



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**UTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN OBRAS MARÍTIMAS.
ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE HORMIGÓN
TRADICIONAL Y HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

Ricardo Antonio Parra Villarzún

Marzo 2019

UTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN EN OBRAS MARÍTIMAS. ANÁLISIS
COMPARATIVO ENTRE HORMIGÓN TRADICIONAL Y HORMIGÓN
AUTOCOMPACTANTE

Ricardo Antonio Parra Villarzún

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

JORGE ROJAS ALCAÍNO

Profesor guía

FERNANDO SOTOMAYOR ALEJANDRE

Revisor

HITALO MORALES BASTIAS

Revisor

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera, u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización, u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

Jorge Rojas Alcaíno.

Profesor Guía.

Ricardo Parra Villarzún.

Alumno Memorista.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente a mi madre, padre, hermanos y madrina, que tuvieron un rol fundamental motivándome incondicionalmente durante esta etapa.

A mis profesores guías, por orientarme en la elaboración de esta memoria.

Y mis amigos de carrera por caminar juntos todos estos años.

Finalmente a todos los que aportaron con su sabiduría en este proyecto de título.

DEDICATORIA

Este proyecto de título está dedicado especialmente a mi madre, madrina, hermanos y padre, por todo su apoyo, esfuerzo y motivación durante este proceso y por siempre confiar en mis capacidades.

Los quiero.
Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
DEDICATORIA.....	v
INDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
RESUMEN.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	3
3.1 ALCANCES.....	3
3.2 LIMITACIONES.....	3
4. MARCO TEÓRICO.....	4
4.1 Fundamentos teóricos.....	4
4.2 Hormigón.....	5
4.2.1 Composición.....	7
4.2.2 Propiedades del Hormigón.....	11
4.2.3 Características del Hormigón.....	12
4.2.4 Tipos de Hormigón.....	12
4.3 Hormigón Autocompactante.....	13
4.3.1 Ventajas.....	16
4.3.2 Desventajas.....	16
4.3.3 Materiales en la Fabricación del Hormigón Autocompactante.....	16
4.4 Hormigón en Ambiente Marino.....	18
4.4.1 Historia.....	18
4.4.2 Obras Marítimas Portuarias.....	19
4.4.3 Zonas de Exposición Marina.....	20
4.5 Técnicas de Hormigonado.....	22
4.5.1 Tremie.....	22
4.5.2 Ensacado.....	23
4.6 Normativa.....	24

4.6.1 NCH 170: 2016	24
5. METODOLOGÍA	29
5.1 Análisis del Hormigón Autocompactante	29
5.2 Análisis de los Componentes del Hormigón	30
5.2.1 Cemento	31
5.2.2 Áridos	32
5.2.3 Adiciones	33
5.2.4 Agua	38
5.2.5 Aditivos	38
5.3 Propiedades del hormigón tradicional y hormigón autocompactante	42
5.3.1 Resistencia	42
5.3.2 Impermeabilidad	45
5.3.3 Trabajabilidad	47
5.3.4 Fraguado	48
5.4 Casos de Obras Marítimas	50
5.4.1 Obras en Hormigón Autocompactante	50
5.5 Método Constructivo en Obras Marítimas.....	52
6. ANÁLISIS	56
6.1 Obras Marítimas en Chile	56
6.1.1 Obras en Hormigón Autocompactante en Chile	56
6.2 Análisis Comparativo entre Hormigones.....	59
6.3 Análisis y Sugerencias	67
CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXOS.....	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Granulometría de la Grava	9
Tabla 2: Granulometría de Arena.....	10
Tabla 3: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión	25
Tabla 4: Clasificación de los hormigones por resistencia a tracción por flexión	25
Tabla 5: Contenido máximo de iones cloruro solubles en el hormigón	26
Tabla 6: Requisitos del hormigón sometido a la acción de congelación y deshielo	26
Tabla 7: Requisitos del hormigón en contacto con sulfatos	27
Tabla 8: Grado de exposición por sulfatos	27
Tabla 9: Requisitos del cemento para el hormigón en contacto con sulfatos.....	27
Tabla 10: Requisitos de hormigón según grado de exposición.....	27
Tabla 11: Requisitos de profundidad de agua determinada según NCh2262	28
Tabla 12: La norma ASTM C494 “Chemical Admixtures for Concrete” distingue siete tipos:	39
Tabla 13: La norma chilena NCh 2182. Of 95 establece la siguiente clasificación.....	39
Tabla 14: Ensayos de permeabilidad	45
Tabla 15: Ensayos en estado fresco	48
Tabla 16: Cuadro resumen	62
Tabla 17: Desglose de hormigón autocompactante instalado en obra	65
Tabla 18: Comparación de recursos humanos entre hormigón tradicional y hormigón autocompactante	66
Tabla 19: Tiempo de ejecución e implicación de personal en el vertido de una losa de 40 m ³	66

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Composición del Hormigón	6
Ilustración 2: Influencia en el contenido de pasta en el asentamiento del hormigón	7
Ilustración 3: Exudación del hormigón sin aditivos	14
Ilustración 4: Exudación del hormigón con aditivos superplastificantes	14
Ilustración 5: Proporción de contenido de árido grueso y fino	15
Ilustración 6: Tipos de exposición marina	20
Ilustración 7: Sistema Tremie	22
Ilustración 8: Hormigón en sacos	23
Ilustración 9: Proporciones de mezcla entre hormigón tradicional y autocompactante	30
Ilustración 10: Composición esquemática cualitativa del hormigón autocompactante	31
Ilustración 11: Penetración de agua a presión y resistencia a compresión a los 91 días..	47
Ilustración 12: Puente en suspensión Akashi Kaikyo.....	50
Ilustración 13: Plataforma petrolífera de Valencia	51
Ilustración 14: Puente de la Constitución de 1812.....	52
Ilustración 15: Encofrado preparado para colocar el hormigón autocompactante mediante bombeo y de abajo hacia arriba	53
Ilustración 16: Hormigonado bajo el agua	54
Ilustración 17: Proceso de expulsión de agua del moldaje al hormigonar.....	55
Ilustración 18: Pilote hormigonado en contacto con el agua de mar	55
Ilustración 19: Fotografía aérea del sector donde se destaca el sector comprometido	56
Ilustración 20: Muestra perforación inferior del muro sometido al desgaste.....	57
Ilustración 21: Corte transversal del muro reparado con HAC.....	58
Ilustración 22: Vista en planta del muro reparado con HAC	59
Ilustración 23: Resistencia Hormigón Tradicional – Hormigón Autocompactante	64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa Conceptual.....	74
Anexo 2: Cotización Hormigón Tradicional, Hormigones Tecnomix	75
Anexo 3: Presupuesto Municipal, reparación muro de contención Av. Perú.....	76

RESUMEN

En la actualidad existen distintas técnicas de hormigonado o vaciado de hormigón, algunos de estos permiten la colocación del hormigón bajo el agua, método que es muy utilizado para proyectar y construir obras marítimas, en donde las faenas son sumergidas.

Para el hormigonado bajo el agua, existen normas que se deben cumplir tanto para los materiales como para la metodología que se desee emplear, todo esto con el fin de garantizar la resistencia y la impermeabilidad del hormigón.

Un factor importante en los elementos de hormigón armado es la impermeabilidad, y más aún, cuando se encuentran expuestos o en contacto directo con el mar. Una buena impermeabilidad ayudará a proteger la armadura de acero de la corrosión, y con eso, otorgará mayor vida útil a estructuras de hormigón armado.

Una propiedad importante del hormigón autocompactante es la fluidez, lo que permite mayor trabajabilidad, y con eso, llenar cualquier vacío del moldaje; por su peso propio, es muy utilizado en estructuras que son expuestas al mar, donde se dificulta el empleo de herramientas para la compactación del hormigón.

En España, por ejemplo, el hormigón autocompactante ha sido utilizado para obras bajo el agua como es el caso del “Puente de la Constitución de 1812” en Cádiz, donde se empleó este para las fundaciones.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha expandido la actividad portuaria. Factores como la globalización de la economía, que ha supuesto un aumento de los flujos de mercancías; la mayor demanda de calidad de los servicios, para conseguir menores plazos de entrega y disminución de costos; o las exigencias para ampliar las alternativas de transporte, han condicionado nuevas concepciones de puertos y han obligado a adecuarse para dar respuesta a las demandas del mercado.

Las especiales condiciones de exposición a la agresividad del ambiente marino y del agua de mar en las zonas portuarias, requieren infraestructuras con características de resistencia y durabilidad distintas a las obras en tierra.

El hormigón es reconocido como uno de los materiales de referencia para la construcción de infraestructuras en ambiente marino, convirtiéndose en una respuesta sostenible y eficiente; aportando un mejor comportamiento en el tiempo, una menor inversión en mantenimiento, y mejorando en definitiva, la rentabilidad de las obras portuarias.

Es por esto que el hormigón se ha utilizado frecuentemente hasta el día de hoy en obras marítimas; como por ejemplo el puente colgante Akashi-Kaikyo en Kobe, Japón.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una comparación entre el hormigón tradicional y el hormigón autocompactante en obras marítimas en Chile.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión bibliográfica sobre el hormigón para colocación bajo agua, y hormigón autocompactante.
- Establecer las variables específicas que permitan comparar un hormigón de características convencionales versus un hormigón autocompactante.
- Analizar los parámetros que permiten obtener una mejor impermeabilidad y determinar si el hormigón autocompactante tiene un mejor desempeño en obras de ingeniería marítima.
- Generar sugerencias y/o recomendaciones a partir de los resultados para la utilización del hormigón autocompactante u hormigón tradicional para obras marítimas.

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

3.1 ALCANCES

La investigación se desarrollará de acuerdo a la información obtenida de obras marítimas en el mundo, no obstante, el análisis y sugerencias serán aplicadas de acuerdo a la información obtenida en la Dirección de Obras Portuarias (DOP), respecto de aquellas construidas en Chile.

Se desarrollará un análisis comparativo entre ambos hormigones respecto de las obras marítimas, como se indica en el mapa conceptual en Anexo 1.

3.2 LIMITACIONES

- Se considerará información disponible en internet, especialmente la referida a obras y hormigón de otros países.
- Se verificará información nacional respecto a obras marítimas de acuerdo a lo informado por la DOP.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Fundamentos teóricos

El hormigón es actualmente el material utilizado por excelencia en la construcción, tanto de obras marítimas como de obras en tierra. El comportamiento de este material frente a la acción del agua viene determinado por su estudio y por la experiencia acumulada en las diferentes obras realizadas en el tiempo. La resistencia mostrada frente a las sollicitaciones más habituales, la trabajabilidad, y el costo de este tipo de obras realizadas con hormigón, son las cualidades que le han permitido ser utilizado con frecuencia.

Este material es probablemente uno de los elementos más importantes para la construcción. Puede usarse en casi todas las estructuras, edificios, puentes, pavimentos, represas, muros de contención, túneles, viaductos, instalaciones de drenaje e irrigación, tanques, y fundaciones de máquinas, por nombrar algunos ejemplos ligados a las obras civiles; además de muchos componentes estructurales en servicio. Generalmente, ellos están sujetos a historias de cargas que varían en el tiempo en forma cíclica bajo condiciones normales de uso, las que pueden provocar un proceso de deterioro progresivo de sus propiedades mecánicas. (Urrutia, 2011) [1].

Así como los tiempos actuales han permitido tener información al instante de diversas partes del mundo, y con el auge que existe sobre los temas medioambientales, el hormigón no puede quedar ausente, sobre todo considerando la evolución que han tenido las diversas estructuras y construcciones que se realizan con él. Actualizar los conceptos, diseños de mezcla y modernizar ciertos conocimientos, son importantes en la continuidad y avances en el uso del hormigón.

Una de las principales propiedades del hormigón autocompactante es la trabajabilidad, fundamentalmente por la facilidad de su uso en estado fresco, desarrollando grandes resistencias en estado sólido. Las propiedades que este tipo de hormigón tiene, con el fin de controlar la calidad de las estructuras que con él se construyen, se detallarán más adelante.

El impacto que generan las diversas industrias en el medio ambiente, consecuencia del desarrollo de sus procesos productivos, no es ajeno para el tipo de hormigón que se utiliza en una obra. La huella de carbono que deja el hormigón utilizado, y el nulo uso de vibración para la construcción, son factores considerados a la hora de optar por este tipo de hormigón.

La producción de cemento, es una de las industrias donde mayor emisión de CO₂ se genera, por lo que la eficiencia en su producto puede permitir una gran ayuda al medio ambiente. Si la construcción de estructuras se hace de forma más eficiente, la cantidad de hormigón a utilizar es menor, por lo que, al usar menos pasta¹ en el diseño de la mezcla, se puede permitir reducir su consumo, distribuyendo de mejor forma su uso, y, por ende, disminuyendo su producción, lo que se traduce en menor CO₂ en el ambiente.

No solo al reducir la cantidad de pasta utilizada se ve reducida la cantidad de cemento a ocupar, también se visualiza una menor cantidad de agua requerida, permitiendo su uso

¹ Mezcla de cemento y agua; también llamada lechada de cemento.

en otras áreas, rubros y consumo humano. En esta industria se utilizan más de 9.000.000 [m³/año] de hormigón. Poder aplicar la eficiencia en el diseño de las estructuras, para disminuir la pasta a ocupar, permite un ahorro superior a los 350.000 [m³/año] de agua, lo que equivale a cerca de 1.600 familias en el mismo periodo de tiempo².

Respecto a la fundamentación del estudio en sí, se ha determinado a través de la NCh170:2016 cuales son los requisitos y generalidades para la construcción y uso del hormigón en obras marítimas, sin embargo, no existe definición alguna respecto del hormigón autocompactante.

Las ventajas que trae consigo el hormigón autocompactante serán analizadas en el siguiente apartado, como también sus propiedades y justificaciones del porque su uso es más conveniente en ambientes marítimos que el hormigón tradicional, y porque su uso no ha sido aplicado actualmente en el país.

4.2 Hormigón

En la actualidad, cuando se habla de hormigón, todos parecen entender de lo que se trata, ya que todos creen conocer los componentes; también así, una vez fraguado y endurecido es claramente identificable por personas que no necesariamente son entendidas en el tema.

Para el Instituto del Cemento y el Hormigón (1988), el hormigón es un material que está constituido básicamente por áridos y pasta de cemento. Eventualmente se agregan aditivos³ y adiciones⁴, en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquieren resistencia. Los áridos son materiales pétreos, compuestos de partículas duras, de forma y tamaño estable. Habitualmente se dividen en dos fracciones: grava y arena. La pasta de cemento es el aglomerante del hormigón, y está formada por el cemento y el agua. Los áridos, el cemento y el agua se mezclan juntos para constituir una masa plástica y trabajable, que permite ser moldeada en la forma que se desee. El cemento y el agua se combinan químicamente por un proceso denominado hidratación, del cual resulta el fraguado⁵ del hormigón y su endurecimiento gradual; este endurecimiento puede continuar indefinidamente bajo condiciones favorables de humedad y de temperatura, con un incremento de la capacidad resistente del hormigón. Se supone y acepta que el hormigón ha alcanzado su resistencia de trabajo al cabo de 28 días, y es por eso que normalmente las exigencias de resistencia se especifican y verifican a esa edad. Aun cuando en realidad, encontrándose en condiciones favorables, los hormigones siguen incrementando su resistencia a medida que aumenta su edad [1].

² Datos obtenidos a través de información recolectada por Sika S.A. publicado el 2016.

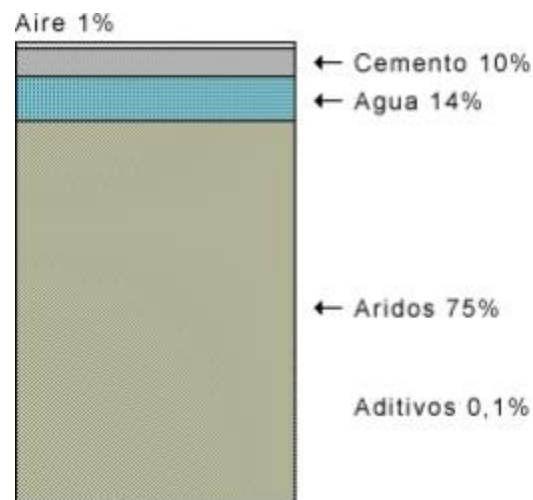
³ Componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, cuya inclusión tiene como objeto modificar las propiedades físicas de los materiales conglomerados en estado fresco. Se suelen presentar en forma de polvo o de líquido, como emulsiones.

⁴ Materiales de naturaleza inorgánica que destacan por sus características puzolánicas o hidráulicas.

⁵ Proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón (o mortero de cemento), producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos, y los óxidos metálicos presentes en el clinker que compone el cemento.

El hormigón se fabrica de la misma forma que hace muchos años atrás. Sus materias primas básicas, el cemento, áridos y agua, permiten que sea fácil de preparar en distintas obras, como muestra la Ilustración 1. Sin embargo, existen componentes adicionales como aditivos químicos y fibras, que son cada vez más usados, permitiendo el desarrollo de nuevos tipos de mezclas que presentan mejores características que el hormigón tradicional; ya que permiten la fabricación de un material más durable, económico y que busca contribuir con las exigencias actuales de sustentabilidad.

Ilustración 1: Composición del Hormigón



Fuente: Cemento Melón

La trabajabilidad del hormigón se determina de acuerdo a las características que tengan los componentes incorporados en su mezcla en estado fresco. Es así como la facilidad con la cual es mezclado permite que sea transportado, colocado y consolidado para obtener finalmente su condición homogénea.

Muchas veces se confunde la trabajabilidad del hormigón, centrándose principalmente en que este concepto se aplica a la consistencia de su mezcla, siendo más seca o dura, como fluida o blanda. Dentro de ciertos límites, efectivamente las mezclas más trabajables suelen ser las más fluidas, sin embargo, existe la posibilidad que dos mezclas de hormigones de la misma consistencia puedan no ser igual de trabajables. Tomando esta base, claramente el concepto de trabajabilidad del hormigón es mucho más amplio que respecto de su fluidez, no siendo la única variable a estudiar.

Independiente de lo descrito anteriormente, la fluidez del hormigón es determinada por la prueba de asentamiento del cono de Abrams, el cual mide la caída o escurrimiento de la mezcla bajo su propio peso, y ello muchas veces se relaciona con su trabajabilidad.

4.2.1 Composición

El cemento junto al agua y los agregados, conforman una pasta líquida, permitiendo flexibilidad y trabajabilidad a la mezcla. En este momento se consigue un material de consistencia determinada que permite ser colocado dentro de moldajes para tomar diferentes formas.

Luego de un tiempo, el aglomerante se vuelve más viscoso, llegando a un punto al que ya no se puede acomodar o vibrar sin poder arruinar lo que está dentro del molde. Tiempo después, el material presenta un estado rígido y duro, denominado fraguado final, iniciando su proceso de ganancia de resistencia mecánica.

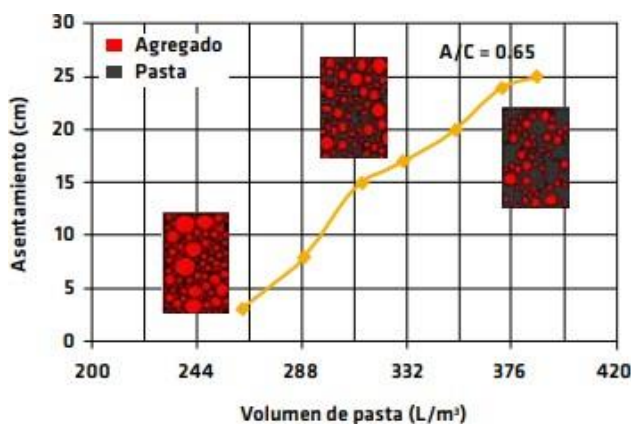
La fluidez de la mezcla del hormigón, está dada principalmente por la pasta que se genera, de acuerdo al contenido de ella por metro cúbico en el hormigón en sí, y por la viscosidad de la pasta usada en la fabricación.

El volumen de la pasta, fundamenta la fluidez del hormigón, por lo que, para tener mezclas de distintos asentamientos, manteniendo las características en resistencias mecánicas, solo basta aumentar o disminuir el volumen de pasta en las mezclas. Así, además, cuando se utilizan pastas menos viscosas, el hormigón da como resultado un mayor asentamiento para iguales contenidos de pastas.

En la Ilustración 2, se logra distinguir que, al aumentar el volumen de pasta podemos observar variaciones en el asentamiento del hormigón, generando una pasta más fluida. Además, se pueden agregar aditivos plastificantes y superplastificantes, sin que cambien las propiedades de la resistencia del hormigón. La consistencia o fluidez de la mezcla se refiere al grado de humedad de la misma y la define como seca (dura) o fluida (blanda).

Dentro de ciertos límites las mezclas fluidas son más manejables que las mezclas secas; no obstante, dos hormigones que tengan la misma consistencia pueden no ser igualmente manejables. Esto sugiere entonces que la trabajabilidad del hormigón es un concepto más global dentro del cual se encuentra la fluidez.

Ilustración 2: Influencia en el contenido de pasta en el asentamiento del hormigón



Fuente: Sika S.A., 2016

4.2.1.1 Cemento

El componente principal del hormigón es el cemento, por lo que es primordial hablar de los tipos existentes y sus usos.

El cemento es un compuesto formado por caliza, el cual, según Arredondo (1972), era todo producto, sea cual sea su composición y aspecto físico, que procede de la calcinación de piedras calizas; y otros minerales que permiten la absorción de agua y actúan de aglomerante de los otros componentes del hormigón.

Respecto de los tipos de cemento, se clasifican en:

- Tipo Portland: El más usado, se produce al pulverizar Clinker⁶ y sulfato cálcico.
- Hidráulico: Mezcla de Clinker, yeso y puzolana⁷.
- Para Albañilería: Mezcla de Portland con algún material que le entregue plasticidad (caliza⁸, cal hidráulica o hidratada).
- Cemento Blanco: Similar al Portland, con una resistencia menor, por lo que tiene usos más decorativos.
- Hidrofóbico: Realizado con base de Portland, pero con químicos que repelen el agua, por lo que su uso es en estructuras en contacto con el agua.
- Aluminoso: Mezcla mixta entre bauxita⁹ y caliza, con un resultado muy parecido a los cementos tradicionales, pero con elevada fuerza a corto plazo, por lo que desprende calor, usándolo en hormigonados a baja temperatura.
- Puzolana Portland: Mezcla de la pulverización de ambos compuestos, más sulfato de calcio o yeso, utilizándose en estructuras marinas y trabajos hidráulicos, debido a su resistencia a químicos y menor emisión de calor de hidratación.
- Expansivo: Es un potente agente fracturador no explosivo que funciona en todo tipo de rocas. Es fiable, seguro y respetuoso con el medio ambiente. No genera ruido, vibración ni proyección de roca. A diferencia de los cementos comunes el cemento expansivo actúa en base al incremento de volumen generado por la reacción con el agua, esta reacción produce una gran fuerza de rotura contra las paredes del espacio contenedor en un tiempo relativamente corto llegando a generar una fuerza de entre 80000 y 90000 [Ton/m²].

⁶ Elemento que se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C.

⁷ Materiales silíceos o aluminio-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento.

⁸ Roca sedimentaria formada principalmente por carbonato de calcio y que se caracteriza por presentar efervescencia por acción de los ácidos diluidos en frío. El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas.

⁹ Roca que puede ser tanto blanda como dura, compuesta por óxidos de aluminio hidratados.

4.2.1.2 Grava

La grava es un árido que se extrae de rocas de canteras, donde su tamaño varía entre 20 y 40 [mm]. Según el tamaño del árido es como se clasifica, como muestra la Tabla 1, según granulometría de áridos gruesos determinada por norma NCH163.

Tabla 1: *Granulometría de la Grava*

Tamiz		Grava 40 a 20 [mm]	Gravilla 20 a 5 [mm]	Arena
ASTM	[mm]			
2"	50	100		
1 1/2"	40	90 y 100		
1"	25	20 y 55	100	
3/4"	20	0 y 15	90 y 100	
1/2"	12.5	y	y	
3/8"	10	0 y 5	20 y 55	100
No. 4	5		0 y 10	95 y 100
No. 8	2.5		0 y 5	80 y 100
No. 16	1.25			50 y 85
No. 30	0.63			25 y 60
No. 50	0.315			10 y 30
No. 100	0.160			2 y 10

Fuente: Elaboración propia según Normativa NCh163

La grava no solo da resistencia, sino que también aumenta el volumen y disminuye el peso del hormigón, siendo de vital importancia el triturado de ésta. Por las propiedades que tiene este árido, es de gran interés de donde proviene la grava, buscando materiales resistentes, sólidos y de gran vida útil.

Para el hormigón la grava cumple variadas funciones. Primero que todo en la mezcla, como esqueleto de la misma reduciendo el contenido de pasta por metro cubico; entrega una capa de partículas que puedan resistir el actuar del desgaste o intemperie del hormigón, al permitir el drenaje de la misma; y minimiza los cambios de volumen que puede tener la pasta a través del fraguado, endurecimiento, humedecimiento y secado.

4.2.1.3 Arena

La arena es un tipo de árido que normalmente no supera los 5 [mm] de grosor. Este material compone en algunos casos casi el 60% de la mezcla para el hormigón, determinado según su tamaño por clasificación:

- Gruesa: entre 5 y 2 [mm].
- Media: entre 2 y 1 [mm].

- Fina: menos de 1 [mm].
- Limo: menos de 0,08 [mm].

La granulometría, tal como muestra la Tabla 2, indica la gradación que limita lo requerido del material en la mezcla.

Tabla 2: Granulometría de Arena

Tamiz U.S. Standard	Dimensión de la malla [mm]	Porcentaje en peso que pasa [%]
No. 3/8"	9,52	100
No. 4	4,75	95-100
No. 8	2,36	80-100
No. 16	1,18	50-85
No. 30	0,60	25-60
No. 50	0,30	10-30
No. 100	0,15	2-10

Fuente: Elaboración propia según Norma NCh 163.

4.2.1.4 Agua

El agua es un líquido esencial en la mezcla del hormigón, ya que le permite dar origen a su propiedad ligante. La hidratación del cemento es muy relevante, principalmente porque el agua excedente solo serviría para aumentar la fluidez de la pasta, y poder generar mayor flexibilidad y trabajabilidad. El agua adicional, al fraguar, crea porosidad, reduciendo la resistencia

El agua utilizada debe ser la misma que se utiliza para el consumo humano, sin sustancias alcalinas, aceites ácidos u otros agregados. El agua del fraguado busca mantener hidratado el hormigón, logrando mayor resistencia en él, por lo que no requiere ninguna especial.

4.2.1.5 Aditivos

Los aditivos que se le agregan al hormigón, son aquellos elementos en forma de polvo o líquido que se le agregan a la mezcla, para darle condiciones que no se obtienen con la mezcla pura. Los aditivos se pueden clasificar según los siguientes tipos:

- Retardadores de fraguado: Retarda el fraguado del hormigón.
- Aceleradores de fraguado: Adelanta el fraguado del hormigón para alcanzar elevadas resistencias en corto tiempo, disminuyendo el tiempo de desencofrado.
- Plastificantes: Mejora la docilidad en el hormigón y reduce el agua de amasado.
- Superplastificantes: Este aditivo es un súper reductor de agua, generando una consistencia fluida, no alterando la razón agua/cemento.

- **Inhibidores de corrosión:** Inhibe la corrosión de las armaduras insertas en el hormigón.
- **Incorporadores de aire:** Incorpora micro burbujas de aire que cortan los microcapilares que existen en el hormigón. Se utiliza generalmente en ciclos de hielo y deshielo.
- **Reductores de agua:** Reduce el agua de amasado, aumentando la resistencia mecánica del hormigón.
- **Fibras metálicas o de polipropileno:** Incrementa la resistencia del hormigón al impacto y a la fisuración.
- **Aditivo acelerador del endurecimiento:** Aditivo que aumenta la velocidad de desarrollo de resistencia inicial del hormigón.
- **Aditivo hidrófugo de masa:** Aditivo que reduce la absorción capilar del hormigón endurecido.
- **Aditivo multifuncional:** Aditivo que afecta a diversas propiedades del hormigón fresco y/o endurecido.

Los aditivos se incorporan a la mezcla en menos de un 5%, y son agregados cuando se dosifica y arma la mezcla.

4.2.2 Propiedades del Hormigón

Dependiendo de cuan fácil se deforma un hormigón, es como se encuentra su consistencia. Los factores más comunes que permiten esta situación son la cantidad de agua de amasado, la granulometría y la formación y tamaño de los áridos.

Algunas propiedades relevantes del hormigón:

- **Trabajabilidad:** Es la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación.
- **La densidad:** Es un factor muy importante a tener en cuenta para la uniformidad del hormigón, pues el peso varía según las granulometrías, humedad de los áridos, agua de amasado y modificaciones en el asentamiento.
- **Permeabilidad:** Es la capacidad que tiene un material de dejar pasar a través de sus poros un fluido; el hormigón, según se especifique su fabricación y dosificación, tendrá mayor o menor permeabilidad.
- **Durabilidad:** Capacidad de resistir el desgaste por ambiente o uso. Depende de los agentes agresivos, que pueden ser mecánicos, químicos o físicos; resistencia térmica; bajas temperaturas; el hielo / deshielo (deterioro mecánico); o altas temperaturas $>300^{\circ}$.
- **Resistencia y durabilidad:** El hormigón se utiliza en la mayoría de los edificios, puentes, túneles y presas por su gran fuerza y resistencia. Se ha comprobado que las estructuras de hormigón pueden soportar desastres naturales tales como huracanes o terremotos. El hormigón ofrece una gran durabilidad ya que no es debilitado por la humedad, el moho o las plagas.
- **Versatilidad:** El hormigón permite ser parte de construcciones como edificios, túneles, puentes, presas, pistas de aterrizaje, pavimentos de sistemas de alcantarillado e incluso en carreteras.

- **Baja necesidad de mantenimiento:** El hormigón no requiere mucho esfuerzo en su mantenimiento. Gracias a ser un material inerte, compacto y no poroso, no pierde sus propiedades con el tiempo.
- **Resistencia al fuego:** La resistencia al fuego es una de las características intrínsecas del hormigón.
- **Masa térmica:** Las paredes y suelos de hormigón se caracterizan por poner barreras al paso del calor. Esto significa que las salas con paredes de hormigón retienen mejor las temperaturas, y necesitan menos calor en invierno y menos refrigeración en verano, lo que supone un gran ahorro energético.

4.2.3 Características del Hormigón

- **Producción y utilización local:** El peso del hormigón dificulta su transporte. Eso hace que el lugar de producción y el de utilización no puedan estar muy lejos el uno del otro.
- **Fraguado del hormigón:** Durante el fraguado, se debe asegurar la humedad de él. Se le llama fraguado a la humectación que se realiza a la masa de hormigón. Se aplica con la masa por aspersión; o cubriendo con sacos mojados; como norma general, el fraguado debe prolongarse hasta obtener una resistencia del hormigón del 70 %, lograda generalmente a los 7 días.
- **Juntas de hormigonado:** Cuando la actividad de colocación del hormigón es pausada, se generan uniones entre el hormigón endurecido y el hormigón fresco; es necesario que las partes de junta sean las de menor demanda de resistencia, teniéndose que asegurar, al proseguir la operación, la continuidad de los elementos.
- **Desmolde:** Al final de la operación del hormigón, se retiran los encofrados o moldajes, viguetas de hormigonado, alzaprimas y demás elementos auxiliares, sin producir golpes o vibraciones que puedan dañar la estructura.

4.2.4 Tipos de Hormigón

- **Hormigón ordinario:** Material que se obtiene al mezclar cemento portland, agua y áridos de varios tamaños, superiores e inferiores a 5 mm, es decir, grava y arena.
- **Hormigón en masa:** Es el hormigón que no contiene en su interior armaduras de acero. Este hormigón solo es apto para resistir esfuerzos de compresión.
- **Hormigón armado:** Es el hormigón que en su interior tiene armaduras de acero. Este hormigón es apto para resistir esfuerzos de compresión y tracción.
- **Hormigón pretensado:** Es el hormigón que tiene en su interior armadura de acero especial tensionada a la tracción, esto se realiza previo al vertido del hormigón, de tal forma que al endurecerse la armadura de acero ya estará tensionada.
- **Hormigón postensado:** Es el hormigón que tiene en su interior una armadura de acero especial sometida a tracción. El tensado de la armadura es posterior al fraguado y endurecido del hormigón, anclando con posterioridad las armaduras al hormigón.
- **Hormigón autocompactante:** Es el hormigón que como consecuencia de una determinada dosificación y del empleo de aditivos súper plastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación.

- **Mortero:** Es una mezcla de cemento, agua y arena (árido fino), es decir, un hormigón normal sin árido grueso.
- **Hormigón ciclópeo:** Es el hormigón que tiene embebidos en su interior grandes piedras de dimensión no inferior a 30 cm.
- **Hormigón sin finos:** Es aquel que solo tiene árido grueso, es decir, no tiene arena (árido menor de 5 mm).
- **Hormigón aireado o celular:** Se obtiene incorporando a la mezcla aire u otros gases derivados de reacciones químicas, resultando un hormigón baja densidad.
- **Hormigón de alta densidad:** Fabricados con áridos de densidades superiores a los habituales. El hormigón pesado se utiliza para blindar estructuras y proteger frente a la radiación.

4.3 Hormigón Autocompactante

El hormigón autocompactante es un hormigón capaz de poder compactarse con la sola acción de la gravedad, sin el necesario vibrado que requiere el hormigón tradicional, permitiendo llenar los encofrados y escurriendo entre las armaduras. La consistencia de este hormigón es algo viscosa, característica que permite reconocerle junto con su fluidez.

Cuando se habla de un hormigón autocompactante, se añade a las prestaciones bien conocidas del hormigón convencional, o del hormigón de altas prestaciones, tanto en términos de resistencia como de durabilidad, aquellas específicas de la autocompactabilidad.

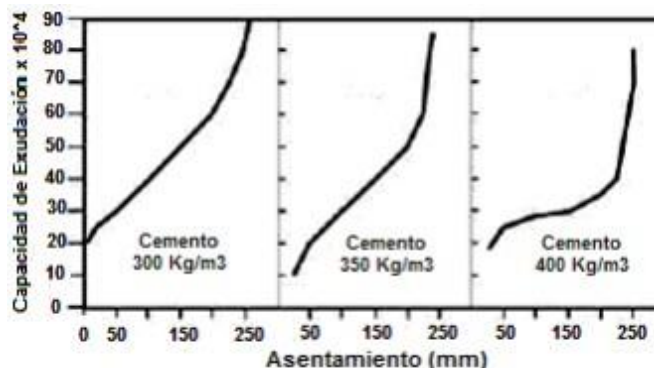
Okamura, propone este tipo de hormigón en 1986, el cual es llamado autocompactante luego de varios estudios, los cuales incluían la trabajabilidad del material. (Ouchi, 1999) [2]. Producto de estas investigaciones, en 1988, se logró obtener el primer hormigón autocompactante denominado “high performance concrete” (hormigón de altas prestaciones) (Okamura, 1997) [3], considerando que en su estado fresco era más adaptable. Al mismo tiempo este hormigón fue definido por Aitcin (Aitcin et al., 1989) [4] como de alta durabilidad debido a su baja relación agua/cemento, llevando a Okamura a cambiar el término “high performance concrete”, al de “self compacting high performance concrete”.

En un principio se pensó que sería fácil crear este nuevo tipo de hormigón debido a que el hormigón que se colocaba bajo agua era de uso común, donde se lograba inhibir estrictamente la segregación con la adición de grandes cantidades de agentes viscosos hechos de polímeros solubles en agua. Sin embargo, esto no pudo ser aplicado al diseño de mezcla de este nuevo hormigón por dos razones fundamentales, primero, las burbujas de aire atrapadas no podían ser eliminadas debido a la alta viscosidad y segundo, la compactación del hormigón en las áreas confinadas por las barras de refuerzo era difícil de llevar a cabo. Luego, en aquel entonces el hormigón que se colocaba bajo agua tenía un alto contenido de pasta, lo que traía como consecuencia problemas de retracción, alto calor de hidratación y también un alto costo (Bartos, 2000) [5].

Así mismo, en este tiempo había otras normativas del hormigón, por lo cual se recomendaba no aceptar mezclas con un asentamiento en el cono de Abrams superior a los 175 [mm], tal como lo indicaba el American Concrete Institute (ACI) en ese periodo,

principalmente porque la exudación del hormigón crecía a medida que se asentaba, como se muestra en la Ilustración 3.

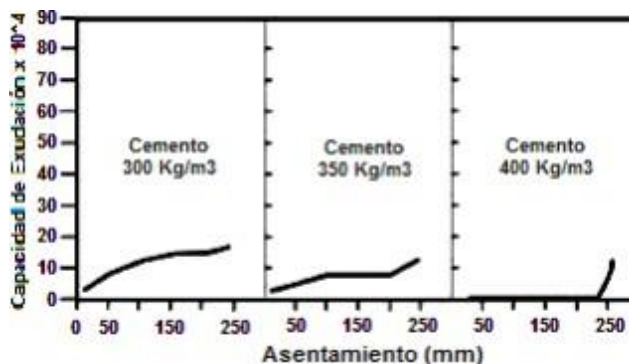
Ilustración 3: Exudación del hormigón sin aditivos



Fuente: Tecnología del hormigón, 2014.

Más adelante, con la llegada de los superplastificantes se pudieron diseñar mezclas de hormigón con un asentamiento superior a los 250 [mm] con una exudación prácticamente despreciable, como puede ver en la Ilustración 4

Ilustración 4: Exudación del hormigón con aditivos superplastificantes



Fuente: Tecnología del hormigón, 2014.

Es así como Okamura (1997) diseña un moldaje de metacrilato en forma de U para poder observar su fluidez y capacidad de atravesar obstáculos. En el interior de esta estructura se colocaron armaduras para simular las zonas confinadas de una estructura real. El hormigón se vertía por una de las columnas y se observaba como fluía a través del moldaje horizontal hasta subir por la otra columna, permitiendo esto, estudiar la fluidez de la mezcla [3].

Más tarde, Hashimoto desarrolla un experimento en la Universidad de Gumma, donde mostraba que el bloqueo del flujo a través de secciones estrechas ocurría como resultado del contacto del árido grueso. Para prevenir esto era necesaria una moderada viscosidad en la mezcla. El experimento consistió en utilizar polímeros en lugar de morteros y

moldajes transparentes de metacrilato para observar como los polímeros, que simulaban al árido grueso, fluían a través de obstáculos y subidas (Hashimoto et al., 1989) [6].

El resultado de este experimento mostró que el uso de superplastificantes era indispensable, ya que se lograba dar una gran fluidez a la pasta con poca pérdida de viscosidad. Por lo que una óptima combinación de relación de agua/cemento y superplastificante para lograr el hormigón autocompactante podía ser lograda si se fijaba el contenido de agregado del hormigón.

Es en este momento en que Okamura y sus colaboradores proponen un sencillo sistema de proporción de la mezcla, como muestra la Ilustración 5, donde el volumen del árido grueso se fija en el 50% del volumen de sólido del esqueleto granular, constituido por el árido fino y el árido grueso, mientras que el correspondiente al árido fino es el 40% del volumen de mortero, constituido por la pasta de cemento y los áridos finos. La relación agua/cemento en volumen se toma entre 0,9 y 1,0 dependiendo de las propiedades del cemento. Por último, la dosificación del superplastificante y la relación final agua/cemento se determina mediante ensayos de fluidez para asegurar la autocompactabilidad.

Ilustración 5: Proporción de contenido de árido grueso y fino



Finalmente, la condición más importante que se debe considerar para realizar la dosificación de un hormigón autocompactante es la de proporcionar la cantidad suficiente del conjunto formado por cemento, agua y finos de tamaño inferior a 0,125 [mm] contenidos en los áridos para alcanzar las características de autocompactabilidad; cabe destacar que a este conjunto de elementos se le suele llamar pasta.

El hormigón autocompactante tiene una mayor fluidez versus la del tradicional, con gran resistencia, permitiendo el hormigonado en áreas estrechas y densas sin dificultad, y sin la necesidad de aplicar medios de compactación internos o externos, manteniéndose estable y homogéneo.

Este tipo de hormigón se emplea comúnmente en geometrías complicadas, las cuales se dificulta realizar el vibrado o es imposible de hacerlo; en armados densos o compuestos; o en gunitados¹⁰, hormigón para túneles y superficies curvas.

4.3.1 Ventajas

- Permite un hormigonado fácil y rápido.
- Su compactación no requiere vibrado.
- Gran fluidez debido a los aditivos superplastificantes.
- Igual o mayor que un hormigón tradicional respecto de la flexibilidad en los diseños.
- Excelente acabado superficial por su fácil adaptación.
- Uniformidad en la aplicación.
- Alta resistencia.
- Mayor durabilidad y permeabilidad.
- Menor contaminación acústica en la obra.
- Menos mano de obra.
- Reduce el costo global de la obra.

4.3.2 Desventajas

- Gran control de dosificación, ya que es necesario ser muy riguroso en la mezcla para no perder sus propiedades, controlando los aditivos de la mezcla.
- Tiene un costo mayor a los otros hormigones.
- Especial cuidado en los moldes, ya que si no están bien cerrados facilitara roturas o huecos.

4.3.3 Materiales en la Fabricación del Hormigón Autocompactante

A pesar de que los materiales en sí son los mismos que se utilizan en el hormigón tradicional, se diferencia de estos por el uso de arenas finas o filler mineral, y la incorporación de aditivos superplastificantes, viscosantes y en algunos casos, incorporadores de aire.

- **Áridos:** Sirven tanto los áridos rodados como chancados, pero el límite del árido grueso suele ser determinado por su tamaño máximo a 20 [mm], estando entre 12 y 16 [mm] el tamaño más empleado. El árido rodado facilita el desplazamiento del hormigón en el molde mientras que el de chancado mejora su resistencia. El árido grueso debe tener una granulometría continua y un módulo granulométrico inferior a 2,5.

¹⁰ Sistema constructivo consistente en proyectar con un cañón (en inglés gun) o manguera a alta presión el hormigón, pudiendo construir sobre cualquier tipo de superficie, inclusive la tierra, con el objetivo de conseguir un muro continuo, con mayor resistencia y menor espesor.

- **Cemento:** Se pueden utilizar toda la variedad de cementos mencionados anteriormente, con y sin adiciones. Las dosificaciones suelen oscilar entre 350 y 500 [kg/m³]. Si la dosificación es inferior a 350 [kg/m³], es necesario incluir adiciones activas inertes que aumenten los finos de la mezcla. Por otro lado, si la dosificación es superior a 500 [kg/m³] hay que tener cuidado con la retracción.
- **Agua:** El uso de agua, suele rondar entre 150 y 200 [l/m³] y la relación agua/finos suele ser entre 0,9 y 1,05.
- **Filler:** Se requiere utilizar un filler inerte con el fin de corregir las fracciones más finas de la arena hasta conseguir que la cantidad de finos de tamaño inferior a 0,125 [mm] sea suficiente como para lograr la autocompactabilidad. Gracias al filler, el hormigón autocompactante tiene resistencias iniciales y finales muy importantes por su compacidad, en especial si es muy fino y calizo.
- **Adiciones:** Dentro de las adiciones utilizadas en la mezcla del hormigón autocompactante, están:
 - Ceniza volante: La ceniza volante son los residuos sólidos que se obtienen del carbón ardiendo que suelen ser muy finas, eliminando la ceniza a través de una serie de precipitadores mecánicos y electrostáticos. El uso de cenizas volantes como adición del hormigón comprende el ahorro económico que supone la reducción del cemento empleado y los cambios microestructurales motivados por la adición, generando un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro.
 - Humo de sílice: Elemento que se produce en la reducción de cuarzo, de elevada pureza, con carbón en hornos eléctricos de arco para la producción de silicio y ferrosilicio. Esta se utiliza fundamentalmente para conseguir hormigones de alta resistencia superiores a 50 [N/mm²].
- **Aditivos:** Son materiales que se añaden a la mezcla y que modifican el hormigón, algunas características del proceso de hidratación, el endurecimiento e incluso la estructura interna del hormigón. Los más utilizados en el hormigón autocompactante son:
 - Superplastificantes: Tiene por objetivo mejorar la trabajabilidad para un contenido de agua constante. Se utilizan: lignosulfonatos modificados, sales de condensado de melanina sulfonado y formaldehído, sales de condensado de naftaleno condensado y otros polímeros sintéticos.
 - Viscosantes: Aumentan la viscosidad de la pasta y su mecanismo consiste en adherirse tanto a los granos del cemento como a las moléculas de agua. Son polímeros de un mayor peso molecular que los superplastificantes, cuya característica principal son la forma del polímero y su grado de solubilidad.
 - Incorporadores de aire: Su uso en hormigones autocompactantes, permite la trabajabilidad gracias a que las burbujas de aire formadas en el hormigón fresco actúan al mismo tiempo como un fluido, aumentando la docilidad de la mezcla y gracias a su tamaño, entre 25 y 250 micrones, su mejor coeficiente de forma y su elasticidad, permiten un deslizamiento con mínimo roce.

4.4 Hormigón en Ambiente Marino

Las condiciones de exposición marítima, como la agresividad y humedad del ambiente marino, hacen necesario tener estructuras sólidas y duraderas. Es así como el hormigón es reconocido como un material con las características ya descritas, siendo uno de los preferentes para la estructuración en ambiente marino, considerado como el más sostenible y eficiente, aportando un mejor comportamiento en el tiempo, una menor inversión en mantenimiento y mejorando, en definitiva, la rentabilidad de las obras portuarias.

Hoy en día en Chile, se puede ver la utilización del hormigón tradicional en diversas obras, la mayoría en pisos, pilares, tabiques y cornisas; algún puente carretero o el borde costero de algunas ciudades; Sin embargo, el hormigón autocompactante aún no logra posicionarse como preferente al momento de llevar a cabo una obra marítima portuaria.

Algunas de las obras marítimas que se ejecutan con hormigón son:

- Rompeolas flotante
- Rompeolas exento
- Duques de alba
- Pontones flotantes
- Muelles de gravedad
- Pilotes
- Muros de gravedad
- Losas de muelles de acero

Claramente, el hormigón es el material que más se usa en las estructuras que tienen contacto con el agua. La información que se tiene sobre su comportamiento cuando está en contacto con este líquido, sea dulce o salado, le da la monopolización frente a obras importantes como diques y muelles.

Sin embargo, el hormigón ha debido ir cambiando a lo largo de los años, logrando adecuarse al material que es hoy. Ya es común ver construcciones en el agua que sean de hormigón tradicional, no obstante, se ha tenido que reformular desde las primeras experiencias para llegar hasta la actualidad.

4.4.1 Historia

Para poder comprender la evolución que ha tenido el hormigón en ambientes marítimos, se debe ver sus inicios. Se consideran éstos en la Antigua Grecia, cerca del año 500 a.C., donde se realizó una mezcla de cemento natural con caliza, agua, arena y algunas piedras molidas y tejas rotas.

El entramado comercial de la civilización griega tenía una sólida base asentada en la existencia de puertos (Yepes, 2012) [7] que permitían el movimiento de buques entre las diferentes polis griegas.

Como no existe un documento que pueda acreditar esta situación de forma paralela, permite pensar que posiblemente fuera la civilización griega la primera en utilizar el hormigón como material de construcción de sus puertos.

Documentos que, encontrados en Roma, se basan en la obra de Vitruvio, Los diez libros de la arquitectura, donde en su quinto volumen se habla específicamente de las construcciones en el mar, y se hace referencia a las obras portuarias. Los perfiles de diques y muelles mencionados en este texto se basan en tres: el dique – muelle vertical de hormigón en masa; el dique – muelle vertical de bloques de hormigón; y el dique vertical de paredes de sillería. Muchas veces estos perfiles eran parte de obras mucho más grandes, como lo es el puerto de la ciudad de Cesarea, en la costa de Israel.

Es así como los romanos supieron aprovechar muy bien las características del hormigón en sus construcciones, como la cúpula del Panteón de Agripa a 43 metros de luz, o los arcos del Coliseo Romano, pero también en construcciones que estaban en contacto permanente con el agua, como la red de alcantarillado o puertos que el imperio tenía en su territorio.

Los ingenieros civiles (Peña, 2001) [8] encargados de diseñar todo el sistema portuario romano tenían un amplio conocimiento del clima marítimo, los temporales y su frecuencia de presentación en la zona elegida para construir el puerto, optando por una tipología constructiva u otra dependiendo de las condiciones con las que se encontraban.

Luego de la caída del imperio romano, el hormigón dejó de ser usado como material de construcción, y así también las obras portuarias disminuyeron considerablemente debido a las nuevas distribuciones territoriales y la disminución del comercio marítimo.

Ya a finales del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, el hormigón vuelve a ser el protagonista de las construcciones, y actor principal de la ingeniería y arquitectura. El descubrimiento del cemento Portland en el 1824 ayudó notablemente en el aumento del uso de este material. Pero este no fue lo único que potenció su uso, otro de los avances que ayudaron fue la invención del hormigón armado en el año 1867.

En el siglo XIX vuelve la actividad portuaria como gran parte del comercio, por lo que se vuelve a potenciar la construcción de mejores infraestructuras para esta área. El paso de barcos de vela a de vapor; el auge del carbón y el hierro; entre otros permiten y dan paso a este crecimiento. Los puertos pasan de ser refugios a ser un espacio de comercio, intercambio, almacenaje de mercancías y reparación de buques, con grandes infraestructuras.

En la segunda mitad del siglo XIX, las obras de los puertos dejan de ser parte del Ministerio de Fomento y pasan a ser parte del Ministerio de Obras, dirigidos por ingenieros de caminos, canales y puertos, sustituyendo a los ingenieros de marina, permitiendo una mayor especialización y avance en las obras.

4.4.2 Obras Marítimas Portuarias

Como se indicó anteriormente, las obras marítimas son aquellas que se construyen bajo las influencias de la marea y el oleaje. Las obras marítimas se distinguen de las obras terrestres principalmente por las acciones a las que están sometidas, normalmente la energía del oleaje, calidad y temperatura del agua; y su ejecución en el mar permite optar técnicas para su ejecución como buzos, grúas, plataformas flotantes, entre otros.

Dentro de las obras marítimas de hormigón en Chile se encuentran:

- Puerto de Asmar.
- Muelle Melinka.
- Muelle y terminal en Mejillones.
- Rampa vehicular y explanada de acceso en Quenchi.
- Mejoramiento costero Estrecho de Magallanes.

4.4.3 Zonas de Exposición Marina

Es relevante poder determinar las zonas de exposición marina, dado el deterioro del hormigón a consecuencia de las temperaturas, mareas, presión hidrostática, entre otros y poder minimizar los efectos en la erosión de las estructuras a largo plazo. La clasificación de estas zonas se muestra en la Ilustración 6, y se detallan más adelante.

Ilustración 6: Tipos de exposición marina



Fuente: Tecnología del hormigón, 2014.

La vida útil del hormigón en zonas marinas depende de la degradación de este elemento contabilizando el periodo de iniciación y el periodo de propagación. El periodo de iniciación es aquel en el cual el cloruro alcanza los niveles de las armaduras, dependiendo

de la velocidad que tiene éstos en la penetración de la estructura. El periodo de propagación es el tiempo que tarda en fisurarse el hormigón, dada la cantidad de oxígeno que existe dentro de él, dependiendo del tipo de ambiente en el que está inserto.

4.4.3.1 *Atmosfera marina*

Zona situada por encima de la pleamar y con influencia hasta cinco kilómetros de la zona costera, por lo que no está en contacto con el mar, pero si obtiene sal procedente de la brisa marina y niebla. El nivel de cloruros disminuye al aumentar la distancia al mar, dependiendo del nivel del viento entre otros factores. El avance de absorción es mucho más lento que en otras zonas, y tarda mucho más tiempo en alcanzar las armaduras.

4.4.3.2 *Zona de salpicadura*

Zona de marea alta y recibe la humectación de la espuma y de las olas.

4.4.3.3 *Zona de mareas*

Zona comprendida entre la marea alta y baja, y donde el hormigón está en contacto con el mar constantemente, por lo que no llega a secarse. Aquí los cloruros avanzan lentamente por difusión, pero como no existe oxígeno en este espacio, no existe corrosión.

4.4.3.4 *Zona sumergida y enterrada*

Zona que se encuentra debajo de la baja mar, por lo que el hormigón está siempre sumergido, estando en contacto con el mar, donde está saturada y el agua se introduce a presión y por absorción. Aquí los cloruros pueden avanzar un poco más rápido debido a que el mecanismo de transporte es la permeabilidad, sin embargo, aquí no hay oxigenación.

4.5 Técnicas de Hormigonado

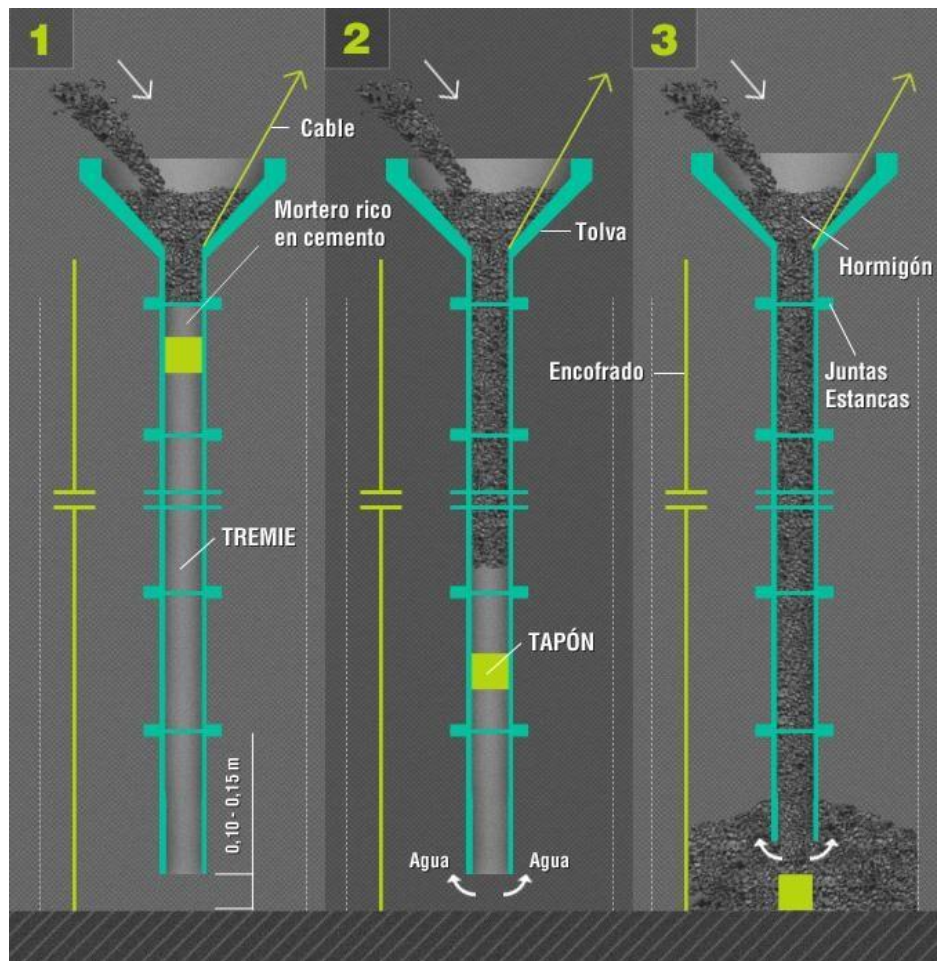
De acuerdo a las necesidades y requerimientos de las estructuras es que se han ido generando diversas técnicas de colocar el hormigón en los distintos moldes. A continuación, se desarrollarán algunas de ellas.

4.5.1 Tremie

Sistema que permite llenar el hormigón a través de un tubo vertical de acero, para mayor facilidad. El extremo del tubo siempre quedará dentro a tres metros dentro del hormigón. Con esta modalidad el hormigón cae por el tubo fácilmente compactándose por sí solo.

La tubería debe apoyarse en el fondo de la excavación y cuando comienza a llenarse, se comienza a elevar el tubo al menos un metro del suelo, como muestra la Ilustración 7

Ilustración 7: Sistema Tremie



Fuente: 360 grados en hormigón.

Esta técnica es usada en distintas estructuras como hormigones sumergidos, estructuras submarinas, reparaciones de hormigones sumergidos, construcción y juntas de secciones de túneles submarinos, columnas para fundaciones de estructuras tales como: puentes y plataformas de costa adentro.

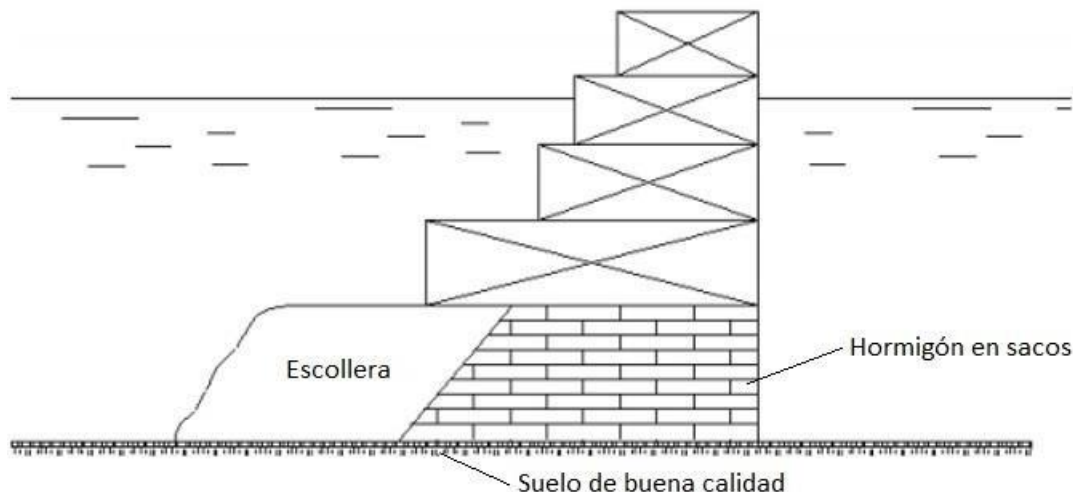
4.5.2 Ensacado

Método que sirve para construir plataformas bajo el agua o muros, como lo son los muros de muelles, utilizando un sistema, donde la arista más cargada se sujeta de un muro de sacos de hormigón, el cual transmite la fuerza a un fondo que se va cimentando.

Para poder realizar este sistema, se utilizan dos formas: la primera deja la mezcla del hormigón seca ensacada, se llena hasta la mitad y se cierra, luego se sumerge a través de pallets y se coloca en la estructura a través de un buzo, el cemento se hidrata y el agua penetra en el saco, como muestra la Ilustración 8. La segunda forma usa el hormigón con un asentamiento de cono bajo y plástico, los sacos deben ser de arpillería o yute, permitiendo ser flexibles para que entre ellos formen un cuerpo, llenándose hasta 2/3 de ellos. Los sacos deben estar empapados con una lechada muy clara antes de colocar la mezcla del hormigón; una vez completados se sumergen en pallets y se envuelven con una manga de polietileno, mientras un buzo sostiene el saco en posición y el otro extrae la manga.

Este método es muy adecuado, cuando el oleaje intenso no permite ocupar otra técnica.

Ilustración 8: Hormigón en sacos



Fuente: Hormigón, estructura y construcción náutica, 2015.

4.6 Normativa

4.6.1 NCH 170: 2016

El Instituto Nacional de Normalización (INN), es el organismo que tiene a su cargo la norma NCh 170:2016. Es el principal documento de referencia para la construcción y especificación del hormigón en Chile y ha sido preparada por la división de normas del INN. Esta norma fue actualizada el año 2016, dejando atrás la NCh 170:1985.

Dado que no existe ninguna norma específica respecto al hormigón autocompactante, si se puede hacer uso de la norma NCh 170:2016 como parámetro comparativo frente al hormigón tradicional.

La norma NCh 170:2016 especifica que para hormigones marítimos el grado de exposición es muy severo, clasificado como C2-2; este grado de exposición entrega un requisito del hormigón clasificado como G 35 (360 [Kg/m³]), con este requisito la profundidad de penetración de agua se clasifica como P2 (profundidad de penetración de agua ≤ 20 mm).

Respecto a la estructura de la normativa, se detallan a continuación, fundamentando la importancia de cada uno de ellos:

- Preámbulo: Punto donde se determina de que se tratará la normativa presente, indicando que los anexos A, B y C no son parte de la norma, sino que son solo títulos informativos. De acuerdo a las consideraciones, se ha tomado como base la Norma Chilena NCh170:1985 y su compatibilidad con la NCh430¹¹
- Hormigón: Requisitos generales: Se determinan los siguientes puntos:
 - Alcance y campo de aplicación: La norma aplica a hormigones de densidad entre 2000 y 2800 [Kg/m³] usados en hormigón simple y hormigón reforzado.
 - Referencias normativas: Se indican los documentos de los cuales tiene relación el presente y se referencian sin fecha, solo con la última publicación de ella.
 - Términos y definiciones: Se determinan los conceptos y definiciones para la aplicación de la norma presente.
 - Clasificación del hormigón por resistencia mecánica: El hormigón se clasifica en grados, ya sea respecto de la resistencia a compresión como la resistencia a tracción por flexión. Para esto se incluye la Tabla 3 y la Tabla 4, donde se detallan de los grados de lo mencionado anteriormente.

¹¹ Norma de diseño de hormigón armado, año 2007.

Tabla 3: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión

Grado	Resistencia especificada [MPa]
G05	05
G10	10
G15	15
G17	17
G20	20
G25	25
G30	30
G35	35
G40	40
G45	45
G50	50
G55	55
G60	60

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 4: Clasificación de los hormigones por resistencia a tracción por flexión

Grado	Resistencia especificada [MPa]
HF 3,0	3,0
HF 3,5	3,5
HF 4,0	4,0
HF 4,5	4,5
HF 5,0	5,0
HF 5,5	5,5
HF 6,0	6,0

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

- Requisitos y designación del hormigón: Se mencionan los parámetros de cuál es el hormigón que debe tener según la presente norma.
- Requisitos por durabilidad del hormigón: Conceptos generales de la durabilidad del hormigón.
- Especificación del hormigón por durabilidad: Se entregan directrices respecto de la durabilidad y requisitos.
- Requisitos de durabilidad debido a la acción de agentes internos: se menciona la cantidad máxima de sulfatos que pueden ir en el hormigón, detallados en la Tabla 5.
- Requisitos de durabilidad debido a la acción de agentes externos: Se mencionan requisitos para cuando el hormigón vaya a ser sometido a congelación y deshielo (Tabla 6), ataques externos de sulfatos (Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9), agentes que provocan corrosión (Tabla 10), y aquellos que requieren baja permeabilidad (Tabla 11).

Tabla 5: Contenido máximo de iones cloruro solubles en el hormigón

Tipo de hormigón	Contenido de iones cloruro solubles en agua [Kg Cl/m ³] de hormigón
Hormigón reforzado y hormigón en masa que contenga armadura	1,20
Hormigón pretensado	0,25

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 6: Requisitos del hormigón sometido a la acción de congelación y deshielo

Grado de exposición		Mínimo grado de resistencia especificado [MPa]	Aire total %	Tamaño máximo nominal del árido [mm]
F0	Hormigón no expuesto a congelación y deshielo	Sin restricción	Sin restricción	Sin restricción
F1	Hormigón expuesto a la congelación y deshielo y ocasionalmente expuesto a la humedad	G30	6,0	10
			5,0	20
			4,5	40
F2	Hormigón expuesto a la congelación y deshielo y en contacto continuo con humedad	G30	7,5	10
			6,0	20
			5,5	40
F3	Hormigón expuesto a la congelación y deshielo y en contacto continuo con humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	G35	7,5	10
			6,0	20
			5,5	40

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 7: Requisitos del hormigón en contacto con sulfatos

Grado de exposición	Mínimo grado de resistencia especificada	Dosis mínima de cemento [Kg/m ³]	Profundidad de penetración de agua según NCh2262 [mm]
S0	G17	-	-
S1	G25	320	<40
S2	G30	340	<30
S3	G35	360	<20

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 8: Grado de exposición por sulfatos

Grado		Contenido máximo de SO ₄	
		Soluble en el suelo % en peso	Disuelto en agua [ppm]
S0	No agresivo	<0,10	<150
S1	Moderada	0,10<SO ₄ <0,20	150<SO ₄ <1500 Agua de mar
S2	Severa	0,20<SO ₄ <2,00	1500<SO ₄ <10000
S3	Muy severa	SO ₄ >2,00	SO ₄ >10000

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 9: Requisitos del cemento para el hormigón en contacto con sulfatos

Grado de exposición	Requisitos del cemento	
	Porcentaje de expansión según ASTM C 1012	Contenido C ₃ A en el cemento %
S0	Sin restricción	Sin restricción
S1	0,10 a 6 meses	<8
S2	0,05 a 6 meses	<6
S3	0,05 a 6 meses	<5

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 10: Requisitos de hormigón según grado de exposición

Grado de exposición	Mínimo grado de resistencia especificado [MPa]	Dosis mínima de cemento [Kg/m ³]	Profundidad de penetración de agua, según NCh2262 [mm]
C0	G17	-	-
C1	G17	270	<50
C2-A	G20	300	<40
C2-B	G25	330	<30
C2-C	G35	360	<20

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

Tabla 11: Requisitos de profundidad de agua determinada según NCh2262¹²

Exposición		Profundidad de penetración de agua [mm]
Grado	Condición	
P0	Hormigón en ambiente seco o en contacto con el agua pero que no requiere baja permeabilidad	Sin restricción
P1	Hormigón en contacto con agua que requiere baja permeabilidad	<40
P2	Hormigón en contacto con agua que requiere baja permeabilidad y existe posibilidad de ataque químico no considerado en sub clausulas anteriores	<20

Fuente: Elaboración propia según NCh170:2016

- Requisitos de materiales constituyentes: Indica los requisitos de los compuestos del hormigón.
- Diseño de mezcla: Se refiere a la dosificación de los componentes del hormigón.
- Confección del hormigón: Determina el proceso de confección del hormigón.
- Transporte: Generalidades y plazos para el transporte del hormigón.
- Colocación: Equipos y procedimientos para la colocación del hormigón.
- Compactación: Determina que es la compactación.
- Curado y protección: Generalidades y plazos del fraguado.
- Desmolde y descimbre: Generalidades, plazos y paramentos del desmolde.

¹² NCh2262 Año 1997

5. METODOLOGÍA

5.1 Análisis del Hormigón Autocompactante

Durante la década de los años 80 en Japón, los problemas asociados a la falta de homogeneidad y, por consiguiente, pérdida de durabilidad del hormigón, tuvieron una gran importancia en numerosas estructuras. La principal causa de este problema fue asociada con una mala compactación del hormigón. En una situación de reducción de trabajadores calificados, la solución para el problema de durabilidad fue desvincular, en la etapa de vibración, la calidad del hormigón de posibles errores humanos.

Inicialmente, la tarea parecía fácil, pues ya se habían utilizado con éxito hormigones sin compactación en los hormigonados sumergidos, y en los hormigonados de recintos estancos. Sin embargo, la cantidad de cemento utilizada en estos casos era elevada, y normalmente este procedimiento se hacía para el hormigón en masa, es decir, sin la presencia de armaduras. Con la introducción de los aditivos superplastificantes fue posible el diseño de mezclas fluidas en estado fresco sin la necesidad de una elevada cantidad de cemento.

Como respuesta a estos problemas, se desarrolló el concepto de Hormigón Autocompactante (HAC), introducido inicialmente por Okamura en Japón en el año 1988. A partir de este período, numerosas investigaciones se han desarrollado en diferentes países, con el objetivo de encontrar una dosificación óptima y económica, que garantice un buen comportamiento del hormigón fresco, así como sus propiedades mecánicas (Skarendahl y Petersson, 1999 [9]; Ozawa 2001 [10]; Shah, 1985 [11].)

El rápido desarrollo experimentado, especialmente en elementos prefabricados, se debe a las importantes ventajas que presenta el HAC frente al hormigón convencional, debido principalmente a sus propiedades en estado fresco. Esto otorga a la posibilidad de realizar proyectos más complejos y exigentes en lo que respecta al diseño, y puesta en obra. Asimismo, presenta un valor reducido, pues el alto costo de material y moldaje que requiere este hormigón, se compensa con un menor costo de personal y maquinaria asociada a la compactación, además de la reducción de los plazos de ejecución de modo considerable.

Las ventajas del HAC también inciden en los aspectos medioambientales, al reducir los ruidos, especialmente en plantas de prefabricación, obras en entornos urbanos y sobretodo, en aspectos relativos al ambiente de trabajo y la salud laboral, mejorando las condiciones ambientales y eliminando los riesgos laborales imputables a la compactación. Sin embargo, la dosificación de este tipo de hormigón es más compleja que la de un hormigón vibrado debido a la necesidad de encontrar un equilibrio entre sus propiedades en estado fresco, las que dependen de la elevada trabajabilidad, la estabilidad después de transportado, y la capacidad de paso entre armaduras sin retención de los áridos. Una alta trabajabilidad, requiere un elevado volumen de pasta, el cual conduce a un incremento de la retracción y de la fluencia. Además, los diferentes materiales existentes en el mercado y sus diferencias entre distintas regiones geográficas, hacen el proceso de dosificación aún más complejo.

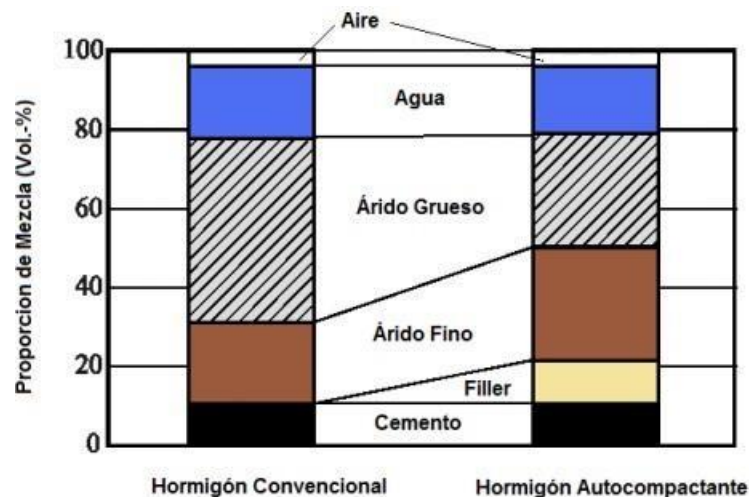
5.2 Análisis de los Componentes del Hormigón

Como se ha descrito en el marco teórico, el hormigón está compuesto por materiales comúnmente conocidos. Es sabido que la base del hormigón es agua, arena y cemento, sin embargo, la especificación de estos materiales es primordial en su composición.

El hecho de que los materiales que se usan en el hormigón tradicional y en el autocompactante sean básicamente los mismos trae ventajas económicas, ya que no se incurre en otros gastos de transportes o adquisiciones en una obra donde se utilicen ambos, no obstante, en la elaboración del hormigón autocompactante se utilizan componentes adicionales, tales como los agentes modificadores de viscosidad y los finos minerales, necesarios para evitar la segregación y exudación del hormigón durante su colocación y para obtener la cohesión necesaria de la mezcla.

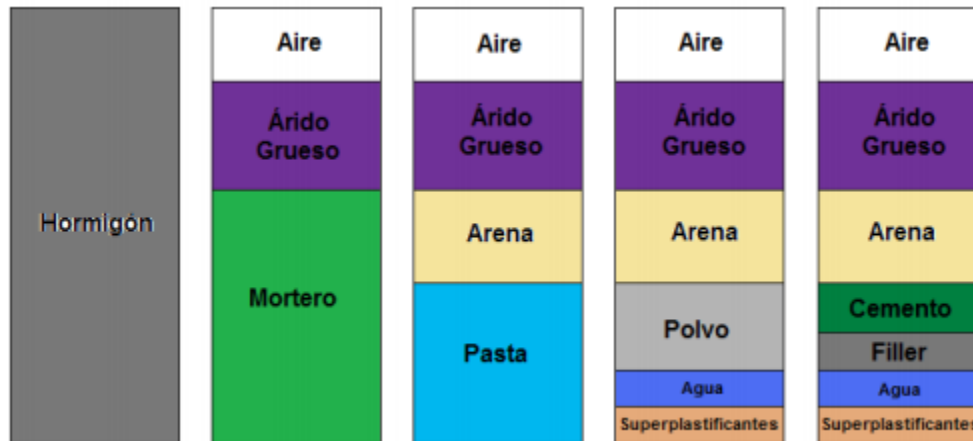
Respecto del cemento y los áridos a utilizar, no existen requisitos adicionales específicos en la mezcla tradicional, sino que se deben adicionar otros componentes como son los superplastificantes. Actualmente en el mercado, hay una gran gama de tipos, como se mencionó en el marco teórico. A grandes rasgos, en la Ilustración 9, se puede ver y comparar las proporciones entre el hormigón autocompactante y el hormigón convencional y en la Ilustración 10, la composición esquemática del hormigón autocompactante.

Ilustración 9: Proporciones de mezcla entre hormigón tradicional y autocompactante



Fuente: Elaboración según Holschemacher y Klug (2002).

Ilustración 10: Composición esquemática cualitativa del hormigón autocompactante



Fuente: Elaboración según Browsers y Radix (2005).

5.2.1 Cemento

El cemento a utilizar es normalmente el mismo que se utiliza en el hormigón convencional, por lo tanto, es un cemento sin requisitos específicos en cuanto a sus características o tipo. Se pueden usar todos los cementos que cumplan con la normativa UNE-EN 197-1¹³ para la elaboración del hormigón autocompactante (EFNARC, 2006)¹⁴. Los cementos convencionales más utilizados son CEM I 42,5¹⁵ y CEM I 52,5¹⁶ (Gettu y Agulló, 2004) [12], quedando condicionada su elección a las distintas necesidades de aplicación, (resistencia y/o durabilidad), tales como la necesidad de obtener resistencias altas a edades tempranas, resistencia a los sulfatos, limitar el contenido de AC3 del cemento al 10% para evitar problemas de trabajabilidad de las mezclas (EFNARC, 2002), o emplear cemento de bajo calor de hidratación, para minimizar los problemas de retracción que se puedan generar debido a la gran cantidad de finos presentes en el hormigón (Navarro y Esteban, 2003) [13].

Sin embargo, existen cementos no convencionales que por sus características son muy apropiados para elaborar hormigón autocompactante, como el cemento con alto contenido de belita (40%-70%) que hace que se obtengan mayores resistencias a largo plazo y un menor calor de hidratación [9]. Esto último es muy significativo, pues en la elaboración de hormigón autocompactante se utilizan generalmente grandes cantidades de cemento, lo cual favorece enormemente a la retracción y la consecuente fisuración del hormigón. De allí la importancia de utilizar un cemento de bajo calor de hidratación. Por otro lado, *“la utilización de cementos más finos, debido a su mayor velocidad de hidratación, contribuye a ganar resistencia en el hormigón”* (Neville, 1997) [14].

¹³ Normativa española para la Normalización, composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, del año 2011.

¹⁴ Federación europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos especializados para la construcción, originada el año 1989.

¹⁵ Cemento con resistencia máxima de 434 [Kg/cm²], según UNE-EN197-1.

¹⁶ Cemento con resistencia máxima de 535 [Kg/cm²], según UNE-EN197-1.

La cantidad de cemento utilizada para la elaboración del hormigón autocompactante, es generalmente mayor que la del hormigón convencional y oscila, de acuerdo a algunos investigadores e institutos de investigación, entre un mínimo de 350 [Kg/m³] y un máximo de 550 [Kg/m³] (Khayat et al., 1999) [15], (Gomes, 2003) [16]; (Fernández, 2007) [17]. Estas cantidades de cemento hace que se deba tener especial atención cuando sus contenidos se sitúen en los extremos, ya que cantidades mayores de 550 [Kg/m³] pueden aumentar considerablemente la retracción y el calor de hidratación y cantidades menores de 350 [Kg/m³], solo podrían tener un uso adecuado si se incluyen adiciones en la dosificación de las mezclas.

5.2.2 Áridos

Así como sucede con el cemento, en el caso de los áridos también se pueden ocupar los mismos que para el hormigón tradicional, a excepción de su tamaño, el cual no debe ser mayor de 20 [mm], no obstante, se han conocido ocasiones que se han utilizado tamaños máximos de árido de 30 y 40 [mm]. El objetivo de limitar el tamaño máximo del árido es obtener una mayor uniformidad en el movimiento y un menor riesgo de bloqueo en el flujo de la mezcla. En la prefabricación de elementos de hormigón, los mejores resultados se obtienen con un tamaño máximo del árido de 12 [mm].

Por otro lado, las partículas menores a 0,125 [mm], no se considerarán como parte de los áridos sino como parte del contenido total de finos del hormigón autocompactante y se tomarán en cuenta para el cálculo de la relación agua/finos. (EFNARC, 2006).

La granulometría y la forma de los áridos, especialmente la de los áridos gruesos, influye directamente en la capacidad de paso y en la fluidez de las mezclas del hormigón autocompactante. En la medida en que los áridos tiendan a ser esféricos, como los áridos rodados, menores serán los bloqueos y mayor la fluidez, ya que se reduce el rozamiento entre ellos. (EFNARC, 2006).

Dado que cualquier pequeño cambio en la dosificación de los hormigones autocompactantes puede alterar su comportamiento tanto en estado fresco como en su estado endurecido, es importante controlar los áridos de forma continuada y minuciosa, especialmente su contenido de humedad, ya que podría incidir en las propiedades y características del hormigón. (EFNARC, 2006).

Una de las características del hormigón autocompactante es que, por lo general, el contenido de árido grueso es menor o igual que el del árido fino, y también por regla general, menor al que se utiliza en el hormigón convencional (Bui et al., 2002) [18]. Siendo la relación árido fino/totalidad de áridos, de gran importancia en el hormigón autocompactante ya que sus propiedades mejoran al incrementarse esa relación (Su, 2002) [19]. Por otro lado, si el contenido de árido grueso en el hormigón autocompactante excede de cierto límite, la mezcla se bloqueará independientemente de la viscosidad de ella [3]. De hecho, es más efectivo reducir el volumen de árido grueso que disminuir la relación arena/pasta para incrementar la habilidad de paso de las mezclas por zonas densamente armadas [19].

5.2.3 Adiciones

Las adiciones son diversos tipos de finos que se usan en la mezcla del hormigón, con la finalidad de obtener características específicas, generalmente utilizados como material reemplazante del cemento con el fin de disminuir costos y mejorar la trabajabilidad de las mezclas. Quedan definidos por el tamaño máximo de sus partículas, las cuales varían normalmente entre 80 y 125 micras, (EFNARC, 2005) o menores de 125 micras (EHE-08)¹⁷. También se pueden clasificar como predominantemente inertes, tales como los filleres calizos, filleres de cuarzo, polvo de mármol o polvo de granito o predominantemente reactivas, como las puzolanas, las cenizas volantes, el humo de sílice, la cáscara de arroz y el metacaolín. Las adiciones más utilizadas son el polvo calizo, el polvo de cuarzo, el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias de alto horno.

El objetivo principal al utilizarlos, es el de proporcionarle a la mezcla la cohesión adecuada para evitar la segregación de los áridos gruesos y la exudación del agua durante su colocación, así como también mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como en su estado endurecido [16]. Mejoran el comportamiento de la microestructura interna del hormigón, aumentan la viscosidad de las mezclas y disminuyen su permeabilidad. Suministradas en cantidades apropiadas, mejoran tanto la trabajabilidad como la durabilidad, sin alterar las resistencias iniciales y mejorando en líneas generales sus propiedades mecánicas. (De Holanda, 2006) [20].

También permiten reducir el contenido de cemento de la pasta, pero incrementando su volumen para lograr la deseada trabajabilidad de las mezclas de hormigón autocompactante, disminuyendo de esta manera la retracción, el calor de hidratación y evitando la fisuración interna (Mata, 2004) [21].

La manera de actuar de los finos en la mezcla dependerá del tipo de adición utilizado. Si se utilizan finos como bentonita o humo de sílice, estos actuarán aumentando la capacidad de retener agua de la mezcla debido a su elevada superficie específica. Si se emplean finos como las cenizas volantes, cal hidratada, caolín o materiales de origen puzolánico, actuarán aumentando la tixotropía de la mezcla.

Entre los beneficios de utilizar adiciones minerales en la elaboración del hormigón, están los ambientales, pues cada vez que se esté utilizando una adición proveniente de un residuo industrial, se evita que el material vaya a directamente al ambiente, y también los económicos, debido a que pueden ser utilizados parcialmente como sustitutos del cemento, disminuyendo su dosificación y reduciendo el costo del metro cúbico de hormigón (Mehta y Malhotra, 1987) [22].

¹⁷ Instrucción Española del Hormigón Estructural.

5.2.3.1 Cenizas volantes

La constante búsqueda del rubro e industria de la construcción por elementos alternativos que entreguen nuevas cualidades a los cementos, además de ahorros energéticos, encontró en las cenizas volantes un poder puzolánico¹⁸ parecido al de los materiales naturales de origen volcánico que, adicionadas al cemento, son capaces de reaccionar con los productos de hidratación aportando nuevas propiedades al producto final, tales como hormigones más compactos, por lo tanto más impermeables y, en consecuencia, menos expuestos a agresiones de agentes exteriores y más durables.

Las cenizas volantes son *“un polvo fino sólido inorgánico que se recoge por precipitación electrostática o por captación mecánica de los residuos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbón pulverizado. Los diámetros de estas esferas pueden oscilar entre 1 y 150 [μm]”* (Christianto, 2004) [23], siendo *“los diámetros más típicos los menores de 20 [μm]”* (Druta, 2003) [24].

Las cenizas volantes que poseen propiedades puzolánicas, estando constituidas principalmente por dióxido de silicio (SiO₂) reactivo y trióxido de aluminio (Al₂O₃), son conocidas también simplemente como óxido de aluminio. El resto está compuesto por óxido férrico (Fe₂O₃), óxido de cal (CaO) y óxidos de azufre (SO₂ y SO₃).

Existen dos clases de cenizas volantes que son apropiadas para ser utilizadas en el hormigón. Estos dos tipos de cenizas volantes denominadas simplemente como Clase F y Clase C, poseen idénticas características físicas, distinguiéndose sin embargo por su composición química. La ceniza volante Clase F, es la más común y normalmente proviene del residuo quemado de la antracita o del carbón bituminoso, posee un bajo contenido de óxido de calcio (CaO), normalmente menor al 10 % y el óxido férrico constituye al menos un 70% de su peso total. Esta ceniza Clase F, es la que generalmente se utiliza como *“material reemplazante del cemento en los hormigones convencionales, con valores que oscilan entre un 15 y un 25% del total del material cementante”* (Hameed, 2005) [25].

El uso de las cenizas volantes en el hormigón generalmente logra mejoras en la estabilidad y en la trabajabilidad de las mezclas. Debido a la forma esférica de sus partículas, *“reducen también el calor de hidratación y mejoran la durabilidad del hormigón”* [25], aunque pueden retrasar el desarrollo de las resistencias iniciales, lo cual puede llevar a la utilización de aditivos aceleradores para compensar ese efecto. También pueden reducir la demanda de agua, especialmente si el diámetro de las partículas es muy pequeño, entre 1 y 5 [mm], las cuales se conocen como cenizas volantes ultra finas [23].

El uso de este tipo de adición hace que la permeabilidad del hormigón sea menor, lo que lo hace más durable. Esto es *“debido a que el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del silicato de calcio reacciona con las puzolanas generando silicatos de calcio hidratados adicionales, reduciendo el espacio de los poros capilares”* (Erdogan, 1997) [26].

¹⁸El comportamiento puzolánico o reacción puzolánica de un material aglomerante es su capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio para formar compuestos hidráulicos similares a los que se generan durante la hidratación del clinker del cemento.

El empleo de cenizas volantes en la elaboración de hormigón autocompactante, permite trabajar con cantidades de cemento más ajustadas debido a su puzolanidad, pero debe asegurarse que la cantidad de la ceniza sea la óptima, ya que altos contenidos de cenizas volantes pueden provocar una pasta con gran cohesión que haga disminuir su fluidez (EFNARC, 2006). Por otro lado, la utilización de cenizas con elevado contenido de residuo no quemado puede provocar manchas negras en la superficie del hormigón ya que éstos, por diferencia de densidades y apoyados por la elevada fluidez del hormigón autocompactante, emergen con facilidad a la superficie (EFNARC, 2006).

5.2.3.2 Filler

La caliza es uno de los más viejos materiales de construcción. Hace más de 5.800 años los egipcios la utilizaron en la construcción de la Pirámide de Giza. Posteriormente con la aparición de los primeros morteros y hormigones, la caliza se utilizó como árido para el hormigón y también como materia prima para esos primeros cementos (Zhou, 2006) [27].

Los filleres calizos, están compuestos principalmente de carbonato cálcico (CaCO_3) en forma de calcita (75-85%) y para su uso como adición en el hormigón deben estar libres de materia orgánica y arcilla. Su composición química es muy variada, dependiendo entre otras cosas de las condiciones medioambientales a las que haya estado sometida la capa o estrato del que se extrae. Los filleres calizos, al igual que en el caso de las cenizas volantes pueden ser utilizados en la elaboración del hormigón, tanto directamente en forma de adición a la mezcla o bien formando parte del mismo cemento.

Son ampliamente utilizados y su incorporación a la mezcla afecta favorablemente sus propiedades y su comportamiento, dando al hormigón excelentes propiedades reológicas, ayudando especialmente a mejorar la hidratación de la pasta, dándole también una mayor trabajabilidad, incrementando su deformabilidad y fluidez, asegurando la cohesión y apropiada viscosidad de la pasta, evitando la segregación de los agregados y reduciendo el rozamiento entre los mismos, mejorando la retención de agua, obteniéndose una menor capilaridad, menor permeabilidad, menor retracción [17] y un mejor desempeño frente a la fisuración [22].

Lo ideal es que su tamaño no exceda los 0,125 [mm] y en general es deseable que más de un 70% pase por el tamiz de 0,063 [mm]. Estos finos pequeños tienen la ventaja de mejorar la uniformidad de la distribución del tamaño de la partícula entre amasadas, generando un mayor control de la demanda de agua, siendo especialmente adecuados para el hormigón autocompactante, al compararse con otro tipo de adiciones, (EFNARC, 2006), especialmente por su costo y también por ser el más beneficioso para el medio ambiente [27].

Por otro lado, el uso de filler calizo en el hormigón hace que la resistencia inicial se incremente para hormigones con igual resistencia a 28 días. De la misma manera, en los hormigones autocompactantes que se elaboran con adición de filler calizo, *“la resistencia a los 28 días es ligeramente superior que en aquellos hormigones autocompactantes que no llevan ningún tipo de adición”* (Bosiljkov, 2003) [28]. Sin embargo, [15] sugiere en un estudio que el filler calizo no contribuye a la ganancia de resistencia en el hormigón autocompactante y que solo es principalmente usado para incrementar el volumen de pasta sin generar mucho calor.

Al igual que las cenizas volantes o cualquier adición mineral de similar finura en el hormigón, el filler calizo presenta un efecto de “relleno de huecos” debido a su granulometría. Éste efecto mejora la distribución de tamaños de poros y la compacidad, lo cual es beneficioso en términos resistentes y de durabilidad.

5.2.3.3 Humo de sílice

Este compuesto es un subproducto del silicio y del ferrosilicio, que se recoge en forma de humo mediante filtro electrostático al reducir en un horno eléctrico, cuarzo muy puro y carbón. Las partículas obtenidas son pequeñas esferas de muy pequeño diámetro ($< 0,5[\mu\text{m}]$), formadas principalmente por sílice muy reactiva y que al utilizarse como adición en la mezcla de hormigón actúa como una especie de “superpuzolana” proporcionándole al hormigón altas resistencias y una gran durabilidad. Sin embargo, sus características hacen que las mezclas de hormigón requieran grandes cantidades de agua, por lo que el uso de superplastificantes, que son reductores de agua de alto rango, sean imprescindibles [25].

La reacción puzolánica tiene lugar cuando el humo de sílice entra en contacto con el hidróxido de calcio formado por la hidratación de los silicatos de calcio del cemento, generando una matriz muy densa. Esta alta densidad en la matriz es debida a lo extremadamente pequeñas que son las esferas de micro sílice, donde se pueden conseguir entre 50.000 y 100.000 micro esferas por cada grano de cemento [24], proporcionándole a esta densidad, altas resistencias y gran durabilidad al hormigón.

Al igual que en el caso de las cenizas volantes y los filleres calizos, el humo de sílice puede ser usado en la mezcla del hormigón tanto directamente o como parte del mismo cemento. A principios de la década de los cincuenta, se realizaron los primeros estudios sobre el uso de humo de sílice como adición para el hormigón, sin embargo, fue solo a mediados de la década de los setenta, con la aparición de los primeros fluidificantes que se realizaron los primeros ensayos en países como Noruega, Suecia, Dinamarca e Islandia.

El uso combinado del humo de sílice y superplastificante es fundamental para la obtención del hormigón autocompactante, ya que suministra una gran cohesión a la mezcla en estado fresco y reduce la segregación. Sin embargo, si bien el humo de sílice puede mejorar la reología y estabilidad de la mezcla cuando se usa en bajas cantidades, aproximadamente entre un 4 y un 6% del contenido de cemento, puede tener efectos diametralmente opuestos sobre la reología y estabilización de la mezcla si se utiliza en grandes cantidades.

En lo que respecta a la influencia del humo de sílice en la resistencia a compresión y en la durabilidad del hormigón, llevaron a cabo una investigación en la cual elaboraron hormigones con porcentajes de humo de sílice que oscilaban entre 1 y 15%, con relaciones de agua/cemento entre 0,30 y 0,60 y con los mismos tipos de áridos. Los resultados indicaron que los hormigones que tenían entre un 5 y un 10% de humo de sílice, como material reemplazante del contenido total de cemento, poseían grandes resistencias a corto y largo plazo y la resistencia a compresión a los 28 días, después de

someter a los especímenes a ciclos rápidos de hielo y deshielo (ASTM¹⁹ C 666) fue entre un 20 y un 40% mayor que la del hormigón convencional.

Ray y Chattopadhyay (1999), llevaron a cabo una investigación sobre la resistencia a compresión y la resistencia contra agentes químicos (ácidos) en hormigones con adición de humo de sílice (4, 8, 12 y 16%) y en hormigones convencionales. El ensayo consistía en someter a unas muestras cúbicas de 50 [mm] de lado a una inmersión de 2% en ácido sulfúrico (H₂SO₄) durante 45 días. Los resultados obtenidos indicaron mayor pérdida de peso y de resistencia, hasta un 24%, en los hormigones convencionales y tan solo un 12% en los hormigones con un 4% de adición de humo de sílice, siendo menores las pérdidas de peso y resistencia a medida que el porcentaje de adición de humo de sílice aumentaba. (Ray y Chattopadhyay, 1999) [29].

5.2.3.4 Escoria de alto horno

La escoria de alto horno es un subproducto proveniente de la fundición del hierro en alto horno. Se le considera un producto no metálico, constituido esencialmente por silicatos de calcio y otras bases originadas durante la fundición. Se obtiene en forma de gránulos al enfriar rápidamente mediante chorro de agua el material remanente de la fundición (Cervantes y Roesler, 2007) [30].

Es un elemento hidráulicamente muy activo, muy fino y con bajo calor de hidratación. Se podría decir, incluso, dadas sus características, que es un verdadero cemento, la desventaja es que fragua y endurece muy lentamente, lo cual se corrige al combinarse con el clinker. Sin embargo, mejora la trabajabilidad de las mezclas debido a su suave textura y a su alta densidad, pero no en la misma proporción que las cenizas volantes. Generalmente las mezclas de hormigón con escoria de alto horno tienen un tiempo de fraguado mayor, lo cual podría ser ventajoso porque permite tener mayor tiempo para su colocación, pero una desventaja cuando se requieran ciertas resistencias a edades tempranas, como en el caso de la prefabricación. Si bien las resistencias iniciales son menores, la resistencia a los 28 días es superior, alrededor de un 25%, que en hormigones elaborados con cemento Portland normal y sin este tipo de adición. (Hale et al., 2000) [31].

Una vez más y al igual que en el caso de las cenizas volantes, los filleres calizos y el humo de sílice, la escoria de alto horno puede ser utilizada en la elaboración del hormigón tanto directamente, en forma de adición a la mezcla, o bien formando parte del mismo cemento.

El grado de reactividad de las escorias de alto horno puede variar ampliamente de una escoria a otra y por ello no es confiable relacionar la composición de la escoria con su reactividad [15]. La escoria de alto horno reacciona con el agua lentamente pudiendo incluso tomar varios meses para alcanzar la resistencia equivalente a 28 días de un hormigón elaborado solamente con cemento Portland [24]. Esto trae como consecuencia que se obtengan resistencias a edades tempranas menores, pero que se consigan mayores resistencias últimas que en los hormigones elaborados únicamente con cemento Portland [25].

¹⁹ Sigla de la American Society for Testing and Materials.

5.2.4 Agua

Como también sucede en el hormigón tradicional, el agua que se necesita en este tipo de hormigón debe de estar limpia y libre de impurezas para no producir alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en el fraguado y en su endurecimiento, ni permitir reducciones en sus resistencias o afectar su durabilidad. Se busca que el agua, además de hidratar el cemento, es de actúe como lubricante haciendo que la masa en estado fresco sea trabajable y también la de crear espacios en la pasta para albergar los productos resultantes de la hidratación del cemento.

La limpieza del agua es muy importante, ya que algunas impurezas presentes en el agua, como los cloruros, pueden dar lugar a eflorescencias en el hormigón y provocar la corrosión de las armaduras. Existen aguas potables, a excepción de algunas aguas minerales, que son aptas para el amasado del hormigón, aunque pueden existir aguas no potables que sean aptas para la elaboración del hormigón. Por regla general las aguas que son inodoras, incoloras e insípidas y que no forman espumas o gases cuando son agitadas, pueden ser utilizadas como aguas de amasado para el hormigón. Sin embargo, deberán evitarse aquellas aguas que contengan azúcares, taninos, materia orgánica, aceites, sulfatos, sales alcalinas, gas carbónico, así como productos procedentes de residuos industriales [17].

Según Yenes (2015) [32], por cada litro de agua de amasado añadido a más de un metro cúbico de hormigón equivalen a dos kilogramos de cemento, por lo que se debe ser más estricto con las características del agua de fraguado que con las de amasado en el hormigón. El agua de mar sólo se puede usar para el hormigón en masa, nunca para el armado ni tampoco para hormigones que estén en contacto con el agua de mar. Nunca usar agua de mar para el amasado del hormigón en obras marítimas. Para hormigones de alta resistencia, la EHE recomienda que el árido grueso tenga un tamaño máximo no superior a 20 [mm], ya que cuanto mayor sea el tamaño máximo del árido, menor necesidad de cemento y agua en la mezcla, pero se limita por separación armaduras.

5.2.5 Aditivos

Los aditivos son productos (orgánicos e inorgánicos) que, introducidos en pequeñas cantidades en el momento de la fabricación del hormigón, permiten modificar alguna de sus propiedades originales. Se presenta en forma de polvo, líquido o pasta y la dosis varía según el producto y el efecto deseado, respetando las indicaciones del fabricante, las dosis varían entre 0,1% y 5% del peso del cemento.

Generalmente se emplea diluidos en el agua de amasado o directamente se incorpora a la mezcla, aunque en el caso de algunos productos en polvo, se refiere que sean agregados directamente al cemento. Su empleo se ha ido generalizando hasta el punto de constituir actualmente a un componente habitual del hormigón.

Los aditivos tienen una función principal que se caracteriza por producir una modificación determinada, y solamente una, de alguna de las características del hormigón, mortero o pasta, pudiendo tener, además, una función secundaria y accesorio de modificar alguna o

algunas de las características de los materiales, independientemente de la que defina la función principal. A estas funciones se les podrían denominar también indicaciones.

Las dosis de aditivos en el hormigón son muy importantes, pues no hay que esperar que, a doble dosis corresponda al doble de efecto ni a mitad de dosis tenga mitad de acción. Con determinados aditivos puede darse, además, el caso de que sobrepasar ciertas dosis se muy contraproducente para el hormigón, hasta incluso puede traer efectos contrarios a los deseados.

Actualmente el empleo de los aditivos en los morteros y hormigones ha experimentado un gran incremento como consecuencia de la mejor calidad de los mismos. Puede decirse que, un porcentaje muy elevado del hormigón que se fabrica, lleva incorporado algún tipo de aditivo y que, si estos son de calidad y están correctamente empleados, permiten conseguir hormigones dóciles, resistentes, durables y económicos.

Por ultimo cabe indicar que nunca un aditivo convertirá a un hormigón malo a un hormigón bueno, pero si podría conseguir que un hormigón bueno sea mejor (Cortés, R, 2012). [33]

5.2.5.1 Clasificación de los aditivos

Existen diversos criterios para su clasificación.

Tabla 12: La norma ASTM C494 “Chemical Admixtures for Concrete” distingue siete tipos:

Tipo	Aditivo
A	Reductor de agua
B	Retardador de fraguado
C	Acelerador de fraguado
D	Reductor de agua y retardador de fraguado
E	Reductor de agua y acelerador de fraguado
F	Reductor de agua de alto rango y mezcla
G	Reductor de agua de alto rango y retardador de fraguado

Fuente: Elaboración propia, según norma ASTM C494.

Nota: Los aditivos incorporadores de aire se encuentran incluidos en la norma ASTM C260 “Specifications for Air Entraining Admixtures for Concrete”.

Tabla 13: La norma chilena NCh 2182. Of 95 establece la siguiente clasificación:

Tipo	Aditivo
A	Plastificantes
B	Retardadores de agua
C	Aceleradores
D	Plastificantes y retardadores de agua
E	Plastificantes y aceleradores de agua
F	Superplastificantes
G	Superplastificantes y retardadores de agua
H	Incorporadores de aire

Fuente: Clasificación de los aditivos según norma chilena.

5.2.5.2 Aditivos plastificantes – Reductores de agua

Se definen como aditivos que permiten, para una misma docilidad, una reducción de la cantidad de agua en un hormigón dado, o que para una misma cantidad de agua aumentan considerablemente esa docilidad.

El aumento de la docilidad permite el hormigonado en estructuras complejas, con una alta densidad de armaduras o con efectos superficiales especiales sin necesidad de incrementar la cantidad de agua de amasado, y por consiguiente la dosis de cemento para obtener las resistencias especificadas.

La disminución de la dosis de agua y en consecuencia de la relación a/c, manteniendo una determinada trabajabilidad, permite aumentar la compacidad del hormigón y, por consiguiente, su resistencia, impermeabilidad y durabilidad. Por la misma razón, la retracción y en consecuencia, la tendencia a la fisuración se ven disminuida.

La acción de los aditivos plastificantes puede ser causada por el efecto combinado de acciones de tipo físico, químico y físico-químico, dependiendo de la preponderancia de alguna de ellas en su composición.

La acción física deriva principalmente de la incorporación de aire que producen algunos aditivos, cuyas burbujas actúan como una especie de rodamiento entre las partículas sólidas, disminuyen la fricción interna.

La acción química proviene principalmente de una disminución de la velocidad de hidratación de los constituyentes del cemento, especialmente de los aluminatos. Se obtiene de este modo una acción más completa (mejor mojado) de los granos de cemento, lo que permite también disminuir el roce interno entre partículas.

La acción físico-química la producen los compuestos tensoactivos²⁰, productos orgánicos capaces de rebajar la tensión superficial o interfacial de los líquidos y en partículas de agua.

Los efectos dependen tanto del tipo de aditivo como de su dosis, de los cuales se mencionan:

- Efectos sobre la trabajabilidad: El principal efecto producido por los aditivos plastificadores – reductores de agua incide sobre la trabajabilidad del hormigón en su estado fresco. Este efecto puede traducirse en una reducción de agua, si se mantiene constante la docilidad o fluidez del hormigón, o en un aumento de su docilidad, si se mantiene constante la dosis de agua del hormigón.
- Efectos sobre el tiempo del fraguado: En algunos productos tiene efecto retardador, el que puede ser muy notorio en caso de sobredosis.
- Efectos sobre la incorporación de aire: Estos productos tensoactivos tienen tendencias a producir incorporación de aire, aunque este efecto no siempre se manifiesta en un incremento de la cantidad total de aire en el hormigón, sino en un cambio en su forma.

²⁰ Que modifican la tensión superficial del líquido en el que se halla el disuelto.

- Efectos derivados de la reducción de la dosis de agua: Esto permite obtener un aumento de cohesión del hormigón, con el cual se reduce la tendencia a la segregación e igualmente a la exudación²¹.
- Efectos sobre la resistencia: Las resistencias mecánicas pueden verse ligeramente aumentadas, aun cuando se mantenga constante la relación a/c, debido a la dispersión e hidratación más completa de los granos de cemento.

5.2.5.3 Aditivos Superplastificantes o Fluidificantes

Corresponde a una nueva generación de aditivos plastificadores en base a productos melaminicos o naftalinicos, constituyendo una evolución en los aditivos reductores de agua en que la absorción y capacidad de dispersión del cemento es mucho más acentuada.

Esto se traduce en un enorme aumento de la trabajabilidad del hormigón, sin modificar la cantidad de agua. El resultado es un hormigón muy fluido (autocompactante), de baja tendencia a la segregación.

Pueden utilizarse también como reductores de agua, siendo posible en este caso, dado su apreciable efecto, alcanzar disminuciones en la cantidad de agua entre 20-30%. Ello permite obtener un fuerte incremento en las resistencias, principalmente en las primeras edades, por lo que pueden analizarse como aceleradores de fraguado o aditivos para hormigones de alta resistencia.

En el modo de acción de los superplastificantes pueden considerarse tres etapas:

- Hidratación del cemento: La mezcla de agua con cemento inicia una reacción química, la hidratación. El agua es parcialmente absorbida por las partículas de cemento, y la superficie de estas se reblandece rápidamente. Finas capas de gel crecen alrededor de las partículas de cemento. Estas capas de gel con el tiempo se solidifican y se convierten en la pasta de cemento endurecida.
- Efecto dispersante: Las moléculas de aditivo, después de la mezcla, son atraídas por las partículas de cemento reblandecidas y las rodean rápidamente. Este proceso incrementa las cargas negativas de la superficie de las partículas de cemento y causa una repulsión electroestática. El resultado es un aumento en la dispersión de las partículas de cemento.
- Efecto estérico: Las moléculas del aditivo tienen largas cadenas laterales. Estas cadenas provocan impedimentos estéricos que facilitan enormemente que las partículas de cemento se mantengan alejadas unas de otras, es decir, generan un excelente efecto dispersante.

Efectos: Los superplastificantes se emplean en dosis mayores que los plastificadores reductores de agua y pueden ser agregados al final del amasado sin diluir previamente en el agua. El efecto obtenido es un aumento de la fluidez de la pasta por disminución de su viscosidad propia, tal como si se disminuyera su densidad, pero sin aumento en la cantidad de agua. La mejora de la fluidez de la pasta conlleva, en las etapas posteriores del hormigón, un aumento en las propiedades con respecto al hormigón de igual relación a/c y sin el aditivo.

²¹ Ascenso del agua de amasado de una mezcla de hormigón durante el fraguado.

Cuando los aditivos fluidificantes se emplean como reductores de agua se obtiene un incremento de algunas características del hormigón endurecido, especialmente de su resistencia, durabilidad e impermeabilidad.

Por otra parte, debido a que no se produce incorporación de aire, el efecto en las resistencias es superior al obtenido con los plastificantes – reductores de agua, especialmente en las primeras edades, lo que resulta muy conveniente para su empleo en hormigones pretensados, prefabricados y obras en que se requiere desarrollo rápido de resistencia (Rojas Batarce R., 2002) [34].

También existen los superplastificantes basados en policarboxilatos, estos actúan sobre las partículas de cemento no permitiendo la floculación, mediante repulsión electrostática y entregando a la pasta de cemento una alta fluidez y una elevada capacidad de dispersión, la cual se debe mantener el tiempo necesario para permitir al hormigón que sea transportado, colocado y suministrado [15]. Esta alta fluidez que se consigue en la pasta con el superplastificante se logra con una mínima disminución de su viscosidad si se compara con el drástico descenso de ella si la fluidez se buscara añadiendo agua a la mezcla [12].

Por otro lado, está el hecho que producir un hormigón con menor cantidad de agua, mediante el uso de estos aditivos, significa lograr mayores resistencias, menor permeabilidad y hormigones más duraderos (De la Peña Riquelme, B. 2000) [35].

La cantidad de superplastificante que se debe emplear en la elaboración del hormigón autocompactante no es fácil de fijar, pues el comportamiento del cemento y del aditivo depende de sus propias características. Esto conlleva a que no se puedan fijar regulaciones debido a la variedad de tipos de superplastificantes y de cemento que se encuentran en el mercado, así como las relaciones dispares que pueden existir entre ellos.

5.3 Propiedades del hormigón tradicional y hormigón autocompactante

5.3.1 Resistencia

La resistencia es la propiedad del hormigón de mayor referencia a la hora de su caracterización. En primer lugar, debido a que, si se compara con los ensayos de las otras propiedades del hormigón, la determinación de la resistencia a compresión es más fácil de ser llevada a cabo. En segundo lugar, la determinación de la resistencia a compresión puede ser una medida de la calidad del hormigón dado que está relacionada con la estructura interna del material [14]. De esta forma, conociendo su valor es posible obtener un estimado del desempeño del hormigón, tanto de sus propiedades mecánicas como de su durabilidad.

La NCh 170: 2016 clasifica a los hormigones por resistencia a compresión o resistencia a tracción por flexión y establece grados de exposición, junto con los requisitos para especificar el hormigón por durabilidad.

Según [22], la resistencia a la compresión no depende solamente de la sollicitación a la cual estará sujeta la probeta de hormigón, sino también de una serie de factores, internos y externos que pueden afectar el resultado obtenido durante el ensayo.

Las características de los áridos pueden también jugar un rol importante en la resistencia a compresión. La resistencia de los áridos está íntimamente ligada a la resistencia del hormigón. El tamaño, la forma, la angularidad, textura y mineralogía pueden afectar la calidad, las condiciones de la zona de interface y la adherencia entre la pasta y el árido. Aunque áridos grandes requieren menos cantidad de agua en las mezclas que los áridos pequeños, la zona de transición alrededor de los áridos grandes es más débil, dando como consecuencia bajas resistencias a compresión. La textura rugosa y las formas angulares de los áridos tienden a mostrar mejoras en la adherencia con la pasta de cemento. Por otro lado, el uso de áridos calcáreos generalmente resulta en un incremento relativo de la resistencia a compresión con respecto a los áridos silíceos [3].

Otros factores principales que afectan la resistencia a compresión son el uso de adiciones, el tipo de cemento utilizado, el uso de aditivos, la cantidad de aire ocluido en la mezcla y las condiciones de fraguado [22].

Respecto de la resistencia a compresión del hormigón autocompactante y el hormigón convencional están entre otros, Horst y Dusseldorf (1999) [36], quienes ensayaron probetas de ambos hormigones con una relación de agua/cemento de 0,55. Además, si bien el hormigón convencional y el hormigón autocompactante se desarrollan en similares resistencias a compresión, éste último presenta una mayor durabilidad. De igual manera [2] se concluye que la resistencia a compresión del hormigón autocompactante no difiere con la del hormigón convencional cuando sus dosificaciones poseen la misma proporción en sus materiales y una misma relación agua/cemento.

Entre quienes encontraron mayores resistencias a compresión en el hormigón autocompactante respecto al hormigón convencional, están Heirman y Vandewalle, (2003) [37], quienes ensayaron hormigones autocompactantes con distintos tipos de adiciones, entre ellas las cenizas volantes y los filler calcáreos, en dosificaciones con igual relación agua/cemento, encontrando una mayor resistencia a compresión en el hormigón autocompactante con respecto al hormigón convencional. Klug y Holschemacher (2003) [38], encuentran, por un lado, que el desarrollo en el tiempo de las resistencias a compresión del hormigón autocompactante y del hormigón convencional son similares, sin embargo, para una relación agua/cemento dada, el hormigón autocompactante presenta mayores resistencias a compresión. También se encuentran investigaciones, donde una mayor resistencia a compresión en el hormigón autocompactante que en el hormigón convencional [24].

Así mismo Mata [21], encuentra mayores resistencias a compresión en los hormigones autocompactantes que en los hormigones convencionales, debido al mayor contenido de cemento de los primeros.[38], hace hincapié en el hecho de que las diferencias en las resistencias entre ambos hormigones, para una misma relación agua/cemento, están más marcadas cuando las resistencias a compresión son altas, concluyendo que esto es debido a las bajas relaciones agua/finos por la presencia de adiciones en el hormigón autocompactante.

Por otro lado, EFNARC (2005), indica que las causas de que se encuentren mayores resistencias a compresión en el hormigón autocompactante que en el hormigón convencional, están por un lado en la ausencia de vibración durante su colocación, lo cual

mejora la adherencia entre el árido y la pasta y, a una mejor y mayor dispersión de las partículas de cemento en la pasta por el uso de los agentes reductores de agua de alto rango. Assie, (2007) [39], encuentran *“para el caso específico de bajas resistencias a compresión (20 [MPa]), que la resistencia a compresión en el hormigón autocompactante es un 21% superior a la del hormigón convencional a iguales relaciones agua/cemento”*.

Concluyen que, el uso de filler calizo como adición y la gran cantidad de superfluidificante empleado puede explicar este hecho. Collepari, 2007 [40], encuentra también, que la resistencia a compresión en el hormigón autocompactante es mayor que en el hormigón convencional.

Así mismo, consigue una resistencia a compresión un 20% mayor a una relación agua/cemento de 0,45. Según él, debido a la actividad puzolánica de algunas adiciones como las cenizas volantes. Por otro lado, también encontró que, adiciones sin actividad puzolánica como los filleres calizos, aumentaban también la resistencia a compresión del hormigón autocompactante, concluyendo que eso podría estar relacionado con un cambio en la microestructura de la matriz de cemento causado por las pequeñas partículas que conforman el filler calizo. Concluye también que, ese cambio en la matriz de cemento hace que los hormigones autocompactantes posean una mayor resistencia de adherencia con el acero que los hormigones convencionales.

De igual forma Koehler y Fowler, (2007) [41], encuentran que, hormigones convencionales y hormigones autocompactantes, con proporciones similares de a/c, pero diferentes trabajabilidades (debido entre otras cosas a la utilización en el hormigón autocompactante de reductores de agua de alto rango), con la consecuente utilización de menor cantidad de agua de amasado y, por lo tanto, una reducción en la relación agua/cemento, genera una resistencia a compresión ligeramente más alta en el hormigón autocompactante que en el hormigón convencional.

Finalmente, Coppola, L, (2000) [42], lleva a cabo ensayos de resistencia a compresión en dos muestras de hormigón convencional con relaciones agua/cemento de 0,40 y 0,60 y en cuatro mezclas de hormigón autocompactante, dos con cenizas volantes y dos con filler calizo también con relaciones agua/cemento de 0,40 y 0,60 para cada tipo de adición empleada. Las proporciones de las mezclas fueron aproximadamente las mismas, el contenido de cemento y el contenido de agua se mantuvieron constantes, concluyendo que *“efectivamente en líneas generales, la resistencia a compresión en el hormigón autocompactante tiende a ser mayor que en el hormigón convencional para una misma relación agua/cemento”*. Los resultados de Coppola y colaboradores indican que esto se logra *“independientemente de la adición mineral seleccionada, cenizas volantes o filler calizo, en la dosificación del hormigón autocompactante. En ambos casos la porosidad y el microagrietamiento de la zona de interfase es menor que en la del hormigón convencional y su microestructura mucho más densa”* (Coppola, L. 2000). [42].

5.3.2 Impermeabilidad

Un hormigón con una baja permeabilidad incrementa la durabilidad del hormigón y colabora en la protección de las armaduras frente a la corrosión. Lo anterior se puede evaluar por medio de ensayos de desempeño del hormigón realizados en laboratorio y/o terreno.

Respecto de los ensayos de permeabilidad en el hormigón autocompactante, se puede ver en la Tabla 14, que este tipo de hormigón adicionado con 50% de lodo calcáreo (CALC²²-1) es el que presenta el mayor porcentaje de poros totales, seguido por CACC²³-2 y CALC-2, y por último el que presenta menor porosidad total es el concreto autocompactante con 50% de caliza comercial molida (CACC-1). Este comportamiento puede ser atribuido a la relación agua/cemento y al contenido de aditivo superplastificante, ya que en el CALC-1 se utilizó la mayor proporción de agua y aditivo comparado con el resto de hormigones autocompactantes, lo cual se reflejó en la porosidad y en el desempeño mecánico de estos hormigones. Caso contrario se presentó en los hormigones en los que se utilizaron relaciones agua/cemento menor. Esto lógicamente está asociado a los cambios microestructurales de la pasta de cemento, siendo menos porosa cuanto menor es la cantidad de agua utilizada en la dosificación.

Tabla 14: Ensayos de permeabilidad²⁴

Propiedades de permeación		CACC-1	CACC-2	CALC-1	CALC-2
Resultados succión capilar	K ²⁵ [Kg/m ² s ^{1/2}]	0,015	0,013	0,016	0,017
	m ²⁶ [x10 ⁷ s/m ²]	3,840	4,010	3,810	3,630
	Porosidad efectiva ε ₀ (%)	9,0	7,8	9,9	13
Resultados porosidad y absorción	Porosidad total (%)	12,83	14,3	18,23	14,10

Fuente: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC. Cali, Colombia, "Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera".

Este comportamiento se corroboró con los resultados del ensayo de succión capilar, ya que demostraron que los concretos autocompactantes fabricados con menores relaciones de agua/cementante y menor cantidad de superplastificante (CACC), fueron los que presentaron mayor coeficiente de resistencia a la penetración de agua (m), menor coeficiente de absorción (K) y menor porosidad efectiva (ε₀) comparado con el resto de concretos (CALC).

²² Siglas para lodo calcáreo.

²³ Siglas para caliza comercial molida.

²⁴ Artículo de revista, Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC. Cali, Colombia, "Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera".

²⁵ Coeficiente de absorción.

²⁶ Coeficiente de resistencia a la penetración de agua.

Este comportamiento también podría estar relacionado con la adición utilizada, como ya se ha mencionado anteriormente, *“la caliza comercial molida tiene menor tamaño de partícula y mayor área superficial, lo cual mejora la distribución de partículas del cementante y aumenta los sitios de nucleación de los productos de hidratación, generando una matriz y una zona de transición interfacial alrededor de los agregados más densa y homogénea con una estructura porosa más refinada”* [39].

Por otra parte, el Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, realizó ensayos de permeabilidad de HAC con adición de cenizas volantes y filler calizo, de resistencia característica 30 MPa, con objeto de estudiar uno de los aspectos importantes de la durabilidad. En los hormigones autocompactantes obtenidos se han realizado ensayos de porosimetría por intrusión de mercurio, que permiten conocer el tamaño y distribución de poros, así como la porosidad total del hormigón, además, se ha realizado el ensayo de penetración de agua bajo presión. A partir de los resultados obtenidos se establecen conclusiones relativas a los aspectos de durabilidad relacionados con la permeabilidad y la microestructura de la red porosa.

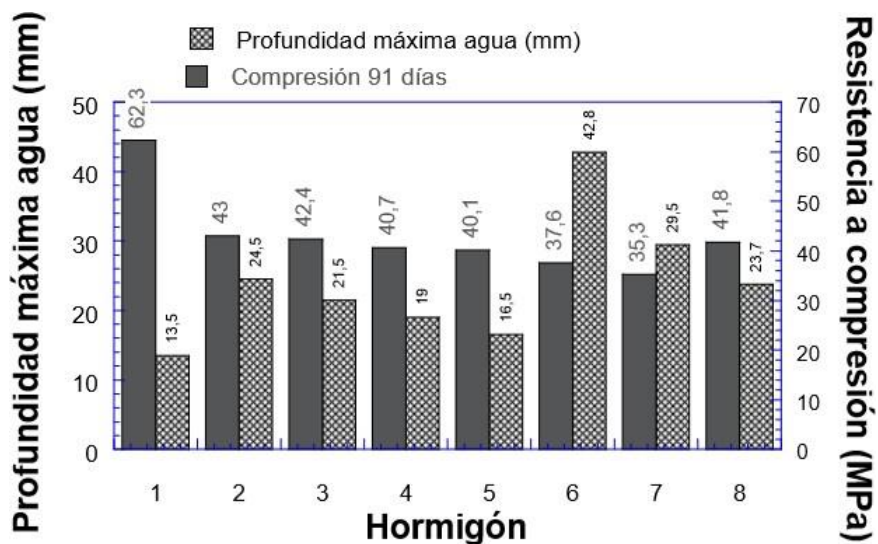
La Ilustración 11 muestra la profundidad máxima de penetración de agua y la resistencia a compresión a los 91 días de edad para las 8 muestras de hormigón autocompactante. Del gráfico podemos evidenciar que, el hormigón 1 (con adición de ceniza volante), que contiene 280 kg de cemento I 42,5 R/SR y una relación a/c 0,50, es el que presenta menor porosidad y permeabilidad al agua, y mayor resistencia a compresión (ensayos a los 91 días). En términos generales, los resultados obtenidos muestran un hormigón poco poroso, resistente y poco permeable. No sólo se ha obtenido una porosidad total pequeña, sino que también se ha reducido sensiblemente el tamaño del poro. Estos resultados corroboran que la adición de cenizas volantes crea centros de nucleación en los poros que aumenta la compacidad de la matriz y con ello dificulta la penetración del agua y de los agentes agresivos.

El resto de los hormigones, con adición de filler calizo, muestran diferencias significativas, tanto en resistencia a compresión como en permeabilidad, con respecto al hormigón con adición de cenizas volantes.

En todas las amasadas con filler calizo se obtuvo un diámetro medio de poro parecido, situándose en un rango que va desde 32 nm hasta 40 nm. Sin embargo, entre ellas existen diferencias importantes en cuanto a la profundidad de penetración de agua bajo presión, lo que muestra que el radio medio del poro no es el único parámetro que influye en la misma. El valor de la porosidad total y el porcentaje de macroporosidad pueden ser factores determinantes en este fenómeno.

Del mismo modo, la relación entre la profundidad de penetración de agua bajo presión y la resistencia a compresión no está completamente clara. Si bien se observa una tendencia general a disminuir dicha resistencia cuando aumenta la penetración. Este efecto, lógico, por otra parte, se presenta igualmente en los hormigones tradicionales. Los dos valores mayores de profundidad de penetración de agua los presentan los hormigones que han obtenido menores valores de resistencia: 6 y 7. El resto de ellos presentan resistencias similares entorno a los 40 MPa que no difieren en ningún caso más del 10%. Sin embargo, los valores de profundidad de penetración de agua muestran valores claramente diferentes.

Ilustración 11: Penetración de agua a presión y resistencia a compresión a los 91 días.



Fuente: Permeabilidad y porosidad en hormigones autocompactantes. Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 2 (2008), Universidad Politécnica de Madrid.

5.3.3 Trabajabilidad

Respecto de la trabajabilidad, cuando se comparan en estado fresco las mezclas de los hormigones, adicionados tanto con caliza comercial molida como con lodo calcáreo, como es presentado en la Tabla 15, se visualiza que, en general las mezclas presentan buena trabajabilidad y cumplen los parámetros establecidos en la norma EFNARC.

En general, todas las mezclas de hormigón generan un flujo de asentamiento en un rango entre 65 - 80 [cm], que son los valores requeridos por la normativa (EFNARC, 2002) [43]. Nagataki (1995) [44] expone que un hormigón autocompactante con un “flujo de asentamiento menor a 50 [cm] se considera que no tiene el flujo suficiente para pasar a través de estructuras fuertemente reforzadas, y un flujo de asentamiento mayor a 700 [cm] corre riesgo de segregación”.

Por último, las mezclas de hormigón evaluadas por medio del ensayo del embudo en V, para medir la facilidad de fluir a través de un espacio reducido, evidenciaron que todas las mezclas cumplieron con los parámetros, encontrándose en un rango entre 8 y 12 segundos, tiempos que se consideran apropiados, ya que las mezclas presentan una viscosidad adecuada para llenar espacios reducidos sin presentar susceptibilidad al bloqueo de los áridos.

Tabla 15: Ensayos en estado fresco

Propiedad	Métodos de ensayo	Unidad	Valores recomendados EFNARC	CAC C-1	CACC -2	CALC -1	CALC -2
Capacidad de relleno	Flujo de asentamiento	[mm]	650 a 800	750	750	720	720
	Embudo V	[s]	6 a 12	9,5	10	11	11,3
Capacidad de paso	Caja en L	[h2/h1]	0,8 a 1	1	0,99	0,96	0,99

Fuente: Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales, GMC. Cali, Colombia, "Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera".

Por otra parte, al comparar los resultados de las propiedades en estado fresco de los hormigones autocompactantes adicionados con caliza comercial molida (CACC) y lodo calcáreo (CALC), se encontró que los valores de flujo de asentamiento y tiempo de flujo de las mezclas CACC fueron mejores comparados con los valores de las mezclas CALC, a pesar de que estos últimos requirieron de una mayor cantidad agua y aditivo superplastificante.

Esto podría ser explicado a partir del menor tamaño de partícula que presenta la caliza comercial molida, ya que según Uysal (2011) este factor *"mejora la distribución de partículas del esqueleto de materiales finos, reduciendo la fricción entre las mismas y el número de espacios vacíos dentro de dicho esqueleto"*, lo cual incrementa el factor de empaquetamiento y disminuye la resistencia al flujo. Por otra parte, no se observaron cambios significativos en los resultados de los diferentes ensayos al variar la proporción de las adiciones (Uysal, M. y Yilmaz, K; 2011) [45].

5.3.4 Fraguado

El fraguado en mezclas sin aditivos genera un fraguado inicial bastante lento, sin embargo, aquellas que tienen base en policarboxilatos²⁷ están técnicamente concebidos para un fraguado inicial más rápido. También proporcionan una mejor y más completa hidratación de las partículas de cemento, produciendo características incrementadas de fraguado rápido. Es necesario decir, que los cementos sin adición emplean menos cantidad de aditivo que los cementos que sí incluyen adiciones, o los que cuentan con un fraguado rápido.

La utilización de aditivos superplastificantes de última generación, ha revolucionado la tecnología del hormigón, debido, fundamentalmente, a que proporcionan una alta trabajabilidad, manteniendo una baja relación a/c; ya que, por una parte, inducen una disminución del contenido de agua del hormigón de hasta el 40%, lo que produce una reducción de su porosidad y un incremento consecuente de sus propiedades mecánicas y durables. Asimismo, estos aditivos producen una mejora en términos de trabajabilidad y

²⁷ Superplastificante basado químicamente en copolímeros de ácido acrílico y ésteres de estos ácidos.

de las propiedades reológicas de los hormigones, lo que posibilita la puesta en obra en zonas de difícil acceso y un mejor recubrimiento de las armaduras.

Por otra parte, el uso excesivo de aditivos superplastificantes, pueden generar problemas relacionados con la pérdida de fluidez, tiempos de fraguado no controlados, segregaciones del hormigón, entre otros; ocasionando en su mayoría, problemas de compatibilidad entre el cemento y el propio aditivo (Arredondo, F; 1972) [46].

Los retardadores del fraguado del hormigón son útiles en tiempos de altas temperaturas porque suelen aumentar la retracción; ya que reducen el agua de amasado y actúan como retardadores del fraguado del hormigón. Los superfluidificantes tienen muchas ventajas, pero hay que agregarlo en obra entre 30 a 60 minutos después de haber realizado la mezcla.

Amziane (2016) postuló que, antes del fraguado, las presiones son “hidrostáticas, siendo el tiempo de inicio de fraguado el momento en que las presiones laterales en el hormigón se hacen cero”. Alternativamente, el fraguado puede ser estudiado como un proceso de percolación²⁸ (Andriamanantsilavo, N. R.; Amziane, S; 2004) [47] con las partículas de cemento interconectadas por los productos de hidratación. El grado crítico de percolación; es decir, el instante en que la masa deja de ser un líquido para convertirse en un sólido es del 16% de las partículas conectadas.

No obstante, teniendo en cuenta la teoría de la percolación, es lógico pensar que el fraguado del hormigón dependerá, no solo de la resistencia a penetración en la pasta de cemento en un instante dado, sino que también, de los factores que afecten el nivel de conectividad entre partículas y vacíos, como por ejemplo su consistencia.

Los factores más relevantes a considerar para el fraguado son:

- La temperatura
 - El aumento de la temperatura reduce el tiempo de fraguado.
 - Una temperatura del hormigón demasiado elevada al inicio de la hidratación puede conducir a una pérdida permanente de resistencia.
 - Grandes variaciones de temperatura pueden generar fisuras en el hormigón.
 - La disminución de la temperatura aumenta el tiempo de fraguado.
 - La hidratación parará cuando la temperatura esté cerca de 0 [°C].
 - La exposición a la luz del sol y las condiciones ventosas también influyen en el fraguado, especialmente en la superficie, en gran parte debido a los efectos de calor y refrigeración por evaporación.
- Relación agua/cemento
 - Una relación agua/cemento más baja reduce el tiempo de fraguado.
- Contenido de cemento/adiciones
 - El aumento del contenido de cemento reduce el tiempo de fraguado.
- Tipo de cemento
 - La química del cemento afectará fuertemente el tiempo de fraguado.
- Aditivos químicos
 - Los aditivos aceleradores y retardadores se utilizan deliberadamente para controlar el tiempo de fraguado. La sobredosis de algunos reductores de agua puede dar lugar al retraso del fraguado.

²⁸ Paso lento de fluidos a través de materiales porosos.

- Tiempo de adición de los aditivos
 - La adición retrasada de algunos reductores de agua puede evitar la rigidización temprana o el retraso.
- Mezclado
 - La mejora del mezclado influencia la hidratación mejorando la homogeneidad y la dispersión de los reactivos y, así, también acelera el fraguado.

5.4 Casos de Obras Marítimas

5.4.1 Obras en Hormigón Autocompactante

De acuerdo a la información entregada, se detallan algunas obras marítimas realizadas con hormigón autocompactante en distintas partes del mundo:

- Puente en suspensión: El puente Akashi Kaikyo, en Japón, la cual está basada en un puente de 3.911 metros de longitud, en el cual dos de los cuatro bloques de anclaje del puente, de 84,5X63X47,5 [m] fueron realizados con hormigón autocompactante. Se empleó este tipo de hormigón, debido a la alta densidad de armado de dichos bloques. Con su aplicación se consiguió la reducción del tiempo de construcción de 30 a 24 meses, es decir, se redujo un 20%. La mezcla utilizada fue confeccionada con cohesionantes minerales, con cemento de bajo calor de hidratación y aditivo superplastificante e inclusores de aire. La resistencia a compresión (28 días) fue 245 [kgf/cm²], cuando lo demandado era 204 [kgf/cm²]. En las estructuras de anclaje de este puente se utilizó un nuevo sistema de construcción con Hormigón Autocompactante que permitió acortar el periodo de construcción en 20% de 2,5 años a 2 años. El puente se terminó en abril de 1998, y se muestra en la Ilustración 12 [2].

Ilustración 12: Puente en suspensión Akashi Kaikyo



Fuente: Google

- Plataforma Petrolífera en Valencia: Obra de pilares de una plataforma petrolífera ubicados en el mar, como muestra la Ilustración 13. Para la construcción de esta plataforma era necesario, para su diseño, un hormigón de altas prestaciones, donde además se debía considerar que los pilares estaban ubicados en el mar, por lo que se tuvo que utilizar un cemento con la propiedad MR (resistente al mar) que al mismo tiempo, aportaba bajo calor de hidratación, lo que era muy positivo dado el lugar donde iban a estar ubicados los pilares, para evitar fisuras por retracción, y por lo tanto, conseguir mayor impermeabilidad con mayor protección de las armaduras. Las características del hormigón debían incluir una resistencia a compresión mínima de $816 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$, impermeable, autocompactante, (siendo esta última característica muy necesaria porque al estar los pilares ubicados en el mar es más complicado el hormigonado y el vibrado del hormigón), máxima durabilidad, y resistencia al agua de mar.

Ilustración 13: Plataforma petrolífera de Valencia



Fuente: Google

- Puente de la Constitución de 1812 sobre la Bahía de Cádiz: La ejecución de las fundaciones de las columnas requería el hormigonado sumergido de la conexión de los pilotes con la losa inferior (encepado) de unos recintos estancos, como muestra la Ilustración 14. Esta conexión debía asegurar tanto la estanqueidad como transmitir la subpresión a los pilotes. El hormigón a ejecutar debía cumplir con requisitos estructurales y de puesta en obra poco habituales en hormigones sumergidos, incluyendo la adherencia a los conectores y barras corrugadas, así como colocarse en obra por bombeo convencional y rellenar bajo el agua celdas contiguas desde un único punto de bombeo, sin formación apreciable de una capa de finos lavados en la superficie del hormigón.

Ilustración 14: Puente de la Constitución de 1812



Fuente: Google

5.5 Método Constructivo en Obras Marítimas

El uso hoy en día del hormigón autocompactante requiere un cambio de concepción en el campo de la construcción, ya que para su elaboración se necesitan procesos de diseño y control diferentes y más estrictos a los utilizados tradicionalmente para el hormigón convencional.

En Europa, por ejemplo, se ha adoptado el hormigón autocompactante con mucho interés, tanto en el sector del hormigón prefabricado como en el hormigón preparado, sin embargo, la ausencia de un marco normativo en Chile que lo regule, y la necesidad de aumentar el conocimiento actual que se tiene de estos hormigones no ha contribuido a potenciar una utilización sistemática de los mismos en obras marítimas, por lo que todavía le queda mucho camino por recorrer para llegar a ser aplicado con normalidad.

El hormigón autocompactante se puede colocar por simple gravedad a través de capachos, grúas, canoas, etc., o mediante bombeo o inyección. En la obra, debe formularse un plan de hormigonado considerando la alta fluidez del hormigón autocompactante, tomando en cuenta las secciones y formas, el orden de hormigonar, la cantidad de hormigón por unidad de tiempo, el tiempo de espera entre capas continuas y los demás aspectos relacionados.

Si bien, en muchos casos no habrá necesidad de reforzar el moldaje, se recomienda por seguridad, especialmente en elementos de gran altura, que la presión lateral del hormigón autocompactante sea calculada considerando a este casi como un líquido. El empuje del hormigón autocompactante sobre los encofrados equivale a una ley hidrostática, sabiendo que el agua posee una densidad de $997 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ y el HAC de $2447 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$ (menor que la del hormigón tradicional ($3200 \text{ [Kg/m}^3\text{]})$). Además, el moldaje debe ser estanco para prevenir la fuga de lechada en las juntas. Un método de colocación altamente eficaz es la inyección del hormigón autocompactante a través de puntos en la zona inferior de los moldajes.

Al momento de suministrar el hormigón en la obra, puede resultar conveniente readitivar el hormigón para mantener las condiciones de autocompactabilidad requeridas para la puesta en obra del mismo. La readitivación debe realizarse, necesariamente, bajo el control del fabricante del hormigón que habrá de decidir sobre el tipo y la dosis precisa de aditivo, así como verificar que el tiempo de amasado en el camión tras la readitivación es el adecuado. La puesta en obra del hormigón autocompactante es análoga a la del hormigón convencional, siendo especialmente adecuado para ser bombeado. Se debe limitar la altura máxima de vertido por caída libre a 5 m y elegir los puntos de vertido considerando que el desplazamiento horizontal del hormigón que ofrece la autocompactabilidad es de 10 m.

La fluidez y cohesión de los hormigones autocompactantes permiten inyectarlos en los encofrados para que llenen estos desde abajo hacia arriba como se muestra en la Ilustración 15. Este procedimiento, en elementos de altura importante, evita la formación de burbujas de aire aprisionadas entre la pared del encofrado, y la propia masa de hormigón. En todo caso la formación de estas burbujas, utilizando el desencofrante adecuado, es inferior a los que se presentarían utilizando hormigón convencional. Son recomendables encofrados de cara metálica o con superficies plastificadas no absorbentes para obtener texturas superficiales uniformes y con muy pocas burbujas de aire retenidas.

Ilustración 15: Encofrado preparado para colocar el hormigón autocompactante mediante bombeo y de abajo hacia arriba.



Fuente: Revista hormigón. Hormigón Autocompactante. Criterios para su utilización.

Es así como existen algunos puntos a considerar en la puesta en obra del hormigón en obras marítimas.

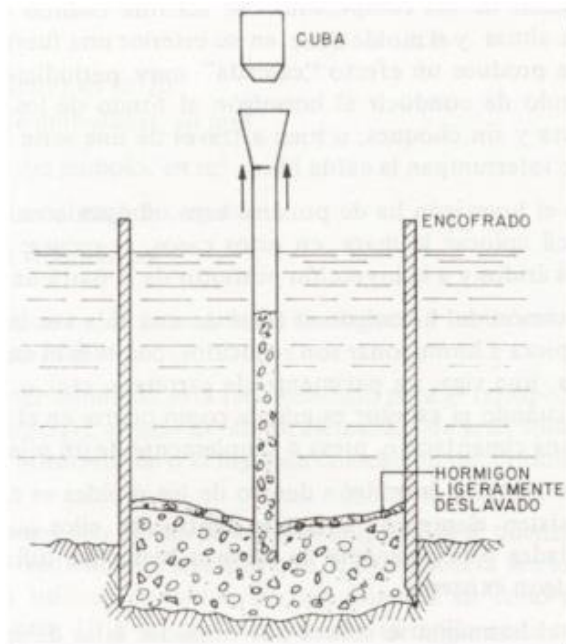
- Para hormigones convencionales se debe evitar la caída libre del hormigón desde una altura superior a 2 [m], no obstante, se puede llegar a permitir caídas libres de

hasta 5 [m] si se estudia una adecuada dosificación del hormigón que sea capaz de soportar estas alturas de vertido.

- La colocación del hormigón se hace de una sola vez cuando los espesores de la pieza a hormigonar son reducidos o en varias capas o tongadas²⁹ cuando el espesor es grande como ocurre en el caso del hormigonado de una cimentación, bloques o simplemente de un pilar.
- El hormigonado bajo el agua no presenta más problema que el de deslavado de la pasta de cemento o de mortero que puede ocasionar el agua en movimiento, si este problema no existe, se conseguirán buenos hormigones toda vez que el medio sea muy adecuado para una hidratación y fraguado perfectos; y además la propia presión del líquido ayude a su compactación.
- Para evitar el deslavado del hormigón por la acción del agua se utilizan diferentes sistemas que, en definitiva, buscan el transporte directo del hormigón al fondo del encofrado a través de conductos, a fin de impedir que éste tenga contacto con la corriente de agua. El transporte puede realizarse en tubos que se elevan a medida que sube el nivel del hormigón, pero, permaneciendo siempre introducidos en la masa del mismo, al objeto de que no se produzca una caída libre que favorezca el deslavado (Figura 5.4). Esto no impide que la parte superior y superficial del hormigón no sufra algo este efecto transformándose, por tanto, en una capa débil que habrá que eliminar posteriormente si fuese preciso.

Para el hormigonado bajo agua como se observa en la Ilustración 16, la masa del hormigón suele estar delimitada por un encofrado situado bajo el agua o por un tablestacado. Actualmente existen en el mercado aditivos que incrementan de una forma elevada la cohesión del hormigón impidiendo el lavado que pueda producir el agua.

Ilustración 16: Hormigonado bajo el agua

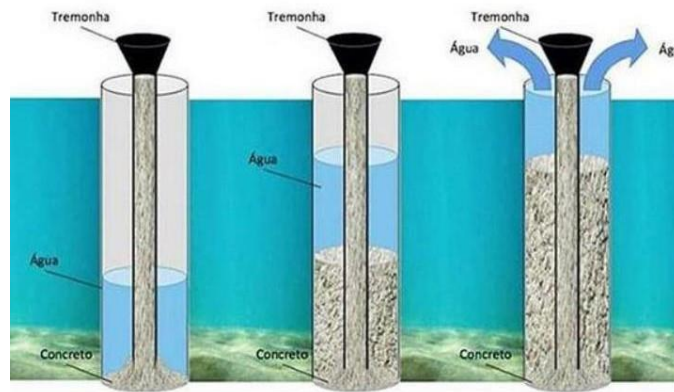


Fuente: Google

²⁹ Capa material, tierra, hormigón, que se extiende sobre una superficie.

En la Ilustración 17 se puede ver como al momento de inyectar hormigón en el moldaje sumergido, el hormigón comienza a desplazar el agua hacia arriba produciéndose en la parte superior de la mezcla deslave, se dejará de bombear o inyectar hormigón hasta que en la parte superior solo se vea hormigón.

Ilustración 17: Proceso de expulsión de agua del moldaje al hormigonar.



Fuente: google

Por otra parte, no todos los moldajes son fijos, es decir, que no son recuperables. Los moldajes recuperables (camisas de acero) son hincados por un martinete, y posterior al hormigonado y fraguado, se realiza la recuperación del moldaje de acero (tubo de acero) quedando el hormigón en directo contacto con el agua como se muestra en la Ilustración 18.

Ilustración 18: Pilote hormigonado en contacto con el agua de mar.



Fuente: Google

6. ANÁLISIS

6.1 Obras Marítimas en Chile

6.1.1 Obras en Hormigón Autocompactante en Chile

En cuanto a las Obras en Hormigón autocompactante en Chile, se obtiene escasa información al respecto de la DOP, uno de los motivos por el cual se desarrolla esta investigación. Sin embargo, se obtienen antecedentes respecto a una Obra realizada en la ciudad de Viña del Mar en el año 2016, consecuencia de un socavón posterior a las marejadas del mismo año, esta obra se llevó a cabo en el paseo borde costero Avenida Perú, como muestra Ilustración 19.

Ilustración 19: Fotografía aérea del sector donde se destaca el sector comprometido



Fuente: Informe Técnico N°25/2016, SECPLA, I. Municipalidad de Viña del Mar.

El diagnóstico señala que se genera una socavación que deja al descubierto una perforación de 40 a 50 [cm] de diámetro que atraviesa todo el muro, esta perforación se ubica bajo el pavimento socavado, permitiendo una fuga del relleno, Ilustración 20.

Ilustración 20: Muestra perforación inferior del muro sometido al desgaste.



Fuente: Informe Técnico N°25/2016, SECPLA, I. Municipalidad de Viña del Mar.

Este socavón se genera debido a la fuerte acción permanente del oleaje, sumándose las intensas marejadas las cuales se incrementaron durante ese año, además de posibles deficiencias constructivas.

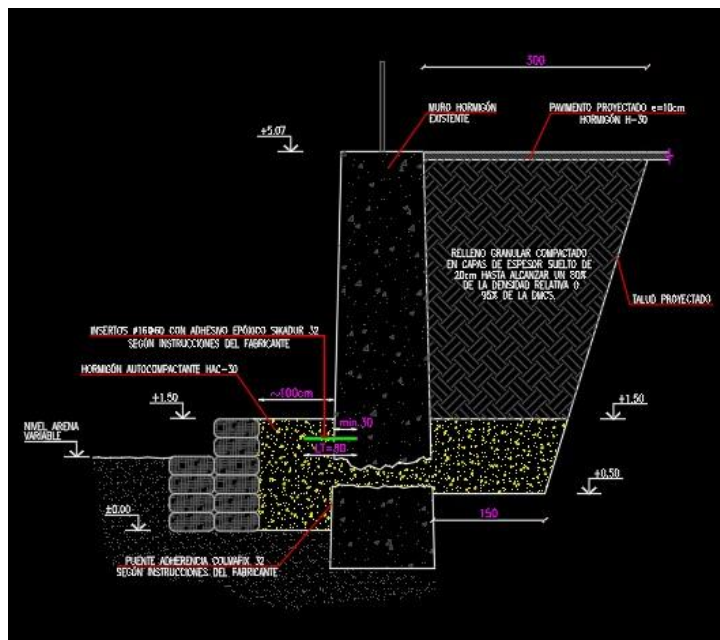
De acuerdo con esto las Bases técnicas del proyecto “Reparación y Refuerzo de Base del muro de contención Av. Perú sector costado Enjoy del Mar”, señalan que el hormigón que se utilizó fue Hormigón Autocompactante (HAC-25), ya que este puede fluir por su propio peso y llenar completamente la cavidad, incluso en presencia de pocos espacios, sin necesidad de vibración, manteniendo la homogeneidad, y de esta manera, otorgando mejor impermeabilidad que un hormigón tradicional. (Contreras Gomez, 2016).[48]

El Hormigón debía tener las siguientes especificaciones de referencia:

- Cono de Abrams invertido de 70 [cm] y 75 [cm] de diámetro.
- Tamaño máximo del árido 13 [mm].
- Granulometría según NCh 163.
- Contenido de finos bajo # 100 mayor a 550 [kg].
- Baja razón agua/cemento.

En la Ilustración 21 se muestra un corte transversal del muro y su perforación, para anclar el hormigón autocompactante que rodeará al muro en su parte exterior, se instalaron barras de acero de largo 80 [cm] y diámetro de 16 [mm] (calidad A 63-42 H), estos insertos fueron fijados al muro existente con Sikadur 32³⁰.

Ilustración 21: Corte transversal del muro reparado con HAC.



Fuente: Archivo de DWG, SECPLA.

Con respecto al moldaje, en primera instancia se utilizarían tablaestacas como moldaje para poder hormigonar y taponar la fuga de material del socavon, pero considerando que el hormigón autocompactante es muy fluido y a modo de evitar el deslave de este, se opto como mejor solucion el moldaje de ensacado (Ilustracion 22), ya que, este tipo de moldaje no permite la fuja de la mezcla de hormigón. La faena de hormigonado se llevo a cabo en horario de marea baja, por lo que se estipulo dos corridas de ensacados, la exterior de 1[m] de altura y la mas proxima al hormigon autocompactante de 1,5 [m] de altura.

³⁰ Adhesivo estructural de dos componentes a base de resinas epóxicas seleccionadas, libre de solventes.

Ilustración 22: Vista en planta del muro reparado con HAC.



Fuente: Archivo de DWG, SECPLA.

6.2 Análisis Comparativo entre Hormigones

Para realizar un análisis comparativo se revisarán algunos puntos relevantes, explicados anteriormente, y que permitan generar un resumen al finalizar este punto, obteniendo información determinante en la comparación de ambos hormigones.

Primero que todo, el hormigón autocompactante se delimita por su propio peso y no necesita agitación mecánica para eliminar la cavitación³¹, la creación de polvo y la contaminación acústica en las áreas adyacentes también se reducen. La eliminación de esta cavitación requiere de mucho tiempo y mano de obra; no hay forma de verificar y, por lo tanto, no garantiza que el resultado esté libre de cavitación. Además, algunos diseños de moldes intrincados tienen nichos que tienen mezclas de alta viscosidad problemas para llenar.

Una diferencia significativa entre el hormigón convencional y el autocompactante es el tamaño del material agregado. El hormigón convencional generalmente tendrá un tamaño nominal del agregado grueso de alrededor de 20 a 38 [mm] o más. Este tamaño de agregado da como resultado un hormigón que es algo rígido, y, por lo tanto, puede reducir su trabajabilidad. Sin embargo, el mayor tamaño agregado también puede contribuir a la resistencia del hormigón convencional cuando se toma el tiempo para agitar adecuadamente el material durante la instalación.

El hormigón tradicional también requiere una proporción de agua más alta. Esta proporción de agua/cemento generalmente es de alrededor de 0.45. Si la humedad ambiental permanece alta por periodos prolongados debido a la lluvia, humedad u otros factores, los cementos convencionales pueden tardar hasta 100 días en determinarse y fraguarse adecuadamente. Por lo tanto, determinar las condiciones ambientales correctas para el proyecto de construcción es importante.

³¹ Formación de cavidades llenas de vapor o de gas en el seno de un líquido en movimiento.

La razón por la que el hormigón convencional se sigue utilizando en muchas obras se debe a los bajos costos de materiales. Las mezclas de hormigón convencionales generalmente tienen un valor de flujo de asentamiento de aproximadamente 53,33 [cm]. Las mezclas de hormigón autocompactante tienen un tiempo de fraguado comparable a las mezclas de hormigón convencionales. Aunque los costos iniciales de los materiales de las mezclas de hormigón autocompactante son más altos que los convencionales, las mezclas requieren menos mano de obra y menos tiempo para completar un proyecto. Es también relativamente autonivelante. Por ejemplo, una obra de hormigón convencional que requiere diez trabajadores podría lograrse con tres o cuatro usando hormigón autocompactante.

El hormigón empleado en la construcción de obras portuarias está sometido generalmente a esfuerzos que exigen un óptimo comportamiento de las resistencias mecánicas, pero pocas veces se toma en cuenta la durabilidad de las estructuras.

Cuando se habla de durabilidad, es indispensable pensar en los ambientes en los que la estructura va a desarrollarse, y es indiscutible considerar el comportamiento del material en su desarrollo como objeto fundamental de estudio.

Un hormigón durable es aquel que por su configuración química, física y mecánica puede llegar a resistir ambientes exigentes como aquellos que están expuestos diariamente a dióxidos de carbono, cloruros y sulfatos, durante toda su vida útil.

Respecto a las obras marítimas, un buen hormigón tradicional sumergido³² en agua marina, incrementa su resistencia con el paso del tiempo. También, la sumersión minimiza los cambios de temperatura, disminuyendo la velocidad y dimensión de las expansiones y contracciones, evitando el agrietamiento, la erosión, el descascaramiento, y por ende, la corrosión. Pero, por otro lado, la permeabilidad que posee el hormigón, permite que el agua comience a penetrar, ya sea por diferencia de presión o por capilaridad.

Cuando el hormigón no está sumergido totalmente, el agua es continuamente evaporada de la superficie del hormigón que sobresale del nivel del agua, generando así un constante hidratamiento, lo que dependiendo del grado de saturación del hormigón va a generar acumulaciones de sal en diferentes zonas. El oxígeno que entra con el aire, se disuelve en el agua en forma diferencial, siendo su concentración menor en algunas zonas y el grado de saturación es mayor, generando columnas galvánicas. Con respecto a la presión del hormigón sumergido, alrededor de los 60 [m] de profundidad, el hormigón mejora en todas sus cualidades. Se ha sugerido que, a profundidades muy grandes, se podría obtener hormigones con resistencias a la compresión de 500 [kg/cm²] o más. En el caso de hormigón bajo el ambiente marino se ha llegado a profundidades de 50 [m] por hormigonado y a 90 [m] por inyección, teniendo resultados excelentes.

Las propiedades del hormigón generalmente mejoran a bajas temperaturas, ya que la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad son inversamente proporcionales a este factor.

Los más perjudiciales para las estructuras de hormigón se encuentran en el grupo de los sésiles y el fouling (suciedad). Este último se adhiere a las paredes de las superficies flotantes, aumentando su espesor y por ende el peso total de la estructura. Los organismos sésiles, como picorocos, piure, cholgas, etc. producen un efecto similar al del fouling, pero más dañino, porque el tamaño de estos es mayor. Además, se considera como efecto contrario el deterioro que sufren las paredes de la estructura cada vez que estos organismos son retirados.

³² Introducción completa de un cuerpo en un líquido.

Para prevenir la corrosión es fundamental que el hormigón tenga una estructura de poros adecuada, que el recubrimiento tenga el espesor suficiente, y que el hormigón esté libre de cloruros.

Existen puntos a considerar en estas estructuras bajo el ambiente marino, como lo son: **Exposición al agua de mar:** Es una de las condiciones más críticas a las que un hormigón puede estar expuesto, por lo que es muy importante conservar relaciones agua/cemento bajas, y por lo tanto resistencias altas; en la actualidad es recomendable la utilización de adiciones activas al cemento u hormigón.

Exposición a sulfatos: Se presenta en algunos suelos, zonas volcánicas o industriales donde se manejan productos con sulfatos o donde se emiten gases o vierten aguas con contenidos altos de sulfatos, y principalmente, en zonas costeras. Para la fabricación de hormigones expuestos a estas condiciones particulares, se recomienda el uso de cementos que contengan dentro de su composición química un porcentaje de aluminato tricálcico limitado a 8% cuando se requieran resistencias a sulfatos moderadas y a 5% cuando se requieran resistencias altas al ataque de sulfatos.

Exposición al CO₂: Se presenta cuando el dióxido de carbono o gas carbónico de la atmósfera, contenido principalmente en gases, penetra en el hormigón y reacciona con el agua contenida en sus poros, produciendo ácido carbónico. Como cualquier ácido que ataca al hormigón, el ácido carbónico reacciona con la cal libre y la convierte en carbonato de calcio, esta sustancia tiene un pH menor que el hormigón, lo cual afecta la capa pasiva que se encuentra en la relación hormigón/acero de refuerzo, iniciándose así un proceso de corrosión que implica daño específico en el material. Frente a estas condiciones de exposición existe un segundo parámetro básico fundamental para la generación del daño, que es establecido por los mecanismos de transporte y la estructura de poros presentes en el hormigón. Los poros determinan el vehículo y el camino que distribuye el daño, es así como la permeabilidad se convierte en la propiedad que más incide en la generación de daños en elementos estructurales.

Exposición al ataque de ácidos: El elemento que mantiene adherido en la pasta de cemento endurecida es el material calcáreo, y como tal, susceptible al ataque de ácidos. El hormigón por sí solo no presenta ningún tipo de defensa contra los ácidos, por lo tanto, estrictamente y sin excepción, estos deben eliminarse de todo su proceso de producción y evitar el contacto con el hormigón durante su vida útil. Los ácidos dentro del hormigón reaccionan con el hidróxido de calcio o cal libre que se forma durante la hidratación del cemento. Solo se podrán emplear hormigones de cemento Portland en ambientes ácidos si se cuentan con barreras protectoras o recubrimientos impermeables resistentes al ataque de ácidos.

Para una mejor comprensión de lo tratado anteriormente, se presenta a continuación un cuadro resumen de ambos hormigones, en la Tabla 16.

Tabla 16: Cuadro resumen

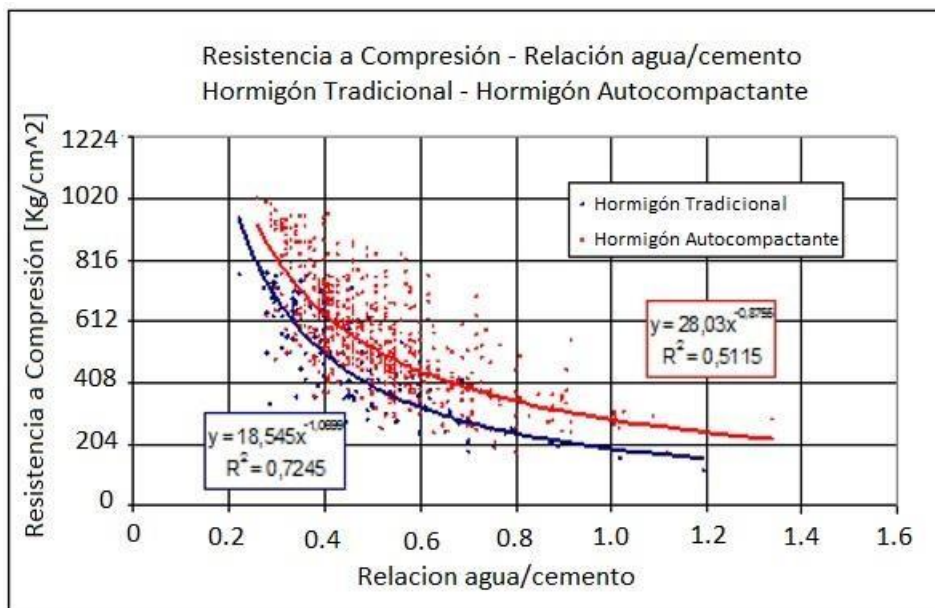
FACTOR	HORMIGÓN TRADICIONAL	HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE
DURABILIDAD	<p>El hormigón tradicional debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido en toda su vida útil. Un buen vibrado, una buena compactación y los materiales otorgarán durabilidad al hormigón. Cabe mencionar que al ser un hormigón más poroso y tener una compactación no asegurada completamente, su durabilidad es menor comparada con la del hormigón autocompactante.</p>	<p>En un hormigón autocompactante la interfase pasta-árido es más densa que en un hormigón convencional, debido a la ausencia de vibración y al uso de adiciones, que permiten una mayor compactación y como consecuencia, una reducción de la velocidad de penetración de los agentes agresivos. De todo esto se puede deducir que es de esperar que el HAC presente una durabilidad igual o superior a los hormigones convencionales con resistencias al menos equivalentes.</p>
RESISTENCIA	<p>La resistencia en el hormigón depende de su dosificación. Para dosificaciones ricas en cemento Portland (800 [Kg/m³] de cemento), se consigue una resistencia de 40 [kg/cm²]; con 500 [kg/m³] de cemento, la resistencia se reduce a 35 [kg/cm²]; mientras que la más habitual con 300 [kg/m³] proporciona una resistencia de 25 [kg/cm²]. Pero así mismo, por falta de adiciones minerales su resistencia tiende a ser menor que la de un hormigón autocompactante.</p>	<p>Para poder establecer la resistencia característica y la resistencia media de un HAC, se pueden aplicar las mismas fórmulas utilizadas en la elaboración de un hormigón tradicional. Dada su composición y el empleo de adiciones minerales en su dosificación, algunas de ellas con propiedades de reactividad hidráulica o puzolánica, hacen que el hormigón autocompactante ofrezca en general, mejores propiedades mecánicas que el hormigón convencional. Como muestra la figura 6.3.</p>
IMPERMEABILIDAD	<p>El hormigón tradicional, a pesar del uso de aditivos impermeabilizantes y también inhibidores de corrosión en las armaduras de acero, es más permeable que un HAC,</p>	<p>Un hormigón con una baja permeabilidad incrementa la durabilidad del hormigón y colabora en la protección de las armaduras frente a la corrosión, como es el caso del HAC. Para esto se</p>

	<p>esto se debe a que su principal desventaja ante la impermeabilidad que impone el medio marino es la porosidad.</p>	<p>pueden utilizar aditivos especiales que permitan llegar al punto requerido en la aplicación. A su vez, gracias a estos aditivos y también a las adiciones, estas mezclas se destacan por tener menor porosidad y por tanto, mayor resistencia a la penetración de agua.</p>
TRABAJABILIDAD	<p>Los componentes de un hormigón tradicional distan mucho de otorgar una mezcla fluida, incluso con superplastificantes nunca se logrará tener una trabajabilidad superior a la de un HAC. Esto se debe principalmente a las adiciones con las que no cuenta el hormigón tradicional y al tamaño de árido que varía entre 20 y 40 [mm].</p>	<p>La trabajabilidad y fluidez del hormigón autocompactante vienen dadas gracias a sus adiciones con diámetros no superiores a 13 [mm], junto con los aditivos superplastificantes. Haciendo así un hormigón mucho más fluido y capaz de llenar completamente los moldajes a diferencia de un hormigón tradicional. Esto se traduce en menor mano de obra y hormigonados en menos tiempo y completamente compactados.</p>
FRAGUADO	<p>El fraguado del hormigón dependerá, no solo de la resistencia a penetración en la pasta de cemento en un instante dado, sino también, de los factores que afecten el nivel de conectividad entre partículas y vacíos, como, por ejemplo, su consistencia. Así también, depende de las condiciones ambientales como la temperatura y humedad, información relevante en ambientes marinos y zonas costeras. Dicho esto, el fraguado tiende a ser acelerado con aditivos que otorguen esta cualidad (aceleradores o retardadores).</p>	<p>Los tiempos de fraguado son manejables y controlables con aceleradores o retardadores de fraguado. Estos son muy importantes en hormigones marítimos, pero aún más relevantes en hormigones autocompactantes, ya que, al ser muy fluidos son más vulnerables al lavado de la mezcla al momento de realizar el hormigonado.</p>

FUENTE: Elaboración propia

De la Ilustración 23 podemos evidenciar que las relaciones de agua/cemento en ambos hormigones son predominantes a la hora de elaborar hormigones resistentes, pero siendo el hormigón autocompactante el que logra obtener mayores resistencias por sobre el tradicional, esto se debe principalmente, como ya fue mencionado, a su compacidad y completa compactación en los moldajes.

Ilustración 23: Resistencia Hormigón Tradicional – Hormigón Autocompactante



Fuente: Dr. Angel Vilanova Fernández, 2009.

Así mismo, se considera destacar otros puntos comparativos relevantes entre ambos hormigones, como lo son el costo, el rendimiento y sustentabilidad (entendida como impacto ambiental).

1. COSTO

Al momento de comparar económicamente ambos hormigones, la principal limitación para el uso masivo del HAC es el costo directo del material, que en la actualidad llega a ser hasta un 40% mayor que un hormigón vibrado en contraste con un hormigón fluido de similar resistencia. En obra, la implementación de moldajes más estancos y resistentes, y, en las plantas de premezclados, una mayor logística, control de áridos y aditivos, hacen de este un hormigón más costoso.

Sin ir muy lejos, y usando como ejemplo la reparación del muro ya descrita en el documento, se comparará el costo del hormigón a utilizar (10 [m³]) tanto con el HAC, como con el hormigón tradicional.

Si la reparación del muro se hubiese llevado a cabo con hormigón tradicional, cuyo valor consiste en 1.95 [UF/m³]³³ (anexo 2), el hormigón utilizado habría tenido un costo de \$512.874,57 pesos chilenos.

En cambio, muy por sobre el valor recién expuesto, el costo del hormigón autocompactante incluido en la reparación, tiene un valor de 3.4 [UF/m³], que se traduciría en \$894.242,84 pesos chilenos (anexo 3).

De acuerdo con esto se muestra el desglose correspondiente al hormigón autocompactante puesto en obra.

Tabla 17: Desglose de hormigón autocompactante instalado en obra.

ITEM	VALOR (\$)	% Respecto del valor de [m ³] de HAC
[m ³] HAC	89.420	-
Mano de obra	40.239	45
Utilización de bomba	28.614	32
Traslado de bomba	40.327	45
TOTAL	189600	-

Fuente: elaboración propia, a partir de datos del SECPLA Viña del Mar.

2. RENDIMIENTO

Un punto bastante importante, pero colateral respecto a la parte técnica de ambos hormigones, es la razón por la cual fue creado el hormigón autocompactante. Es relevante determinar que el número de personal necesario en la construcción, y el tiempo de ejecución de la obra que se puede observar en el vertido con hormigón tradicional con respecto a la construcción con hormigón autocompactante, es al menos tres veces mayor en razón a los rendimientos de colocación, los cuales son muy superiores a los del hormigón convencional, dado que el hormigonado del HAC se realiza sin interrupciones, puesto que no requiere de ser vibrado, a diferencia del hormigón tradicional, el cual requiere de esta técnica en más de una ocasión.

Además de esto, en elementos horizontales tales como losas de piso, forjados, soleras o pavimentos, donde estos rendimientos son aún mayores, se puede llegar a reducir los tiempos de ejecución hasta en un 20 o un 25%, dependiendo de la naturaleza de la construcción, logrando así disminuciones en los tiempos de ejecución, con una disminución en la mano de obra necesaria para su colocación de hasta un 50%.

Estudios de comparación llevados a cabo utilizando hormigón autocompactante y hormigón tradicional, respaldan lo mencionado anteriormente. Como ejemplo de esto, un estudio realizado en Holanda (Pacios, 2003) [49], cuyo objetivo principal era determinar los tiempos de ejecución y del personal necesario en la construcción de losas planas rectangulares y de losas en doble T, muestra la elaboración de cada una de ellas con ambos tipos de hormigón, como se observa en la Tabla 18.

³³ Valor referencial de la UF correspondiente a Noviembre del año 2016, \$26.301, 26.

En este ejemplo, se señala que las losas planas rectangulares poseían un volumen de hormigón de 3,5 [m³], además, se utilizaron tanto para las elaboradas con hormigón autocompactante como convencional un conjunto de 10 moldes, lo que representaba un volumen total de concreto de 35 [m³]. Por otro lado, para la construcción de las losas doble T se dispuso un conjunto de 5 moldes de longitud variable que requerían en su totalidad aproximadamente también 35 [m³] de concreto

Tabla 18: Comparación de recursos humanos entre hormigón tradicional y hormigón autocompactante

Actividad	Losa 3.5 [m ³] Volumen total: 35 [m ³]		Losa en doble T Volumen total: 35 [m ³]	
	HAC	HC ³⁴	HAC	HC
Forma de vertido	Cubeta y rastrillo	Cubeta, pala y vibrador	Cubeta y rastrillo	Cubeta, pala y vibrador
Personal	3 hombres	6 hombres	3 hombres	6-7 hombres
Tiempo de vertido	1 hora	3 horas	1 hora	3.5 horas

Fuente: Elaboración propia, a partir de Pacios A. (2003). El hormigón autocompactante: tecnología sostenible para el sector de construcción. Revista Hormigón y Acero.

Por otro lado, en otro estudio llevado a cabo (Borralleras y Jofre, 2007) [50], en el caso específico de construcción de forjados (losas de entrepiso), de 40 m³, se observa (Tabla 19) que la reducción del tiempo de colocación dependerá del método de vertido escogido, cubilote o bomba, obteniéndose mayores rendimientos de colocación cuando se utiliza el sistema de bomba que cuando se utiliza el sistema de vertido con cubilote. Siendo los rendimientos de colocación en el hormigón.

Tabla 19: Tiempo de ejecución e implicación de personal en el vertido de una losa de 40 m³

Actividad	Vertido con Cubilote de 1 [m ³]		Vertido con Bomba	
	HAC	HC	HAC	HC
Personal	2 operarios	5 operarios	2 operarios	5 operarios
Ejecución	2 horas	3,3 horas	1,3 horas	2,2 horas

Fuente: Elaboración propia, a partir de Borralleras, P. y Cofre C. (2007). Realizaciones con hormigón autocompactante. Revista Cemento y Hormigón. España.

3. SUSTENTABILIDAD

El hormigón es el material más utilizado en el mundo de la construcción, y es este sector el responsable de aproximadamente el 40 % del impacto medioambiental total, generando así el 7% de las emisiones globales de CO₂, las cuales son, en gran medida, debido a las emanaciones de las fábricas productoras de cemento [49]. Por lo tanto, se puede afirmar que definitivamente el hormigón no es un producto sostenible, ya que la fabricación del cemento consume mucha energía, y las materias primas necesarias para su elaboración agreden los distintos ecosistemas.

³⁴ Hormigón convencional o tradicional

Sin embargo, el hormigón autocompactante contribuye con la preservación del medio ambiente al utilizar productos residuales de otras industrias, tales como las cenizas volantes, escorias, finos, micro sílice, etc; siendo estos productos residuales, los utilizados en algunas ocasiones como complementos cementicios o sustitutos parciales del cemento o de la arena, pudiéndose lograr, incluso que se utilicen menores cantidades de cemento que en el hormigón convencional, contribuyendo con ello a una menor emanación de dióxido de carbono en la atmósfera. Por otro lado, colabora con la preservación del medioambiente al producir menores residuos que el hormigón convencional en su colocación y puesta en obra, requiriéndose una menor limpieza, y logrando con ello menor emisión de partículas al aire y en las aguas residuales.

De igual manera y dado que el ruido se considera también como un tipo de contaminación, la utilización del hormigón autocompactante hace que los niveles de ruido en las obras sean mucho menores, permitiendo a los trabajadores prescindir de las protecciones externas para los oídos, ya que no se utiliza ningún equipo de vibración para su compactación, mejorando con ello las condiciones de trabajo. Por otro lado, los altos niveles de ruido en una obra, debido a la utilización de equipos vibratorios para la compactación del concreto convencional no solo perjudica la salud de los trabajadores, sino que hace que las comunicaciones entre ellos sean más difíciles, potenciando el riesgo de malos entendidos que pueden traer serias consecuencias (Bartos y Cechura 2001). [51]

6.3 Análisis y Sugerencias

Para realizar una obra marítima, es necesario, en primer lugar, conocer el lugar de emplazamiento, ya que se debe tener conocimiento del clima del sector, las mareas y la batimetría (configuración física del fondo marino, medida de la profundidad del agua). Posteriormente, es necesario definir las características y las bases del diseño. Una vez precisados los aspectos principales, y tras la revisión de la autoridad marítima, se inicia el proceso de diseño.

Actualmente, existen metodologías que ayudan, tanto en la predicción de las condiciones operacionales, como en el establecimiento de las condiciones de diseño de los trabajos marítimos y portuarios. Los temas logísticos en una obra marítima son fundamentales, debido a las características lineales de muchas obras, así como las dificultades de abastecimiento en los frentes de trabajo y a la imprevisibilidad de factores climáticos y oceanográficos.

A lo anterior, se suma el alto costo de los trabajos que se realizan. Los proyectos de obras marítimas deben ser hechos pensando en los métodos y programas constructivos.

En la actualidad en Chile no existe una normativa en cuanto a diseño de puertos. Lo que se utiliza son normas japonesas (Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan) o españolas (ROM)³⁵, y en ocasiones solo se considera a partir de instructivos de la Dirección del Territorio Marítimo (Directemar) y del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). De esta forma, se recogen guías, normativas y/o estándares internacionales para desarrollar un diseño específico.

³⁵ ROM, Recomendaciones de Obras Marítimas

Es por esta razón, que la DOP ha desarrollado una guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas. Este documento tiene el objetivo de recopilar, ordenar y sistematizar la información existente en la literatura y agregarle las características especiales del país, obteniendo un material que recomiende procedimientos estándar de diseño.

El principal desafío de una obra portuaria se relaciona con la diferencia existente entre los equipos, técnicas y conocimientos necesarios para desarrollarlas. No es menor el hecho de construir sobre o bajo el mar, con equipo flotante o apoyado en el suelo marino, sujeto a condiciones marítimas y oceanográficas cambiantes, cumpliendo las exigencias técnicas en el plazo contratado y los costos presupuestados.

Es necesario poder contar con el capital humano competente y el equipamiento que corresponde para poder desarrollar cualquier obra de estas características.

A pesar de que Chile cuenta con una extensa costa, las bahías disponibles para poder construir un puerto están en su mayor parte copadas. Por lo tanto, los desafíos para el crecimiento que se proyecta en el país en materia portuaria, es que el tipo de obra que se quiere construir debe ser de mayor valor. La mayor preocupación en este tipo de construcción, es generar una bahía adecuada, protegida del oleaje.

Para la DOP, los molos corresponden a un muro o terraplén que, internándose desde la costa o ribera aguas adentro, sirve para la defensa o abrigo de cierto espacio de agua y que también puede ser utilizado para la movilización de carga o de pasajeros.

Pero esta no es la única alternativa, en otros países, especialmente en España, se utiliza una tecnología prefabricada que ya se está estudiando en Chile. Se trata de las obras de cajón o cajones flotantes que, a grandes rasgos, corresponden a enormes cubos de hormigón autocompactante, que se fabrican en tierra, en astillero y se llevan flotando a su lugar, tras una preparación previa del fondo marino.

Eso les confiere una gran versatilidad en cuanto a la construcción (mediante hormigonado deslizante), transporte (flotando) y colocación en la obra portuaria, ya sea para muelles, diques u otros.

Cabe destacar que, en España y Japón, consideran el hormigón autocompactante como el principal protagonista de estas obras, sobre todo por sus cualidades presentadas, no obstante, a nivel nacional, no han existido obras de gran envergadura, esto debido a lo copado que se encuentran las costas que podrían tener obras de este tipo, y por otro lado, porque no han existido nuevas construcciones marítimas que puedan probar estas nuevas técnicas, debido a sus altos costos.

Sin embargo, lo que sí es relevante, y genera gran distinción, es la disminución de los costos de la mano de obra, razón por la cual fue creado el HAC, y porque aún sigue siendo el gran componente en países asiáticos en construcción marítima.

CONCLUSIONES

De los análisis comparativos realizados se puede concluir lo siguiente:

En cuanto a la resistencia ambos hormigones alcanzan las resistencias requeridas. Ahora bien, cabe destacar que los hormigones al estar en contacto con el agua aumentan su resistencia con el paso del tiempo. De acuerdo con esto, el hormigón autocompactante adquiere resistencias ligeramente mayores que la de un hormigón tradicional debido a la compacidad otorgada por sus adiciones además de la ausencia de nidos.

Respecto al fraguado, el cual es de suma importancia en obras marítimas, ninguno de los dos hormigones presenta ventajas por sobre el otro, ya que este proceso en la actualidad es controlado con aceleradores y retardadores, por lo que el endurecimiento del hormigón puede ser manipulado mediante tecnologías de fraguado.

De acuerdo con la trabajabilidad, el hormigón autocompactante corre con mucha ventaja por sobre el hormigón tradicional, más aún cuando hablamos de obras marítimas, ya que este no requiere ser vibrado para su completa compactación.

De la mano con esto, el rendimiento del hormigón autocompactante se encuentra muy por encima del hormigón tradicional, ya que el tiempo efectivo del hormigonado del HAC es continuo a diferencia del hormigón tradicional.

Así, la impermeabilidad del hormigón autocompactante es superior que la del hormigón tradicional, gracias a su homogeneidad, compacidad, y menor porosidad, lo que le otorga una mejor barrera al paso del agua, protegiendo la armadura de acero, a diferencia del hormigón tradicional el cual es más poroso debido al mayor tamaño de árido grueso y árido fino. Y de acuerdo con esto, la durabilidad de obras marítimas, elaboradas con HAC será superior a la del hormigón tradicional.

Con respecto a los costos que implica llevar a cabo una obra marítima con hormigón autocompactante, este es alrededor de un 40% más costoso en contraste con un hormigón tradicional, pero este costo es compensado con una importante reducción de la mano de obra, arriendo de maquinaria y mantención ya que el costo global de la obra, se ve disminuido al requerir de menos personal y maquinaria para su aplicación, reduciendo los tiempos de trabajo.

Es importante señalar que el hormigón autocompactante es mucho más amigable con el medio ambiente que el hormigón tradicional, ya que la emisión de CO₂ es disminuida en gran medida gracias a la utilización de residuos industriales, como cenizas volantes y filler en la elaboración del HAC, además de, la ausencia de vibrado disminuyendo la contaminación acústica.

Se puede inferir que la ausencia del hormigón autocompactante en las obras marítimas chilenas, se ve limitado, ya que en los últimos años no se han registrado grandes obras marítimas en donde se le pueda dar una chance al hormigón autocompactante, además del poco conocimiento de nuevas tecnologías para la construcción.

Finalmente, de acuerdo a lo investigado se puede decir que el hormigón autocompactante tiene un mejor desempeño en obras de ingeniería marítima.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Urrutia, R. Determinación de parámetros que afectan la resistencia a fatiga de hormigones. 2011. 311 p.
- [2] Ouchi, M. Self compacting concrete development, applications and investigations. Nordic Concrete Research, 1999.
- [3] Okamura, H. Self compacting high performance concrete. Concrete International. July 1997.
- [4] Aitcin, P.C., Gagne, R. y Pigeon, M. Deicer salt scaling resistance of high performance concrete. Paul Klieger Symposium on Performance Concrete. 1989.
- [5] Bartos, P. Key properties of fresh Self-Compacting Concrete: A Case for Standardisation, Proc., Seminar on Self-Compacting Concrete, Malmo / Copenhagen. 2000.
- [6] Hashimoto, C., Maruyama, K. y Shimizu, K. Study on visualization technique for blocking of fresh concrete flowing in pipe. Concrete Library International, 1989.
- [7] Yepes Piqueras, V. ¿Fueron los griegos buenos ingenieros? Valencia. 2012.
- [8] Peña Olivas, José Manuel. Ingeniería e Historia. OP. Ingeniería y Territorio. 2001.
- [9] Skarendahl, A.; Petersson, O. Self Compacting Concrete. Final Report of Task 1. Preliminary Mix Design. Swedish Cement and Concrete Research Institute. 1999.
- [10] Ozawa, K., Sakata, N. y Okamura, H. Evaluation of Self Compactability of Fresh Concrete, Using the Funnel Test. Proc. Japan Society of Civil Engineers, Vol.23, n0 490, 1994.
- [11] Shah, S., y Ahmad, S. Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete. Journal of the Prestressed Concrete Institute, 1985.
- [12] Gettu, R. y Agulló, L. Estado del arte del hormigón autocompactante y su caracterización, Informe C4745/1, Universidad Politécnica de Cataluña. 2003.
- [13] Navarro Vaquerizo, J.M. y Puerta Gutiérrez F. El viaducto de Navia. Una experiencia en Hormigón autocompactable en Comunicaciones del 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, España, 2008.
- [14] Neville, A.M. Properties of Concrete. Fourth Edition. Editorial Longman. London. England. 1997.
- [15] Khayat, K., HU, C. y Monty, H. Stability of Self-Consolidating Concrete, Advantages and Potencial Applications. 1er International RILEM Symposium om Self-Compacting Concrete. 1999. Stockholm. Proceedings RILEM Publications 1999.

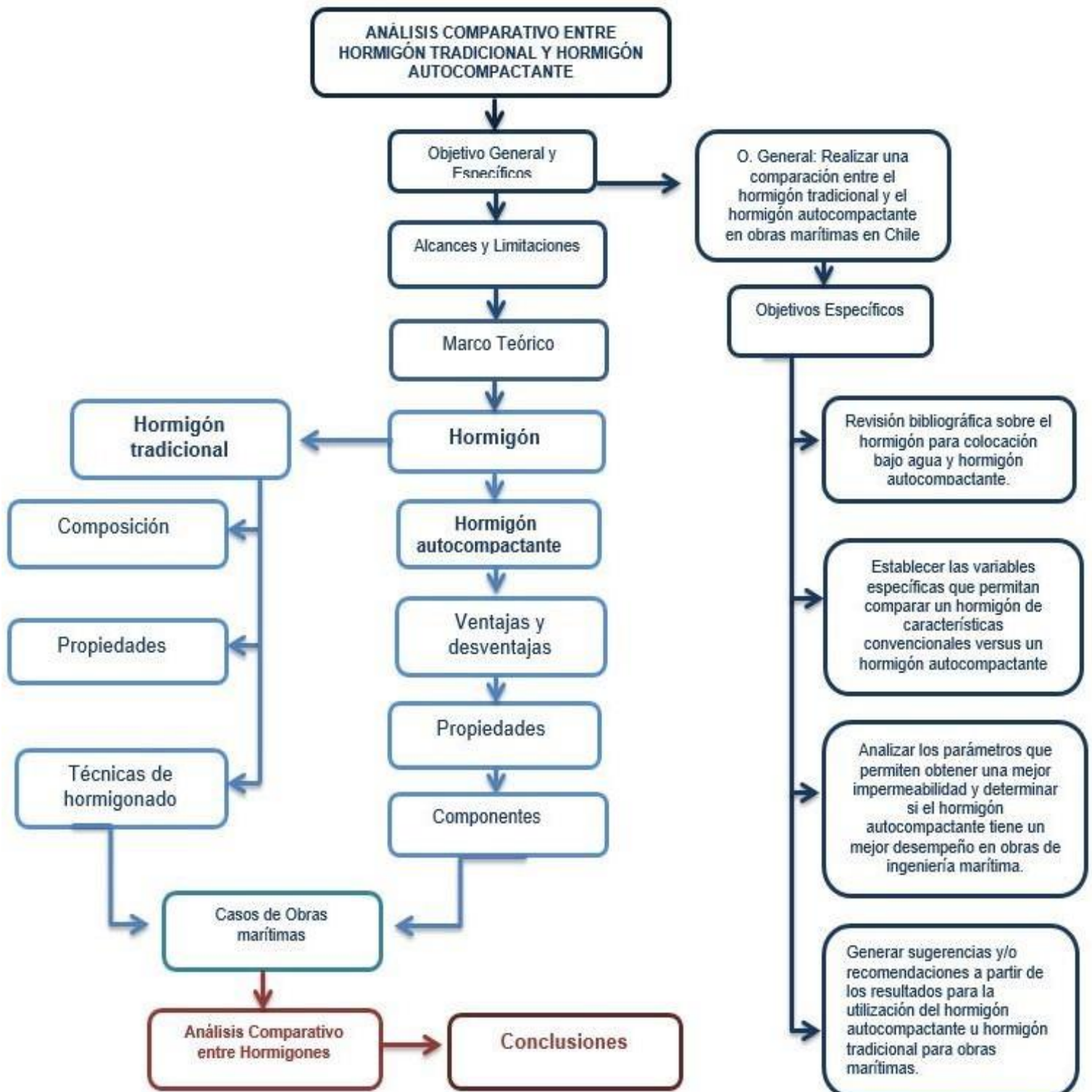
- [16] Gomes, P.C.C., Gettu, R. y Agulló, L. Una nueva metodología para la obtención de hormigones autocompactantes de alta resistencia con aditivos minerales. V Simposio EPSUP. Estructuras de Hormigón. 2003.
- [17] Fernandez, M. Hormigón. Colegio de Ingenieros de caminos Canales y Puertos. Octava Edición. Octubre 2007.
- [18] Bui, V.K., Akkaya, Y. y Shah, S.P. Rheological Model for Self - Consolidating Concrete. ACI Mater. J., vol.99, 2002.
- [19] Su, J., Cho, S., Yang, C. y Huang, R. Effect of sand ratio on the elastic modulus of self-compacting concrete. Journal of Marine Science and Technology. Vol. 10. No. 1. 2002.
- [20] De Holanda, D. Contribucao ao Estudo de Propriedades do Concreto Auto-Adensavel Visando sua Aplicacao em Elementos Estruturais. Master Thesis. 2006.
- [21] Mata, L. Implementation of Self-Consolidating Concrete (SCC) for Prestressed Concrete Girders. Master Thesis. Master of Science in Civil Engineering. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering. North Carolina State University. Raleigh, North Carolina, U.S.A. 2004.
- [22] Mehta, P. y Malhotra, V. Pozzolanics and cementitious materials. 1987.
- [23] Christianto, H. Effect of Chemical and Mineral Admixtures on the Fresh Properties of Self Compacting Mortars. 2004.
- [24] Druta, C. Tensile Strength and Bonding Characteristics of SelfCompacting Concrete. 2003.
- [25] Hameed, M.A. A study of mix design and durability of self-compacting concrete. 2005.
- [26] Erdogan, T. Admixture for Concrete. METU. Press. Ankara. Turkey. 1997.
- [27] Zhou, J. Microstructure and Permeability of Portland Cement Blended with Blast Furnace Slag, Fly Ash and Limestone Powder. 2006.
- [28] Bosiljkov, V.B. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. Cement and Concrete Research. No. 33, 2003.
- [29] Ray, I. y Chattopadhyay, R. Effect of silica fume on superplasticized concrete. International Conference on Concretes, Dundee, Scotland 1999.
- [30] Cervantes, V. y Roesler, J. Ground Granulated Blast Furnace Slag. Tech Note No. 35. University of Illinois, Department of Civil and Environmental Engineering. Urbana. Illinois. U.S.A. 2007.
- [31] Hale, W., Bush, T. y Russell, B. Interaction of blast furnace slag and Class C fly ash with type I cement. 2000.
- [32] YENES 2015
- [33] Cortes R. Tesis 2012, " Estudio de la influencia del tipo y cantidad de aditivo en la permeabilidad de hormigones autocompactantes ". Universidad de Valparaíso.

- [34] Rojas Batarce R. Tesis 2002, "Efecto del tipo de aditivo en el hormigón autocompactante". Universidad de Valparaíso.
- [35] De la Peña Riquelme, Bernardo. Propiedades y uso del hormigón autocompactante. 2000.
- [36] Horst, G.; Dusseldorf, J.: "Self-Compacting Concrete: Another Stage in the Development of the 5 Component System of Concrete", Concrete Technology Report Verein Deutscher Zementwerke (1999)
- [37] Heirman, G.; Vandewalle, L "The influence of fillers on the properties of self-compacting concrete in fresh and hardened state" August 2003.
- [38] Klug, Y.; Holschemacher, K.: "Comparison of the hardened properties of self-compacting concrete and normal vibrated concrete". 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete. Reykjavic, Iceland (2003)
- [39] Assié, S., Escadeillas, G. y Waller, V. (2007). Estimates of self-compacting concrete "potential" durability. Construction and Building Materials
- [40] Collepardi, Self-consolidating concrete, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, (2007)
- [41] Koehler, E.; Fowler, D.: "Aggregates in Self-Consolidating Concrete." Aggregates Foundation for Technology, Research and Education (AFTRE), International Center for Aggregates Research (ICAR), University of Texas at Austin. March (2007)
- [42] Coppola, L. (2000). Self-Compacting Concrete. Concrete Technology. 42-47 p.
- [43] EFNARC (2002). Specification and guidelines for self-compacting concrete (Vol. 44). Farnham, Reino Unido. <http://www.efnarc.org/publications.html>
- [44] Nagataki. (1995). Porous and Complex Flow Structures in Modern Technologies.
- [45] Uysal, M. y Yilmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Composites, 771-776 p.
- [46] Arredondo, F. Estudio de materiales: V.-Hormigones. Madrid:Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. 1972.
- [47] Andriamanantsilavo, N. R.; Amziane, S. (2004). Maturation of fresh cement paste within 1 to 10 m large formworks. Cement and Concrete Research. 2141-2152 p.
- [48] Contreras Gómez (2016) Informe técnico N°25/2016 Socavon muro Av. Peru costado Enjoy del Mar, Viña del Mar.
- [49] Pacios, A. (2003). El hormigón autocompactable: tecnología sostenible para el sector construcción. Revista Hormigón y Acero N° 228-229. 2do. y 3er, trimestre 2003
- [50] BORRALLERAS, P y JOFRÉ, C. (2007). Realizaciones con Hormigón Autocompactante (Parte 1 y 2). Revista Cemento y Hormigón N 899. Madrid. España.

[51] BARTOS, P. y CECHURA, J. (2001). Improvement of Working environment in concrete construction by the use of self compacting concrete. Structural Concrete. Vol. 2. No. 3. Septiembre 2001.

ANEXOS

Anexo 1: Mapa Conceptual



Anexo 2: Cotización Hormigón Tradicional, Hormigones Tecnomix.



Cuenta
con nosotros



Señores

Con Con, 28 de Octubre del 2015

INGENIERIA Y CONSTRUCCION INGECO S.A.
 Viña del Mar
 Presente

TX06-3021-5-15

Atn. Sr. FERNANDO BALBONTIN

**Ref: Suministro de Hormigones EDIFICIO PACIFICO
 MONTEMAR**

Fono 32-2810064 56181537

Fax

Mail fbalbontin@ingeco.cl

De nuestra consideración

Es grato dirigirme a Ud., para hacerle llegar nuestros precios para la provisión de hormigones para la siguiente obra:

Nombre Proyecto	EDIFICIO PACIFICO MONTEMAR	Mandante	NUMANCIA
Dirección	LAS ARAUCARIAS 789 LOMAS DE MONTEMAR	Inicio de la obra	01-10-2015
Plazo de ejecución	8 meses	Cantidad aprox.	3720 m3

A. HORMIGONES

Nº	Tipo	Unidad	Precio Unitario UF/m3
1	S128 (00) 40/6	m3	1,44
2	HB30 (90) 20/10	m3	1,89
3	HB35 (90) 20/10	m3	2,00
4	HB40 (90) 20/10	m3	2,13
5	HN30 (90) 40/8	m3	1,86
6	HN30 (90) 20/08	m3	1,92
7	HB30 (90)20/12	m3	1,95
8	HN35 (90) 40/8	m3	1,92
9	HB35 (90) 20/12	m3	2,00
10	S086 (00)20/06	m3	1,33
11	HN25 (90) 20/8	m3	1,87
12	HB25 (90) 20/10	m3	1,90
13	HB25 (90) 20/12	m3	1,91
14	HB25 (90) 20/10 R3	m2	2,15
15	HB25 (90) 20/10 R7	m3	2,10
16	PENETRON	m3	0,65
17	Maxicret GB30(90)20-10	m3	2,74
18	HN35 (90) 20/08	m3	1,97

Anexo 3: Presupuesto Municipal, reparación muro de contención Av. Perú.

PRESUPUESTO REFERENCIAL					
REPARACION Y REFUERZO DE BASE DEL MURO DE CONTENCIÓN AV PERU SECTOR ENJOY DEL MAR					
ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
1	INSTALACION DE FAENA	GL	1	\$ 2 850 000	\$ 2 850 000
2	SEGURIDAD POR RIESGO EN AREA DE TRABAJO	GL	1	\$ 3 500 000	\$ 3 500 000
3	PREPARACION O DESPEJE DE TERRENO	GL	1	\$ 598 600	\$ 598 600
4	DEMOLICION PAVIMENTO EXISTENTE	m2	12	\$ 26 800	\$ 321 600
5	EXCAVACION Y TRASLADO A BOTADERO	M3	30	\$ 19 600	\$ 588 000
6	RETIRO ARENA BAJO MURO GRAVITRACIONAL	ml	12	\$ 155 000	\$ 1 860 000
7	INSERTO DE ACERO	Un	20	\$ 16 900	\$ 338 000
8	MOLDAJE (SACOS DE ARENA)	ml	12	\$ 271 512	\$ 3 258 144
9	HORMIGON AUTOCOMPACTANTE (HAC)	m3	10	\$ 198 600	\$ 1 986 000
10	RELLENO ESTRUCTURAL	m3	15	\$ 27 250	\$ 408 750
11	BASE ESTABILIZADA = 10CMS	m3	3	\$ 6 980	\$ 20 940
12	RADIER	m2	12	\$ 31 600	\$ 379 200
13	RETIRO ELEMENTOS DE CONTENCIÓN	ml	12	\$ 90 000	\$ 1 080 000
14	ASEO FINAL Y ENTREGA	GL	1	\$ 350 000	\$ 350 000
SUBTOTAL					\$ 17 539 234
GASTOS GENERALES (10%)					\$ 1 753 923
UTILIDAD (15%)					\$ 2 893 974
TOTAL NETO					\$ 22 187 131
IVA (19%)					\$ 4 215 555
GRAN TOTAL					\$ 26 402 686