con la agregación del agua; y la fase gaseosa con el aire ocluido en el concreto endurecido. A continuación, se mencionan las propiedades que intervienen en el hormigón en estado fresco: la trabajabilidad, la consistencia, la disgregación y la exudación.

3.3.1. Trabajabilidad

Facilita la mezcla, la colocación, la compactación y el acabado del hormigón fresco de la construcción. En este sentido, no requiere la segregación y la exudación durante estas actividades operativas. Cabe resaltar que no existen estudios de pruebas que permitan la cuantificación general de esta propiedad, pero es notorio en los ensayos de consistencia del hormigón autocompactado.

Asimismo, la circulación de la pasta del cemento engrasa a los agregados del hormigón —tanto finos y pesados—, brindándole manejabilidad al mezclado. Incluso, actúa de la misma manera en su función inversa a la resistencia del concreto. Es decir, al obtener más fluidez en la mezcla menor será la resistencia cementante. Por influencia de un concreto consistente, es controlado por la cantidad de agua, el exceso de aditivos, el contenido de cemento, los niveles de agregados pesados y finos, ya que estos factores al ser desmedidos inciden sobre esta propiedad en estado fresco (Mehta y Monteiro, 1998).

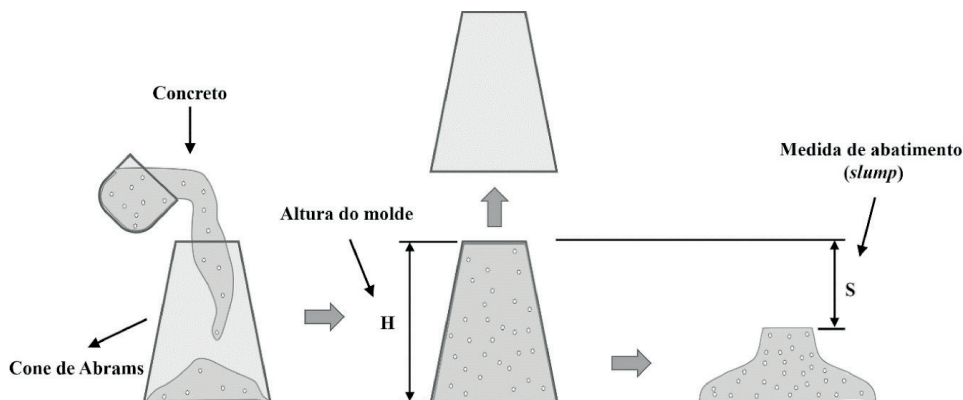
3.3.2. Consistencia

Se refiere a la humedad que posee la combinación por el nivel de fluidez que posee. En otras palabras, a mayor humedad, mayor facilidad obtendrá el concreto en su fluidez durante el proceso de colocación. Su medición determina la cuantía hídrica de agua por metro cúbico de concreto. Para ello, esta propiedad se vincula con la trabajabilidad del concreto, más no es sinónimo. Por ejemplo, una mezcla trabajable puede presentar una alta consistencia, pero resulta difícil trabajar en encofrado. Inversamente, una mezcla consistente es adecuada para el llenado de columnas siendo trabajable.

Esta propiedad en dosis adecuada se obtiene mediante la incorporación de cierta cantidad de agua que cambia según la granulometría, la cantidad de agregados finos, el empleo de aditivos y la absorción de agua del soporte sobre la superficie aplicada. Asimismo, la importancia de los agregados atiende a disminuir el grado de consistencia al añadir partículas gruesas de textura en la mezcla menor consistente adquiere.

Figura 3

Medición de la consistencia del concreto a través de la prueba de asentamiento



Nota. Tomado de Pereira y Maciel (2022).

La medición de la consistencia del concreto se realiza sobre la base del asentamiento del cono de Abrams denominado como prueba de asentamiento, como se visualiza en la Figura 3. En esta permite controlar la uniformidad del concreto y garantizar la aceptabilidad de la mezcla. Es utilizado por la simplicidad de ejecución y aplicado para detectar los cambios pequeños en la composición de la mezcla cementante.

3.3.3. Segregación

Según Rivva (2000), es la desintegración mecánica del hormigón en estado fresco en sus porciones de componentes cuando el compuesto pesado se separa del mortero. Frente a ello, la segregación refiere a la división de los materiales al formar una combinación diversa (tal como es el concreto), de manera que su reparto deja de ser homogéneo debido a la ausencia de cohesión.

Además, este accionar es ocasionado por diversos factores como la distinción en los tamaños de las partículas del cemento, la inadecuada distribución granulométrica, la densidad de la mezcla, el incorrecto modo de mezclado, los vibrados incorrectos y el mal transporte. De acuerdo con Benito

et al. (2015), el elevado aumento de fluidez e influencia de humedad en la mezcla inciden en la aparición de segregación; por ello, se debe aumentar la viscosidad del contenido de los componentes del concreto y emplear aditivos que cohesionan adecuadamente el material endurecido.

3.3.4. Exudación

Se refiere a la separación que empieza del agua del mezclado durante el proceso de fraguado al percibir densidades diversas, pero que —a su vez— están controlados al usar los aditivos en la mezcla. Asimismo, los agentes climáticos de la atmósfera como el sol, la lluvia y el viento perjudican la manejabilidad de la mezcla. La inadecuada dosificación, los diversos sistemas de mezclado, el medio de traslado, la densidad cementante y el prototipo de obra preestablecido son factores que también afecta la manejabilidad del concreto.

Mehta y Monteiro (1998) sostienen que es conocida como sagrado. Se la define como la aparición de agua manifestándose en la superficie externa, luego de ser compactado el concreto en el encofrado. Este determina que la exudación es una forma de segregación del concreto, ya que los sólidos quedan suspensos hacia abajo por la fuerza de gravedad.

Cabe resaltar que el indicador de la temperatura durante el hormigón fresco afecta la plasticidad de la mezcla al interior de sus propiedades, especialmente el contenido de aire y el asentamiento cementante. Por eso, es prescindible la medición de la exudación, pero al no existir un método normalizado de medida es suficiente utilizar el termómetro de bolsillo.

3.4. Propiedades en el hormigón endurecido

El hormigón tiene la misma similitud de una roca compuesta de materiales —agregados finos y pesados, agua, aditivos y cemento—, el cual adquiere ciertas propiedades durante el concreto endurecido. Su importancia se refleja en la resistencia y la durabilidad que posee el material.

En cuanto a la resistencia, se comprende como la propiedad que soporta el hormigón con las fuerzas de compresión, flexión, tracción, entre otras propiedades. Incluso, esta es afectada por la compactación inadecuada del concreto. Y, con respecto a la durabilidad, implica el comportamiento del concreto que reacciona a la acción agresiva del entorno, siendo afectada por el deshielo y los agentes agresivos químicos y/o físicos.

Las propiedades que definen y de las que depende el hormigón endurecido son las propiedades físicas/químicas, las propiedades mecánicas y las propiedades reológicas.

3.4.1. Físico-químicas

Propiedad son las características que permiten distinguir una sustancia de otra. Por un lado, la propiedad física refleja la conservación de su composición química de alguna materia; por otro lado, la propiedad química implica un cambio de la composición química al trasladar con una serie de procesos que generan sustancias nuevas. Por ello, la propiedad físico-químico del concreto tiene importancia en la impermeabilidad, la durabilidad y la resistencia térmica.

Una edificación con base de cemento está conformada por elementos estructurales de hormigón para conseguir una construcción antisísmica, siendo utilizado por su durabilidad y resistencia estructural. Sin embargo, para cumplir con el objetivo es conveniente determinar los atributos físico-químicos del concreto endurecido que interviene en el proceso constructivo de sus componentes. Estos atributos son los siguientes:

Impermeabilidad. Antes de ahondar en la impermeabilidad, primero se brindará un breve panorama de la permeabilidad del concreto, ya que esta reacción es opuesta a la impermeabilidad. La permeabilidad es el fenómeno en el cual se propicia el caudal de agua que penetra en la organización del hormigón endurecido. En este sentido, hay dos formas en que el agua filtra el concreto: por presión al referirse a la instalación de conducciones y/o depósitos, y por capilares de los poros al entrar en contacto con el medio húmedo.

Al mezclarse los componentes del concreto con el agua, tiene la responsabilidad de ser permeable en la pasta del cemento hidratado, ya que el contenido determina el espacio total y, posteriormente, el espacio aún no llenado después del agua consumida. De este modo, el vínculo de agua/cemento es el mayor elemento de influencia que se relaciona con la permeabilidad. Por ejemplo, ante un bajo grado de hidratación, la pasta del cemento adquiere un alto grado de porosidad capilar.

La impermeabilidad se refiere a la capacidad de obstruir la conducción del agua a través del material. Los causantes que inciden son la finura del cemento, la porción de agua utilizada y la compacidad respectiva a la mezcla. Como lo demuestra Hermida (2009), esta actúa sobre un hormigón de alta resistencia, e incluso de baja porosidad. La impermeabilidad de la pasta cementante se obtiene por medio de aditivos, los cuales ayudan a disminuir los capilares porosos durante el fraguado final y reducir el impacto de corrosión del concreto. Asimismo, este aditivo es aplicado en edificaciones donde existe mayor contacto con el agua como represas, tanques, puentes y muros de contención.

Durabilidad. Los profesionales de la obra de construcción han tenido interés desde tiempos remotos en las características de resistencia del concreto. Es decir, son conscientes de la afectación estructural cementante que surja ante un desastre natural causada por una inadecuada planeación de armado. Por eso, la construcción refleja la importancia de su durabilidad con el tiempo. Frente a un concreto correctamente colocado en el encofrado y curado, este ofrece una estructura de alta resistencia a largo plazo. En contraparte, es dañado por fallas prematuras de las estructuras cementantes si no se identifican a tiempo los factores responsables de la durabilidad.

Asimismo, se refiere a toda aquella capacidad que resiste la interacción de la intemperie, la acometida química de la mezcla, la abrasión y otros procesos que introduzcan el deterioro del concreto. En síntesis, el concreto al mostrar propiedad de durabilidad retendrá su forma de origen y su calidad de resistencia sin tener afectación de deterioro.

Por un lado, el agua es el componente que involucra a la estructura cementante, la forma de porosidad y permeabilidad del hormigón, generando la velocidad inmediata de deterioro. Este compuesto disuelve sustancias de iones y gases que originan la descomposición química de los compuestos sólidos al adquirir un alto calor de vaporización y producir porosidad en el concreto endurecido. Por otro lado, los efectos físicos influyen por el desgaste que ocasiona en la superficie, la fisuración y el agrietamiento de la estructura cementante. Además, intervienen por lixiviación del concreto al causar el contacto del agua con impurezas que afectan la durabilidad del material.

De este modo, los factores que inciden son las sales minerales, el calor, los agentes tóxicos contaminantes y la humedad (exceso de agua). Como indican Solís y Alcocer (2019), los problemas que impactan en la durabilidad del concreto están vinculados con la presencia de la porosidad y la permeabilidad porque determinan el permiso del flujo de gases y líquidos en la estructura del hormigón endurecido. Incluso, los compuestos químicos deterioran la estructura cementante por el hallazgo de cloruros, dióxido de carbono, sulfatos y ácidos químicos. Estos dos últimos ocasionan la corrosión del material.

Asimismo, influyen determinadas acciones que atentan contra la durabilidad del concreto como las acciones mecánicas, las acciones biológicas, las acciones químicas y las acciones físicas. El primero se produce por causas naturales como la sobrecarga, los impactos y las vibraciones realizadas en el concreto endurecido. El segundo interviene los agentes de la naturaleza como los ácidos húmicos (hongos y bacterias). El tercero se origina por ataques de ácidos y sulfatos. El cuarto, se genera por la presencia de altas temperaturas y humedad.

El Ministerio de Fomento de España (2010) plantea una serie de estrategias para prevenir la durabilidad del concreto, como otorgar selección a las formas de estructuras adecuadas, la consecución a una calidad dosificada del concreto, brindar espesor de recubrimiento para la protección de grietas, controlar la abertura de fisura a tiempo y disponer de protección superficial del armado frente a desastres naturales y/o químicos. Además, se determinan ciertos

requisitos para conseguir la durabilidad adecuada, en la cual destacan una máxima relación del agua/cemento, considerando un mínimo contenido del cemento para el llenado, así como utilizarlo con resistencia al agua y a los sulfatos.

Resistencia térmica. La conductividad térmica brinda flujo de calor transmitido a un material, bajo la unidad de la temperatura, por el cual es afectado por los minerales que integran los agregados del material y el nivel de humedad. Frente a un concreto de aislamiento térmico, el material actúa como anti combustible al presentar al fuego como excelente compuesto, debido al bajo coeficiente de conductividad térmica ya que la transferencia del calor del concreto es reducida.

Se refiere a la propiedad del concreto para resistir a las variaciones abruptos de las temperaturas. Incluso, la incidencia de los factores son las bajas temperaturas como el hielo, y las altas temperaturas, mayor a 300 °C. Retamal et al. (2020) señalan que el hormigón celular es un material prefabricado liviano que posee ventajas en la construcción, los cuales destacan el bajo peso del concreto, el elevado aislante térmico, la aislante acústica y la resistencia al fuego. Con este material se fabrican bloques de fábrica, tabiques de suelo a techo, bloque en U, zuncho vertical, placas de cubiertas, entre otros.

3.4.2. Mecánicas

La resistencia del hormigón es la propiedad de mayor interés y control que realizan los ingenieros de calidad frente a la construcción. Por eso, en objetos sólidos, lleva una relación inversa entre la resistencia y la porosidad. Así, el cemento padece de cierta porosidad en su estructura, convirtiéndose como una propiedad adversa a la resistencia. Esto conlleva prestar atención a los factores de compactación y el curado de la pasta del cemento. Además, otra definición es la habilidad que dispone el cemento para resistir esfuerzos extremos sin fallar su estructura de agrietamiento (Mehta y Monteiro, 1998).

Las propiedades mecánicas se realizan sobre probetas normalizadas que se confeccionan en moldes, y se deja un tiempo necesario y prudencial para que el hormigón termine de fraguar. Estas probetas son de tres formas: cúbicas, cilíndricas y prismáticas, y cada una tiene diferentes dimensiones. A continuación, se mencionan las tres más destacables resistencias: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tracción.

Resistencia a la compresión. Se refiere al aguante máximo que resiste el material en una carga de aplastamiento. Esta puede fallar por la rotura, en límites bien alineados como una materia autónoma. No obstante, la resistencia no se rompe, sino deforma el concreto en una cantidad arbitraria. Para hallar la medición se mide la carga máxima por la zona transversal originaria de una probeta en un ensayo de compresión.

Resistencia a la flexión. Es el aguante máximo que soporta una viga a flexión antes de que sea agrietado. Los factores que inciden son la relación del agua/cemento, la edad promedio del material, el contenido de aire y el cemento, la influencia que sujeta en los agregados, su tamaño máximo, el proceso de fraguado, el curado después del fraguado final y el uso de aditivos de fibras utilizados en el concreto.

El Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2013) determina este tipo al emplear un instrumento apto de ejecutar una carga completa en el centro del espécimen, de modo que las fuerzas se realicen perpendicularmente en las caras horizontales de la viga. Asimismo, se distribuye homogéneamente en toda la extensión del peso.

Resistencia a la tracción. El hormigón tiene una resistencia mínima a la tracción en la cual no se considera uno de los diseños de estructuras normales. No obstante, en la resistencia a tensión hay agrietamiento por la restricción de contraer el concreto por la disminución de la temperatura. Asimismo, hay una asociación directa entre el soporte a la compresión y la tracción; por lo que, si una de estas resistencias disminuye su capacidad, la otra también lo hará. Sin embargo, se espera que mejore cuando ocurre una cohesión entre la pasta y el agregado favorecida entre sí.

García et al. (2009) señalan que es un valor de tipo convencional que depende del ensayo empleado. Estas destacan tres formas: la flexotracción, el hendimiento y el ensayo directo de tracción axial del concreto, siendo el último el de mayor dificultad y no es práctico emplear. Este es de interés en caso de pavimento porque refleja cualidad de limpieza y de los agregados del concreto.

3.4.3. Reológicas

En Perú, la reología es una ciencia nueva que se desarrolla como propósito de brindar el mayor conocimiento, en el cual los factores directos mejoran el comportamiento de la materia. El control efectuado a las propiedades reológicas del concreto endurecido comienza al realizar el diseño de la mezcla, de modo experimental, con un número limitado de ensayos de prueba. Así, se estima las proporciones adecuadas del mezclado, la consistencia del cementante, el proceso de endurecimiento, la textura en los agregados y los aditivos usados en este material.

En ese contexto, es la ciencia que investiga la fisura y el movimiento de la materia bajo la influencia de las tensiones a cargas de larga duración. Es decir, estudia las relaciones fundamentales de constitución entre las fuerzas y ciertas deformaciones en los materiales. Incluso la influencia de los tipos de cemento en su fluidez de un concreto, su influencia de aditivos y la composición morfológica de los agregados. La medición de la propiedad reológica se utiliza por medio de reómetros que son diseñados especialmente para concretos, los cuales son equipos específicos que miden el comportamiento reológico del material (Palencia, 2020).

El comportamiento reológico que tiene cada concreto es distinto en su aplicación y se destacan los siguientes: la consistencia, la plasticidad, la viscosidad y la cohesión del concreto, ya que en cada momento se aplican y realizan el acabado, el transporte y el mezclado. Son estos distintos momentos reológicos donde el concreto actuará de manera diversa. Al estudiar las propiedades reológicas, permite controlar las características de los componentes que serán

empleados en el hormigón en estado fresco para obtener un mejor grupo de partículas sin necesitar del agua para incrementar mejor la composición del concreto y sus agregados.

En relación con las características reológicas del concreto, Massarotto et al. (2019) sostienen que al mezclarse el aserrín con el reemplazo de arena se produce una reducción en la densidad del hormigón, actuando como aditivo retardador de fraguado, e incluso generando porosidad en el cementante y sus propiedades mecánicas son satisfactorias. Asimismo, el humo de sílice interviene en el control de la trabajabilidad y absorción del agua. Estos reemplazos generados de los componentes benefician el comportamiento mecánico y reológico del concreto.

3.5. Modificadores del comportamiento reológico del hormigón

Las indagaciones del fenómeno reológico han contribuido a desarrollar mayor saberes de las características en estado fresco y endurecido de los componentes del concreto con base de cemento. Aunque la pasta de cemento es la respuesta de hidratación de partículas de cemento con el agua, su accionar es distinto a una interrupción de materias inertes, el cual depende de fuerzas de gravitación entre las moléculas que generan a los flóculos y, luego de tener relación con el agua, se crean reacciones que suscitan disoluciones de iones, comenzando con la formación de partículas hidratadas sobre la superficie. Esta superficie es producida por los flóculos que se rompen durante el proceso de mezcla, lo que demuestra el cambio que surge según rapidez de fisura de la materia.

Este fenómeno explicado depende, en mayor medida, de la energía del proceso del mezclado al formarse la pasta de cemento. En el concreto, los agregados finos y pesados benefician el dispositivo de la rotura de flóculos al disminuir la causa del mezclado, siendo dificultoso realizar la comparación ante la respuesta reológica entre el concreto y la pasta de cemento.

Estos cambios producidos por la composición del concreto afectan su comportamiento reológico, lo que hace imposible el análisis de la segregación de factores existentes en la interacción entre ellos. De este modo, el contenido desmesurado de agua provoca notoriamente la densidad plástica del concreto y el soporte al movimiento acumulado. Es decir, cuanto mayor sea el agua, ambas propiedades se disminuyen de manera importante. En su mayoría, los aditivos modifican los comportamientos reológicos del concreto como los reductores de agua que aminoran en poca proporción la viscosidad plástica cementante, así como la resistencia hacia el flujo del concreto (Zerbino et al., 2006).

En otro sentido, el modelo de cemento también repercute en el comportamiento reológico según los compuestos que tiene el concreto, el cual reacciona a mayor velocidad. Por ejemplo, cuando ocurre mayor incidencia, entre ellas aparecen los compuestos de sulfatos y el aluminato tricálcico (C_3A). Incluso, acarrea un efecto con la agregación de minerales y aditivos químicos.

Por consiguiente, el concreto se ha convertido en uno de los componentes de mayor demanda de construcción utilizado a nivel mundial. Con la integración de sus componentes, se obtiene la mezcla de masa plástica, en el cual se transforma en una roca por su proceso de endurecimiento, siendo más complejo conocer la naturaleza interna de su pasta de cemento.

El concreto se encuentra dividido en dos fases: concreto en estado fresco y concreto en estado endurecido; en ambas se comporta de manera distinta. Por tal razón, es importante conocer cada una de sus propiedades. Por un lado, las propiedades del hormigón fresco son la trabajabilidad, la consistencia, la segregación y la exudación. Por otro lado, las propiedades del concreto endurecido está compuesta por propiedades físico-químicas, mecánicas y reológicas. Estas propiedades actúan como características propias que lo hacen perfecto para la construcción de pavimentos por ser resistentes y de buena hermeticidad.

Además, un conveniente conocimiento de las propiedades de los componentes es importante en la construcción, preservación y arreglo de una obra de arquitectura, incluso es importante reconocerlo para desarrollar un adecuado proyecto de construcción.

3.6. Carbonatación en el concreto por pérdida del pH y su reacción

La durabilidad de la organización de fierros al interior del concreto estriba en la capacidad del material para impedir la entrada de agentes agresivos — como oxígeno, agua y dióxido de carbono— y compuestos de cloruros que brindan soporte a ciertas concentraciones dañinas al concreto. Con respecto a las sustancias de dióxido de carbono y cloruros, el parámetro para determinar la capacidad es por el valor del pH del agua, cuyo efecto es la porosidad del hormigón.

En ese sentido, las armaduras de hierro están protegidas por el concreto que les rodea durante el llenado del encofrado y es en este armazón cementante que se sustenta la seguridad de las edificaciones. Los tres agentes agresivos comunes dañan al hierro, oxidándose a una velocidad superior por la presencia de ácido en el ambiente. Si en caso el concreto tiene la propiedad de poroso, la cal se formará en carbonato por el CO_2 del aire. Por ende, el pH del concreto disminuye su valor en 8 hasta que el acero obtenga propiedades precarias de defensa. En consecuencia, la presencia del óxido a un volumen mayor que el metal, el cual provoca patologías de fisuras y desprendimiento del material circundante de la estructura reforzada (García et al., 2009).

A pesar de que el concreto de alta resistencia es duradero, a lo largo del tiempo puede mostrar deterioro por diversos factores que propician el contacto de sustancias químicas y las condiciones ambientales perjudiciales en la estructura. El mecanismo de deterioro más frecuente es el daño por deshielo, calor térmico y la carbonatación. Estos propician patologías del concreto, por ejemplo, grietas, fisuras y desprendimientos. En este sentido, el asunto de interés es conocer la carbonatación del concreto.

Para Vidaud (2012), la carbonatación es un proceso físico-químico de complejidad que modifica paulatinamente el tiempo durable de la estructura del hormigón, incitando a cambios en las propiedades físicas del material. Por ende, este fenómeno químico avanza del exterior al interior del concreto endurecido, siendo considerado otro tipo de reacción ácida que afecta la durabilidad del cemento reforzado.

La carbonatación, entonces, es un evento originado por la reacción química entre el hidróxido de calcio del concreto y el dióxido de carbono de la atmósfera, formando carbonato cálcico insoluble. Este se percibe físicamente en un hormigón endurecido y no significa un asunto para el material. Sin embargo, es un problema serio para el acero de refuerzo, ya que paulatinamente disminuye y deja su pH. De este modo, deja de ser un medio elevadamente alcalino, con un pH inferior de lo normal (entre 12 y 13) que desestabiliza la capa de óxido protectora del refuerzo e inicia la corrosión.

Según Ribeiro, como se citó en Costa et al., 2022, los elementos que influyen en la carbonatación del concreto son la humedad del ambiente, la temperatura, la concentración de dióxido de carbono (CO_2), la relación entre agua/cemento utilizado, el revestimiento de la superficie, el tipo de cemento, las condiciones de hidratación y curado, la red de poros y la permeabilidad del material. Asimismo, a edades tempranas del endurecimiento, el fenómeno de la carbonatación evidencia baja afectación. No obstante, en periodos tardíos es más evidente en la presencia del concreto por el aumento del ambiente saturado de CO_2 en la atmósfera.

A continuación, se realizará un breve panorama sobre el proceso de hidratación que incide en la aparición de la carbonatación del concreto. Durante la hidratación de las partículas del cemento (agua y cemento), en su interior se forma el gel de CASH, lo que brinda propiedades deseables para el hormigón endurecido y proporcionado alrededor de 50 %. Además, se generan otros compuestos como hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], lo que constituye casi el 15 a 25 % de la pasta en la masa. Después de séptima reacción de hidratación, la masa plástica conforma tres compuestos principales: (a) gel CASH, (b)

hidratos de aluminio ferrita de calcio, y (c) hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. El último compuesto es considerado cal hidratada que no contribuye a las propiedades de resistencia ni a otras deseables, pero sí mantiene protegido la conservación de un alto pH al interior del concreto armado; incluso, el compuesto genera reacción con los ácidos y otros en sí. Esta reacción forma carbonato de calcio, lo que genera la aparición de carbonatación del hormigón (Lines et al., 2021).

Hay algunos métodos para determinar el indicador de carbonatación en el concreto, siendo la prueba de fenolftaleína la más común. Esta es conocida como el indicador de color, donde se prepara la solución al agregar sustancia de fenolftaleína sobre el polvo en litro de alcohol isopropílico, impregnándolo en caras del concreto. Si sale el color fucsia, indica que no hay presencia de carbonatación; en caso contrario, sí. Además, la prueba de color determina la presencia de pH en el concreto (Volpi et al., 2022).

CAPÍTULO IV

ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

En la actualidad, el hormigón se ha posicionado como un compuesto básico en la construcción civil, arquitectónica y de edificios, el cual pasa por un proceso de cuidadosa preparación para obtener una calidad deseada en el mercado internacional del rubro de la construcción. Esta calidad no solo depende de la dosificación utilizada en la combinación (cantidad de agua, cemento y agregados) y las propiedades de sus componentes, sino también de los procesos de colocación, compactación y curado (Santamaría et al., 2021).

Asimismo, el motivo radica en sus cualidades destacadas como la resistencia que posee a la acción del agua, ya que no presenta ningún tipo de deterioro si entra en contacto con ella. Además, tiene capacidad para configurar compuestos (de diversas formas y tamaños). Finalmente, es económico y de fácil acceso (Zerbino, 2020).

Por otro lado, es considerado un material frágil o cuasi frágil, por ello, al momento de ser utilizado en el área de la construcción, es reforzado con elementos estructurales, lo que permite que el resultado final pueda sobrellevar los esfuerzos de tracción. Zerbino (2020) explica que esta técnica fue mejorada a lo largo de los años, ya que en tiempos ancestrales era común reforzar los objetos ligeros con fibras vegetales en arcilla cocida o de pelos de animales en morteros de albañilería.

Entonces, en los últimos años se ha tratado de buscar una alternativa de solución frente a la contaminación que este elemento provoca mediante la implementación de estrategias que disminuyan sus afecciones y permitan emplearlo sin comprometer al medio ambiente. Ello porque este material es

el causante de la producción de residuos a grandes volúmenes y de emisiones tóxicas, resultado de su producción y utilización (Gámez et al., 2017).

4.1. Implicaciones sobre la mezcla del hormigón

Su elaboración debe ser realizada por un personal calificado debido a que, si esta mezcla es maniobrada con niveles excesivos de los componentes o, por el contrario, con cantidades bajas, se altera al producto final de forma negativa. De esa manera, afecta sus características y las estructuras que se realicen en torno a ella

Si se refiere a la resistencia del hormigón, esta depende no solo del tipo de esfuerzo que se aplique al momento de maniobrar, sino de la mezcla de diversos factores que afectan la porosidad de los distintos componentes estructurales. Los factores hacen referencia a las propiedades y dimensiones de los compuestos que constituyen la combinación en sí. Uno de los más importantes recae en el vínculo de agua/cemento (Mehta y Monteiro, 1998).

El excedente o disminución de ambos materiales se concretaría en un debilitamiento progresivo de la matriz por el incremento de la porosidad. Esta relación es diferente en el concreto de resistencia baja y media; ya que es determinada por la relación de la porosidad en el área de traslado y la matriz. Por otro lado, los hormigones de gran soporte tienen un vínculo bajo de agua/cemento, lo que les brinda altos y desproporcionados niveles de resistencia que mejoran significativamente en la zona de transición.

Otro elemento que influye recae en la inclusión de aire como resultado de una compactación inadecuada o por el empleo de un aditivo inclusor de aire, aumentando la permeabilidad de la mezcla, siendo los más afectados los concretos con altas resistencias. En cambio, al mejorar la trabajabilidad y la compactabilidad del concreto, el aire incluido procederá a mejorar el soporte del área de transición, especialmente en combinaciones con mínimo contenido de agua/cemento (Mehta y Monteiro, 1998).

En este agregado está la extensibilidad, la cual se refiere a la capacidad que posee el concreto para someterse a deformaciones sin agrietarse. Para ello, la mezcla debe estar preparada para disminuir su retracción y aumentar su grado de elasticidad. En este caso, son los concretos de alta resistencia, aquellos que tienen más posibilidades de agrietarse. Ello porque tienen una mayor retracción térmica y un menor relajamiento de esfuerzos. En cambio, los concretos de baja resistencia poseen menor posibilidad de agrietarse, ya que tienen una menor retracción térmica y un mayor relajamiento de esfuerzo.

En el caso de la retracción por el secado y por el flujo, ambas se generan por la pasta de cemento hidratada, así como influyen al flujo plástico. La deformación que se ocasiona es de 400 a 1000×10^{-6} , pero en ambos casos estas son parcialmente reversibles. También ocurre cuando la pasta de cemento está sujeta a esfuerzos sostenidos, dependiendo de la magnitud y duración del esfuerzo aplicado, ocasionando una pérdida de agua físicamente adsorbida que afecta, de igual manera, a la viscosidad de la mezcla. Por eso, este detractor no es tomado en cuenta cuando se produce concreto en grandes cantidades.

Finalmente, otro factor es la temperatura que afectará, en mayor o menor medida, al material dependiendo de su grado de incremento térmico, y la magnitud del descenso y ascenso de esta dimensión. En construcciones de hormigón ordinario, estos daños por la temperatura ambiental son pocas o nulas a excepción de las temperaturas extremas. Mehta y Monteiro (1998) informan que, en estructuras masivas, la combinación del calor producido por la hidratación del cemento y la poca disipación del calor en la mezcla, resulta en el incremento del concreto. Asimismo, el enfriamiento causa grietas en el hormigón.

4.2. Agua y aire

Ambos brindan características relevantes en la mezcla. En el caso del agua, cumple la función principal de hidratar al cemento, aunque también se utiliza para mejorar la maleabilidad de la mezcla. Se estipula que debe ser incolora,

bajo una noción de estar en apariencia cristalina y debe cumplir con la NTP 339.088. Se debe evitar incorporar a la mezcla sustancias que decoloren y tengan un olor o sabor anormal (Rivva, 2000).

En general, se debe eludir incorporar a la mezcla sustancias que causan desconfianza a menos que la elaboración específica de un hormigón lo solicite, o que el agua con dicho color haya sido testeada previamente y validada de que no causará ningún daño a la calidad de la mezcla. De igual manera, tiene que estar libre de sustancias (aceites, ácidos, álcalis, sales y materias orgánicas). Por ello, se considera que el agua potable sería ideal para la mezcla, ya que cumple con todos los requisitos previamente descritos. El agua no potable también puede ser utilizada, pero siempre que se demuestre su idoneidad, aunque es normalmente evitada para elaborar mezclas de hormigones de alta resistencia.

Rivva (2000) explica que el agua de mar también es utilizada para la fabricación del concreto, pero solo para casos muy específicos. De igual forma, es necesario conocer el contenido de las sales solubles para verificar si afectan a la mezcla durante el proceso de preparación o en el endurecimiento; aunque no hay evidencias que muestren una falla en la estructura del concreto que haya sido preparado con este material. El contacto del agua de mar con el concreto genera un tanque de poca intensidad, la cual es menor cuando se propicia un contacto sin renovación; ya que el agente activo se agota y su acción se modifica por la presencia de nuevos productos formados por la reacción.

Asimismo, interviene en el procedimiento de trituration al ser utilizada para quitar impurezas y sobra de finos que poseen los agregados. Además, tiene que ser lo adecuadamente pulcra para que no contamine los materiales procesados, logrando afectar su calidad. Esta será adicionada para brindar fluidez a la mezcla obtenida, la cual —una vez endurecida— tendrá como parte de su estructura a una cantidad, mientras que otra parte quedará como agua libre. De esta manera, es necesario que el personal regule cuánta agua retiene el concreto al momento de su endurecimiento, ya que esta agua se evapora y deja pequeños conductos internos que afectan la resistencia del sólido (Sánchez de Guzmán, 2011).

Asimismo, es utilizada para el proceso de curado, pues es necesaria la incorporación de este elemento para una completa hidratación del grano de cemento. Generalmente se emplea la misma agua al inicio de la mezcla, aunque no es lo recomendado; pues genera manchas en el concreto, producto de su evaporación por la presencia relativa de hierro y materias orgánicas. El objetivo del proceso del curado es conservar el concreto saturado hasta lograr rellenar las zonas a un grado anhelado con los resultados de la hidratación del cemento. También, se emplea para evitar el deterioro del concreto endurecido, lo cual se vuelve más estricto cuando se utilizan para concretos arquitectónicos o a la vista.

Por otro lado, el aire es un componente que se encuentra de manera pasiva en el hormigón. Por ello, no son tomados en cuenta cuando se describe a la mezcla. Actualmente, este elemento ha cobrado mayor relevancia en la industria de la construcción gracias a diversos avances tecnológicos que han permitido establecer al aire como un inclusor y como aditivo para este fin (Sánchez de Guzmán, 2011).

Es común que durante la dosificación y la mezcla del hormigón se introduzca un volumen variable de aire a su composición. A esta acción se le denomina aire atrapado u ocluido. En cambio, cuando es introducido intencionalmente, en forma de esteroides, se le denomina “aire incorporado o incluido”. En estos casos se genera un cambio en las características de la mezcla, ya que al tener “aire atrapado” se verificará una declinación importante en el soporte potencial de la mezcla y en su durabilidad. En cambio, cuando se da la aparición de “aire incorporado”, es usualmente agregado para brindar algunos efectos deseables en el hormigón.

Vidaud (2013) menciona que el aire ocluido es más común en estructuras que se encuentran en regiones que pasan por periodos de congelación y deshielo. Ello debido a que al momento que el agua capilar se congela, en el concreto genera una expansión de 9 % de su volumen. De esta manera, se propicia una presión interna al material que provoca la aparición de grietas, desprendimientos y eventual desintegración del hormigón.

4.3. Cemento

Los conglomerantes son materiales cerámicos capaces de enlazar fragmentos de una o más sustancias para brindar adherencia al conjunto. De esta manera, origina conversiones químicas en su masa que propicien otros componentes. Estos se muestran en forma de un polvo muy fino, el cual se convierte en una pasta cuando entra en contacto con el agua, capaz de ser moldeada. Entre los materiales conglomerantes más resaltantes se encuentran la cal, el yeso y el cemento (Muñoz, 2020).

El cemento es un material de tipo aglutinante, cuyo uso habitual radica en la combinación que se obtiene al unirlo con otros materiales áridos para formar otros compuestos conglomerados (mortero y hormigón). Al ser amasado con agua, este material fragua y logra endurecerse, realizando el proceso químico de la hidratación. Este endurecimiento se realiza tanto en interacción con el aire como sumergido en el agua. Por ello, es denominado un conglomerado hidráulico, aunque también existen tipos de cemento no hidráulico. Este material, junto con la arena, la piedra y el agua, crea una combinación apta de solidificarse hasta conseguir la solidez de una piedra (Sanjuán y Chinchón, 2014).

Tabla 5

Composición química de los cementos (% en masa)

Parámetro	Rango aproximado
Residuo insoluble	0.1 – 1.4
Óxido de calcio (CaO)	58.2 – 65.6
Sílice (SiO ₂)	19.8 – 26.45
Alúmina (Al ₂ O ₃)	4.1 – 9.5
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2.1 – 4.5
Magnesio (MgO)	Trazas – 2.9
Álcalis (K ₂ O, Na ₂ O)	0.1 – 2.8
Sulfatos (SO ₃)	0.1 – 2.2
Pérdida por calcinación	0.2 – 2.8

Nota. Tomado de Sanjuán y Chinchón (2014).

Los cementos, tal como se aprecia en la Tabla 5, poseen en mayor medida el óxido de calcio y la sílice en su composición. Los derivados de la calcinación del yeso y los carbonatos (piedra caliza) son denominados no hidráulicos, pues sus productos de hidratación no son resistentes al agua. Por otro lado, existen diversos tipos de cementos hidráulicos, como el cemento Portland (el más usado), el cemento Portland con adiciones activas, los cementos especiales, los cementos siderúrgicos, los cementos puzolánicos y los cementos aluminosos.

Vidaud (2013) informa que el cemento Portland actual se consigue al abrasar mezclas de calizas y arcillas, obteniendo el clínker, el cual se prepara artificialmente a una temperatura aproximada de 1500 °C (sinterización) para formar nuevos compuestos. Mehta y Monteiro (1998) sostienen que los clínker son nódulos de 5 a 25 mm de diámetro que contienen diferentes tipos de composiciones. Adicionalmente, posee un regulador de fraguado que suele ser piedra de yeso natural

Tabla 6

Composición química del clínker (% en masa)

Fase	Fórmula	Abreviatura	Rango	Valor medio
Silicato tricálcico	3CaO SiO_2	C_3S	46-79	61
Silicato bicálcico	2CaO SiO_2	C_2S	5-30	15
Ferrito Aluminato tetracálcico	$4\text{CaO (Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_4(\text{A}, \text{F})$	4-16	8
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6-18	12
Cal libre	CaO	C	0.1-4	1
Óxido de magnesio libre	MgO	M	0.7-1.5	1.5

Nota. Tomado de Sanjuán y Chinchón (2014).

Este componente es de tipo hidráulico y debe estar constituido por silicato de calcio (3CaO.SiO) y (2CaO.SiO_2), tal como se observa en la Tabla 6, en al menos dos tercios de su masa. En cambio, el resto del clínker estará constituido por aluminio, hierro y otros compuestos. La relación en masa ($\text{CaO}/(\text{SiO}_2)$) no será menor de 2.0, y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 0.5 % en masa (Sanjuán y Chinchón, 2014).

En el caso del cemento Portland con adiciones activas, se refiere a aquel tipo de cemento que, aparte de poseer clínker y yeso como componentes principales, contiene algunas adiciones minerales (escoria siderúrgica, humo de sílice, puzolana natural, ceniza volante, etc.). Luego, están los cementos especiales, los cuales son cementos de alto soporte al principio, los resistentes a los sulfatos, los de bajo calor de hidratación y los cementos blancos. Estos, por cierto, frecuentemente son cementos Portland especiales, solo se refuerzan algunos de los compuestos elementales del clínker (Vidaud, 2013).

El cemento siderúrgico, perteneciente al grupo de los cementos fríos, se obtiene de la combinación del cemento Portland, el yeso natural (en dimensiones oscilantes del 5 % al 7 %) y la ceniza de carbón (derivado de

centrales termoeléctricas) o con la escoria de fundiciones (en dimensiones variantes entre el 35 % y el 85 %). Este tipo de cemento se caracteriza por obtener la escoria, amortiguando duramente en agua la espuma derretida que proviene de operaciones siderúrgicas. Por eso, se barniza y se convierte activa hidráulicamente por su mezcla en cal combinada, la cual se fragua a sí misma y tiene un proceso de endurecimiento lento. Entonces, se le adiciona el cemento Portland.

Los cementos puzolánicos derivan de la combinación de clínker de Portland, el regulador de fraguado mencionado (en proporciones oscilantes entre el 45 % y el 85 %), con puzolana (en proporciones oscilantes entre el 15 y el 55 %). Hay dos tipos de puzolana: la natural, utilizada por los antiguos romanos, que es de origen volcánico y se compone de sílice y alúmina. Esta mezcla al mezclarse químicamente con la cal, en presencia del agua, produce este tipo de cemento. En cambio, la puzolana artificial se halla en las cenizas volantes, la tierra de diatomeas o las arcillas activas (Vidaud, 2013).

Finalmente, están los cementos aluminosos que se producen por fusión de caliza y bauxita, siendo su básico componente el aluminato monocálcico. A este tipo de cementos se le agrega el yeso durante su periodo de elaboración. Por lo tanto, no contienen sulfato y su proceso de endurecimiento se realiza en pocas horas, por lo que es mayormente empleado para la realización de compuestos prefabricados de hormigón.

Existen dos tipos de procesos de fabricación del cemento. El primero, que es de tipo húmedo, consiste en unir el molido con la homogeneización de la mezcla prima para formar un tipo de lodo que contiene entre el 30 % al 40 % de agua. En cambio, el procesamiento en seco es el más usado por plantas modernas al ser un medio más eficiente con respecto a la energía. Consiste en la obtención de la misma mezcla lodosa, solo que el agua conduce a ser evaporada antes de la operación de clinkerización.

Para el procesamiento en seco se necesitan molinos equipados con precalentadores de suspensión (permiten el cambio de calor entre los gases calientes y la mezcla prima), los cuales requieren un insumo de energía de

combustible fósil del orden de 800 kcal/kg de clínker en comparación con 1400 kcal/kg que se necesitan para los hornos de proceso húmedo. Posteriormente, la operación final del proceso consiste en pulverizar el clínker en partículas menores de 75 μm de diámetro (Mehta y Monteiro, 1998).

4.4. Los agregados y su diversidad

Son componentes inertes en el concreto que no generan ninguna reacción química compleja con los demás componentes de la mezcla, pero determinan muchas propiedades importantes del hormigón como la porosidad, la graduación o distribución del tamaño, la absorción de humedad, la forma, la textura de la superficie, la resistencia a la ruptura, los tipos de sustancia nociva, etc. Asimismo, tienen un rol importante al momento de establecer los precios y la trabajabilidad del concreto (Mehta y Monteiro, 1998).

Además, se consideran agregados a todos los compuestos que, teniendo un soporte propio idóneo, no alteran ni impactan de manera desfavorable a las propiedades y las características de la mezcla. Al contrario, garantizan una vasta cohesión con la pasta solidificada del cemento Portland. Aunque, de igual manera, hay algunos agregados con elementos nocivos que afectan la organización química del hormigón y su durabilidad (Rivera, 2013).

Hay diversas formas de clasificación de estos componentes. En este sentido, solo se mencionan las más importantes. En primer lugar, se tiene la clasificación más generalizada que es por su tamaño. En este caso, se subdivide esta categoría en dos partes: los agregados finos y los agregados gruesos. Los agregados finos se describen a las partículas menores de 4.75 milímetros (en el rango de 75 μm a 4.75 milímetros generalmente), y los agregados gruesos, a las partículas mayores de 4.75 milímetros (entre 50 hasta 150 milímetros).

Tabla 7

Clasificación de los agregados según el tamaño de sus partículas

Tamaño en mm.	Denominación más común	Clasificación	Uso como agregado de mezclas
< 0.002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0.002 – 0.074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0.074 – 4.76 #200 – #4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4.76 – 19.1 #4 – ¾"	Gravilla	Agregado grueso	Material apto para concreto
19.1 – 50.8 ¾" – 2"	Grava		Material apto para concreto
50.8 – 152.4 2" – 6"	Piedra		
> 152.4 6"	Rajón, piedra bola		Concreto ciclópeo

Nota. Tomado de Rivera (2013).

En la construcción se pretende utilizar aditivos que ayuden a conservar la resistencia y la trabajabilidad del concreto, pues permitiría un beneficio económico al ahorrar cemento, cuyo precio es diez veces más elevado que los agregados. A pesar de la clasificación brindada en la Tabla 7, se considera que, en la industria de la construcción, el tamaño máximo que podría tener un agregado sería de 19 milímetros. Esto porque el tamaño del agregado no puede ser mayor a un quinto de la proporción más angosta de la cimbra, en la cual el concreto pasará a ser colado. Asimismo, tampoco debe ser mayor de tres cuartos de la distancia libre máxima entre la varilla de refuerzo (Mehta y Monteiro, 1998).

Por otro lado, se clasifica a los agregados según su procedencia, dividiéndolos en dos grupos. En primer lugar, al tipo natural que deriva del rendimiento de recursos naturales; es decir, son materiales inorgánicas que se

hallan en la naturaleza. Estos poseen una definición química generalmente definida y una estructura primordialmente cristalina. Son usados tal cual son hallados o variando la organización de la dimensión de sus partículas, la cual se realiza de manera natural (intemperismo y abrasión) o por acción del hombre (trituration mecánica).

En este tipo de agregados están las rocas que, a su vez, se clasifican en tres tipos: las rocas ígneas, aquellas que se crean al enfriarse el magma (sobre, abajo o cerca del área) y varían de acuerdo con la rapidez con las que se solidifican (plutónicas, hipabisales y volcánicas); las rocas sedimentarias las que más abundan en el plano terrestre, y están conformadas por pedazos de rocas ígneas, metamórficas y otras sedimentarias que son transportadas y depositadas por acción del agua, el aire y el hielo; y las rocas metamórficas, rocas ígneas o sedimentarias que fueron transformándose producto de su interacción con los fenómenos físicos o químicos bajo la superficie de la tierra.

También se encuentran minerales, como el cuarzo, que se hallan en las rocas ígneas; el ópalo, principalmente en rocas sedimentarias, especialmente en horstenos; los feldespatos, importantes componentes de las rocas que son tan duros como el cuarzo, se diferencian por su estructura química y sus propiedades cristalográficas; los minerales de sulfato, donde se hallan el yeso y la anhidrita (Mehta y Monteiro, 1998).

Luego, están los agregados artificiales que se producen desde procesos y productos industriales (arcillas extendidas, escorias de alto horno, clínker, limaduras de hierro, etc.), habitualmente son de mayor o menor consistencia que los compuestos naturales. En la actualidad, se prioriza la formación de concreto ligero y ultraligero con propiedades específicas: forma de los granos compacta, consistencia de volumen, aguante a las variaciones climatológicas, bajos porcentajes de consistencia, etc. (Rivera, 2013).

Mehta y Monteiro (1998) agregan que en esta categoría también se encuentran los agregados reciclados que son provenientes de concreto reciclado (vidrio, papel, metales, etc.) y desechos municipales (residuos de incineradores). Hay diversos estudios que validan diferentes beneficios

obtenidos de este tipo de concreto en comparación con el obtenido de la mezcla con compuestos naturales. Desde el mayor soporte a la presión hasta su trabajabilidad y maleabilidad satisfactoria.

4.5. Los aditivos y su tipología

Son componentes capaces de modificar diversas características propias del hormigón. Cuando se descubrieron los diferentes beneficios que brindan a la mezcla, hubo un crecimiento en la industria de los aditivos del concreto que ha perdurado durante los últimos 40 años. Actualmente, es común que el concreto posea más de un aditivo capaz de mejorar diversas características necesarias para las edificaciones modernas (Mehta y Monteiro, 1998).

Su uso permite un progreso en la maleabilidad de la combinación sin la necesidad de disminuir el agua incorporada a la misma. Este proceso también funciona en viceversa, ya que hay aditivos que permiten disminuir la cantidad de agua sin modificar la manejabilidad del concreto. También hay otros que permiten controlar el tiempo de fraguado, además de disminuir la segregación y aumentar la resistencia, la durabilidad y la permeabilidad de las edificaciones. Por otro lado, la mejora de todas estas características permite reducir los precios de elaboración e incrementar los costos en el mercado en relación con la mejora de la calidad.

Asimismo, se clasifican de acuerdo con las características que mejoran al momento de ser adicionados a la mezcla, de los cuales los más importantes son:

Los aditivos aceleradores. Son aquellos que adelantan o reducen el tiempo del fraguado y del endurecimiento, o ambos procesos a la vez. Se utilizan para aquellos concretos donde es importante contar con una resistencia elevada desde el principio. También se utilizan para mezclas que requieran un desencofrado rápido, aquellos que permanecen inmersos o en contacto de agua, así como favorecer la resistencia en tiempos fríos de estas construcciones (Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para el Hormigón y Cemento [ANFA], s. f.-a).

Los aditivos retardantes o estabilizadores. Según la ANFA (s. f.-b), son aditivos que retardan el proceso común que posee el concreto. Sika Perú (s. f.) añade que este tipo de aditivo posibilita una gran adaptabilidad cuando se dosifique los tiempos de fraguado y normalmente se usan cuando la mezcla requiere tiempos largos de transporte, si está expuesto a temperaturas muy elevadas o se reduce el calor de hidratación del hormigón.

Los aditivos plastificantes. Sika Colombia (2014) menciona que estos compuestos son orgánicos y optimizan los diseños del concreto disminuyendo las necesidades de agua y cemento que estos puedan tener. Un efecto directo de este tipo de aditivo está en la disminución de la viscosidad de la mezcla, permitiendo que esta se vuelva más líquida y fluya más rápido.

Los aditivos superplastificantes. Cumplen la misma función que los plastificantes, aumentar la manejabilidad de la mezcla, lo que permite reducir el volumen del agua y de cemento, pero son aplicados cuando los aditivos plastificantes han llegado a su máximo, siendo eficientes para concretos de alta resistencia (Sika Colombia, 2014.).

4.6. Materiales suplementarios o complementarios

El cementante es la pasta que almacena los agregados y elementos complementarios que afectan significativamente a las características del concreto. Estos materiales están formados por cemento Portland el cual, a su vez, está combinado o triturado conjuntamente con uno o varios materiales conocidos como adiciones, los cuales reemplazan a los materiales base o complementarlos para ayudar a mejorar sus características. Entre los principales materiales tenemos:

Tabla 8

Principales adiciones del cemento

Adición	Carácter	Reactividad
Escoria granulada de horno de fundición (GBFS)	Artificial	Hidráulica
Ceniza volante (FA)	Artificial	Puzolánica
Humo de sílice (SF)		
Ceniza de cascarilla de arroz (RHA)		
Metacaolín (MK)		
Cenizas volcánicas	Natural	
Pumice volcánico		
Filler	Artificial	No activa

Nota. Tomado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (2017b).

Tal como se divisa en la Tabla 8, las adiciones hidráulicas y puzolánicas son consideradas activas, pues tienen la disposición de actuar con el agua y con el CH del cemento Portland hidratado, reaccionando con el agua directamente o a temperatura ambiente, respectivamente, formando productos cohesivos y estables.

La existencia de estas reacciones hace posible que las adiciones activas reemplacen alguna parte del cemento Portland o el clínker, conservando las características positivas del cementante. Por ello, son considerados materiales complementarios o suplementarios. El propósito radica en un ahorro de energía

y reducción del carbón, además que ayuda a la manejabilidad y el soporte del concreto por poseer un resultado satisfactorio y lograr la aceleración del proceso de hidratación. (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2017a).

Actualmente, las empresas optan, en sus gastos fijos, por la incorporación de estos adicionales a la mezcla porque les permite lograr una reducción en los procesos de producción, brindando un beneficio a las grandes compañías. De igual manera, permite una reducción del CO₂ por tonelada de cemento, lo que ha ocasionado una clara reducción en la producción de OPC con el tiempo. Finalmente, la mezcla del hormigón o concreto tiene diversos elementos que brindan una variabilidad a sus características. Ello es aprovechado por diversas empresas, principalmente que se encuentren en el área de la construcción, ya que les permite la creación de edificaciones con mayor resistencia frente a situaciones específicas, como los cambios ambientales, los desastres naturales, etc.

Entre los materiales bases más importantes están el cemento, componente principal de la mezcla que otorga la maleabilidad del material. Los procesos que afectan a este componente brinda las características principales a la mezcla final. Por eso, es necesario que su proceso de realización se ejecute por personal capacitado. También están los componentes como el agua, que ayuda a la hidratación de la mezcla al igual que el tratamiento cuando se encuentra endurecida, y al aire en la elaboración inicial de la mezcla, pero toma mayor relevancia como un aditivo.

Los agregados, los aditivos y los materiales complementarios y suplementarios son los componentes que ayudan a agregar estas características específicas a la mezcla, así como sirven para disminuir los procesos de producción y otorgar un costo agregado a la venta de la mezcla en el mercado. Asimismo, se pueden reemplazar en cantidad a los materiales base sin alterar las características de la mezcla final.

CAPÍTULO V

INTRODUCCIÓN A LOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

La aplicación de los aditivos para hormigones es definida como sustancias químicas que dosifican alrededor del 5 % de la pasta de cemento, cuya agregación de estas sustancias se realizan con el resto de los componentes esenciales como el agua, los agregados, el cemento, y aditivos opcionales. Entonces, se incorpora comúnmente a lo largo de la elaboración de la mezcla, cuyo fin es alterar algunas de sus capacidades físicas y obtener grandes beneficios en la reducción de los costes finales del concreto.

Desde tiempos antiguos, se utilizaban para la diversa fabricación de concreto, por el cual aumentaba la calidad de sus construcciones cementantes, e incluso mejoraba las propiedades inherentes de la mezcla. En este sentido, hay dos distinciones entre los aditivos para el cemento y concreto. El primero, se aplica con el proceso de molienda de clinker junto con sustancias diversas del cemento; el segundo, con otros fines que operan sobre la base del cemento y los demás compuestos de la combinación.

El empleo de aditivos debe darse bajo las especificaciones de un proyecto diseñado con rigurosidad de expertos, en el cual se requiere controlar la cantidad para prevenir ante cualquier efecto secundario. Al haber una serie de aditivos, el director de obra tiene que observar características propias del lote para la selección adecuada: las condiciones de la obra, la ubicación del terreno, el proceso de construcción y las condiciones ambientales. Conocer a fondo ayuda a implementar la elección adecuada de aditivos y las ventajas que trae consigo.

Existen cinco tipos de aditivos: los plastificantes, los superplastificantes, los aceleradores y los retardadores de fraguado y los inclusores de aire. Cada uno cumple funciones propias que benefician favorablemente al concreto. A continuación, se presenta el estudio de aditivos superplastificantes como tema de interés de mayor uso para el concreto. La función principal es reducir significativamente la capacidad de agua de un hormigón.

5.1. Alcance conceptual sobre los aditivos superplastificantes

Cuando se mencionan aditivos para el concreto, se refiere a los productos incorporados durante el momento del mezclado del concreto, cuya finalidad es cambiar sus capacidades, tanto en cemento fresco y cemento endurecido. Por ello, hay una serie de tipos de aditivos que se recogen en la Tabla 9, en la cual describen cinco: los plastificantes, los superplastificantes, los aceleradores de fraguado, los inclusores de aire y los multifuncionales, cada uno cumple una función distintivamente en el concreto.

Tabla 9

Tipos de aditivos utilizados en la construcción

Tipos de aditivos para los hormigones
Plastificantes. Disminución de agua para facilitar la manejabilidad sin cambiar el volumen de humedad.
Superplastificantes. Reducir de modo significativo la cantidad de agua sin cambiar la manejabilidad.
Aceleradores y retardadores. Modificación del tiempo de fraguado.
Inclusores de aire. Elaborar en el concreto un volumen manejado de finas burbujas de aire de uniformidad distribuidas para la mejora de la propiedad frente a las heladas.
Multifuncionales. Cambiar los cargos principales sobre el concreto.

Nota. Tomado del Ministerio de Fomento de España (2010).

Hay una cuestión entre los conceptos de aditivos plastificantes y superplastificantes, puesto que ambos términos son usados en la literatura científica y son casi sinónimos, aunque tienen funciones distintivas una de otra. Por aditivos plastificantes, se entiende a todo aditivo que reduce cierta cantidad del agua al permitir el mantenimiento de la trabajabilidad del concreto; mientras que los aditivos superplastificantes, a todo aditivo que funciona como reductor de agua de alta actividad, con poca cantidad de agua logra el concreto se fluidifique y acelera el endurecimiento de la mezcla.

Los superplastificantes, también considerados como superfluidificantes, son aditivos de alto rango reductor de agua. Es decir, actúa significativamente en el revenimiento del concreto y la relación entre agua/cemento (de bajo a normal) para generar un hormigón de mayor fluidez en la mezcla. Se emplea al llenar una vez al máximo la capacidad de los plastificantes para conseguir una función eficiente de asentamiento o alta resistencia en el concreto. Fernández et al. (2016) describen que el compuesto base de los superplastificantes son naftaleno sulfonado, melaminas y vinilos. Estas moléculas son de naturaleza orgánica e inorgánica para trabajar en unión con las partículas. De esta manera, se consigue su propósito de reducir la dosificación del concreto y mejorar sus propiedades mecánicas en la obtención de una mejor durabilidad en la construcción.

Materiali Ausiliari Per l'Edilizia e l'Industria [MAPEI] (2022) sostiene los siguientes aportes de los aditivos superplastificantes para su empleo en el concreto:

Dynamon SX. Es un producto de alto rendimiento para el concreto basado en la cuarta generación de aditivo de policarboxilato que pertenece al sistema de MAPEI Dynamon. Es utilizado para mezclas listas y hormigón preformado, cuyo fin es obtener mayor reducción de agua y perfeccionar las capacidades mecánicas del concreto. Además, se emplea para conseguir una alta cohesión y moldeabilidad en el mezclado.

Dynamon XTend W180. Aditivo en estado líquido para la agregación en la mezcla del concreto en conservación de su alta calidad, especialmente para reducir su proporcionalidad de agua y cemento, mejorar la moldeabilidad y prolongar el tiempo de la obra en el proceso de fraguado.

EVO 2500. Es de última tecnología compuesto de policarboxilatos para conseguir el alto rendimiento en el mezclado del concreto. Este aumenta la hidratación de los compuestos del cemento, mientras mejora los parámetros reológicos del concreto en todas las edades del tiempo. Incluso, este aditivo no favorece a que haya mayor corrosión en el concreto reforzado, puesto que no contiene cloruro de calcio que deteriora el acero reforzado.

Polychem 850. Diseño para facilitar el acabado de hormigón premezclado, cuya característica es fluido y moldeable durante tiempos prolongados, y con propiedades normales de proceso de fraguado. Su propiedad es reductora de agua para realizar un fraguado normal de rangos que utiliza el medio tecnológico de policarboxilato.

Melchem. Es de alto rango de reductor de agua, con base de compuesto de melamina. Incluso es soluble en agua. En este sentido, disminuye el agua al estar añadido con la mezcla alrededor de 30 %, generando una alta resistencia con poca proporción para obtener un concreto fluido.

Mapefluid N200. Tiene base de naftaleno sulfonato para obtener un fraguado normal en la mezcla, tanto de alto rendimiento, y un cemento endurecido de mayor durabilidad. Asimismo, su fabricación tiene un alto grado de maleabilidad durante el mezclado.

Estos aditivos son usados en funciones esenciales para el manejo del concreto, como el incremento de la trabajabilidad, durante el proceso de mezclado en su asentamiento y la cantidad definida del cemento sin alterar las propiedades reológicas del diseño de la obra. En segundo lugar, el aumento de la resistencia al encontrar la cantidad medida de agua, sumado al aditivo al producir un *slump* deseado. Finalmente, reduce la cantidad de cemento

definida en el ensayo de *slump* del concreto. Además, se usa para conseguir la disminución del volumen de agua al conservar constantemente la relación agua/cemento.

Pese a las ventajas que ofrecen los aditivos superplastificantes manejados en la mezcla cementante, su uso excesivo conduce a efectos anormales y secundarios como la segregación, los retrasos en el fraguado inicial, la pérdida rápida de la trabajabilidad y cortos mantenimientos de fluido en el fraguado. Las situaciones descritas son problemas de incompatibilidad entre el cemento y el aditivo. Alonso (2011) plantea que los factores que inciden a la compatibilidad son los siguientes: factores vinculados a los aditivos decisivos en su efecto fluidificante como la dosificación, el peso, molecular y la composición química; los factores vinculados al cemento que inciden en la finura del tamaño de sus partículas, el contenido en C_3A y/o sulfatos cálcicos y la presencia de minerales adicionales en el concreto; y los factores relacionados bajo los requerimientos de pruebas de ensayo como la incorporación de otros aditivos y la interacción de la propiedad reológica de la mezcla.

5.2. Sistema clasificatorio de los plastificantes y superplastificantes

En la actualidad, los avances tecnológicos del hormigón son imprescindibles para conseguir la perfección generalizada, demandante para la realización de construcciones modernas de concreto armado y la disminución ante los desastres naturales que afectan a las viviendas de casas prefabricadas de madera. Por ello, ha sido estudiado para innovar nuevos materiales hacia otras prestaciones necesarias de mayor atención, propiciando el surgimiento de los aditivos químicos. Por ejemplo, los requerimientos que asignan a la mezcla y su fraguado, las condiciones climáticas diversas, o las necesidades de transportar el mezclado a largas distancias.

Casos como contar una dosificación determinada conlleva agregar agua a la mezcla, pero esta se vuelve más permeable y tiene menos consistencia. Otra situación, es la conservación de la mezcla fresca durante un determinado tiempo, aunque pierde su plasticidad y endurece. En ese sentido, es

imprescindible incorporar un nuevo componente en el concreto para socavar estas problemáticas. Estos son los diversos aditivos para la elaboración de la mezcla.

Los aditivos determinados compuestos químicos son incorporados durante la mezcla, cuyo fin es mejorar algunas propiedades del concreto. En este sentido, beneficia tanto al concreto fresco y concreto endurecido, hallando determinadas limitaciones del compuesto como polvos, emulsiones y líquidos.

Los aditivos fueron utilizados en la antigua Roma ante la agregación de agentes naturales (sangre y tocino) en sus concretos puzolánicos para perfeccionar las capacidades reológicas de la combinación como la durabilidad de sus monumentos arquitectónicos. En el siglo XIX, se usaron estos aditivos químicos al patentar el cemento Portland en Europa, especialmente Inglaterra, en el cual se añaden el cloruro de calcio y el yeso para controlar el endurecimiento del concreto hacia fin de siglo. Un siglo después, se incorpora el uso de silicato de sodio y jabones para ayudar la propiedad de endurecimiento, así como aditivos —como polvos finos y fluosilicatos— que ayudaban a colorear y endurecer el concreto en toda la superficie de pavimento.

Finalmente, en los años sesenta, se empezó el masivo uso de aditivos plastificantes y superplastificantes, siendo los más demandantes en el mercado internacional por su capacidad de reducción del agua durante el mezclado y la obtención de concretos de mayor resistencia. Inclusive, la normativa ASTM los clasifica según los tipos de aditivos mencionados (Vidaud y Vidaud, 2014a). A continuación, los aditivos plastificantes y/o superplastificantes se clasifican en las siguientes categorías: primera generación, segunda generación, tercera generación y cuarto generación.

5.2.1. Plastificantes de 1.^a generación

Se empleaban aditivos sobre la base de lignosulfonatos, derivados de la industria papelera de la producción de la celulosa de la madera. Se usaba frecuentemente en la producción de la mezcla con otros componentes básicos del concreto.

Estos aditivos —o sustancia reductora de agua de media gama— al poseer cargas opuestas se adhieren en la superficie de las moléculas del cemento. En este sentido, al presentar carga negativa resiste la aparición de cargas positivas, generando que aparezcan solo las primeras. Este accionar pone en marcha a dos agentes. Por un lado, un agente físico, generando una aversión entre las moléculas cementantes al tener igual carga negativa; por otro lado, un agente desperdigado al permitir que haya mayor permeabilidad de agua, teniendo mayor trabajabilidad en la mezcla. Como indica Ferraz (2016), los aditivos con base de lignosulfonatos disminuyen, en mayor medida, la tensión superficial del agua, ya que aumenta el efecto de lubricación al interior de las partículas cementantes.

5.2.2. Plastificantes de 2.^a generación

Permite la mayor reducción de agua y cemento del hormigón. Se emplean aditivos con base de naftaleno y melamina, los cuales tienen los mismos mecanismos de función a los aditivos de la primera generación, pero estos generan un agente de dispersión eléctrica de mayor intensidad en las partículas de cemento. En ese contexto, estos polisulfonatos se adhieren a los componentes del cemento, concediendo una carga negativa mayor para la repulsión. Esto permite la mejor hidratación de la mezcla.

Por un lado, el aditivo con base de naftaleno se produce bajo la industria de refinería de carbón, lo que proporciona una reducción de agua debido a su estructura molecular hidrofóbica que posee dicho aditivo, y la inclusión de contenido de aire puesto en el hormigón. Por otro lado, el aditivo sobre la base de melamina constituye a polímeros sintéticos, similar al compuesto de naftaleno, pero en este su resistencia es más alta.

En ese sentido, Vidaud y Vidaud (2014b) señalan que la elaboración de polímeros sintéticos reduce hasta un 15 % de agua en promedio, ya que en comparación de los aditivos de la primera generación solo permitía la reducción de agua del 5 % original durante el mezclado, sin perder la consistencia y obtener alta resistencia del concreto. Un claro ejemplo, si se mezclase el cemento con el agua, llevaría a cabo la formación de grumos en el concreto, generando un efecto negativo en la resistencia de la mezcla. No obstante, al añadir los aditivos superplastificantes (reductores de agua), las partículas del cemento absorberán este aditivo, logrando una mezcla fluida y necesitando menor cantidad de agua.

5.2.3. Plastificantes de 3.^a generación

Fue producida por la tecnología de Sika. Estos constituyen la producción de aditivos con base de copolímeros vinílicos al poseer moléculas de mayor tamaño que los aditivos de anteriores generaciones; siendo más efectivo como reductor de agua de alto rango. Incluso, proporciona una reducción del 30 % de agua, brindando mayor resistencia mecánica al concreto.

5.2.4. Plastificantes de 4.^a generación

Finalmente, la última innovación de aditivos para el concreto es conocida como la cuarta generación de superplastificantes de alto rango de eficiencia porque poseen la propiedad de disminuir el agua hasta un 40 % promedio en la mezcla. Este tipo de aditivo se elabora con base de polímeros acrílico o policarboxilatos, los cuales modifican los parámetros reológicos de los hormigones durante mayor tiempo. Ello es opuesto a sus predecesores a través del mecanismo de repulsión estérica. Como indica Ferraz (2016), la repulsión resulta de la adsorción de la cadena de polímeros en las partículas del cemento y a las largas cadenas laterales del polímero. De este modo, proporcionan tiempos prolongados de disminución de agua debido a los efectos de fuerzas estéricas.

Con la producción de los policarboxilatos fue posible la creación de nuevos hormigones con la capacidad de mayor fluidez sin segregación alguna, siendo denominados los concretos autocompactables. Por el cual, se mejoran las condiciones reológicas de fluido y trabajabilidad de otras aplicaciones de concreto, esto trajo consecuencias a la resistencia de compresión de las reacciones entre las cadenas poliméricas y el cemento Portland.

5.3. Tres clases de superplastificantes

El empleo de plastificantes puede causar efectos secundarios sobre el concreto, por ejemplo, el retraso en su proceso de fraguado y la demora de su endurecimiento. No obstante, la reducción de agua es característica propia de estos aditivos, el cual no supera el 15 %, dependiendo el tipo. En ese sentido, actualmente se están empleando otro tipo de aditivos o superplastificantes referidos a los productos químicos que, en menor medida, presentan efectos secundarios en el hormigón, el cual supera el 30 % de reductor de agua.

La incorporación de los aditivos superplastificantes al concreto es perseguida por tres objetivos primordiales: el primero, la intención de reducir la capacidad de agua durante la combinación sin disminuir la trabajabilidad del concreto; el segundo, aumentar la consistencia de la pasta de cemento sin agregar el volumen de agua; y, el tercero, optimizar la capacidad del cemento mediante la reducción de la relación agua/cemento para conseguir la fluidez del del material.

Existen tres grupos de superplastificantes: los condensados de formaldehído (SMF y SNF), los lignosulfonatos modificados (SML) y los policarboxilatos. Los dos primeros grupos son los más económicos por ser subproductos de la refinería de papel, pero los más empleados son de cuarta generación por la mayor efectividad reductora de agua, superando el 30 % (García et al., 2009).

Así, la gran variedad de aditivos, tanto plastificantes y superplastificantes, están en la industria a nivel internacional. No obstante, la norma europea EN 934.2 los divide según su función reductora de agua: los plastificantes

tiene una reducción de agua del 5 % hasta el 12 %, cuyo origen pertenece a los lignosulfonatos modificados (LS); los superplastificantes, una reducción de agua mayor del 12 %, cuyo origen pertenece a los condensados de formaldehído con base de naftaleno y/o melamina (SNF y SMF); y los polímeros de policarboxilato. La distinción radica en el porcentaje receptor en estos aditivos.

5.3.1. Lignosulfonatos modificados (LS)

Durante la producción del papel se forma un subproducto líquido en su interior que contiene otras sustancias de desintegración de la lignina y/o la celulosa en la madera, de hidratos de carbono y otros productos de sulfonación. Ante la fermentación, elabora una serie de variedades de lignosulfonatos de diversas purezas, en el cual sus propiedades se sujetan de acuerdo con las causas y los tipos de madera utilizada, el tratamiento de elaboración del papel y las condiciones de proceso de fermentación.

Los LS son los primeros superplastificantes utilizados en la construcción alrededor de 1940. Posee un rango bajo de reducción de agua que rodea el 5 % hasta el 10 %, consiguiendo la eliminación de impurezas de los carbohidratos, donde se selecciona las fracciones de peso molecular mayor (Alonso, 2011).

5.3.2. Condensados de formaldehído

A partir de los 60, se desarrollan aditivos superplastificantes con base de naftaleno y melamina, los cuales se conocen como sales de condensado de naftaleno sulfonado y formaldehído (SNF), y sales de condensado de melamina sulfonada y formaldehído (SMF).

Se distinguen por estar en el mismo grupo funcional, llamado sulfonato. Tanto el SNF como el SMF son elaboraciones sintéticas elaboradas para un específico uso, cuyos factores son determinados por el proceso de fabricación de este material. Según Alonso (2011), estos aditivos convencionales realizan el proceso de adsorción sobre las partículas de cemento por medio de sus

familias sulfónicas (aniónicos) por la carga positiva superficial de los granos. Una parte de los grupos con carga negativa permanece en relación con la emulsión al conferir una carga negativa, responsable hacia el fenómeno de repulsión electrostática entre estos grupos. Dicho efecto actúa sobre la segregación de las moléculas de cemento al liberar agua detenida en los flóculos.

5.3.3. Policarboxilatos

Pertenecen al nuevo grupo de los superplastificantes, cuya organización química es más compleja que las anteriores generaciones porque posee cadenas de polímeros acrílicos y presenta un complejo tridimensional que, sumado a su composición química, deriva el accionar de un agente dispersante de triple efecto: eléctrico, adsorción y repulsión estérica. Actúa entre tres veces la dosificación en superioridad en comparación de otros superplastificantes. Incluso, el efecto de dispersión depende, en menor medida, de sus fuerzas eléctricas y la reducción de agua alcanza hasta 40 % de agua de mezclado, y su manejabilidad es superior que otros aditivos (Sika Colombia, 2014).

Frente a estas características, proveen un excelente parámetro reológico en concreto fresco, sobresaliendo resultados favorables en concreto endurecido. Los más destacables son: gran disminución de agua, alto grado de manejabilidad, mayor accionar reológico, alta resistencia en edades tempranas y tardías del concreto bajo el grado de permeabilidad y reducido costo presupuestal.

5.4. Aditivos con base de policarboxilatos

Los aditivos actuales son los superplastificantes perciben un desarrollo constante de empleabilidad en obras constructivas. No solo por su función de reductor de agua, sino por la síntesis de modificarse sus secuencias químicas que le permite regular sus propiedades. Por ejemplo, mantener la consistencia inicial y final del concreto, y adaptar su compactibilidad del tipo de aditivo con cada partícula de cemento.

5.4.1. Efecto químico de los policarboxilatos

La interacción química en los superplastificantes determina la existencia de la adsorción, por el cual lleva a cabo el impedimento de las zonas reaccionarias en las propias moléculas del cemento y la creación de enrevesados tensoactivos. Con respecto a ello, los aditivos son sustancias (tensoactivos) con elevada acción superficial que intervienen en procedimientos donde surge relación entre el fluido (agua) y los compuestos sólidos (partículas del cemento). Las capacidades obtenidas por los aditivos en el concreto dependen por las cadenas hidrocarbonadas que están enlazadas por grupos hidrofílicos. Por ello, se clasifican en tensoactivos aniónicos como hidroxilo, sulfonato y carboxilo.

Los policarboxilatos son polímeros no lineales formados por cadena principal, obtenidos por medio del proceso de polimerización de unidades de ácidos acrílicos y otras moléculas entre sí. Esta cadena está conformada por grupos carboxilato ionizantes, responsables del procedimiento de adsorción de los polímeros encima del área del cemento y la producción del efecto electrostática. Inclusive, es responsable del efecto de dispersión por el mecanismo esférico al ser colgadas las cadenas laterales provenientes de la cadena principal.

Estas largas cadenas laterales impiden que las partículas del cemento realicen la circulación. En ese sentido, Andrade et al. (2009) sostienen las siguientes fases de mecanismos de acción de los superplastificantes con base de policarboxilatos:

Agregación del superplastificante en el hormigón fresco. Esta primera fase está relacionada con el periodo de mezclado requerido para que el aditivo se distribuya homogéneamente. En este sentido, depende del volumen de agua y el tipo de aditivo a emplear, por el cual a menor humedad se obtiene mayor tiempo de mezclado. Asimismo, en caso que se use el aditivo policarboxilato, a mayor densidad de las cadenas laterales, mayor será el tiempo de amasado.

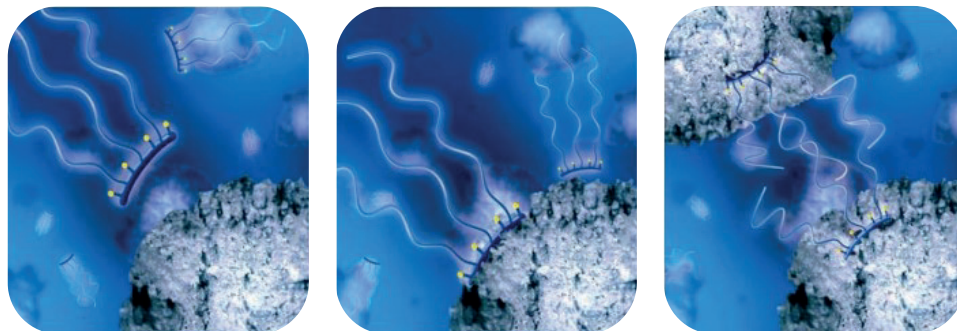
Proceso de adsorción del polímero sobre el cemento. Esta segunda fase se asocia al efecto dispersante conseguido y el periodo de persistencia del ensayo del cono. Al ser mayor la cantidad de polímeros adsorbidos, mayor será la producción de efecto dispersante en las partículas del cemento. De este modo, esta afinidad dependerá del volumen que poseen los polímeros y la densidad de los grupos ionizantes de las partículas. Inclusive, su mecanismo de acción interviene la composición del cemento y la reacción química de los agregados/compuestos alcalinos del concreto.

Acción del polímero adsorbido. En esta tercera fase, el polímero al ser absorbido se orienta para la disposición de los grupos carboxilos, siendo los responsables en el accionar del efecto dispersante, cuyo proceso genera que sus densidades susciten un único signo en los compuestos del cemento.

Progreso de equilibrio entre el polímero adsorbido y en solución. Esta cuarta fase, se vincula con el periodo de persistencia del agente dispersante. Asimismo, la disgregación se conserva durante el periodo necesario para el traslado y la puesta de obra del concreto. Por eso, la reserva del polímero en solución es necesario para que continúe adsorbiendo sobre otras partículas del cemento durante su aumento de tamaño. Es decir, cuando se hidrate y mantenga el equilibrio del efecto dispersante a lo largo del fraguado. El equilibrio entre los aditivos (absorbido y en solución) depende de la estructura interna de los polímeros, especialmente de la densidad de los grupos ionizantes entre sí.

Figura 4

Mecanismo de acción de la naturaleza hidrófila de cola hidrófoba



Nota. Tomado de Andrade et al. (2009).

Como se aprecia en la Figura 4, las moléculas superplastificantes están formadas por largas cadenas y enlaces, las cuales se adhieren a las partículas de cemento en la fase de adsorción. Sin embargo, las materias primas utilizadas para elaborar el cemento pueden dificultar este proceso. El superplastificante sobre la base de policarboxilatos considera estas variaciones del cemento, siendo más potente el sistema de enlace que cubre rápidamente todas las partículas independientemente. Después, cada elemento tiene un papel primordial donde las cadenas más largas separan las partículas y fluidifican la mezcla, actuando como agente de repulsión electrostática.

5.4.2. Estructura de polímero: naturaleza hidrófila en una cola hidrófoba

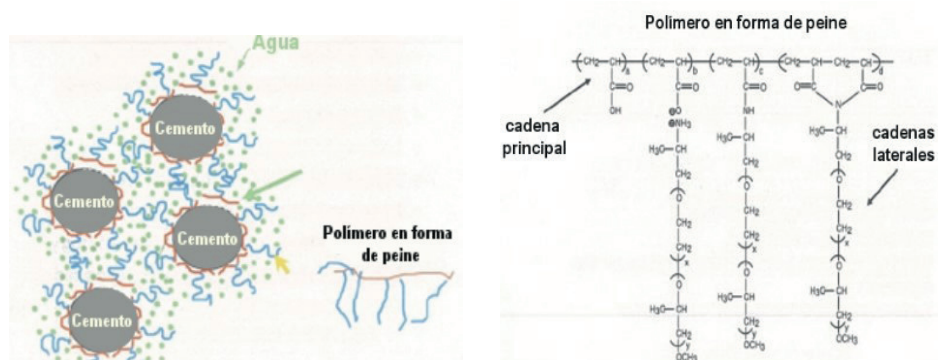
Estos superplastificantes de alto rango poseen una función superficial debido a la composición química que accionan los grupos hidrofílicos e hidrofóbicos. Estos grupos permiten que sus enlaces actúen con mayor potencia en la adhesión de las partículas del cemento. En definitiva, la creación de la cola hidrófoba depende de la naturaleza hidrófila, posibilitando la vinculación a cada una de las partículas del cemento.

En presencia de agua, las colas hidrofóbicas interaccionan entre sí, donde crea un espacio hidrofóbico en el cual excluye al agua por ser una sustancia

apolar insoluble. En tanto, la naturaleza hidrófila, al ser polar y soluble, interacciona con el agua. Esto permite que la cola hidrófila se encuentre solventada entre moléculas disolvente con soluto y resguardando a las hidrofóbicas de cualquier contacto con el agua. Asimismo, son denominadas como la cadena principal, y las hidrofóbicas, las cadenas laterales.

Figura 5

Estructura del polímero



Nota. Tomado de Andrade et al. (2009).

Como se aprecia en la Figura 5, en el lado izquierdo se visualiza la estructura genérica del polímero policarboxilato. En contraste, en el lado derecho el accionar de la fuerza de repulsión electrostática del superplastificante.

5.5. Regulación sobre su empleo

La ejecución de los aditivos superplastificantes se halla en la obtención de hormigones de alta resistencia, con una cifra elevada de cemento equilibrado sin presentar efectos de retracción y agrietamiento de las combinaciones en exceso del material. Cuando se usa estos aditivos se incrementa el aguante del hormigón, ya que disminuye la permeabilidad de la pasta cementante y otras propiedades beneficiadas como la disminución de la porosidad y el aumento de durabilidad y/o consistente. Antes de ser utilizado en la obra, el

superplastificante debe ser analizado por profesionales de la construcción, quienes analizan una serie de factores para su selección de aditivo. A continuación, tiene que ser empleado correctamente en la superficie cementante con el conocimiento de las normas de construcción. En el siguiente párrafo se mencionan las precauciones a considerar en cuanto a este tipo de aditivo:

- a. Conservar en un lugar seco los aditivos en polvo. En caso el envase esté defectuoso, inmediatamente cambiar a otro para no perder su capacidad de función.
- b. Al utilizar superplastificantes en líquido, se debe de agitar antes de su uso.
- c. Durante tiempos de invierno, es recomendable tener conocimiento del punto de congelación y almacenamiento del aditivo a usar.
- d. Cerciorarse la fecha de caducidad del producto superplastificante antes de ser utilizado.
- e. Seguir las órdenes para su empleabilidad, especialmente cuando se utilizan los productos.

El empleo de los superplastificantes consigue la notable mejora de la trabajabilidad de las masas plásticas sin variar la relación entre agua/cemento, obteniendo aumento de consistencia en la mezcla. El hormigón conserva la cohesión sin presentar cambios en la exudación y la segregación. Estas características resultan beneficiosas para los hormigones de armaduras y el bombeo hormigonado de los pavimentos. También, demuestran la rápida trabajabilidad sin necesidad de realizar vibraciones en la masa por una gran fluidez empleada (García et al., 2009).

Asimismo, los superplastificantes son productos químicos que consiguen el aumento de resistencia, considerando diversas aplicaciones como prefabricaciones, reparaciones para pavimentos, obras de acueductos y

hormigón de alta resistencia. Este permite disminuir la dosis del contenido de cemento, resultando de mayor interés la reducción del fraguado y la retracción del concreto.

Por consiguiente, son productos cruciales para el uso en los hormigones prefabricados y sistemas constructivos, los cuales —al haber un grupo de aditivos que ayudan a modificar las propiedades reológicas del concreto—son imprescindibles para realizar una selección adecuada del superplastificantes a emplear. Así que, antes de emplear un aditivo, se tiene que conocer las funciones y limitaciones que actúan en el hormigón, tanto para su beneficio como efectos secundarios en la mezcla.

CAPÍTULO VI

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES CON BASE DE POLICARBOXILATOS: ANÁLISIS DE CASO PARA EL MEJORAMIENTO DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL

El coliseo romano es una obra arquitectónica antigua, en la cual se utilizaron aditivos para la resistencia y la durabilidad del concreto al agregarle cal y puzolanas. Incluso, se utilizó sangre de animales que servía como plastificante, siendo de mayor trabajabilidad. En la actualidad, esta construcción es un lugar de interés para turistas que se exhibe como un anfiteatro de sitio.

Un aditivo se refiere a toda sustancia en estado líquido y polvo que se agrega a la mezcla en conjunto de los componentes del concreto, cuyo fin es mejorar o modificar ciertas características del material en estado fresco y endurecido. En este sentido, hay aditivos frecuentemente utilizados y estudiados para un fin específico como los plastificantes, los superplastificantes (reductor de agua alto rango), los incorporadores de aire, los retardantes y los aceleradores de fraguado, entre otros.

6.1. Una mirada evaluativa de la realidad

Debido al auge de la industria en la construcción, la fabricación del concreto para las edificaciones tiene una demanda alta a nivel global. Por ello, se crearon e innovaron diversos tipos de aditivos superplastificantes que conservarán la calidad y la mejoría de las características del concreto fresco y endurecido. El aditivo de la nueva generación, y estudiado en la presente investigación, es el superplastificante con base de polímeros y/o copolímeros de policarboxilatos, el cual se haya instaurado por la copolimerización de ácido carboxílico y olefinas. Este aditivo funciona como agente reductor de agua que modifica los

atributos mecánicos y reológicos de la pasta del cemento, ya que influye en el rendimiento de efecto dispersante de su mecanismo de acción.

El concreto está conformado por cemento, agregados finos y pesados, agua y aditivos de modo opcional en su uso; todos componen la matriz endurecedora de la mezcla preparada después de ser colocada y curada para su resistencia. La investigación está direccionada al concreto en su etapa primaria al producirse el transporte, la colocación y la transición del fraguado. Asimismo, posee una versatilidad adaptable de maneras diversas en condiciones normales. Sin embargo, presenta problemas al no aplicar un buen diseño de mezcla en climas diferentes. De igual manera, el clima es un factor que incide en la selección del concreto adecuado con respecto a la construcción en un clima cálido o templado.

En este caso, el objetivo general es estudiar las propiedades de los compuestos a emplear en las combinaciones, con adición de superplastificantes sobre la base de policarboxilatos. Su finalidad es incrementar el soporte a la compresión y optimizar los recursos, los costos y el tiempo de los proyectos. Además, se investiga los atributos físicos y mecánicos de los compuestos del concreto con adición de superplastificante como la influencia en la composición del material.

Luego, se define la metodología del caso. Corresponde a una investigación documental de fuentes bibliográficas y de tipo descriptivo, ya que extrae los datos por medio de la observación indirecta al utilizar resultados de las propiedades mecánicas.

La selección del objeto de estudio inicia con la delimitación de la población. Esta se compone de las bases normativas establecidas en cada uno de los países de investigaciones realizadas, por ejemplo, en la normativa china (GB 8076-2008), Concrete Admixtures (GB/T 17671-2005 Method of Testing Cements-Determination of Strength); la normativa americana (ASTM C230 / C230M-20 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement); la normativa india (IS 456: 2000); y la normativa rusa (SP 63.13330.2012). Consecuentemente, la muestra de estudio se compone de los

ensayos de asentamientos, compresión y flexión obtenidos de las referencias. Incluso, para determinar la dosis de superplastificante a estudiar, se determinó las consideraciones siguientes: la temperatura ambiental, la relación entre a/c , las edades del concreto, la dosis de aditivo y probetas para testigos del concreto según la normativa ASTM.

Según la Norma Técnica de Edificación E.60 (2009), se obtuvo una muestra de $n=435$ testigos por tipo de temperatura. En el caso de la relación en edades distintas, resultaron una muestra por dosis de superplastificantes policarboxilatos. Estas se constituyen por polímeros de carboxilatos que intervienen en las propiedades del concreto para la dosificación.

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Tabla 10

Muestra de diversas pruebas en el concreto

Prueba de asentamiento del concreto						
Muestra y patrones		Edades				
Muestra	Hormigón	3	7	14	21	28
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
Prueba de la temperatura del concreto						
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
Prueba de la forma y textura del concreto						
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Prueba de la trabajabilidad del concreto						
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
Prueba de tiempo de fraguado del concreto						
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
Prueba de la resistencia del concreto						
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
Prueba de la fluidez del concreto						
M1	Patrón	3	3	3	3	3
M2	Con 0.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M3	Con 1.0 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3
M4	Con 1.5 % de polímero de poli-carboxilatos.	3	3	3	3	3

Para la colección de datos se utilizaron las técnicas de pruebas y los ensayos establecidos por las investigaciones de referencias, pues contribuye a calcular las características mecánicas del concreto con base en diversas normas. Las esenciales técnicas se registran tales como la técnica estadística, la técnica de laboratorio, las técnicas de investigación de campo, las técnicas de análisis documental, entre otras. Asimismo, los instrumentos de recolección de datos han sido los formatos de laboratorio, equipos y herramientas manuales, auditorías, inspecciones, identificación de los trabajadores por especialidad. Asimismo, se emplearon normas vigentes nacionales e internacionales de la construcción, siendo válidas en el contenido.

Con respecto al procesamiento de datos, se utilizaron programas de IBM SPSS Statistics 25, Microsoft Office-Excel y reportes de *software*. Además, se aplicó tablas personalizadas, reportes de software, histogramas y líneas de tendencia de los datos.

6.2. Resultados de la investigación

Para el análisis del estudio se utilizaron los datos obtenidos en las técnicas de pruebas y ensayos de las investigaciones anteriores. Así, se incorporaron al programa SPSS para la elaboración de tablas estadísticas.

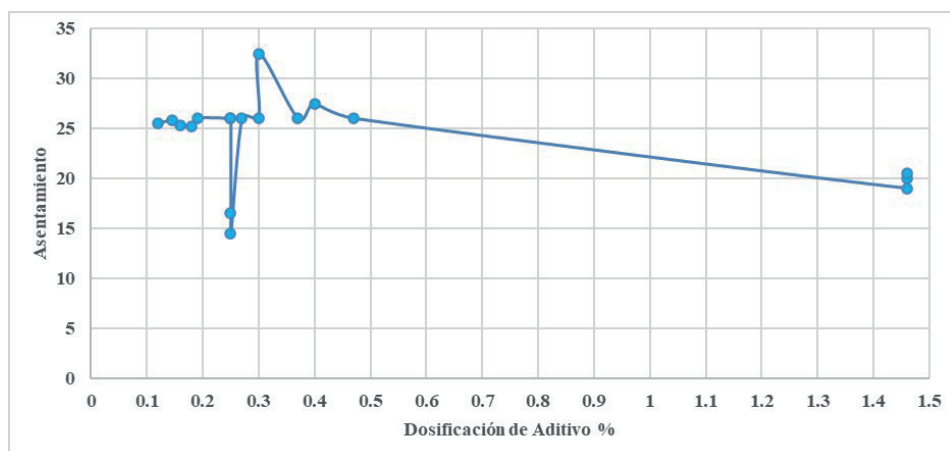
6.2.1. Superplastificantes con base de policarboxilatos en la resistencia a la compresión

a. Superplastificante con base de copolímeros sobre el asentamiento

De acuerdo con Liu y Wang (2015), el superplastificante de estructura molecular o múltiples brazos tenía un asentamiento de 32.50 centímetros a una dosis de 0.30 % en contraste con otro aditivo tradicional de 0.40 % y consiguió un *slump flow* de 27.5 centímetros. Ambos muestreos fueron ensayados en una relación entre a/c = 0.29. Esta información se visualiza en la Figura 6:

Figura 6

Indicador de asentamiento vs. la dosificación de superplastificante (%)



Como sostienen Iig y Plank (2016), el superplastificante sintético con injerto ATBS en su estructura de lignito consiguió un *slump flow* preliminar de 26.30 centímetros para el muestreo Lignito (ATBS-co-AA) con una relación molar aproximada de 1:0.15 y dosificación de 0.25 % en peso del cemento. En contraste, un aditivo convencional obtuvo 25.8 para la dosificación del 0.30 % en peso del material. De esta manera, se aplica en ambas muestras una relación entre a/c constante de 0.455. Por su parte, Chen (2012) presenta el superplastificante con base de copolímeros de policarboxilato P(AA-co-MA)/PEG. De este estudio, se consiguió un *slump flow* promedio máximo de 20.5 para una asociación a/c=0.50, con una dosificación de 1.46 % de aditivo por el peso del cemento, logrando una disminución de agua considerable. En este trabajo, también se aplicó incorporaciones de minerales y polvo de escoria de alto horno.

En este sentido, investigadores —como Jun y Jeong (2014)— estudiaron la síntesis de dos copolímeros de policarboxilatos cambiados con agregados de cadenas laterales y cortas. Entonces, toman como muestra el superplastificante sintetizado AP25, el cual registró una apropiada reacción que el concreto patrón sin aditivos, proporcionando un *slump flow* de 16.50 y una dosificación óptima del 0.25 % para una relación entre a/c=0.28. Sin embargo, afirman

que a pesar de que los aditivos sintetizados tienen varias cadenas laterales de agregados, no alcanzaron el aumento de fluidez en la combinación por su corta longitud.

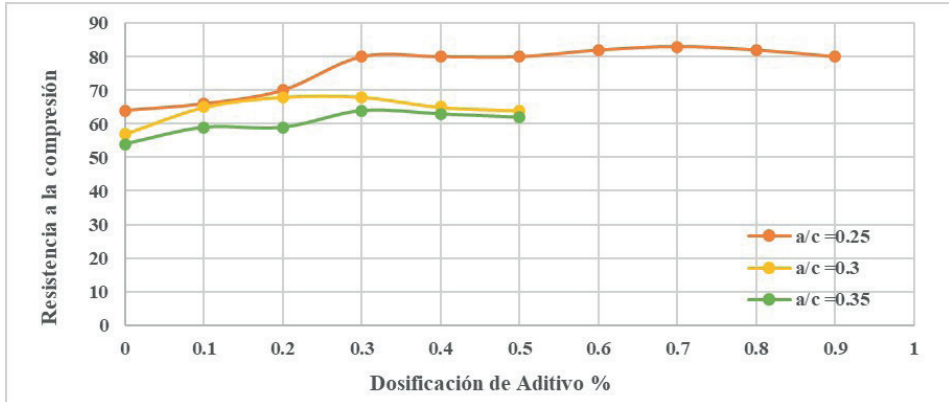
En el estudio de Huang y Yang (2018) se aplicaron ensayos con aditivos de tipo plastificante de hiperramificados a través del método de redox *in situ*. De esa manera, se consiguió un *slump flow* de 25.80 centímetros para una dosificación de 0.145 % de una relación $a/c=0.29$ por encima de la muestra base. Sin embargo, se solicitan cantidades elevadas de aditivos hiperramificados para lograr mayores beneficios que un aditivo tradicional.

- b. Relación entre a/c sobre la propiedad mecánica de resistencia a la compresión

Se usarán aditivos sobre la base de naftaleno y policarboxilatos durante la activación de suspensiones de cemento por medio del aparato pulsación RPA. Así, se usó el cemento Portland escoria CEM II/AS 32.5 como componente base adherente, con compuesto fino de una viscosidad aparente de 1.550 gr/cm³ y agregado pesado con una densidad aparente de 1.40 gr/cm³. Se aplicó superplastificante con base de naftaleno y policarboxilatos para incrementar el aguante y las capacidades mecánicas y/o físicas. Inclusive, se manejaron probetas de 10 x 10 x 10 cm iguales en las muestras para las pruebas de aguante a la compresión.

Figura 7

Propiedad de resistencia del concreto a 28 días en diferente relación entre a/c



En la Figura 7, se muestra el soporte máximo de 83 MPa para el vínculo entre $a/c=0.25$ con una dosificación de 0.80 % de aditivo superplastificante de tipo BA. Según Antoni et al. (2017), la porción ideal está sujeta al tipo de aditivo y la energía de compresión se disminuirá con la excesiva aplicación de superplastificante. El aditivo Z refuerza al aguarde del hormigón para un rápido fraguado, lo que evidencia la ventaja sobre otros aditivos. Por consiguiente, este tipo de superplastificante promueve el proceso de hidratación en tiempo temprano, reflejando las propiedades del policarboxilato de modo funcional.

El resultado del PCE-2 y los materiales suplementarios sobre el soporte a la compresión de la mezcla es en diferentes periodos. Debido a que el material secundario muestra partículas más pequeñas que el cemento, la organización de empaque de moléculas se vuelve más hermética. Además, estos materiales obtuvieron resultados positivos en la forma y/o movimiento y de menor adsorción de agua, mejorando la trabajabilidad de la mezcla, así como mostrando un efecto reductor de agua.

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Tabla 11

Tipos de aditivos con relación entre a/c y la resistencia a 28 días

Autores y títulos	Tipos de policarboxilato	Aditivo %	a/c	Resistencia MPa
Ibragimov y Fediuk (2019). Perfeccionando el aguate inicial del concreto: resultado de la mecanoquímica, la activación de la interrupción de cemento y el uso de varios superplastificantes	Remicrete SP60 sin activación P5	1	0.3	57.55
	Remicrete SP60 con activación P6	1	0.3	65.72
Erzengin et al. (2018). Las propiedades de los sistemas de cemento superplastificados con policarboxilatos sobre la base de éster metacrílico.	PC500-1-10	0.30	0.29	50
	PC500-1-15	0.30	0.29	50
	PC950-1-10	0.30	0.29	55
	PC950-1-15	0.30	0.29	60
Antoni y Kusuma (2017); O. C. y Hardjito, D. (2017). Mejoramiento de la dosis de superplastificante con base de policarboxilato en la amplia gama de cementos.	PMMA	0.30	0.29	45
	S.CC	0.60	0.25	79
	S.SV	0.50	0.25	79
	S.BA	0.50	0.25	83
	S.BS	0.50	0.25	75
	S.AS	0.50	0.25	70
	S.CC – 2	0.20	0.3	60
	S.SV – 2	0.50	0.3	74
	S.BA – 2	0.30	0.3	70
	S.BS – 2	0.50	0.3	70
	S.AS – 2	0.40	0.3	70

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Raymond et al. (2017). Perfeccionamiento del hormigón autocompactante de alto rendimiento.	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R1	1.00	0.27	56.34
	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R4	1.00	0.27	53.2
	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R2	1.00	0.29	42.93
	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R3	1.00	0.31	32.16
Raymond et al. (2017). Optimización del hormigón autocompactante de alto rendimiento.	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R1	1.00	0.27	56.34
	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R3	1.00	0.31	32.16
Raymond et al. (2017). Optimización del hormigón autocompactante de alto rendimiento.	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R1	1.00	0.27	56.34
	Humo de sílice (SD) + polvo de vidrio R3	1.00	0.31	32.16
Xiang et al. (2020). Síntesis de un nuevo policarboxilato a temperatura ambiente y su impacto en las características de las pastas de cemento con diversos compuestos cementantes suplementarios.	PCE-1	0.15	0.3	80
	PCE-2	0.15	0.3	85
	PCE-3	0.15	0.3	73

c. Relación entre a/c con plastificantes con base de copolímeros

Ibragimov y Fediuk (2019) contrastaron que el superplastificante Remicrete SP60 en las muestras por composición 5 y 6 manifiesta una resistencia a la compresión de 57.55 MPa y 65. 72 MPa en 28 días en ensayos de dosificación de 1 %. Asimismo, la relación entre a/c era =0.30 para estos ensayos, siendo elevado en el ensayo 1 que registró un aguante a la compresión de 40.53 MPa en 28 días de ensayo y la relación de 0.42 de a/c. Ello se visualiza en la Tabla 12:

Tabla 12

Propiedades físicas y mecánicas de resistencia a la compresión del concreto

Número de composición	a/c	Densidad de mezcla kg/ m ³	Contenido de aire %	Temperatura °C	Resistencia a la compresión del concreto en MPA		
					1d	2d	3d
1	0.42	2389	1.05	21.60	7.10	19.57	40.53
2	0.42	2424	0.94	22.70	13.76	29.01	46.15
3	0.31	2472	0.88	22.30	12.81	32.42	51.7
4	0.31	2485	0.64	23.10	22.53	46.38	62.81
5	0.30	2476	0.69	22.00	12.32	31.89	57.55
6	0.30	2472	0.70	23.50	19.62	45.01	65.72

6.2.2. Relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas del concreto

a. Temperatura extrema en el asentamiento a periodo largo

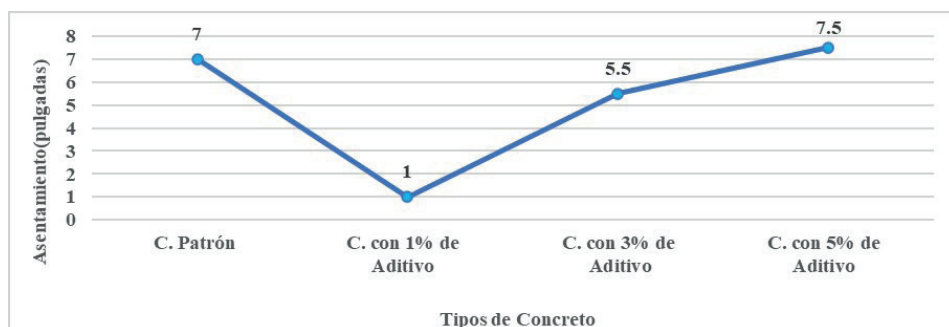
Según Manrique (2019), en clima cálido, a pesar de no haber regulado ningún tipo de aditivo, la combinación del patrón conserva un *slump* $\geq$ a 5 pulgadas (127 milímetros) en un tiempo de 80 minutos reconocido como diseño patrón. En los 40 minutos después de la preparación de la mezcla, el

asentamiento de 9.01 pulgadas (230 milímetros) se disminuyó en el 47.8 %, cuyo fin era elaborar un concreto manejable por mayor tiempo. Para ello, se incorporó un aditivo reductor de agua con retardante a lo largo de la regulación de los compuestos de D1037 (0.85) y WR-75 (0.25). Posterior a calcular el asentamiento de la mezcla, se consiguieron indicadores a 80 y 90 minutos respectivamente, presentando una caída de *slump* a razón de 1.07 pulgadas (27 milímetros) cada 20 minutos. Este modelo, entonces, logró un bajón de asentamiento nulo en un periodo de 160 minutos después de su proceso.

En el clima frío, el superplastificante con aditivo retardante brinda cifras de mantención muy óptimas. No obstante, una vez puesto el concreto, su fraguado queda por debajo del superplastificante 3330, siendo usado. Sin embargo, el diseño patrón de 3 horas se utiliza en una dosificación de 2.80 litros; el diseño propuesto de 2 horas, 3.0 litros. Así, significa una adición de 0.20 litros más al m³ de mezcla de hormigón.

Figura 8

Asentamiento del concreto vs. el porcentaje de aditivo



En la Figura 8, se aprecia el número del *slump* incrementado cuando se adiciona el porcentaje de aditivo utilizado. Ello por la liberación de agua atrapada en los flóculos del cemento, generando una mezcla más fluida. El *slump* del concreto patrón es de 17.8 cm por el mayor uso de agua.

Asimismo, el establecimiento del concreto de escoria disminuyó un aproximado de 8 milímetros para un reemplazo del 30 % del cemento por escoria de Al. Así, resulta ser insignificante, cuyo hormigón elaborado con un 20 % de sustitución de escoria de Al otorgó un mejor soporte y manejabilidad aceptable en ambientes cálidos. Con la adición de escoria de Al como aditivo retardante, hubo una sutil disminución en la manejabilidad por la filtración del agua sobre la elevada zona de la escoria.

Una mezcla de 20 % de escoria de Al presentó un retraso de 30 minutos en el tiempo de fraguado inicial, realizado mediante pruebas del penetrómetro. Sin embargo, el tiempo de fraguado final de Al alcanzó 20 % en 720 minutos. Así, el 30 % de sustitución de escoria obtuvo un mejor índice de disminución del aguante de la flexión, pues hubo ausencia de uniformidad en la organización de los aditivos de hidratación en disposiciones del clima cálido.

b. Aditivos en tiempo de fraguado

Llamo y Rodríguez (2018) diseñaron una combinación modelo con un tiempo de fraguado inicial de 4 1/8 horas y un fraguado final de 6.33 horas. A diferencia del aditivo SIKA TM-140, incrementado con un fraguado inicial de 18 horas y uno final de 20.55 horas. En este sentido, en clima frío, según Sotomayor (2019), se demuestra que en el fraguado anterior hay una divergencia con la base del cemento de alto aguante, el cual consigue el fraguado inicial 5 minutos antes. Es decir, es un 3 % más veloz que el concreto con base de cemento en grado corriente.

Para el fraguado final la diferencia es visible; el concreto de alta resistencia alcanza más de una hora de anticipación en relación con el material sobre la base de cemento convencional. Por consiguiente, en una temperatura fría, el aditivo SIKA TM-40 tiene una reducción rápida de manejabilidad de 2 3/4 pulgadas durante 60 minutos de tiempo prolongado. De esa manera, se disminuye la capacidad de agua en contraste con el aditivo superplastificante 3330, el cual posibilita sostener un estado fluido al concreto durante 4 horas.

Tabla 13

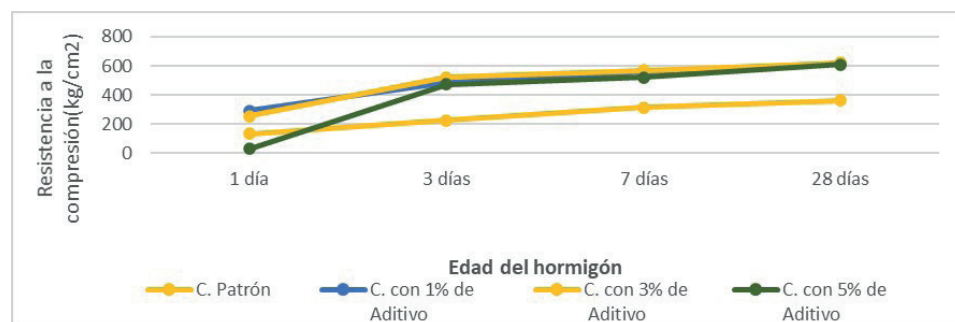
Asentamiento del concreto fresco en clima frío

Autor	Tipo de aditivo	°C	Tiempo de colocación												Re-lación a/c
			0	15	20	30	60	90	120	150	180	210	240		
Sánchez, B.	Patrón 1	13.8	8			7	7	6	6	5	5	4	3	0.44	
			3/4			1/2		1/2		1/2			1/2		
	Superplastifi-cante 3330	14.6	8			8	8	7	7	6	5	4	3	0.4	
			3/4			1/2		1/2		1/2	3/4	1/2	3/4		
	Superplastifi-cante SC	13.6	10			9	9	8	8	8	7	6	5	0.43	
						1/2		1/2	1/4			1/2	3/4		
Colque-Huanca, D	Patrón 2	18.3		8			7		6		4				
				1/4			1/2								
	Aditivo plas-tificante	18.9		8			6		4		1				
				1/4			1/2		1/2		1/4				
	Aditivo su-perplastifi-cante	17.3		4		7	6		2		1/4				
				1/4		1/4			1/2						
Muñoz, R. y Velasco, E.	Aditivo SIKA TM-40	17	6		4		2	1						0.7	
			1/2				3/4								

En la Tabla 13, se observa que los números de compresión de los hormigones con aditivo son elevados al material patrón. Inclusive, los resultados a los 28 días son semejantes con la consideración que la alta cifra se encuentra en el hormigón con el 3 % de aditivo.

Figura 9

Resistencia a la compresión vs. la edad del concreto



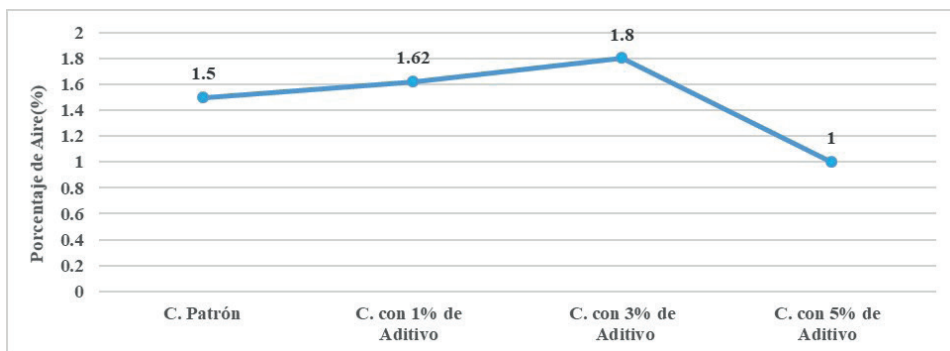
Es fundamental estudiar los tres primeros días, tal como se muestra en la Figura 9, ya que al agregar el 5 % de aditivo ocasiona demoras en las ventajas de soporte del concreto, por ello, es muy notorio el ensayo del primer día mediante el fraguado.

c. Aire y la adición de aditivos

Se estima que cuanto mayor capacidad de aditivo tenga la mezcla, se vuelve más fluida y la cantidad de aire disminuye. Los efectos a los 28 días se consiguieron al agregar el aditivo en dosis menores al 3 %, siendo óptimo la incorporación del 1 %. Además, añadir más del 5 % sería arriesgado para los costos económicos y técnicos del material.

Figura 10

Porcentaje de aire vs. la adición de aditivos



El *slump* con 5 % de aditivo fue de 7.5; con 3 %, de 5.5; y con 1 %, de 1. Así, demuestra la eficacia y la susceptibilidad del aditivo frente al agua. Las muestras con aditivo adquieren rápidas resistencias en edad temprana. Por ejemplo, a los 3 días consigue 492.33 kg/cm² en promedio (confirma la reactividad de la nanosílice); a los 7 días, 549.66 kg/cm² y a los 28 días, 615 kg/cm² en promedio. Entonces, a los 3 días se obtiene un aproximado de 80 % de la resistencia, a los 7 días, el 89 % de la resistencia. Asimismo, como se presume, la nanosílice responde básicamente con los aditivos de la hidratación del cemento, después de los 28 días continuará consiguiendo mayores resistencias como se muestran en las indagaciones de la Tabla 14:

Tabla 14

Tiempo de fraguado con % de aditivo en clima frío

Autor	% de aditivo	°C	Asentamiento pulgadas	Fraguado inicial	Fraguado final
Beas et al.	Patrón 1	16	1	4.8	6.5
	Nanosílice (1 %)	—	—	5.6	9.4
	Nanosílice (3 %)	—	5.5	11.8	14
	Nanosílice (5 %)	—	7.5	14	18
Hernán et al.	Patrón 2	12	3.19	—	—
	Sup Sika 290n (0.7 %)	—	5.05	—	—
	Sup Sika 290n (1.05 %)	—	6.07	—	—
	Sup Sika 290n (1.4 %)	—	7.16	—	—
	Hormigón H20/C/1	19.2	6.5	3.15	5.5
Sotomayor	Hormigón H20/R/1	19.6	7.5	3.1	4.45

Durante el clima cálido, tanto el traslado y la instalación del concreto deben completarse, ya que los retrasos contribuyen a la pérdida. De acuerdo con la norma ACI 211.1, un hormigón de duración fluida dispone un *slump* $\geq$ **5 pulgadas (125 milímetros)**, mientras que una combinación manejable, un *slump* mínimo de 4 pulgadas (100 milímetros). En Manrique (2019), al no dosificarse ningún aditivo, la mezcla patrón mantuvo un *slump* $\geq$ 5 pulgadas, ideal para su traslado en elevadas temperaturas mediante 1 hora 20 minutos. También, este hormigón patrón mostró una disminución de establecimiento a razón de 0.96 pulgadas (24 milímetros) cada 20 minutos. De este modo, obtuvo un *slump* de 0 pulgadas durante 3 horas 20 minutos luego de su manejo. El resultado identificó que la combinación con el superplastificante de alto rango D1037 (0.85) obtuvo una reducción

de asentamiento de 1.01 pulgadas (25 milímetros) cada 20 minutos al obtener cifras menores a 40 y 50 minutos, respectivamente. Ello solo representa el 44 % y el 55 % del transcurso total del conservado de la fluidez de la combinación.

Con la intención de elaborar un hormigón trabajable por más tiempo, se usaron la porción de aditivo 1037 (0.85) y WR-75(0.25). Así, luego de calcular el establecimiento de la combinación durante el tiempo, se establecieron variables iguales a 1 hora 20 minutos y 1 hora 30 minutos respectivamente. De esa manera, se presenta una caída de *slump* a razón de 1.07 pulgadas (27 milímetros) cada 20 minutos. Esta organización obtuvo un quiebre de 0 en un lapso de 2 horas 40 minutos después de su manejo. En el patrón 1, la reducción de asentamiento durante 4 horas fue 5 1/4 pulgadas, mientras que al agregar el aditivo 3330 con una dosis de 0.806 %, 5 pulgadas. Finalmente, al añadir un superplastificante SC con una dosis de 0.66 % durante 4 horas era de 4 1/4 pulgadas.

Llamo y Rodríguez (2018) observaron que, con la incorporación del aditivo Sikament TM-140 al 2 %, el tiempo de fraguado es mayor; mientras que el patrón 2 posee un tiempo de fraguado principal de 4.75 horas y un tiempo final de 6.33 horas. Ello a diferencia de otro diseño con aditivo Sikament TM-140, el cual aumenta con un tiempo de fraguado inicial de 18 horas y un tiempo final de 20.55 horas. En el diseño de Aponte (2017), se mostraron que los tiempos de fraguado del patrón 4 es de 3 horas, y el final, de 3.6 horas. En tanto, el hormigón con aditivo Z Retar, de 4.10 horas, y el fraguado final, de 4.2 horas. De este modo, la ejecución de este aditivo al hormigón aumenta la duración de fraguado inicial y final.

Por su parte, Beas et al. (2015) sostienen que el hormigón que se retrasa en fraguar es el que tiene 5 % de aditivo (nanosílice) con un aproximado de 18 horas. Es decir, a mayor cantidad de aditivos, los tiempos de fraguado inicial y final aumentan. Estos incrementan en los concretos a medida que se expanden el número de aditivos. En el caso del 1 %, el fraguado inicial es 48 minutos más que el diseño de patrón y, en el caso de 5 %, más de 9 horas para fabricarse el fraguado inicial. Sotomayor (2019) analiza que para el fraguado inicial hay una sutil desigualdad. Con base de cemento nivel de gran soporte (H20/r/1), se

obtiene el fraguado anterior 5 minutos antes, siendo un 3 % más veloz que un cemento convencional (H20/C/1). Para el fraguado final, la diferencia es obvia; el concreto con cemento nivel elevado de soporte (H20/r/) adquiere la capacidad más de una hora de anticipación con base de cemento convencional (H20/C/1).

6.2.3. Temperatura extrema y la consistencia durante el tiempo de fraguado

a. Asentamiento en temperatura baja

Autores, como Liu et al. (2011), observaron que en el empleo de aditivos incorporador de aire (alfa-olefina sulfonato, permillaje para cemento) y reductor de agua (sulfonato de naftaleno) se identificó un fijamiento promedio de 110 milímetros. Tal como se aprecia en la Tabla 15, hay una consistencia húmeda del hormigón utilizado en elementos estructurales y/o reforzados

Tabla 15

Contraste de asentamiento de concreto con aditivo en temperatura media -18 °C a -20 °C

Autor	Intervalo de temperatura	Tipos de aditivos y adiciones	Curado	a/c	Slump (mm)
Ismail y Hassan (2019)	-18 °C	Reductor de agua de alto nivel sobre la base de policarboxilato (HRWRA).	50 ciclos de congelación y descongelación	0.40.8	700 ± 50 120 ± 30
Tavasoli et al. (2018)	+5 °C a -17.8 °C	Escoria de alto horno granulada molida (GGBS) de la industria de fundición de hierro de Isfahan.	4 ciclos de congelación por día	0.44	680 720 810 690 760 710 680 690
		Humo de sílice (SF) de la industria de la sílice de Azna Feru.			
		Superplastificante tipo III con base de ácido policarboxílico.			
		Polvo de cal (LP).			
Liu et al. (2015)	-20 °C	Incorporador de aire (alfa-olefina sulfonato, permillaje para cemento).	250 ciclos de congelación y descongelación	0.45	130
		Reductor de agua (sulfonato de naftaleno).		100 110 100 100 110 100 120 100	
		Agregado reciclado RCA con partículas con diámetros de 4.75 mm. a 26.5 mm.			

b. Asentamiento en temperatura media

Analizar los aditivos a temperatura ambiente y, posterior a ello, comprobar que el asentamiento del concreto necesita productos posteriores de otros ensayos. Según Svintsov et al. (2020), en temperatura media usando superplastificante SNF, aunado al incorporador de aire WSR y el aditivo anticongelante, se consiguió un establecimiento promedio de 40 milímetros y una composición semiseca. Por ejemplo, para pavimentos, fundaciones en concreto simple y losas con poco reforzamiento. De acuerdo con Rizzuto et al. (2020), en temperatura media utilizando aditivo autopolimerizable PEG 400 se adquiere un establecimiento de 155 milímetros y una duración fluida, tal como se visualiza en la Tabla 16. Ello es adecuado para compuestos internos muy fortalecidos o los que necesitan de una estructura de instalación por medio de bombeo.

Tabla 16

Contraste de asentamiento con aditivo en temperatura media de 20 °C +- 1 °C

Autor	Tipo de aditivos y adiciones	Proporción de aditivo en %					a/c	Muestra	Slump (Mm)
		SNF	WRS	Nano 3	Sio2	Peg 400			
Svintsov et al. (2020)	Sulfonato de naftaleno formaldehído (SNF).	0.40	0.05	4	0.10		0.65	M 1 - C	60
	Resina saponificada de madera (WSR): un aditivo incorporador de aire.	0.40	0.05	4	0.10		0.56	M 2 -C	60
	Aditivo anticongelante de nitrato de sodio (Nano3). Nanosilica (Sio2).	0.40	0.05	4	0.10		0.50	M 3- C	60
Rizzuto et al. (2020)	Aditivo autopoli-merizable Peg 400.						0.40	Nc/25c/5c	130
								Nc/25c/20c	155
						1.50		Sc/25c/5c	140
						1.50		Sc/25c/20c	165

c. Asentamiento en temperatura alta

Analizar los aditivos a temperatura alta y, posterior a ello, verificar el fijamiento del concreto, el cual requiere de posteriores ensayos estudiados. Los resultados de la Tabla 17, el uso de humo de sílice (HS), cenizas volantes (CV), polímero superabsorbente (SAP) y superplastificante de policarboxilato (SP) durante las temperaturas cálidas consiguen asentamiento en el rango de 200 a 205 milímetros De modo similar, utilizando aditivo de humo de sílice (HS*),

además de superplastificante (SP**) y fibras de polietileno (PE), se logran un rango de 160 a 180 milímetros. En ambos se identificó sus resultados con la correspondencia de una combinación de duración muy ligera (Liu y Wang, 2015; Chen et al., 2019).

Tabla 17

Contraste de ensayos en concreto endurecido a 28 días con aditivo a 20 °C - 25 °C

Autor	Intervalo de temperatura	Tipo de aditivo y adiciones	Curado	a/c	Slump (mm)
Liu et al. (2015)	20 ± 1 °C	Humo de sílice y cenizas volantes.	Cámara con una temperatura de 20 ± 2 °C	0.18	202.5
				0.22	205
		Polímero superabsorbente (SAP).		0.22	200
Chen et al. (2019)	25 ± 0.5 °C	Superplastificante de	Cámara con una temperatura de 25 ± 0.5 °C y una humedad de 50 ± 1 %	0.2	160 a 180
		policarboxilatos (SP).			
		Humo de sílice.			
Jinchuan et al. (2017)	20 ± 1 °C	Superplastificante (SP).	Cámara de curado con 20 ± 2 °C y 60 % ± 5 % de HR	0.17	200 a 220
				0.20	
				0.17	
				0.22	
				0.17	

d. Resistencia en temperatura baja

Analizar los aditivos a temperatura baja y, posterior a ello, examinar el aguante a la compresión, los cuales necesitan de ensayos de otros estudios. Los resultados obtenidos de Gomathi y Sivakumar (2015) en las muestras, como 40BT-S/HWC, 50BT-S/HWC, 40BT-S/SC, 40BT-CB/HWC incorporados en adición de SNF, WSR y aditivo incorporador de aire, aditivo anticongelante de nitrato de sodio (NaNO_3) y nanosilica, lograron un aumento de soporte en 20.49 %, 12.84 %, 8.47 % y 9.29 % con respecto a los datos del ACI. En tanto que para Svintsov et al. (2020) solo subió de resistencia en 10.73 % en relación con la muestra M1 y la suma del agregado de ceniza volante-bentonita y superplastificante. Ambos en una temperatura de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Según Liu y Wang (2015), sus muestras CC-CG-N, RC-MC-N, RC-MC-E, RC-MC-T y RC-HC-N consiguieron el incremento de aguante en porcentajes de 15.18 %, 1.98 %, 8.58 %, 9.9 % y 6.6 % con respecto a la inserción del reductor de agua (sulfonato de naftaleno) y el incorporador de aire (alfa olefina sulfonato). Ambas tienen una temperatura de $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 18

Contraste de ensayo en concreto endurecido a los 28 días con aditivo a $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Autores	Tipo de aditivo y adiciones	a/c	Muestra	Rc (Mpa)	ACI (Mpa)	Rt (Mpa)	Rf (Mpa)
Svintsov et al. (2020)	Sulfonato de naftaleno formaldehído (SNF).	0.65	M1	19.6	17.7	—	—
	Aditivo anticongelante de nitrato de sodio (NaNO3). Nanosilica.	0.56	M 2	19.6	23.4	—	—
	Resina saponificada de madera (WSR): un aditivo incorporador de aire.	0.5	M 3	19.6	27.2	—	—

ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES COMO REGULADORES DEL HORMIGÓN

Goma- thi y Sivaku- mar (2015)	Agregado de ceniza volan- te-bento- nita.	0.35	62BT-CB/ HWC	16.0	36.6	1.8	3.30
		0.35	50BT-CB/ HWC	19.4	36.6	2.1	2.26
		0.35	62BT-CB/ SC	20.8	36.6	1.9	2.65
		0.35	62BT-S/ SC	23.1	36.6	2.1	4.07
	Superplas- tificante (SP).	0.35	40BT-CB/ HWC	24.2	36.6	3.1	2.76
		0.35	62BT-CB/ SC	25.1	36.6	2.2	2.94
		0.35	50BT-S/ SC	27.9	36.6	2.5	4.30
		0.35	40BT-CB/ SC	35.8	36.6	3.2	3.58
		0.35	40BT-CB/ HWC	40.0	36.6	2.0	3.13
		0.35	40BT-S/ SC	39.7	36.6	3.6	4.36
		0.35	50BT-S/ HWC	41.3	36.6	2.4	3.31
		0.35	40BT-S/ HWC	44.1	36.6	3.5	3.36

e. Resistencia en temperatura media

Analizar los aditivos para el hormigón a temperatura media, así como comprobar el aguate a la compresión, necesitan de los resultados comprobables de otros estudios posteriores. Los efectos conseguidos de las muestras de Rizzuto (2020) demuestran lo siguiente: el concreto convencional autopolimerizable SC/25 C y el convencional normal NC/25 C emplean el aditivo de PEG 400, consiguiendo un incremento de aguate a la compresión en 28.28 % y 18.08 % establecidos por el ACI. En tanto, autores como Svintsov

et al. (2020) muestran una reducción de resistencia de M3-C en 29.4 % (19.2 MPa.) y M2-C (18.5 MPa.) en 20.9 %.

Tabla 19

Contraste de asentamiento con aditivos en temperatura media (20 °C a 25 °C)

Autores	Tipo de aditivo y adiciones	Relación a/c	Muestra	Rc (Mpa)	ACI (Mpa)	Rt (Mpa)
Svintsov et al. (2020)	Sulfonato de naftaleno formaldehído (SNF).	0.65	M 1 - C	18.1	—	—
	Resina saponificada de madera (WSR): un aditivo incorporador de aire.	0.56	M 2 -C	18.5	—	—
	Aditivo anticongelante de nitrato de sodio (NaNO ₃). Nanosilica.	0.5	M 3- C	19.2	—	—
Rizzuto et al. (2020)	Aditivo autopolimerizable PEG 400.	0.4	NC/25C	40.5	—	5.4
		0.4	SC/25C	44.0	10.8	5.6

En la Tabla 19, se muestran los datos del ACI relación agua/cemento por resistencia, en el cual se usa el aditivo SNF, el WSR, el aditivo incorporador de aire aunado al aditivo anticongelante de NaNO₃ y la nanosilica.

f. Resistencia en temperatura alta

Analizar los aditivos superplastificantes en el hormigón a ambientes elevados de calor y, posterior a ello, examinar la propiedad de aguante a la compresión; para lo cual se requieren los impactos verídicos de ensayos de otras indagaciones. Según el ensayo de Jinchuan et al. (2017), se utiliza superplastificante con adición de escoria granulada de alto horno en

temperaturas elevadas, cuyo resultado optimiza el aguanete del hormigón en relación con otros superplastificantes empleados en los ensayos.

6.2.4. Agregados con superplastificante de policarboxilatos en la propiedad de resistencia a la compresión

a. Tamaño en el asentamiento del concreto

En el estudio de Nowak (2015) se usó en su material un compuesto natural de TMN de 1/2 pulgadas con la incorporación de aditivo superplastificante de 0.5 %, el cual obtuvo un asentamiento de 210 milímetros. Por su parte, Lajan et al. (2019) de un material natural de dimensión máximo nominal de 3/4 pulgadas con la incorporación de 0.25 %, obtuvo un asentamiento de 145 milímetros, siendo menor en su asentamiento de fraguado.

En el estudio de Özen et al. (2021) se manejó un hormigón agregado de dimensión máximo nominal de 3/8 de pulgadas con la incorporación de 1.90 %, cuyo resultado propició un asentamiento mayor a 200 milímetros. En este sentido, en el estudio de Jain et al. (2019) se valió de un agregado natural de TMN de 3/8 pulgadas con la adición de 1.35 %, resultando un asentamiento de 200 milímetros. En estos artículos se observa que cuando más hay una reducción en la dimensión máximo nominal del agregado, se consigue un mayor fijamiento, siendo el más bajo de 145 milímetros con una medida máximo nominal de 3/4 pulgadas según Lajan et al. (2019), y los máximos de 200 milímetros en los estudios de Özen et al. (2021), con un TMN de 3/8 pulgadas (Jain et al., 2019).

Tabla 20

Tamaño máximo nominal y asentamiento con aditivo sobre la base de policarboxilato

Autores	N.º	TMN (")	Superplasti- ficante	Aditivo (%)	Asenta- miento (mm)	Consis- tencia
Nowak (2015)	2	1/2		0.2	70	Plástica
			SP	0.35	170	Fluida
				0.50	210	Fluida
Lajan et al. (2019)	3	3/4	Patrón	0.00	125	Fluida
			Solid Poly- carboxylate Powder	0.15	130	Fluida
				0.20	140	Fluida
				0.25	145	Fluida
Gókhán et al. (2021)	7	3/8	PCE - 1000	1.90	>200	Fluida
			PCE - 2400	1.40	>200	Fluida
			PCE - 3000	2.26	>200	Fluida
Jain et al. (2019)	27	3/8	SP	1.35	>200	Fluida

b. Tamaño en la resistencia a la compresión

Lajan et al. (2019) utilizaron agregado natural de TMN de 3/4 pulgadas con la adición de 0.25, obteniendo un aguante a la compresión de 48 MPa, siendo la más mínima. En Özen et al. (2021), emplearon un hormigón agregado de TMN de 3/8 pulgadas con la incorporación de 1.90 % de aditivo, resultando un soporte a la presión de 66 MPa, siendo la más alta en su resistencia. Según Jain et al. (2019), aplicaron un agregado natural de TMN de 3/8 pulgadas con el aditamento de 1.35 %, por el cual consiguió un soporte de 52 MPa. De los estudios analizados, se determina que conforme se reduce el TMN del agregado, se adquiere una resistencia mayor. En este sentido, el aguante más bajo lo registró Lajan et al. (2019) al utilizar un material de TMN de 3/4 pulgadas con un aditamento de 0.25 %. Por otra parte, su resistencia era de 48 MPa, y la mayor, de 66 MPa con un TMN de 3/8 pulgadas y la adición de 1.90 % en el estudio de Özen et al. (2021).

Tabla 21

Tamaño máximo nominal y resistencia a la compresión con aditivo policarboxilato

Artículo	N.º	TMN (pulg)	Nombre de superplastifi- cante	% de aditivo	Resistencia a la compresión (MPa)		
					7	14	28
Lajan et al. (2019)	3	3/4	Patrón	0.00	26.00	—	34.00
			Solid Polycarboxylate Powder	0.15	37.00	—	44.00
				0.20	39.00	—	46.00
				0.25	45.00	—	48.00
Gókhán et al. (2021)	7	3/8	PCE - 1000	1.90	57.00	—	66.00
			PCE - 2400	1.40	56.00	—	65.00
			PCE - 3000	2.26	55.00	—	62.00
Esen y Orhan (2015)	19	3/8	—	1.30	48.87	54.22	60.19
				1.50	48.25	49.65	54.15
				1.70	48.23	53.98	57.47
Jain et al. (2019)	27	3/8	SP	1.35	38.67		52

c. Agregados ligeros y pesados en el asentamiento

Lajan et al. (2019) utilizaron en su estudio un hormigón con agregado grueso y fino natural de vínculo agregado fino/grueso de un 1.04 % y adición de aditivo de un 0.25 %, consiguiendo un asentamiento de 145 milímetros. Por otra parte, Jain et al. (2019) emplearon un concreto similar, pero la relación agregado fino/grueso fue de un 1.06 % aunado a 1.35 %, obteniendo un fijamiento mayor a 200 milímetros. En este sentido, en estos estudios se demostró que mientras aumenta la relación agregado fino/grueso y los policarboxilatos, se incrementa la trabajabilidad del concreto. Por otra parte, Lajan et al. (2019) consiguieron el asentamiento inferior de 145 milímetros al utilizar el agregado fino/grueso de 1.04 con adición de 0.25 % de aditivo, en contraste con estudio de Jain et al. (2019), obteniendo un asentamiento superior a 200 milímetros del agregado fino/grueso de 1.06 y el 1.35 % de aditivo superplastificante.

Tabla 22

Relación entre agregado fino/grueso y asentamiento con aditivo policarboxilato

Artículos	TMN (plg)	Fino (kg)	Grueso (kg)	Agregado fino/agregado grueso	Nombre del superplastificante	% de aditivo	Asentamiento (Mm)
Lajan et al. (2019)	3/4	952.80	912.54	1.04	Patrón	0.00	125
		962.10	921.10	1.04	Solid	0.15	130
		969.00	927.60	1.04	Polycarboxylate	0.20	140
		976.00	934.00	1.04	Powder	0.25	145
Jain et al. (2019)	3/8	845.26	796.54	1.06	Sp	1.35	>200

d. Adición de policarboxilatos en la resistencia a la compresión

Investigaciones posteriores usaron diferentes marcas de superplastificantes de policarboxilatos de acuerdo con la nacionalidad de cada estudio. Jonbi et al. (2018) incorporaron un superplastificante de 2 %, obteniendo un mayor soporte a la compresión de 53.84 MPa. Respecto a Nowak (2015), al agregar un 0.5 % de superplastificante, consiguió mayor resistencia de 59 MPa. Lajan et al. (2019), con el aditamento de superplastificante de 0.25 %, alcanzaron la mayor resistencia de 48 MPa. Por último, según Özen et al. (2021), al incorporar un 1.90 % de superplastificante, la muestra obtuvo una mayor resistencia en el concreto de 66 MPa, pero al agregar un 2.26 % de aditivo se registró un aguante de 62 MPa. Así, se redujo su propiedad a 6.1 %. De esta manera, a partir de los estudios analizados, se demuestra que cuando aumenta el porcentaje del aditivo, también la resistencia se incrementa.

Tabla 23

Porcentaje de aditivo policarboxilato y la resistencia a la compresión de 28 días

Artículo	a/c	Nombre de superplastificante	Dosis de aditivo (%)	Resistencia a la compresión (MPa)		
				7	14	28
Jonbi et al. (2018)	0.40	Patrón	0.00	30.00	38.00	42.47
		PCE	0.50	35.00	43.00	47.05
			1.00	37.00	47.87	49.81
			2.00	40.00	50.81	53.84
Nowak (2015)	0.46	Patrón	0.00	—	—	51.70
		PCE	0.20	—	—	58.60
			0.35	—	—	59.00
			0.50	—	—	59.00
Lajan et al. (2019)	0.60	Patrón	0.00	26.00	—	34.00
	0.57	Solid Polycarboxylate Powder	0.15	37.00	—	44.00
	0.50		0.20	39.00	—	46.00
	0.48		0.25	45.00	—	48.00
Gókhan et al. (2021)	0.35	PCE - 1000	1.90	57.00	—	66.00
		PCE - 2400	1.40	56.00	—	65.00
		PCE - 3000	2.26	55.00	—	62.00

e. Relación entre a/c en la durabilidad del concreto

Jonbi et al. (2018) usaron un superplastificante de policarboxilatos con una proporción de un 2.00 %, el cual logró una relación agua/cemento de 0.40 y un soporte de 53.84 MPa. En Nowak (2015), al utilizar el mismo aditivo con una proporción de 0.50 %, alcanzó una relación a/c de 0.46 y una resistencia de 59.00 MPa. Respecto a Özgen et al. (2021), un aditivo con una proporción de 1.90 % obtuvo una relación de 0.35 y una resistencia de 66.00 MPa.

Asimismo, Esat y Buğra (2015) emplearon un superplastificante de policarboxilatos con una dimensión de 1.30 %, donde logró una relación entre a/c de 0.42 y una resistencia de 60.19 MPa. En Jain et al. (2019), con una dimensión de 1.35 %, se consiguió una relación a/c de 0.37 y una resistencia de 52.00 MPa. De todos los artículos analizados, en Nowak (2015) se alcanzó una mayor relación a/c de 0.46 con adición de 0.5 % de superplastificante, y en Özen et al. (2021) una menor relación a/c de 0.35 con el aditamento de 1.90 % de aditivo sintetizado por su peso de cadena lateral de 1000 g/mol. De esta manera, consiguió que el concreto sea más durable por las bajas relaciones de a/c y reducible en su volumen de sus poros capilares (Rivva, 2014).

6.3. Discusión

En este acápite se discutieron los resultados alcanzados en el trabajo realizado por documentos y posteriores investigaciones, donde establecen indicadores de conocimiento sobre los aditivos superplastificantes con respecto a su resistencia de compresión, a la relación entre temperatura y propiedades, temperatura extrema y sus agregados de superplastificantes policarboxilatos en la resistencia.

6.3.1. Superplastificantes con base de policarboxilatos en la resistencia a la compresión

De acuerdo con los resultados de autores como Liu et al. (2011), Zhang et al. (2016), Winnefeld et al. (2007) y Benaicha et al. (2019), se sostiene que el superplastificante con base de copolímero fortalece y optimiza los atributos del concreto a una alto soporte. Los aditivos plastificante PCE tienen un *slump flow* con promedio de 30 centímetros y un nivel entre 0.20 % a 0.26 % de dosificación. Para el soporte a la compresión, se consiguieron resultados de hasta 73.50 MPa y una relación a/c de 0.45. Según los resultados del asentamiento, autores como Liu et al. (2011) y Zhang et al. (2016) hallaron la manejabilidad óptima del superplastificante sobre la base de copolímeros, mejorando el establecimiento en el concreto de alto aguante y con un asentamiento promedio de 21.5 centímetros al utilizar un superplastificante

de copolímero anfótero de estructura peine, en un rango entre 0.30 % a 40 % de manejabilidad.

Zhang et al. (2016) consiguen un asentamiento promedio de 30 centímetros, usando un superplastificante PCE en un nivel de 0.20 % a 0.26 % de dosificación. Winnefeld et al. (2007) y Benaicha et al. (2019) señalan que los aditivos plastificantes con base de copolímeros optimizan el soporte en concreto de alto rango, alcanzando resultados de 54.60 MPa y 73.50 MPa, así como una relación a/c de 0.37 y 0.45, respectivamente.

6.3.2. Relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas del concreto

Según la norma ACI 211.1 (2002), un hormigón de composición fluida tiene un *slump* $\geq$ a 5 pulgadas (125 milímetros); mientras que una combinación apropiada en su manejabilidad, un *slump* mínimo de 4 pulgadas (100 milímetros). Asimismo, Manrique (2019) sostiene que, al no dosificar ninguna clase de aditivo, la combinación patrón conserva un *slump* $\geq$ a 5 pulgadas, siendo óptima para el traslado del concreto en altas temperaturas durante 1 hora 20 minutos. Asimismo, se considera que el patrón mostró una pérdida de establecimiento a razón de 0.96 pulgadas (24 milímetros) por cada 20 minutos.

En consecuencia, la sustancia alcanzó un *slump* de 0 pulgadas prolongadas por 3 horas 20 minutos luego de la dosificación. Asimismo, la combinación con el superplastificante de alto rango D1037(0.85) mostró una reducción de establecimiento promedio de 1.01 pulgadas (25 milímetros) cada 20 minutos, alcanzando variables menores de 40 y 50 minutos respectivamente, los cuales equivalen el 44 % y el 55 % del lapso en que la mezcla conserve su desarrollo.

Se empleó una cantidad de aditivo 1037 (0.85) y WR-75 (0.25) para conservar manejable el concreto por mayor tiempo. Después de calcular el establecimiento del mezclado durante ese tiempo, resultaron indicadores equivalentes a 1 hora 20 minutos y 1 hora 30 minutos, respectivamente,

presentando una caída de *slump* a en función de 1.07 pulgadas (27 milímetros) por cada 20 minutos. Este diseño logró una caída de 0 en un tiempo de 2 horas 40 minutos posterior a su porcionalidad. En el diseño patrón 1, la disminución de asentamiento transcurrida en 4 horas había bajado 5 1/4 pulgadas; mientras que, al agregar el superplastificante 3330 con una cantidad de 0.806 %, la baja de fijamiento durante 4 horas estaba en 5 pulgadas. Finalmente, al adicionar un superplastificante SC con una porción de 0.66% y su merma de fijamiento durante 4 horas, se obtuvo 4 1/4 pulgadas.

Llamo y Rodríguez (2018) identificaron que, con la adición de 2 % de Sikament TM-140, el tiempo de fraguado es mayor. El diseño del patrón 2 posee un tiempo de fraguado inicial de 4.75 horas y uno final de 6.33 horas. A diferencia del Sikament TM-140, el cual incrementa su fraguado inicial de 18 horas y final a 20.55 horas. En su diseño, Aponte (2017) observó los periodos de fraguado del patrón 4, en el cual el fraguado inicial es de 3 horas, y el final, de 3.6 horas. En tanto, para la mezcla con aditivo Z RETAR es de 4.10 horas en tiempo inicial y de 4.2 horas en tiempo final.

Beas et al. (2015) sostienen que el concreto, al tomar más tiempo en fraguar, solo tiene un 5% de aditivo nanosílice aproximado de 18 horas. A mayor cantidad de aditivos, los tiempos de fraguado inicial y final aumentan. Es decir, se incrementan en los concretos a medida que aumenta la dosis de aditivo. En el caso de 1 %, el fraguado inicial es de 48 minutos más que el diseño patrón; y en el caso de 5 %, de 9 horas a más para generarse el fraguado inicial.

En este sentido, Sotomayor (2019) en su estudio analiza que para el fraguado inicial existe una sutil disparidad. El concreto sobre la base de cemento de alta resistencia (H20/r/1) logra el fraguado inicial 5 minutos antes, siendo 3 % más rápido que el concreto convencional (H20/C/1). Con respecto al fraguado final, la disparidad es evidente. Entonces, el concreto con cemento de alta resistencia (H20/r/1) adquiere una propiedad más con una hora anterior frente al concreto corriente (H20/C/1).

6.3.3. Temperatura extrema y la consistencia durante el tiempo de fraguado

En diversos estudios se evidencian mejoras en el asentamiento del concreto al estar en temperaturas bajas y adicionar aditivos. Por otra parte, en diferentes pruebas también se reportan mejoras en temperaturas altas con el uso de aditivos, coincidiendo un rango de relación a/c de 0.45 a 0.70. Asimismo, cuanto al aguante a la compresión en temperaturas medias al incorporar aditivos con una relación a/c de 0.40 a 0.65. De igual manera, hay progresos en el aguante a la compresión en temperaturas bajas, usando aditivos que coinciden un rango de relación a/c de 0.40 a 0.50. Finalmente, se muestran otros avances en temperaturas altas al utilizar aditivos, los cuales coinciden en una relación a/c de 0.17 a 0.30.

6.3.4. Agregados con superplastificante de policarboxilatos en la propiedad de resistencia a la compresión

Özen et al. (2021) y Ekwulo y Eme (2017) realizaron una indagación sobre un hormigón sin incorporación de policarboxilatos, cuya intención era contrastar el impacto del superplastificante en el material fresco; por lo que ambos estudios consideran una dimensión máxima de agregado de 3/8. No obstante, se consiguió un establecimiento de 60 milímetros sin aditivo y uno mayor a 200 milímetros con superplastificante. Esta variación es causada por el superplastificante que genera una segregación entre las partículas de la mezcla al liberar el agua implicada en los flóculos y optimizando el fijamiento de la combinación.

Un concreto de tamaño máximo nominal de 3/8 pulgadas es inferior en su resistencia porque es superado por uno de 3/4 pulgadas mayor en resistencia (Lajan et al., 2019). En Adewuyi et al. (2017), el resultado es logrado por una mezcla en 1/2 pulgadas, ya que el tamaño del agregado aumenta, así como las condiciones del agua se disminuyen al aminorar la relación agua/cemento y optimizar la resistencia. No obstante, para agregados de mayor tamaño de 1, el resultado de la disminución de agua se balancea con la pérdida de cohesión debido a la reducción del área superficial.

Así, la resistencia a la compresión más alta se logra al tener un menor TMN, ya que hay una mayor adherencia y se reduce la relación a/c. Asimismo, conforme aumenta la relación agregado fino/grueso en la combinación con policarboxilatos, se mejora el establecimiento del hormigón. En tanto el hormigón sin adición de policarboxilatos conforme aumenta el vínculo incorporado fino/grueso, se disminuye el establecimiento y pierde manejabilidad por las propiedades fluidificantes del policarboxilatos, los cuales permiten conservar un mayor asentamiento.

REFLEXIONES FINALES

- a. Superplastificantes con base de policarboxilatos en la resistencia a la compresión. Frente a una prueba de asentamiento (*slump flow*) de 32.5 centímetros para una cantidad de 0.3 % en el plastificante sintetizado de molécula, se encontró un rango entre 0.25 % a 0.40 %. El aditivo policarboxilatos, con codificación PCE-2, adquirió una propiedad de 85 MPa de resistencia a la compresión con adición mineral, en un periodo de 28 días con relación de 0.30 a/c. En la PC-3, se consiguió una aguante a la compresión de 73 MPa sin la incorporación del aditivo en el mismo periodo y relación. Esto determinó que el empleo de plastificante de copolímeros afecta beneficiosamente en las propiedades del concreto; es decir, al reducir el agua y mejorar las resistencias.
- b. Relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas del concreto. En clima frío, el aditivo con una dosificación de 1.50 % y relación de a/c de 0.35 obtuvo un asentamiento entre 55 a 73 milímetros. Al periodo de 28 días de ensayos, el cemento endurecido halló una resistencia a la compresión de 44.06 MPa, a la tracción de 3.36 MPa y 4.1 MPa.

En contraparte, para el clima cálido, el aditivo de cenizas volantes, con una dosificación de 2.40 %-3.0 % y relación de a/c de 0.17 obtuvo un asentamiento entre 200 a 220 milímetros. Al periodo de 28 días de ensayos, el cemento endurecido encontró una resistencia a la compresión de 165 MPa, a la tracción de 32.0 MPa y 32.5 MPa. Por ello, se concluyó que el uso de superplastificantes aumenta las capacidades mecánicas del hormigón en climas diferentes.

- c. Temperatura extrema y la consistencia durante el tiempo de fraguado. Se concluyó que en el periodo de fraguado inicial ocurre una leve distinción. En el caso del concreto, H20/R1 consigue 5 minutos, siendo más rápido a un 3 % que el concreto H20/C1. No obstante, para el fraguado final la distinción es visible, el hormigón H20/R1/ con 1

hora de anterioridad es 19 % más rápido que el hormigón H20/C1/. En tiempo de frío, el superplastificante TM-40 pierde rápidamente la trabajabilidad durante 60 minutos al reducir el fraguado. Ello en contraste con el superplastificante 3330 que dura 4 horas para conservar la trabajabilidad de la mezcla.

- d. Agregados con superplastificantes de policarboxilatos en la propiedad de resistencia a la compresión. Una mayor trabajabilidad y resistencia del concreto se obtiene al adicionar un 1.90 % de aditivo policarboxilatos, de agregado pesado 3/8 pulgadas y relación de a/c de 0.35. Dichas características obtuvieron un fijamiento de 200 milímetros y resistencia de 66 MPa.

Recomendaciones

- a. Superplastificantes con base de policarboxilatos en la resistencia a la compresión. No sobrepasar la dosis (0.40 % óptimo) para obtener un adecuado asentamiento y trabajabilidad. Asimismo, conservar una baja asociación entre a/c de un nivel próximo de 0.25 a 0.30, así como guardar e identificar la composición química de los policarboxilatos porque puede reducir el aguanete a la compresión del material.
- b. Relación entre la temperatura y las propiedades mecánicas del concreto. Mantener un control adecuado del concreto fresco en clima cálido, utilizar un apropiado aditivo para conservar el estado plástico del material, proteger los componentes del concreto durante el proceso de fraguado inicial y final. En este sentido, aminorar las revoluciones del mezclador y añadir aditivo retardante de fraguado sin alterar el vínculo de a/c, y considerar el tiempo de fraguado para cualquier edificación.
- c. Temperatura extrema y la consistencia durante el tiempo de fraguado. Para temperatura media se sugiere estimar la colocación del concreto y no sobrepasar la porción de 1.5 % del aditivo autopolimerizable. En temperaturas bajas tener en cuenta la relación de a/c no mayor a 0.48

con incorporación de aditivos y no sobrepasar la cantidad de 1.5 % de aditivo. En temperatura alta usar superplastificantes para conservar el soporte del concreto.

- d. Agregados con superplastificante de policarboxilatos en la propiedad de resistencia a la compresión. Para mejorar las propiedades de la mezcla se recomienda utilizar superplastificantes policarboxilatos y adiciones. En este sentido, realizar estudios experimentales con diversos tipos de aditivos de policarboxilatos con las mismas proporciones de agregados, así como estudios comparativos de las capacidades mecánicas del concreto al conservar el vínculo a/c con la suma del superplastificante. Por último, evaluar la influencia de los tipos de superplastificantes en zonas altoandinas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceros Arequipa. (2020). *Manual de construcción para maestros de obra*. Aceros Arequipa. <https://www.acerosarequipa.com/manuales/manual-de-construccion-para-maestros-de-obra/mezcla>
- Adewuyi, A., Sulaiman, I. y Akinyele, J. (2017). Compressive Strength and Abrasion Resistance of Concretes Under Varying Exposure Conditions. *Open Journal of Civil Engineering*, 7, 82-99. 10.4236/ojce.2017.71005.
- Alonso, M. (2011). *Comportamiento y compatibilidad de cementos y aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos. Efectos de la naturaleza de los cementos y estructura de los aditivos* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Madrid]. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/6698/39592_alonso_maria_del_mar.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- American Concrete Institute. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. American Concrete Institute. https://www.academia.edu/41545739/ACI_211_1_1_
- Andrade, M., Borralleras, P., Corres, H., Monteiro, P., Navarro, J. y Shah, S. (2009). *Nanotecnología en el hormigón y hormigones autocompactantes*. Cátedra BMB-UPC. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/9677/2009-02-26-526987.pdf>
- Aragón, S. (2006). *Manual de elaboración de concreto en obra*. Instituto Costarricense del Cemento y del Concreto. <https://ficem.org/CIC-descargas/costa-rica/Manual-de-elaboracion-de-concreto-en-obra.pdf>
- Arcila, A., Silva, Y., Medina, D. y Delvasto, S. (2022). Efecto de tratamientos en agregados reciclados sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de concretos autocompactantes. *Revista EIA*, 19(38), 1-20. <https://revistas.cia.edu.co/index.php/reveia/article/view/1547/1466>

- Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para el Hormigón y Cemento. (s. f.-a). *Acelerantes de fraguado*. <https://anfah.org/aditivos/acelerantes-de-fraguado/>
- Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para el Hormigón y Cemento. (s. f.-b). *Tipos de aditivos*. <https://anfah.org/aditivos/tipos-de-aditivos/>
- Barrio, D., García, S. y Solís, J. (2011). Modelo para la gestión de la innovación tecnológica en el sector inmobiliario. *Revista Ingeniería de Construcción*, 26(3), 353-368. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732011000300006&script=sci_arttext
- Beas, G., Pajuelo, A., Alonso, Á. y Calderón, E. (2015). Concreto de alto desempeño utilizando nanosílice. *Concreto al día ACI*, 40-46.
- Becosan. (11 de febrero de 2019). ¿Cuánto tarda en fraguar el hormigón? *Becosan*. <https://www.becosan.com/es/cuanto-tarda-en-fraguar-el-hormigon/>
- Benaicha, M., Hafidi-Alaoui, A., Jalbaud, O. y Burtschell, Y. (2019). Dosage Effect of Superplasticizer on Self-Compacting Concrete: Correlation Between Rheology and Strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2063-2069. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.015>
- Benítez, I., Julián, M., Caballero, M. y Miño, J. (2016). Características reológicas de la pasta para producir cemento Portland. *Revista Científica de la UCSA*, 3(1), 13-23. http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-87522016000100003&lang=es
- Benito, F., Parra, C., Valcuende, M., Miñano, I. y Rodríguez, C. (2015). Método para cuantificar la segregación en hormigones autocompactantes. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 6(2), 48-63. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112015000100003&lang=es

- Calo, D. (2014). Cap. 5. Construcción. En *Manual de diseño y constitución de pavimentos de hormigón* (pp. 3-72). Instituto del Cemento Portland Argentino. https://web.icpa.org.ar/wp-content/uploads/2019/04/capitulo_5.pdf
- Cemex Colombia. (s. f.). *Concreto de fraguado acelerado*. <https://www.cemexcolombia.com/-/concreto-de-fraguado-acelerado>
- Cemex República Dominicana. (s. f.). *Concreto de fraguado retardado*. <https://www.cemexdominicana.com/productos/concretos/especiales/concreto-de-fraguado-retardado>
- Chen, B. (2012). Mix Proportion Design of P (AA-co-MA)/PEG Polycarboxylic Copolymer and High-Performance Concrete with Composite Admixture. *Applied Mechanics and Materials*, 246-247, 1085-1090. <https://www.scientific.net/amm.246-247.1085>
- Chen, Y., Yao, J., Lu, Z. y Leung, C. (2019). Experimental Study on the Shrinkage Reduction of High Strength Strain-Hardening Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, 104. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946518313003>
- Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K. y Garcez, M. (2022). Predicción de la vida útil de estructuras en concreto a partir de modelos para el avance del frente de carbonatación. *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*, 12(1), 47-60. <https://www.revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/558/1068>
- Decreto Supremo 015-2004-VIVIENDA de 2004 [Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento]. Aprueban el índice del Reglamento Nacional de Edificaciones. 3 de septiembre de 2004.

- Decreto Supremo 011-2006-VIVIENDA de 2006 [Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento]. Aprueban 66 Normas Técnicas del Reglamento Nacional de Edificaciones- RNE. 5 de mayo de 2006.
- Ekwulo, E. y Eme, D. (2017). Effect of Aggregate Size and Gradation on Compressive Strength of Normal Strength Concrete for Rigid Pavement. *American Journal of Engineering Research*, 6(9), 112-116. [https://ajer.org/papers/v6\(09\)/O0609112116.pdf](https://ajer.org/papers/v6(09)/O0609112116.pdf)
- Environmental Protection Agency. (2016). *Guía para el control de la humedad en el diseño, construcción y mantenimiento de edificaciones*. Environmental Protection Agency. https://espanol.epa.gov/sites/default/files/2016-07/documents/moisture_control_guidance_spanish_april_2016_508_final.pdf
- Esat, K. y Buğra, A. (2015). Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19, 2208-2216. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0327-y>
- Estrada, C. y Páez, R. (2014). *Influencia de la morfología de los agregados en la resistencia del concreto* [Tesis de pregrado, Universidad Veracruzana]. <https://docplayer.es/46084967-Tesis-ingenieria-civil.html>
- Fazinga, W., Saffaro, F., Isatto, E. y Lantelme, E. (2019). Implementación del trabajo estandarizado en la industria de la construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(3), 288-298. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732019000300288&script=sci_arttext
- Fernández, A., Morales, J. y Soto, F. (2016). Evaluación del comportamiento de la resistencia a compresión del concreto con la aplicación del aditivo superplastificantes PSP NLS, para edades mayores que 28 días. *Revista Ingeniería UC*, 23(2), 197-203. <https://www.redalyc.org/pdf/707/70746634010.pdf>

- Ferraris, Ch. (2001). Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(2), 391-399. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/106/2/j62fer.pdf>
- Ferraz, D. (2016). Aditivos reductores de agua para concreto premezclado. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 22-23. <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/mayo2016/experto.pdf>
- Fonseca, J. y Díaz, S. (2020). *Aspectos químicos y termodinámicos del cemento y el concreto*. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/32512>
- Gámez, D., Saldaña, H., Gómez, J. y Corral, R. (2017). Estudio de factibilidad y caracterización de áridos para hormigón estructural. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 283-304. <https://www.redalyc.org/journal/852/85252030002/movil/>
- García, Á., Jiménez, P., Morán, F. y Arroyo, J. (2009). *Hormigón armado basada en la EHE-2008 ajustada al código modelo y al eurocódigo EC-2*. 15 ed. Gustavo Gili.
- García, C. y Pérez, B. (2020). La responsabilidad social en Cemex. *Investigación Valdiviana*, 14(4), 175-187. <http://diu.unheval.edu.pe/revistas/index.php/riv/article/view/728/688>
- Gomathi, P. y Sivakumar, A. (2015). Accelerated Curing Effects on the Mechanical Performance of Cold Bonded and Sintered Fly Ash Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 77, 276-287. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181401410X>
- Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L. y Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 80-86. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835626>

- Hermida, G. (2009). *Concreto Impermeable. Una mirada reciente*. Sika. <https://per.sika.com/dms/getdocument.get/2a4c9422-120b-358c-9436-9672bf915150/BROCHURE%20CONCRETO%20IMPERMEABLE%20LATAM.pdf>
- Huamán, I. (2018). *Concreto autocompactante: diseño, beneficios y consideraciones básicas para su uso en la ciudad de Ayacucho* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/UNSCH/3259/1/TESIS%20CIV501_Hua.pdf
- Huang, Z. y Yang, Y. (2018). Preparing Hyperbranched Polycarboxylate Superplasticizers Possessing Excellent Viscosity-Reducing Performance Through in Situ Redox Initialized Polymerization Method. *Cement and Concrete Compositers*, 93, 323-330. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946517311307>
- Ibragimov, R. y Fediuk, R. (2019). Improving the Early Strength of Concrete: Effect of Mechano-Chemical Activation of the Cementitious Suspension and Using of Various Superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 226, 839-848. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819319877>
- Iig, M. y Plank, J. (2016). A Novel Kind of Concrete Superplasticizer Based on Lignite. *Cement and Concrete Research*, 79, 123-130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000888461500232X>
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2009). Determinación del índice de rebote utilizando el dispositivo conocido como esclerómetro. *IMCYC. Selección Coleccionable*, (19), 64-67. <http://www.imcyc.com/ct2009/mar09/PROBLEMAS.pdf>
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2013). Determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro. *IMCYC. Selección Coleccionable*, (76), 68-71. <https://docplayer.>

es/12005712-Determinacion-de-la-resistencia-a-la-flexion-usando-una-viga-simple-con-carga-en-el-centro-del-claro.html

Jain, A., Gupta, R. y Chaudhary, S. (2019). Performance of Self-Compacting Concrete Comprising Granite Cutting Waste as Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, 221, 539-552. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819315326>

Jinchuan, M., Zhongwen, O., Xuxin, Z., Jimming, L. y Yahui, W. (2017). Influence of Superabsorbent Polymer on Shrinkage Properties of Reactive Powder Concrete Blended with Granulated Blast Furnace Slag. *Construction and Building Materials*, 146, 283-196. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181730750X>

Jonbi, J., Arini, R., Anwar, B. y Ali, M. (2018). Effect of Added the Polycarboxylate Ether on Slump Retention and Compressive Strength of the High-Performance Concrete. *MATEC Web of Conferences*, 195. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/54/mateconf_icrmce2018_01020/mateconf_icrmce2018_01020.html

Jun, Y. y Jeong, Y. (2014). Influence of the Structural Modification of Polycarboxylate Copolymer with a Low Dispersing Ability on the Set-Retarding of Portland Cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(6), 1787-1794. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-014-1189-4>

Lajan, A., Kawan, G. y Ahmed, M. (2019). Testing and Modeling the Young Age Compressive Strength for High Workability Concrete Modified with PCE Polymers. *Results in Materials*, 1. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590048X19300044>

Lines, S., Rothstein, D., Rollins, B. y Alt, Ch. (2021). Corrosión del concreto inducida por microbios. *Concreto Latinoamérica*, 2(5), 4-9. <https://acimexico-snem.org/wp-content/uploads/2021/05/CONCRETO-LATINOAMERICA-MAYO-2021.pdf>

- Liu, J., y Ran, Q., Miao, C. y Zhou, D. (2011). Synthesis and Characterization of Comb-Like Copolymer Dispersant with Methoxy Poly (Ethylene Oxide) Side Chains. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50(1), 59-66. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2010.512351>
- Liu, X. y Wang, Z. (2015). Synthesis, Characterization and Performance of Superplasticizer with a Multi-Arm Structure. *Materials Science Forum*, 815, 594-600. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.815.594>
- Llamo, L. y Rodríguez, S. (2018). *Evaluación de la eficiencia de los aditivos Sikament TM-140 y Chemament 440 en la elaboración de concreto para zonas de clima cálido-desértico en Chiclayo-Lambayeque* [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán]. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/4914>
- Manrique, J. (2019). *Diseño y prueba de mezclas de concreto con baja pérdida de trabajabilidad en el tiempo* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4336/ICI_291.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Massarotto, L., Neves, A. y Dunk, J. (2019). Caracterización mecánica y reológica de hormigones con residuos de madera y humo de sílice. *Eng & Ingeniería y Ciencias*, 8(2), 15-24. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/8111>
- Materiali Ausiliari Per l'Edilizia e l'Industria. (2022). Aditivos para concreto. *MAPEI*. https://cdnmedia.mapci.com/docs/librariesprovider67/line-technical-documentation-documents/admixtures-for-concrete-catalog-sp.pdf?sfvrsn=cd139bd_14
- Mayo, C. y Sanz, D. (9 a 12 de octubre de 2019). Relación entre los procesos de fabricación y la textura petrográfica de los cementos históricos [Presentación de ponencia]. XI Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Soria, España. <https://oa.upm.es/65292/>

- Mehta, P. y Monteiro, P. (1998). *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. <https://bit.ly/3yzD01M>
- Ministerio de Fomento de España. (2010). *EHE-08 Instrucción de hormigón estructural. Con comentarios de los miembros de la comisión permanente del hormigón*. Gobierno de España. https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1820100.pdf
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto armado*. http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/Estudios_Normalizacion/Normalizacion/normas/E060_CONCRETO_ARMADO.pdf
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2022). *Marco legal*. https://www3.vivienda.gob.pe/ministerio/marco_legal.aspx#:~:text=El%2011%20de%20Julio%20de,%2C%20Urbanismo%2C%20Construcci%C3%B3n%20y%20Saneamiento.
- Mouret, M., Bascoul, A. y Escadeillas, G. (2003). Strength Impairment of Concrete Mixed in Hot Weather: Relation to Porosity of Bulk Fresh Concrete Paste and Maturity. *Magazine of Concrete Research*, 55(3), 215-223. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/mac.2003.55.3.215>
- Muñoz, M. (2020). Procesamiento de materiales conglomerantes: cal, yeso y cemento. *Universitat Politècnica de València*, 1-10. <https://riunet.upv.es/handle/10251/146535>
- Nowak, M. (2015). Influence of Superplasticizer on Porosity Structures in Hardened Concretes. *Procedia Engineering*, 108, 262-269. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.146>

- Nuñez, C. (2021). Análisis sobre la importancia de la seguridad y salud en el trabajo en el sector de la construcción en Colombia. *Revista de Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 8(15), 45-53. <https://urepublicana.edu.co/ojs/index.php/ingenieria/article/view/645/527>
- Özen, S., Gökhan, M., Mardani, A., Ünlü, A. y Ramyar, K. (2021). Effects of Anionic Monomer Type of Water-Reducing Admixture on Fresh Properties, Compressive Strength and Water Adsorption of Self-Compacting Concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(11), 1203-1218. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1840896>
- Palencia, D. (2020). *Evaluación de las propiedades en estado fresco de un concreto autocompactante con adición de polietileno en alta densidad recuperado granulado* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79616>
- Paredes, J. (2021). *Diseño de hormigones de altas prestaciones para la mejora de su resistencia y durabilidad* [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/70025/>
- Pereira, J. y Maciel, G. (2022). Medida de consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone automatizado: sua validação e potencialidades. *Matéria*, 26(4), 1-13. <https://www.scielo.br/j/rmat/a/mrN-9jHpsvWfqgywGjdkhgFd/?lang=pt>
- Ramos, C. (2021). *Exploración material en concreto empleando vidrio triturado como agregado* [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/6297/FA-M-2021-0202.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Retamal, F., Rougier, V. y Escalante, M. (2020). *Estudio del comportamiento mecánico del hormigón celular simple y hormigón celular reforzado con fibras en vigas híbridas de hormigón armado* [Ponencia]. XV Congreso Internacional de Patología y Recuperación de Estructuras.

- Rivera, G. (2013). *Agregados para mortero o concreto*. Universidad del Cauca. <https://bit.ly/3yxGDWk>
- Rivva, E. (2000). *Naturaleza y materiales del concreto*. ACI Perú. <https://document.tips/documents/materiales-para-el-concreto-enrique-rivva-lopezpdf.html?page=1>
- Rizzuto, J., Kamal, M., Elsayad, H., Bashandy, A., Etman, Z., Aboel, R., Mohamed, N. y Shaaban, I. (2020). Effect of Self-curing Admixture on Concrete Properties in Hot Climate Conditions. *Construction and Building Materials*, 261. <http://repository.uwl.ac.uk/id/eprint/7045/>
- Robles, J. y Velásquez, L. (2013). Estructura y desempeño del sector de la construcción en México. *El Cotidiano*, (182), 105-116. <https://www.redalyc.org/pdf/325/32529942011.pdf>
- Sánchez de Guzmán, D. (2011). *Tecnología del concreto. Tomo I y II*. Asociación Colombiana de Productores de Concreto. <https://doku.pub/documents/tecnologia-del-concreto-tomo-1-9qgo5vjv3kln>
- Sanjuán, M. y Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. Universidad de Alicante. https://www.lareferencia.info/vufind/Record/ES_65ded824e03662339a8d0d65567dc49e
- Santamaría, J., Adame, B. y Bermeo, C. (2021). Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen. *Novasinerгия*, 4(1), 91-101. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2631-26542021000100091
- Segura, J. (2011). *Estructuras de concreto I*. Vol.7. Universidad Nacional de Colombia. <https://www.yumpu.com/es/document/read/62782881/estructuras-en-concreto-jorge-segura-franco-7ed-pdf>

- Sika Colombia. (2014). *Concreto. Aditivos para concreto*. <https://col.sika.com/content/dam/dms/co01/7/BROCHURE%20ADITIVOS%20PARA%20CONCRETO.pdf>
- Sika Perú. (s. f.). *Retardantes para concreto*. <https://per.sika.com/es/construccion/aditivos-concreto/aditivos-concreto-premezclado/retardantes-concreto.html>
- Solís, R. y Alcocer, M. (2019). Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 20(4), 1-13. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432019000400003&script=sci_arttext
- Sotomayor, N. (2019). Análisis de un modelo matemático para determinar el tiempo de fraguado del hormigón [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfci-s7181a/doc/bmfci-s7181a.pdf>
- Svintsov, A., Shchesnyak, E., Galishnikova, V., Fediuk, R. y Stashevskaya, N. (2020). Effect of Nano-Modified Additives on Properties of Concrete Mixtures During Winter Season. *Construction and Building Materials*, 237. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819329794>
- Tecnopol. (2018). *Guía práctica: la humedad en el hormigón y los recubrimientos sensibles a esta humedad*. Tecno Magazine. <https://tecnopol.es/newsletter/TECNOMAGAZINE-N8-es.pdf>
- Umacon. (17 de enero de 2017). Los 10 principales tipos de hormigón y sus aplicaciones. ¡Lo debes saber! *Umacon*. <http://www.umacon.com/noticia.php/es/principales-10-aplicaciones-y-tipos-de-hormigon/428>

- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (1 de julio de 2017a). *El cementante*. http://www.uptc.edu.co/docentes/oscar_gutierrez/En_Concreto/Materia4.html
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (1 de julio de 2017b). *Materiales cementantes suplementarios*. http://www.uptc.edu.co/docentes/oscar_gutierrez/En_Concreto/Materia5
- Vidaud, E. (2012). La carbonatación en el concreto reforzado. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 20-22. <http://www.imcyc.com/revistacyt/diciembre2012/pdfs/ingenieria.pdf>
- Vidaud, E. (2013). De la historia del cemento. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 20-24. <http://imcyc.com/revistacyt/pdf/noviembre2013/ingenieria.pdf>
- Vidaud, E. y Vidaud, I. (2014a). Breve reseña. Los aditivos químicos y su impacto en el medio ambiente (parte I). *Construcción y Tecnología en Concreto*, 28-31. <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/mayo2014/tecnologia.pdf>
- Vidaud, E. y Vidaud, I. (2014b). Breve reseña. Los aditivos químicos y su impacto en el medio ambiente (parte II). *Construcción y Tecnología en Concreto*, 28-31. <https://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/junio2014/tecnologia.pdf>
- Volpi, V., López, L., Serralde, J., González, A., Bigurra, C. y Sánchez, M. (2022). Comparativo de perfil de carbonatación entre tabicones macizos de noryl y convencionales. *Pädi. Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(2), 191-196. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/8678>

- Winnefeld, F., Becker, S., Pakusch, J. y Götz, T. (2007). Effects of the Molecular Architecture of Comb-shaped Superplasticizers on their Performance in Cementitious Systems. *Cement and Concrete Composites*, 29(4), 251-262.
- Xargay, H., Ripani, M., Sambataro, L. y Folino, P. (2016). Degradación del hormigón frente a altas temperaturas. *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, 1-19. <https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-anteriores/2016/contenidos/trabajos/071.pdf>
- Zerbino, R., Barragán, B., Agulló, L., García, T. y Gettu, R. (2006). Reología de hormigones autocompactables. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, (13), 51-64. <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/4a3bad15-e67d-4f2e-86a0-6d6649f3f716/content>
- Zerbino, R. (2020). El hormigón reforzado con fibras y sus proyecciones dentro de la industria de la producción. *Revista de Ingeniería*, 53(416), 14-18. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/139016>
- Zhang, G., Li, G. y Li, Y. (2016). Effects of Superplasticizers and Retarders on the Fluidity and Strength of Sulphoaluminate Cement. *Construction and Building Materials*, 126, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.019>

