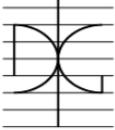


TRABAJO FIN DE MASTER

MODELOS PREDICTIVOS DE RESISTENCIA Y DURABILIDAD EN HORMIGONES

Por:
María Victoria Ortiz Bruno

Autor/Author: María Victoria Ortiz Bruno	Fecha/Date: 14/09/2019	
Título/Title: Modelos predictivos de resistencia y durabilidad en hormigones.		
Director del trabajo/Supervisor: Navarro Ferrer, Ferran	Código/Code: CST/MIH	Nº de páginas/Pages: 145
Departamento/ Departament: INGENIRÍA DE LA CONSTRUCCION Y PROYECTOS DE INGENIERIA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA	 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA	 MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN UNIVERSITAT POLITÈCNICA VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Hormigón, Durabilidad, Resistencia a compresión, Inteligencia Artificial, Redes neuronales/ Concrete, Durability, Compression Resistance, Artificial Intelligence, Neural Networks.		
Código Unesco: 3305/05 Ciencias tecnológicas / Tecnología de la construcción / Tecnología del Hormigón		

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Ferran Navarro Ferrer, tutor de este Trabajo Final de Master, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo y por el respeto a mis sugerencias e ideas.

A los profesores del Máster en Ingeniería del Hormigón, de la Universitat Politècnica de València, por su profesionalidad y ayuda en todo momento.

Y por ultimo a mi familia, que sin su apoyo nada de esto sería posible.

RESUMEN

En el hormigón es el material más empleado en la construcción, y por tanto será necesario conocer su comportamiento a lo largo de su vida útil. La durabilidad del hormigón depende principalmente de su dosificación, en concreto del tipo de cemento y relación agua-cemento, y en menor grado de importancia podemos encontrar otros factores que influyen en el desempeño del mismo.

En este trabajo se presenta una base de datos construida con resultados de ensayos obtenidos a partir de artículos científicos orientados al estudio de la durabilidad del hormigón, en concreto a dos factores claves en este tema, los cuales son la penetración y la difusión de cloruros. Para ello se obtuvo de cada uno de los artículos las distintas dosificaciones, composiciones químicas de los materiales cementicios, tipos y temperaturas de curado, resistencia a la compresión y los resultados obtenidos tanto de los ensayos de penetración como de difusión de cloruros

Para analizar la influencia de los diferentes parámetros en la durabilidad del hormigón, se ha utilizado estadística clásica y redes neuronales artificiales, y así poder predecir el comportamiento de los diferentes hormigones frente a los ataques por cloruros.

Se comprueba que los resultados obtenidos mediante redes neuronales artificiales son mejores que los obtenidos mediante métodos clásicos de estadística. Así mismo, se confirma que las principales variables que influyen el comportamiento del hormigón frente al ataque por cloruros son la relación agua-total material cementante, el tipo de cemento y el contenido de adiciones.

ABSTRACT

Concrete is the material most used in construction; therefore, it will be necessary to know the behavior in the life service. The durability of the concrete depends on mixes, principally the cement type and the water-cement ratio, to lesser degree importance we can find other factors that influence to concrete performance.

This document presents a database constructed with results from different scientific articles oriented to study the concrete durability, focusing on a key factor to determine the concrete durability, such as the penetration and diffusion of chlorides. For this, was obtained different mixes, chemical compositions of the cementitious materials, curing types, results of compression tests and results of penetration diffusion of chlorides.

To analyze the influence of different parameters on the concrete durability was used classic statistic and artificial neural networks and thus be able to predict the behavior of this according to parameters.

It is verified that the results obtained by artificial neural networks are better than the results obtained by classical statistical methods. Also, it is confirmed the main variables that influence the behavior of concrete to the attack by chlorides are the water-total cementitious materials ratio, the concrete type, and the supplementary cementitious materials.

ÍNDICE

LISTADO DE IMÁGENES	7
LISTADO DE TABLAS	8
LISTADO DE GRÁFICAS	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. OBJETIVOS	13
1.2. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	13
2. ESTADO DEL ARTE	15
2.1. DURABILIDAD: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	15
2.1.1. INTRODUCCION A LA DURABILIDAD DE LOS HORMIONES	15
2.1.2. ANALISIS DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS	16
2.1.3. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS CRÍTICOS	18
2.1.4. MECANISMO DE TRANSPORTE DE CLORUROS	20
2.1.5. MODELOS DE CUANTIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN	22
2.1.6. METODOLOGÍAS DE ENSAYO	24
2.2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	30
2.2.1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	30
2.2.2. HISTORIA DE LAS REDES NEURONALES	31
2.2.3. FUNCIONAMIENTO	32
2.2.4. TIPOS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES	34
2.2.5. NUMERO DE NEURONAS DE LA CAPA OCULTA	35
2.2.6. APRENDIZAJE DE LA RED NEURONAL	36
2.2.7. SOBREALPRENDIZAJE DE LA RED	38
2.2.8. DATOS DE ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y TEST	38
2.2.9. ESTANDARIZACIÓN DE LOS DATOS	40
2.2.10. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	40
3. BASES DE DATOS	41
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN MEDIANTE MODELOS ESTADÍSTICOS CLÁSICOS	65

4.1.	INTRODUCCIÓN	65
4.2.	LA INFLUENCIA DE DIFERENTES VARIABLES Y MODELOS ESTADÍSTICOS.	65
5.	APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	82
5.1.	ELABORACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	82
5.2.	RESUMEN DE LA APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	100
6.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	102
6.1.	CONCLUSIONES GENERALES	102
6.2.	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	102
6.3.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	103
7.	BIBLIOGRAFÍA	104
	ANEXO A: TABLAS DE DOSIFICACIÓN CORRESPONDIENTES A LAS BASES DE DATOS	113

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1, Mecanismos físicos y químicos del deterioro del hormigón (Bernal Camacho, 2014).	12
Imagen 1, Mecanismos de deterioro en el hormigón (Ulloa Mayorga, 2012).	15
Imagen 2, Fase de iniciación y propagación de la corrosión. Diagrama propuesto por Tuutti (1982).	17
Imagen 3, Definiciones para umbrales de cloruro basados en el modelo de Tuutti (Ueli Angst, y otros, 2009).	18
Imagen 4, Contenido crítico de cloruros en función a la humedad ambiente (Ulloa Mayorga, 2012).	19
Imagen 5, Causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado (Ulloa Mayorga, 2012).	20
Imagen 6, Ejemplo de a) evolución del contenido de cloruros con el tiempo, b) regresión lineal del periodo correspondiente al estado estacionario y la representación del tiempo de paso (UNE 83987, 2014).	25
Imagen 7, Esquema de una muestra típica, (ASTM-C1556, 2016).	26
Imagen 8, Esquema del ensayo ASTM C1202 (2019).	27
Imagen 9, Esquema del ensayo noruego de difusión de cloruros (NT BUILS 492, 1999).	28
Imagen 10, Esquema del ensayo de migración de cloruros (UNE 83987, 2014).	29
Imagen 11, Topología modelo de una red neuronal artificial.	30
Imagen 12, Funcionamiento de una neurona artificial k (Navarro Ferrer, 2016).	33
Imagen 13, Tipología de funciones de transferencia (Navarro Ferrer, 2016).	33
Imagen 14, Conexión Tipo Feedforward.	34
Imagen 15, Conexión Tipo Recurrente.	34
Imagen 16, Conexión Tipo feedback.	34
Imagen 17, Análisis del fenómeno de “sobreadrendizaje” de la red (Flórez López, y otros, 2008).	38
Imagen 18, Coeficientes de correlación.	83
Imagen 19, Información de red neuronal en Matlab R2018b.	84

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1, Variables primarias y secundarias de los modelos según (Shafikhani & Chidiac, 2019).	22
Tabla 2, Valores comparativos cualitativos de la penetrabilidad del ion cloruro (ASTM-C1202, 2019).	27
Tabla 3, Numero de neuronas de la capa oculta según diversos autores (Navarro Ferrer, 2016).	36
Tabla 4, Número de datos de cada una de las bases.	41
Tabla 5, Parte 1-Articulos correspondientes a la Base de datos.	42
Tabla 6, Parte 2-Articulos correspondientes a la Base de datos.	43
Tabla 7, Pasos sucesivos para la variable de Permeabilidad de cloruros.	77
Tabla 8, Ecuaciones de regresión para la permeabilidad de cloruros y valores de R2 para los distintos modelos de estudio.	77
Tabla 9, Ecuaciones de regresión para la permeabilidad de cloruros y valores de R2 para los distintos modelos de estudio.	78
Tabla 10, Pasos sucesivos para la variable de Coeficiente de difusión de cloruros.	78
Tabla 11, Tabla A.9.4 correspondiente a la Instrucción EHE-08, Anejo 9, punto 1.2.2.2.	79
Tabla 12, Ecuaciones de regresión para el coeficiente de difusión de cloruros y valores de R2 para los distintos modelos de estudio.	79
Tabla 13, Pasos sucesivos para la variable de Resistencia a la compresión.	80
Tabla 14, Ecuaciones de regresión para la resistencia a la compresión y valores de R2 para los distintos modelos de estudio.	80
Tabla 15, Valores de R obtenidos en función del número de neuronas en la capa oculta en la RNA 5.	82
Tabla 16, Variables de salida en las distintas RNA.	85
Tabla 17, Variables de entrada para las distintas redes neuronales artificiales.	86
Tabla 18, Variables de entrada para las distintas redes neuronales artificiales.	87
Tabla 19, Resumen de redes neuronales-Permeabilidad de cloruros a 28 días como variable de salida.	97
Tabla 20, Resumen de redes neuronales-Resistencia a la compresión a 28 días como variable de salida.	97
Tabla 21, Resumen de redes neuronales-Coeficiente de difusión de cloruros a 28 días como variable de salida.	98
Tabla 22, Variables de entrada para las distintas redes neuronales artificiales.	98
Tabla 23, Valores del coeficiente R2 para distintas redes neuronales artificiales.	101

LISTADO DE GRÁFICAS

Grafica 1, Permeabilidad de cloruros en función a la relación agua-total de material cementante (843 datos).	66
Grafica 2, Coeficiente de difusión de cloruros en función a la relación agua-total de material cementante (445 datos).	66
Grafica 3, Resistencia a la compresión en función a la relación agua-total de material cementante (228 datos).	66
Grafica 4, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de agua (843 datos).	67
Grafica 5, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido de agua (445 datos).	68
Grafica 6, Resistencia a la compresión en función al contenido de agua (228 datos).	68
Grafica 7, Permeabilidad de cloruros en función al contenido total de material cementante (843 datos).	69
Grafica 8, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido total de material cementante (228 datos).	69
Grafica 9, Resistencia a la compresión en función al contenido total de material cementante (843 datos).	69
Grafica 10, Permeabilidad de cloruros en función al porcentaje de contenido de cemento CEM I.	70
Grafica 11, Coeficiente de difusión de cloruros en función al porcentaje de contenido de cemento CEM I.	70
Grafica 12, Resistencia a la compresión en función al porcentaje de contenido de cemento CEM I.	71
Grafica 13, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de metacaolín.	71
Grafica 14, Coeficiente de difusión en función al contenido de metacaolín.	72
Grafica 15, Resistencia a la compresión en función al contenido de metacaolín.	72
Grafica 16, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de ceniza volante.	73
Grafica 17, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido de ceniza volante.	73
Grafica 18, Resistencia a la compresión en función al contenido de ceniza volante.	73
Grafica 19, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de humo de sílice.	74
Grafica 20, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido de humo de sílice.	74
Grafica 21, Resistencia a la compresión en función al contenido de humo de sílice.	75
Grafica 22, Permeabilidad de cloruros en función a la resistencia a la compresión a 28 días.	75
Grafica 23, Coeficiente de difusión de cloruros en función a la resistencia a la compresión a 28 días.	76
Grafica 24, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 1.	85
Grafica 25, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 2.	88
Grafica 26, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 9.	89
Grafica 27, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 14.	89
Grafica 28, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 15.	90
Grafica 29, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 3.	90
Grafica 30, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 10.	91
Grafica 31, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 16.	91
Grafica 32, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 4.	92
Grafica 33, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 11.	93
Grafica 34, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 17.	93
Grafica 35, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 5.	94
Grafica 36, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 18.	94
Grafica 37, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 6.	95
Grafica 38, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 12.	95
Grafica 39, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 7.	96

Grafica 40, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 13.	96
Grafica 41, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 8.	97
Grafica 42, Ajuste Lineal de las redes neuronales artificiales RNA 19.	99
Grafica 43, Ajuste Polinómico de las redes neuronales artificiales RNA 19.	99
Grafica 44, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 20.	100

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material de construcción más utilizado a nivel mundial por su versatilidad. Este es un material compuesto principalmente de tres elementos, cemento, agua y árido. En su estado fresco, el hormigón tiene que garantizar buenos niveles de homogeneidad, capacidad de trabajo y compactibilidad, mientras que en estado endurecido su requisito habitual es cumplir con un valor determinado de resistencia a la compresión característica (generalmente a 28 días).

De acuerdo con los códigos y normas, se espera que el hormigón resista las cargas para las que ha sido diseñado, además es necesario mantener su resistencia y servicio a través de su vida útil, por lo tanto, debe de ser duradero. Esto implica que deberá soportar todo tipo de deterioro, ya sea ocasionado por el entorno, por reacciones entre sus materiales u otras incidencias.

En condiciones adecuadas el hormigón tiende a ser un material de larga duración, aunque frente a acciones de diversos agentes pueden reducir su vida útil. Si bien se ve como un material compacto, el hormigón es un material poroso, permitiendo el paso de agentes agresivos a su interior, ya sea en estado líquido como gaseoso.

En las últimas décadas se ha comenzado a desarrollar el estudio sobre la durabilidad del hormigón, dado que se han puesto de manifiesto sus limitaciones respecto al comportamiento frente a ambientes agresivos.

La durabilidad de una estructura de hormigón puede definirse como la capacidad de resistir durante su vida útil distintas condiciones físicas y químicas a las que está expuesta.

Normativas a nivel mundial plantean estrategias capaces de construir estructuras de hormigón duraderas, lo cual supone, en relación a la dosificación y comportamiento, limitar la máxima relación agua/cemento y el contenido mínimo de cemento como requisitos generales. Además, se plantean otros requisitos si fuera el caso, como el tipo de cemento, el contenido mínimo de aire ocluido, utilización de cementos sulfuresistentes o resistentes al agua de mar y resistencia frente a la erosión o bien frente a las reacciones álcali-árido.

Según Bernal Camacho (2014), los principales factores de deterioro del hormigón pueden ser bien físicos, como son ciclos de hielo-deshielo, abrasión, fuego, etc. O químicos, como la corrosión de la armadura, ataque por cloruros, ácidos, sulfatos, reacción álcali-árido, carbonatación, disoluciones, etc. Este investigador ha realizado una revisión de más de 400 artículos publicados en los años noventa sobre el deterioro del hormigón. En la Imagen 1 se puede observar la clasificación de estos tipos de deterioro y en ella se destaca el alto porcentaje de estructuras afectadas por ataque de cloruros (16%) y carbonatación (16%).

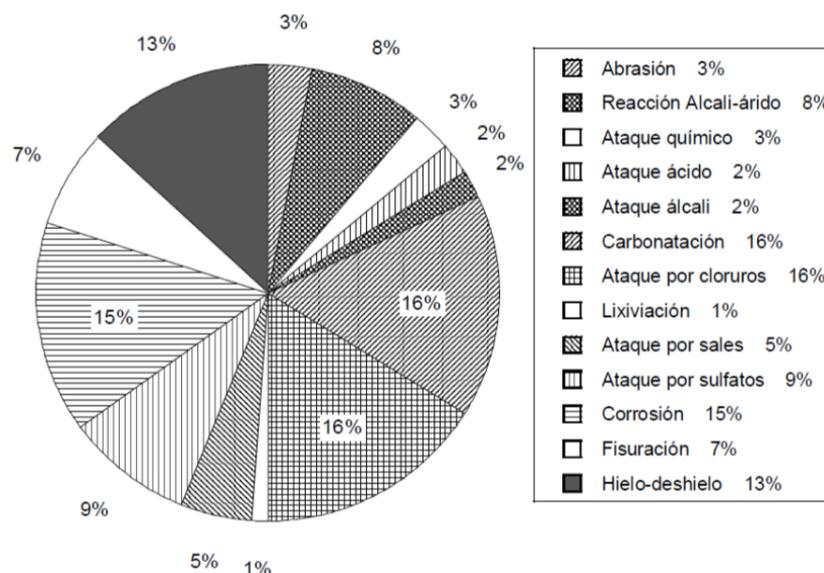


Imagen 1, Mecanismos físicos y químicos del deterioro del hormigón (Bernal Camacho, 2014).

Para el cálculo de la vida útil de una estructura de hormigón frente a estos tipos de ataque se deberá tener en cuenta el periodo de iniciación, que será el tiempo que tardan los cloruros en alcanzar las armaduras y despasivarlas, y este dependerá de la velocidad de difusión o penetración. Y el periodo de propagación, que será el tiempo en que la corrosión alcance un grado de corrosión significativo y ocasione fisuras en el hormigón, lo cual lleva a un desprendimiento de los recubrimientos. Este dependerá de las condiciones de oxígeno y humedad del material.

Actualmente se proponen una variedad de ensayos experimentales para determinar la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros. Algunos de ellos consisten en calcular el coeficiente de difusión de cloruros, que determina la capacidad de penetración del ion a través de la red porosa del hormigón. Otros métodos aplican una diferencia de potencial sobre la probeta para cuantificar la cantidad de carga eléctrica que se transporta por medio de ella y obtener una evaluación más rápida del material. Este último ensayo, nos permite evaluar las mezclas de hormigón mediante indicadores de durabilidad que se encuentran directamente relacionadas con la penetración de cloruros.

Entonces, resulta necesario encontrar medios adecuados para predecir confiablemente el ingreso de cloruro al hormigón, con un enfoque en el período de iniciación. Hoy día, existe necesidad de profundizar los conocimientos sobre los mecanismos de ingreso de cloruro en el hormigón con el fin de desarrollar metodologías y tecnologías que permitan predecir e incrementar la vida útil de las estructuras en servicio en ambiente agresivos.

A nivel internacional hay tendencias hacia modelos de predicción probabilísticos y a modelos analíticos. Actualmente, no todas las variables que afectan a la velocidad de ingreso de cloruro en el hormigón están completamente definidas, y los modelos existentes no consideran integralmente factores como la temperatura, contenido de humedad y proporciones de los materiales constituyentes. En el ámbito internacional no existe aun consenso sobre la aplicabilidad de ningún modelo de predicción, pero son numerosos los esfuerzos de avance en este campo. En esto debe considerarse que cada modelo fue desarrollado para situaciones locales particulares y no es directamente extrapolable a otros ámbitos.

Recientemente, algunos investigadores han introducido las redes neuronales artificiales en el procesamiento de datos en el campo de la durabilidad, siendo muy eficientes en comparación

con el método estadísticos a partir de datos experimentales. Las redes neuronales no son más que un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, siendo un sistema capaz de adquirir conocimiento a través de la experiencia. Una red neuronal es un sistema elaborado para el tratamiento de la información, cuya unidad básica de procesamiento está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano, la neurona.

Al día de hoy seguimos esforzándonos para la búsqueda de relaciones y modelos que sirvan para determinar la influencia que ejercen los distintos materiales constituyentes del hormigón, así como determinados parámetros tecnológicos y ambientales en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón armado.

Este estudio, utilizará tanto el análisis estadístico clásico y como redes neuronales, para la evaluación y predicción del coeficiente de difusión y permeabilidad ante cloruros. El análisis tendrá en cuenta diversos componentes del diseño de la mezcla y del curado. Los distintos datos han sido tomados de ensayos experimentales realizados por otros investigadores, que tenían como objeto de estudio la durabilidad del hormigón frente a ataques por cloruros.

1.1. OBJETIVOS

El objeto principal de este TFM es poder comprender la influencia que tiene el diseño de la mezcla y el curado de las muestras de hormigón sobre la resistencia a compresión y durabilidad, precisamente sobre el ataque de cloruros. Para el análisis se utilizaran diferentes modelos que nos ayuden a comprender las relaciones existentes entre estas, los modelos utilizados son Estadística Clásica y Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Para ello se ha elaborado unas bases de datos, mediante una búsqueda exhaustiva de artículos científicos, donde se analizaban distintos tipo de hormigón con distintos materiales constituyentes. Una vez construidas las bases de datos, hemos dividido en dos partes diferentes el análisis entre las variables de la mezcla y de curado con los parámetros de durabilidad y resistencia a compresión. Por un lado, se realizará un análisis estadístico con el fin de evaluar las diferentes relaciones que existen, aplicando modelos de regresión lineales simples o múltiples. Mientras que la segunda parte se realizará un análisis de estas variables mediante redes neuronales artificiales, con el fin de predecir la resistencia a la compresión, permeabilidad y difusión de cloruros.

Como objetivos secundarios, analizaremos los pesos que tienen las variables más relevantes con respecto a la resistencia a la compresión, permeabilidad y difusión de cloruros, con los modelos anteriores, evaluando el rendimiento de los métodos de análisis utilizados.

1.2. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo se ha estructurado de la siguiente manera.

Capítulo 1, *Introducción*, se realiza un breve acercamiento al tema de estudio, y cual es el objetivo para este trabajo.

Capítulo 2, *Estado del Arte*, se realiza el estado del arte sobre los temas abordados, dividiéndose en dos partes, la primera correspondiente al tema de la durabilidad del hormigón frente a ataques por cloruros, mientras que la segunda parte hace una descripción y análisis de las Redes Neuronales Artificiales.

Capítulo 3, *Bases de datos*, se realiza un resumen del objeto de estudio y conclusiones de cada una de las bases de datos utilizadas para la realización de este trabajo.

Capítulo 4, *Análisis y discusión mediante modelos estadísticos clásicos*, se presenta el estudio estadístico de las relaciones entre las variables explicativas con la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la difusión de cloruros, mediante modelos de regresión lineales simples o múltiples, obteniendo de cada uno de ellos las medidas del coeficiente de correlación al cuadrado R^2 . Se discutirán los datos obtenidos.

Capítulo 5, *Aplicación de las redes neuronales artificiales*, se realizará un análisis mediante redes neuronales artificiales para la predicción de la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la difusión de cloruros mediante a las mismas variables explicativas utilizadas en el capítulo anterior, más una serie de variables nuevas. De cada red se obtiene el coeficiente de determinación R^2 . Se discutirán los datos obtenidos.

Capítulo 6, *Conclusiones*, se describen las conclusiones del trabajo y se definen posibles líneas de investigación surgidas a partir de este trabajo.

Capítulo 7, *Bibliografía*, se presenta la bibliografía utilizada.

Y por último, se incluye el "ANEXO A" con información recopilada de artículos científicos.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. DURABILIDAD: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1.1. INTRODUCCION A LA DURABILIDAD DE LOS HORMIONES

Año tras año se invierten millones de euros en el mundo en la reparación y/o sustitución de elementos estructurales de hormigón armado, debido al deterioro físico, químico y corrosión (Imagen 2). Todos los mecanismos de deterioro implican procesos complejos que tienen lugar en el esqueleto de los poros del hormigón y la gran mayoría de los problemas de durabilidad se deben a acciones sinérgicas entre dos o más procesos diferentes.

Si hablamos de durabilidad del hormigón, existen una diversa variedad de definiciones en la bibliografía consultada, entre ellas podemos encontrar:

- Según ACI 201, se define durabilidad de hormigón como: *“Capacidad para resistir la acción de la intemperie, ataque químico, abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro”*.
- Según el Eurocodigo 2, *“Se entiende por Estado Limite de durabilidad el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada.”*
- Tanto la Instrucción EHE-08 como la norma europea EN 206-1 no definen propiamente lo que significa durabilidad, pero si imponen una serie de requisitos para el correcto funcionamiento de la estructura en lo que se refiere al hormigón como material, ellos son contenido mínimo de cemento, la relación agua-cemento, el tipo de cemento, ciertas limitaciones en cuanto a los áridos y el máximo contenido de adiciones para cada tipo de exposición. Aun así, permite otras dosificaciones que cumplan “prestaciones equivalentes” comparando el hormigón propuesto con uno que si cumple la norma EN 206-1. Para cumplir con dicha normativa se deberá realizar una serie de ensayos y comprobar que se verifican las especificaciones requeridas.

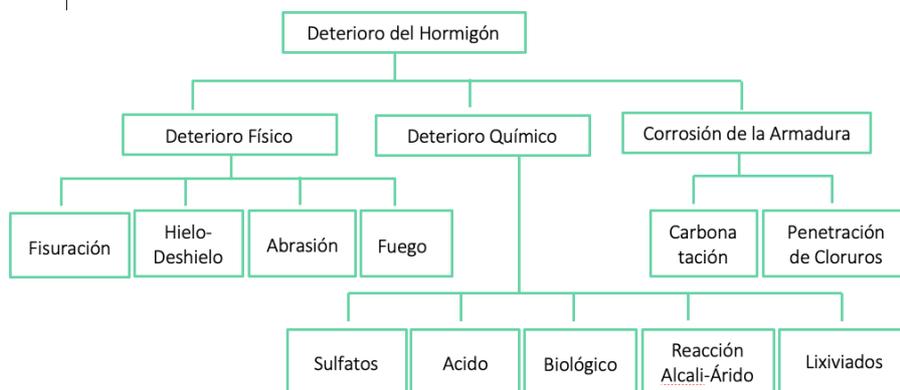


Imagen 2, Mecanismos de deterioro en el hormigón (Ulloa Mayorga, 2012).

Varios autores determinan que uno de los deterioros más frecuente en las estructuras de hormigón es la corrosión de las armaduras provocada por la penetración y difusión de cloruros, provenientes de aguas marinas, aguas subterráneas o sales de deshielo, entre otros. Por tanto,

se deberá tener en cuenta los factores que afectan a nuestra estructura a la hora diseñar el hormigón, para lograr una extendida vida útil del material.

Dada la problemática presente, en los último 50 años la durabilidad del hormigón frente a ataques de cloruros es objeto de investigaciones (*Ueli Angst y otros, 2009*). Esto comienza cuando se reconoce que el cloruro induce la corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón armado, desde entonces se han realizado grandes esfuerzos en la investigación respecto a este tema, realizando numerosas publicaciones, presentando valores para el contenido crítico de cloruro (C_{crit}) en hormigón armado (*Ueli Angs, y otros, 2009*).

Hoy día existen varias estrategias que nos permitirán aumentar la vida útil de nuestra estructura expuesta a cloruros, ellas pueden ser hormigones de alta resistencia, baja permeabilidad, recubrimientos de mayor espesor, inhibidores de corrosión, revestimientos tanto para la estructura como para las armaduras, aceros inoxidable, protecciones catódicas en las estructuras en el momento de la construcción, entre otras. Todos ellos con el fin de garantizar la durabilidad y prolongar la vida útil de la estructura.

Cada estrategia tendrá asociado un procedimiento técnico así como un costo y esta dependerá del uso y vida útil de nuestra estructura, por tanto se deberá encontrar la solución óptima entre los costos asociados y vida útil.

Hay que tener en cuenta que la estrategia de protección puede reducir los costos de reparación futuros o bien ampliar al tiempo que se realice la reparación. Por lo tanto, aunque la implementación de una estrategia de protección puede aumentar los costos iniciales de construcción, puede reducir los costos del ciclo de vida al reducir los costos futuros de reparación.

2.1.2. ANALISIS DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

Se puede definir corrosión como la destrucción o el deterioro de un metal debido a su reacción con el medio que lo rodea. No sólo implica una reducción de su sección sino también un incremento del volumen por la creación de óxido, lo cual genera tensiones sobre el hormigón (recubrimiento), y por consiguiente su fisuración. A medida que la corrosión progresa, las fisuras van siendo cada vez más grandes, promoviendo un mayor ataque y por tanto, reduciendo su vida útil (*Ulloa Mayorga, 2012*).

Como se ha mencionado en el Apartado 2.1.1, el principal causante de la corrosión de las armaduras son los cloruros que ingresan al hormigón desde el exterior. El ataque por cloruros se inicia con mayor frecuencia cuando los cloruros ingresan desde la superficie del hormigón. Los cloruros pueden presentarse en sales, agua de mar, aguas contaminadas o bien en aguas subterráneas.

Cabe señalar, que no es necesario que una estructura este en primera línea de mar para que pueda ser afectada por cloruros, ya que estos pueden trasladarse mediante el viento, por ejemplo la Instrucción de hormigón estructura EHE-08 contempla lo mencionado y determina un ambiente marino hasta 5Km de distancia del mar.

Existen tres mecanismos de ingreso de cloruro a la microestructura del hormigón, ellos son el transporte mediante un liquido, difusión y absorción. Además, la entrada de cloruro es posible con la migración iónica bajo la existencia de tensión diferencial (*Kanellopoulos, y otros, 2012*). En todos los mecanismos mencionados, los cloruros utilizan la red interconectada de poros o cualquier fisura superficial existente para el ingreso al hormigón. Para conseguir que esto no suceda, se recomienda que los poros ocupen el menor volumen posible y que además estos formen una red capilar poco intercomunicada.

Una vez en el interior del hormigón, los cloruros en presencia de oxígeno y humedad atacan la pasividad del hormigón, exponiendo así el acero y haciéndolo susceptible al desarrollo de la corrosión. Los productos de corrosión (óxidos de hierro) ocupan un volumen mayor que el acero del que provienen, esta diferencia de volumen da como resultado una fisuración en la interfaz entre acero y hormigón (Kanellopoulos, y otros, 2012).

Para poder entender como se produce este deterioro de las armaduras por corrosión, es importante definir que es la vida útil. Esta se define como el período entre la construcción hasta la primera reparación (t_r). Este tiempo (t_r), puede determinarse utilizando un modelo cuantitativo para predecir el daño inaceptable para un elemento determinado en un entorno determinado.

Se podrá estimar la vida útil de la estructura de hormigón bajo un proceso de corrosión de su armadura pasiva, mediante dos fases, las cuales fueron propuestas por Tuutti en 1982 (Imagen 3). La primera fase llamada de iniciación se refiere al tiempo que se necesita para alcanzar una concentración determinada de ion cloruro entorno a la armadura, la segunda fase corresponde a la propagación, la cual será el daño estructural ocasionado por a aparición del óxido.

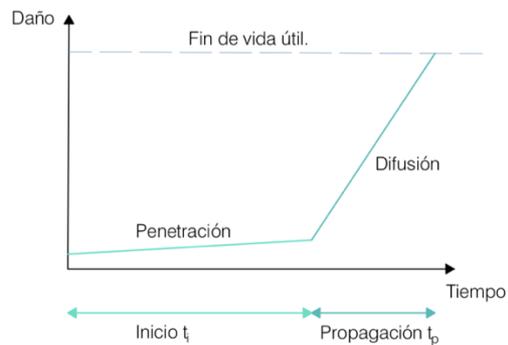


Imagen 3, Fase de iniciación y propagación de la corrosión. Diagrama propuesto por Tuutti (1982).

El período de iniciación (t_i), define el tiempo (velocidad), que tardan los cloruros en penetrar desde el exterior por medio de la superficie del hormigón y acumularse entorno a la superficie de las armaduras y así descomponer la capa pasivadora e iniciar un estado activo de corrosión.

Entendiéndose como capa pasivadora a la interfase que se forma entre el acero y el hormigón, la cual tienen un espesor de aproximadamente 10mm y se crea a partir de un potencial electroquímico apropiado, esta capa protege a la armadura de agresiones del exterior y eleva la alcalinidad del hormigón, la cual tiene un pH entre 12,6 y 13,5. Cuando tenemos bajos espesores de recubrimientos o un hormigón muy poroso la penetración de agentes agresivos se acentúa, llegando hasta armadura, destruyendo esta capa y dando lugar a la corrosión (ACI Committee 222, 2001).

La duración del periodo de iniciación será en función del tipo de hormigón con el que trabajaremos, el espesor del recubrimiento, la clase de exposición a la cual esta sometida la estructura y la concentración de cloruro, para alcanzar la profundidad de la superficie (x_d), necesaria para iniciar la corrosión. En este periodo no se supone que se produzcan daños debidos a cloruros.

El período de propagación (t_p), define el tiempo necesario para que se produzca la corrosión de la armadura, causando un nivel inaceptable ya sea a uno de los elementos o bien a toda la estructura. El tiempo de duración de este periodo dependerá del proceso de corrosión y de lo que consideremos daño inaceptable, el cual variará según la naturaleza de la estructura. La corrosión se verá influenciada por un gran número de factores, incluyendo la naturaleza del

acero, las propiedades del hormigón y su estructura de poros, y por último las condiciones ambientales a la cual este expuesto el hormigón (temperatura y humedad).

Según *Ulloa Mayorga (2012)*, parece excesivo afirmar que se podrá valorar la vida útil en la primera fase del diagrama de Tuutti (1982), donde se define como punto final el momento en que la capa pasivante de la armadura desaparece, ya que el inicio de la corrosión se produce cuando una cierta cantidad de cloruros alcanza la superficie de la armadura y altera la estabilidad y cinética de la capa pasiva.

Se observa que en los últimos tiempos los investigadores han dado mayor importancia a la relación entre la difusión de cloruros, composición química de los productos de hidratación del hormigón y a la microestructura de poros, en comparación a años atrás que solo se consideraba la permeabilidad como un factor clave en la corrosión de la armadura. Por lo que hoy día se desarrollan modelos de difusión de cloruros en función al área superficial de los materiales cementantes, al volumen de poros capilares o bien la relación calcio-sílice del gel silicato cálcico hidratado de la reacción cementicia.

Por lo tanto, para diseñar una estructura duradera se requerirá comprender los mecanismos que controlan el ingreso del cloruro, la interacción física y química entre los iones de cloruro y la estructura de poros del hormigón, y por ultimo la cuantificación de la propiedad del material que controla el transporte de iones de cloruro.

2.1.3. CONCENTRACIÓN DE CLORUROS CRÍTICOS

Para que se produzca la corrosión deberá existir una cantidad determinada de ion cloruro, por tanto se definirá el contenido crítico de cloruros, como la cantidad necesaria para provocar la corrosión activa del acero. Por tanto, será importante para el diseño de nuevas estructuras como para la evaluación de las estructuras existentes el conocimiento del valor crítico de cloruro, incluso ha sido identificado como el parámetro de entrada más decisivo en diversos modelos de comportamiento.

Según *Ueli Angst (2009)*, existen dos formas diferentes de definir el valor crítico, el primero desde el punto de vista científico, entendiéndose como el contenido de cloruro necesario para la despasivación del acero. La segunda, es desde un punto de vista práctico de la ingeniería, siendo el contenido de cloruro asociado al deterioro visible o "aceptable" de la armadura. A diferencia de la primera definición, esta considera las dos fases, iniciación y propagación.

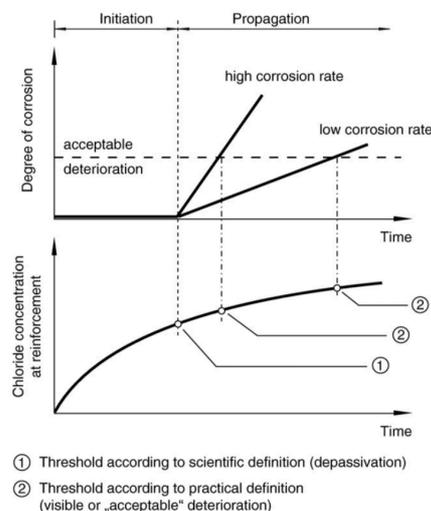


Imagen 4, Definiciones para umbrales de cloruro basados en el modelo de Tuutti (*Ueli Angst, y otros, 2009*).

Hay muchos factores que intervienen en el contenido crítico, por tanto es difícil establecer un único valor. Estos factores no solo son propiamente del hormigón sino también del acero, entre ellos se encuentra el pH de la solución del poro, la humedad, la temperatura, el tipo de catión que acompaña al cloruro, el contenido del aluminato tricálcico (C₃A), la finura de cemento, las adiciones, etc. En cuanto a los factores correspondientes al acero, estos pueden ser su impureza, la composición y la definición de su superficie. A estos factores se deberá agregar las condiciones ambientales del entorno del hormigón (Imagen 5).

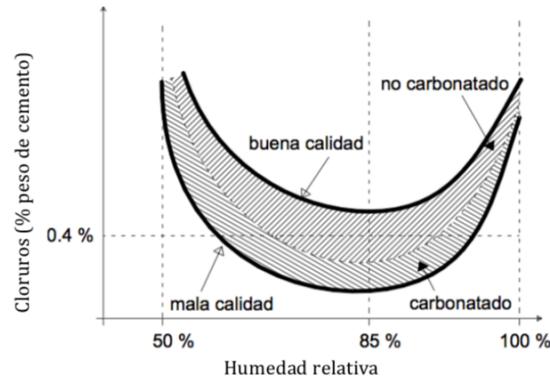


Imagen 5, Contenido crítico de cloruros en función a la humedad ambiente (Ulloa Mayorga, 2012).

Por otra parte, estas concentraciones de cloruros se pueden encontrar dentro del hormigón de dos formas distintas (Sanchez de Rojas, 2004):

- **Combinado**, es el que permanece unido a las fases sólidas del hormigón. Este cloruro queda inmobilizado, sin posibilidad de moverse. Se sabe que una parte de los cloruros que penetran en la estructura del hormigón son fijados por los compuestos sólidos hidratados del mismo. Por ejemplo, el aluminato tricálcico puede formar el monocloroaluminato cálcico hidratado o "sal de Friedel" (C₃AH₁₀·CaCl₂), entre otros compuestos.
- **Libre**, es el disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del hormigón mediante difusión u otros mecanismos. Ellos son relevantes desde el punto de vista de la corrosión de armaduras.

Los cloruros que afectan la armadura son los disueltos o libres, pero es posible que los que están unidos a la fase sólida de los materiales se incorporen a la disolución convirtiéndose en peligrosos. Por tanto, las normativas se refieren al límite de cloruros totales, con el fin de contemplar ambos estados de concentración.

Según Ulloa Mayorga, (2012), existe entre un 40% y 50% de los cloruros combinados en el hormigón, pero esta proporción podrá variar en función del tipo de cemento utilizado. En cuanto a los cloruros libres, pueden estar entre un 67% para el cemento de aluminato tricálcico y de un 90% cuando se utiliza un cemento con escoria de tipo B.

Incluso algunos autores, basados en estudios experimentales, caracterizan el riesgo de corrosión según el contenido de cloruros, donde variables como el tipo de exposición y la relación agua-cemento influyen en el contenido crítico de cloruros, es decir a menores relaciones agua-cemento será necesario mayores concentraciones de cloruro para que se inicie la corrosión.

En la bibliografía se encuentra un amplio rango de variación del contenido crítico de cloruro y generalmente esta referido a un % de cloruros totales y libres expresados en peso de cemento o bien del hormigón. Las normas han recomendado valores límites para el contenido total de ion cloruro en el hormigón, por ejemplo para la Instrucción EHE en su Artículo 31.1 el cloruro total aportado por los componentes no deberá exceder de 0,2% del peso del cemento si es hormigón

pretensado, en cambio en hormigón armado o en masa el máximo valor será de 0,4% del peso del cemento. Igual así, los límites establecidos deben manejarse con prudencia, ya que en regímenes higrométricos no estacionarios y con un hormigón carbonatado, puede ser conveniente reducir el límite establecido en dicho artículo. En cuanto al Eurocodigo 2 (EN 1992) el contenido de cloruros máximos en un hormigón armado es de 0.6% del peso de cemento mientras que para los hormigones pretensados se debe adoptar un valor límite de 0,3% del peso de cemento.

Sobre este punto, varios autores mencionan que a pesar de la gran cantidad de investigaciones para la estimación de la concentración crítica de cloruros, es difícil establecer valores generalizados ya que intervienen numerosas variables, incluso también existen una variedad de métodos de ensayos que hacen imposible su comparación.

2.1.4. MECANISMO DE TRANSPORTE DE CLORUROS

Si bien las diferentes normas determinan unos requisitos para poder garantizar un buen desempeño del hormigón frente al ataque por cloruros, como el tipo y contenido de cemento mínimo, relaciones de agua-cemento máxima, resistencias a compresión mínima, espesores de recubrimientos, etc. estos no son necesariamente suficientes para asegurar un buen desempeño de la estructura en cuestión de durabilidad. Será necesario comprender los diferentes mecanismos de transporte de estos agentes agresivos, para poder garantizar el buen desempeño.

Precisamente la Instrucción EHE-08 (2008), hace referencia indirectamente a los mecanismos de transporte al decir que la impermeabilidad del hormigón es una condición necesaria, aunque no suficiente, para lograr un comportamiento adecuado frente a los ataques agresivos, debido a que la permeabilidad no es el único mecanismo de transporte que interviene en los procesos de degradación, sino que existen otros mecanismos como absorción de agua y de difusión de gases e iones.

Por tanto, un correcto análisis y evaluación de estos mecanismos de transporte, permite entender los procesos que se producen y por ende las causas de deterioro (Imagen 6), lo cual aportan valor, tanto en el diseño de la estructura, así como en el conocimiento de la calidad del hormigón que se emplee en la misma.

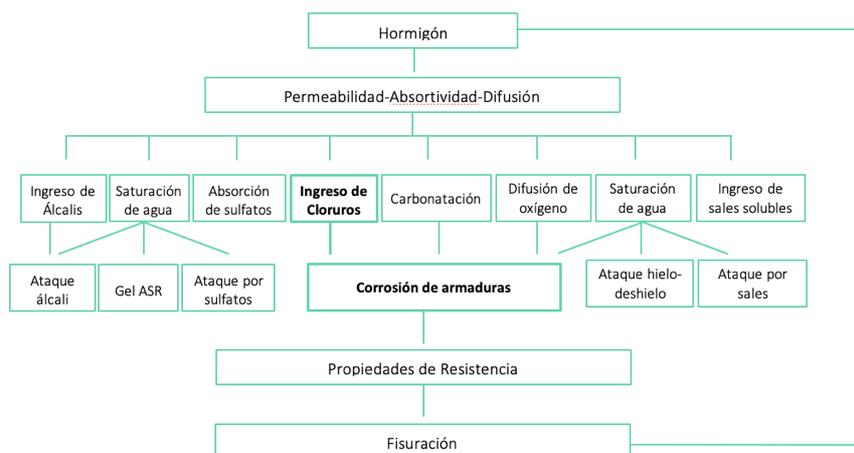


Imagen 6, Causas de deterioro de las estructuras de hormigón armado (Ulloa Mayorga, 2012).

Los mecanismos de transporte del cloruro a través de hormigón son, la permeabilidad, capilaridad, la absorción y la difusión. La permeabilidad y la absorción son mecanismos de transporte muy rápidos, mientras que la difusión es bastante más lenta (Bermúdez Odriozola, 2007).

- *Permeabilidad*, permite el paso de un fluido a través de un material saturado bajo la acción de una presión diferencial, y en función del tamaño de los poros interconectados (>120 μm). La velocidad del flujo sigue la ley de Darcy para flujo laminar a través de un medio poroso.

$$v = -\frac{k dp}{\mu dx}$$

Siendo, v la velocidad aparente del flujo (m/s), k es la permeabilidad intrínseca del material en (m²), μ es la viscosidad del fluido en (N.s/m²), p es la presión (N/m²), y es negativo, ya que el flujo es contrario al incremento de la presión.

- *Capilaridad o Succión capilar*, es la propiedad que caracteriza a un material poroso para absorber y transportar agua por las capilaridades del material. En el hormigón se presenta en el movimiento de los líquidos a través de los poros de la matriz mediante la succión, en determinadas condiciones ambientales. Esta se produce tanto en un hormigón seco, como parcialmente seco, ocupando con líquido los espacios disponibles. El comportamiento de la absorción es función del tiempo y se puede representar con la siguiente función:

$$A = C + S\sqrt{t}$$

Siendo, A el ingreso de agua (m³/m² o g/m²), C la distorsión inicial y S es el comportamiento del hormigón respecto a la succión capilar, los cuales varían entre 1 y 10 (g/m²).

- *Difusión*, es el movimiento iónico bajo un gradiente de concentración. La difusión de cloruros en el hormigón sigue la 2ª Ley de Fick:

$$J_c = -D_a \frac{dC}{dx}$$

Donde, J_c es el flujo (kg/(m².s)), C es la concentración (kg/m³) y D_a es el coeficiente aparente de difusión (m²/s), este último se utiliza para referirse a la velocidad en que los gases o iones entran en el hormigón bajo una diferencia de concentraciones. Además hay que tener en cuenta que este factor se vera afectado por el tamaño de los poros y de la velocidad de difusión.

Por ejemplo, la norma ASTM 1556, toma el coeficiente de difusión aparente como constante, como primera aproximación, pero este realmente es función de varios factores, como puede ser la relación a/c, tipo de cemento, adiciones, tipo de curado, el ambiente, etc.

Según Bermúdez Odriozola, la importancia relativa de cada uno de estos mecanismos de transporte vendrá dada por la exposición en la que se encuentre la estructura, por el contenido de humedad y la estructura de poros:

- En una zona atmosférica, los procesos de transporte de gases, agua o sustancias disueltas en agua son procesos de difusión en función de la humedad del aire.
- En zona de carrera de mareas, de salpicaduras y húmedo por el agua de lluvia, la succión capilar se consigue muy rápidamente. Además, los ciclos de humectación y desecación de la superficie del hormigón con agua que contiene cloruros producen un aumento de estos en la capa superficial.

- En un hormigón en zona sumergida, la penetración será primero por succión capilar, posiblemente acelerada por un aumento de la presión hidráulica. Las estructuras completamente sumergidas tienden a estar protegidas de la corrosión por la falta de oxígeno.

Los iones cloruro ingresan al interior del hormigón mediante los mecanismos de transportes definidos, generando la corrosión en las armaduras.

2.1.5. MODELOS DE CUANTIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

Según M. Shafikhani y otros, (2019), se han presentado diferentes modelos para cuantificar el coeficiente de difusión de cloruro en el hormigón y estos pueden clasificarse en fenomenológicos, análogos, estadísticos o combinados denominados híbridos. Observan que la diferencia fundamental en cada uno de estos modelos es su objetivo.

De los modelos analizados por estos autores, se encuentran:

- Los que cuantifican el coeficiente de difusión de cloruro mediante métodos de ensayo estándar y modelizando a los materiales con el fin de comparar y evaluar mezclas.
- Modelos que combinan modelos estadísticos y fenomenológicos para diseñar y dosificar mezclas de hormigón.
- Modelos que emplean el coeficiente de difusión aparente, basado en datos del ensayo de inmersión.
- Modelos que emplean coeficiente de difusión efectivo, principalmente mediante el uso del ensayo de migración.

Han realizado una Tabla 1, con recopilación de los diferentes modelos junto con las variables primarias o secundarias contempladas por los diferentes autores. Las variables primarias son consideradas en el diseño de la mezcla y las variables secundarias son aquellas variables calculadas o derivadas de las variables primarias.

Table 1
Primitive and secondary variables considered in models.

Model	Primitive Variables							Secondary variables						
	w/cm	SCMs	G _m	time	V _a	Agg. size dist.	Paste thickness	Path	Diffusion properties of bulk cement paste			Diffusion properties of ITZ		
									φ ^p	φ ^e	D _p	V _{ITZ}	γ _{ITZ}	D _{ITZ}
Luciano and Miltenberger [20]	✓	✓	✓	✓				✓						
Chalee et al. [23]	✓	✓		✓										
Life-365	✓	✓		✓										
Riding et al. [24]	✓	✓		✓										
Audenaert et al. [29]	✓			✓										
Xi and Bazant [14]	✓			✓	✓				✓	✓	✓			
Caré [30]	*			*	✓	✓			*		✓	✓		
Oh and Jang [31]	*	*		*	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
Sun et al. [15]	*	*		*	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
Shi et al. [3]	*	*		*	✓	✓		✓	*		✓			
Bentz et al. [32]	✓			✓	✓				✓	✓	✓			

✓: Considered directly.

*: Considered implicitly through other variables.

Tabla 1, Variables primarias y secundarias de los modelos según (Shafikhani, y otros, 2019)

A continuación se describen los diferentes modelos analizados por Shafikhani,

- Luciano y Miltenberger, determinaron el coeficiente de difusión utilizando la ecuación de Nernst-Einstein y una configuración del ensayo de migración de estado estacionario. El

modelo tiene en cuenta la relación agua/total de material cementante, tipo y contenido de material cementante, tiempo, temperatura y coeficiente de forma de las partículas del árido. Estas variables son necesarias, dado que son indicadores de la porosidad y de la estructura de poros, pero al mismo tiempo creen que no son suficientes para cuantificar adecuadamente las propiedades de difusión. De acuerdo con esto anterior, su aplicación es limitada.

- *Mangat y Molloy*, presentaron una ecuación empírica, para predecir el coeficiente de difusión en un momento dado. Para ello emplearon la solución analítica de la 2ª Ley de Fick para un flujo unidireccional asumiendo un coeficiente de difusión constante y una concentración fija de cloruro en la superficie. Empleando un análisis de regresión y perfiles de concentración de cloruro obtenidos a partir de ensayos de penetración en tres condiciones de exposición diferentes, determinaron el factor de edad (m), en función a la relación agua-total de material cementante (a/tmc). Para el modelo se utilizaron mezclas con o sin adiciones y variaron la relación a/tmc entre 0,40 y 0,58 y un período de exposición de hasta 5 años. La relación a/tcm y el tiempo se obtienen directamente en este modelo, mientras que las otras variables se consideran implícitamente a través de un coeficiente de difusión de cloruro de referencia que se calcula de nuevo utilizando datos experimentales. Esto implica que a/tmc es la única variable considerada efectiva durante el tiempo.
- *Chalee et al.* desarrollaron un modelo para cuantificar el coeficiente de difusión del hormigón que contenía cenizas volantes bajo condiciones de exposición marina a largo plazo. Al igual que *Mangat y Molloy*, se empleó una relación exponencial entre el tiempo y el coeficiente de difusión aparente, y el factor de edad se determinó experimentalmente en términos relación a/tmc (0,45 a 0,65) y variando el contenido de cenizas volantes.

Este modelo no tiene en cuenta explícitamente parámetros como el contenido de cemento, el contenido de adiciones, el contenido de áridos, etc. que pueden afectar significativamente al coeficiente de difusión.

- *Life-365* es un modelo desarrollado por el Comité ACI, con el objetivo de predecir la vida útil del hormigón. Este modelo se basa en su estimación del coeficiente de difusión aparente de referencia (D_{ref}), en un tiempo de referencia (t_{ref}), y una temperatura de referencia, (T_{ref}). El modelo se deriva del trabajo experimental de *Stanish*, el cual se basa en los resultados obtenidos de una prueba de inmersión. Además, el coeficiente de difusión aparente de cloruro se ajusta para tener en cuenta el transcurso del tiempo. Además este modelo tendrá en cuenta los efectos de las adiciones en el coeficiente de difusión. Cabe mencionar, a partir de los 25 años asume que el coeficiente de difusión permanece constante.
- *Riding et al.* postularon un valor límite para el coeficiente de difusión (D_{ult}), el cual se iguala a un coeficiente de difusión a 100 años. Además, planteó un modelo predictivo del coeficiente de difusión aparente para hormigones con diferentes contenidos de adiciones. El modelo es similar a *Life-365*, incluye una serie de relaciones para cuantificar el coeficiente de difusión de referencia a los 28 días, el factor de edad en términos de relación a/tmc y el nivel de reemplazo de materiales cementantes.
- *Audenaert et al.* investigan la relación tiempo-difusión de cloruros, mediante el uso del ensayo de difusión no estacionario y proponiendo una serie de ecuaciones para predecir el comportamiento. El modelo empírico se desarrolló empleando una función exponencial para el tiempo en función del coeficiente de difusión, y la solución obtenida

de esta ecuación la utilizó en la segunda ley de Fick suponiendo un coeficiente de difusión dependiente del tiempo.

El modelo considera la porosidad capilar como un parámetro importante para predecir el coeficiente de difusión efectivo, el cual combina junto con la relación a/tmc y el grado de hidratación del material, que será máximo a un año.

- *Caré*, desarrolló un modelo semi-analítico, en el cual tiene en cuenta la influencia del árido, es decir, el coeficiente de difusión disminuirá debido a la tortuosidad de la estructura (efecto geométrico), mientras que aumenta con una estructura más porosa (efecto microestructural). El primero se contabilizó introduciendo un parámetro de tortuosidad, τ , que depende solo de la fracción de volumen del árido, y el último se determinó experimentalmente como una función lineal de la fracción de volumen de la fase de transición.
- *Sun et al.* emplearon un modelo de "inclusión en capas" para el coeficiente de difusión basado en una solución analítica del modelo de ensamblaje de esferas compuestas. El modelo de inclusión de n capas es una función de la fracción de volumen y la difusión de tres fases, a saber, árido, zona de transición y la pasta de cemento. El modelo incluye la fracción de volumen de partículas agregadas, porosidad, la estructura del poro, difusión y fracción de volumétrica de la zona de transición.
- *Shi et al.* propusieron un modelo para el coeficiente de difusión del hormigón en función del coeficiente de difusión de la pasta de cemento y del árido. El modelo asume que el coeficiente de difusión de la pasta es la combinación del coeficiente de difusión de la pasta de cemento y del coeficiente de difusión de la zona de transición. Además, para utilizar esta relación hay que determinar la difusión de la pasta de cemento experimentalmente o adoptando un modelo de predicción apropiado.
- *Garboczi y Bentz*, desarrollaron un modelo digital basado en imágenes de la microestructura de la pasta de cemento y simularon el proceso de hidratación del cemento Portland. Al convertir este modelo en una red de conductores aleatorios, con la suposición de una condición de estado estacionario, emplearon la relación Nernst-Einstein para obtener el coeficiente de difusión de la pasta. El modelo proporciona una imagen cuantitativa del sistema de poros de pasta de cemento a un nivel de hidratación y conecta el coeficiente de difusión de la pasta de cemento a su porosidad. El modelo se limita a un hormigón con una relación a/c entre 0,25 y 0,75 y sin el uso de adiciones. Aunque el modelo estima el coeficiente de difusión efectivo indirectamente, mediante el uso de este modelo numérico identificaron tres variables principales que afectan la difusión. Estas son la relación a/c , el grado de hidratación, y fracción de volumen de árido.

2.1.6. METODOLOGÍAS DE ENSAYO

Existen una variedad amplia de ensayos para determinar el coeficiente de difusión, uno de ellos plantea un modelo, obteniéndose un coeficiente de difusión determinado. Esto produce que los diferentes ensayos muchas veces no sean comparables entre sí (*Ulloa Mayorga, 2012*). Las diferencias de estos ensayos son el espesor de la muestra con la que trabajan, la diferencia de potencial con el que trabajan y la concentración de cloruro sódico (NaCl).

Para los ensayos se diferencian dos situaciones posibles, primeramente el régimen estacionario (D_s) o efectivo (D_{eff}), el cual hace referencia al transporte de cloruro en el interior del hormigón en condición de flujo constante, esto quiere decir que circula cuando las fases sólidas no pueden retener más ion cloruro. La segunda situación refiere al estado no estacionario (D_{ns}) o bien

llamado aparente (D_{app}), este estado contempla bien los cloruros que se transportan por el hormigón y los iones cloruros que son retenidos por la fase solida de la pasta de cemento.

La norma UNE-83987 (2014) propone una forma de identificar ambos estados y esta se realiza a partir de la representación de la evolución de la cantidad de cloruros en el anolito (mol) y el tiempo de ensayo en segundos. El primer paso consiste en seleccionar el periodo correspondiente al estado estacionario, este se puede definir entre los puntos (ssi) y (ssf) de la Imagen 7-a, el cual representa el tramo de aumento lineal de la cantidad de cloruros en la gráfica. Para este tramo, se hace una regresión lineal por mínimos cuadrados, de ecuación $y = Ax + B$, tal como se muestra en la Imagen 7-b. La pendiente de la recta, A, es un parámetro a introducir en el calculo del valor del flujo de cloruros. La intersección de la recta de ajuste del tramo de estado estacionario con el eje X corresponde al llamado tiempo de paso (t_{paso}), el cual marca el fin del periodo de estado no estacionario, que abarca desde el inicio del ensayo hasta este punto.

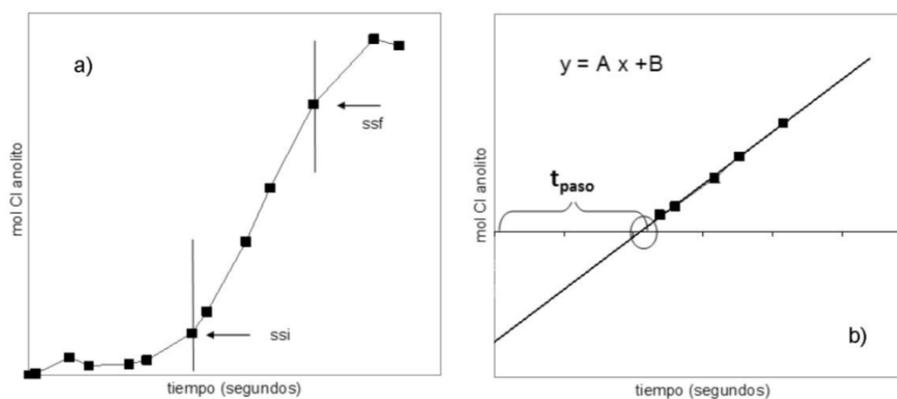


Imagen 7, Ejemplo de a) evolución del contenido de cloruros en el Anolito (mol) con el tiempo (s), b) regresión lineal del periodo correspondiente al estado estacionario y la representación del tiempo de paso (t_{paso}) (UNE 83987, 2014).

Según el CEB, se pueden clasificar en tres grupos los ensayos para la determinación del contenido de cloruros:

- Ensayos de difusión en estado no estacionario- Ensayos de inmersión.
- Ensayos de difusión en estado estacionario- Ensayo de célula de difusión.
- Ensayos de migración en campo eléctrico–Ensayos acelerados.

Dentro del primer grupo, los ensayos de inmersión se pueden encontrar la norma ASTM C1556, la cual obtiene el perfil de cloruros de una forma experimental, a través de muestras de hormigón extraídas de diferentes profundidades.

Dentro del primer grupo, correspondiente a los ensayos de inmersión, se puede encontrar la norma ASTM C1556, la cual obtiene el perfil de cloruros de una forma experimental, a través de muestras de hormigón extraídas de diferentes profundidades.

La norma C1556 indica que la resistencia a la penetración de cloruros se ve afectada por factores tales como el medio ambiente, el acabado, la composición de la mezcla, la mano de obra, el curado y la edad.

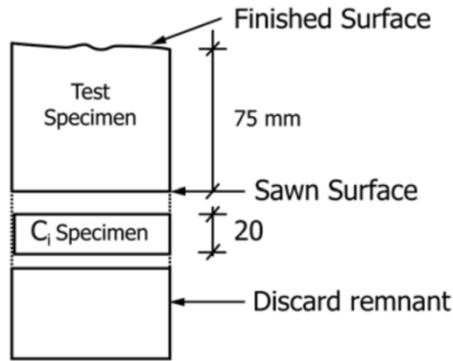


Imagen 8, Esquema de una muestra típica, (ASTM-C1556, 2016).

Una vez extraído la concentración de cloruros, se puede obtener el coeficiente de difusión aparente mediante la Ley de Fick:

$$C_x = C_s - (C_s - C_i) \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right]$$

Donde la concentración superficial es C_s , la inicial es C_i y erf es la función de error expresada como:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du$$

Cabe mencionar, que este tipo de ensayo no es compatible con aquellos ensayos que obtengan el coeficiente de difusión estacionario o efectivo.

Según *Ulloa Mayorga (2012)*, muchos investigadores han utilizado estos modelos pero han contemplado también parámetros como la porosidad o el grado de saturación de los poros.

En el segundo grupo tendremos los ensayos de Célula de difusión, los cuales toman una muestra de 2.5 cm de espesor, colocándose entre dos compartimentos de un depósito, en uno de ellos contiene la solución de sal (muestra 1) y en la otra se encuentra libre de cloruros (muestra 2). Allí se mide la velocidad de difusión a través del análisis a intervalos de tiempo de la concentración de sal que tiene la muestra que era libre de cloruros (muestra 2). Una vez obtenida la velocidad se utilizará la fórmula siguiente para la obtención del coeficiente de difusión de cloruros:

$$D = \frac{V l}{C_A S} \frac{DC_B}{Dt}$$

Siendo, V el volumen de solución en la muestra, l el espesor de la muestra, C_A es la concentración de cloruros en la muestra 1 y S la superficie de la muestra expuesta, C_B corresponde a la concentración del cloruro en la muestra 2 tras un determinado tiempo t por lo tanto $\frac{DC_B}{Dt}$ es la velocidad de variación de C_B con el tiempo.

Y por último, los ensayos acelerados o de migración son algo similares a los ensayos de difusión. En este tipo de ensayos se aplica un campo eléctrico generando una diferencia de potencial entre los dos compartimentos, forzando el paso de cloruros por medio de la muestra de hormigón. Al ser un ensayo rápido es muy utilizado para la determinación del coeficiente de difusión. Proporcionan una medida empírica, solo permitiéndonos hacer un análisis comparativo.

Dentro de este tipo de ensayos podemos encontrar la norma ASTM C1202 (2019), el cual es uno de los métodos más utilizados. El objetivo es la determinación de la conductancia eléctrica del hormigón para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones de cloruro. Este método es muy criticado, ya que algunos autores determinan que no mide la penetrabilidad del sistema, sino la conductancia eléctrica. La principal crítica de la prueba es que la corriente que pasa a través de la muestra no solo corresponde a los iones de cloruro sino también a los iones en la solución que puede existir en los poros. Además, el alto potencial (hasta 60 V), aplicado en la muestra conduce a un aumento de la temperatura, especialmente para los hormigones de baja calidad. Se sabe que el aumento de la temperatura da como resultado un aumento en la carga que pasa, lo que hace que el hormigón de mala calidad se vea peor de lo que realmente es, lo cual podría influir en el resultado del ensayo, debido a que incrementa la velocidad de flujo (Nilsson, L. O., 1996) y (Pilvar, y otros, 2016).

Incluso, según Moffatt y otros (2017) se ha encontrado que el procedimiento de prueba ASTM C1202 parece no ser válido en hormigones que contienen adiciones, ya que los resultados pueden estar sesgados debido al cambio en la composición química de la solución de poros.

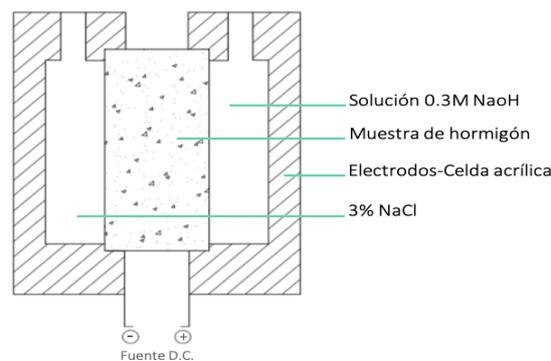


Imagen 9, Esquema del ensayo ASTM C1202 (2019).

La norma ASTM-C1202:2019 proporciona indicaciones cualitativas de la penetrabilidad del ion cloruro basadas en los valores experimentales. Los valores se desarrollaron a partir de muestras preparadas a partir de varios tipos de hormigones.

Carga Total (Coulomb)	Penetración ion cloruro
>4000	Alta
2000-4000	Moderada
1000-2000	Baja
100-1000	Muy baja
<100	Ninguna

Tabla 2, Valores comparativos cualitativos de la penetrabilidad del ion cloruro (ASTM-C1202, 2019).

Además, en dicha norma hace referencia a los factores que influyen en la penetración de iones cloruro. Ellos son la relación agua-total de materiales cementicios, tipo y cantidad de materiales cementicios, la presencia de aditivos poliméricos, soluciones iónicas de aditivos como nitrito de calcio, la edad de la muestra, el sistema de vacío, el tipo de árido, el grado de consolidación y tipo de curado.

Otro método es el propuesto en la normativa nórdica NT Build 492 (1999), el cual permite determinar el coeficiente de difusión de cloruros en el hormigón para el estado no estacionario. El método requiere muestras cilíndricas con un diámetro de 100 mm y un espesor de 50 mm. Un potencial eléctrico externo se aplica axialmente a través de la muestra (10 V, 30 V y hasta 60V

llegando a durar 24 horas), y fuerza a los iones de cloruro a migrar hacia el otro lado de la muestra. Para ello utiliza una solución del 10% de cloruro sódico en agua saturada de cal. Finalizado, se divide la muestra en dos partes y se rocía una solución de nitrato de plata, pasados 15 min se mide la profundidad de penetración y se calcula el coeficiente de difusión D_{nssm} .

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} * \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t}$$

Donde:

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} * \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

Siendo, D_{nssm} el coeficiente de migración en estado no estacionario (m^2/s), z el valor absoluto de valencia iónica, que para el cloruro z es igual a 1; F es la constante de Faraday, la cual tiene un valor de 9.648×10^4 ($J/V \cdot mol$), U es el valor absoluto de la tensión aplicada (V), R constante de gas, siendo 8.314 ($J/K \cdot mol$), T es el promedio de las temperaturas inicial y final en la solución de anolito (Kelvin), L es el espesor de la muestra (m), x_d es el promedio de las profundidades de penetración (m), t , es el tiempo de duración del ensayo (segundos), erf^{-1} es la inversa de la función de error; c_d es la concentración de cloruro, la cual es aproximadamente 0.07 N para hormigones con cementos portland ordinario y c_0 es la concentración de cloruro en la solución de católito, la cual es 2 N.

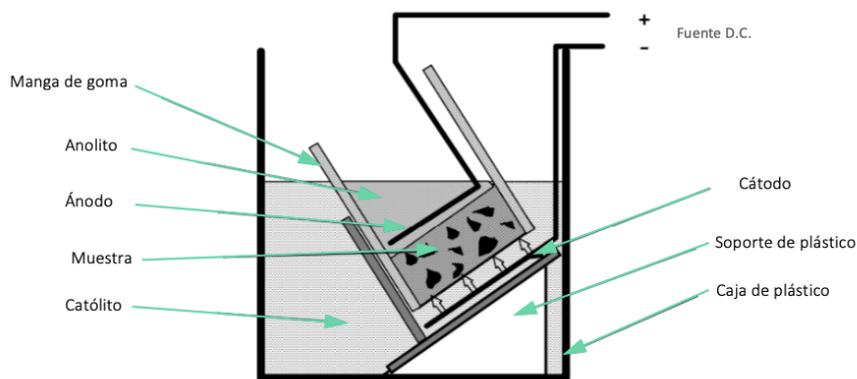


Imagen 10, Esquema del ensayo noruego de difusión de cloruros (NT BUILS 492, 1999).

La norma UNE 83987 (2014), es un método multirégimen, la cual mide el coeficiente de difusión tanto en estado estacionario como no estacionario. El fundamento de esta se basa en: “que los iones presentes en un electrolito responden a la acción del campo eléctrico aplicado migrando hacia el polo de signo contrario a la carga de la que son portadores. Dada la naturaleza de las matrices cementantes, con su compleja microestructura constituida por un entramado poroso conteniendo una fase acuosa rica en iones, estas se comportan eléctricamente como un conductor, respondiendo los iones que confinan al campo eléctrico, como si estuvieran en disolución” (UNE 83987, 2014).

Este ensayo aplicará un diferencial de potencial de 12 V a través de una de las caras de la muestra, la cual se encuentra con una solución de 1M NaCl, lo cual genera que los iones cloruro se vean

atraídos por el electrodo positivo, alojado en la otra cara de la muestra, el anolito, y migran hacia él atravesando la muestra. El incremento en la concentración de cloruros en el anolito se mide a partir de la determinación de la conductividad eléctrica del mismo.

El estado estacionario se alcanza cuando el flujo de los iones cloruro hacia el cátólito sea constante. El periodo de estado no estacionario es el correspondiente al “tiempo de paso” (t_{paso}).

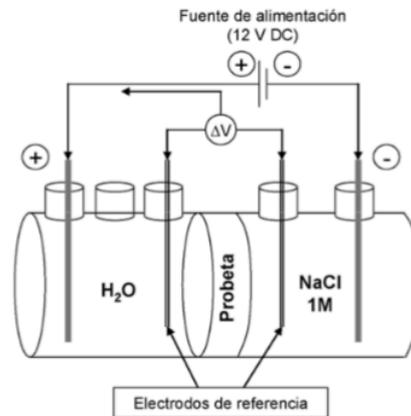


Imagen 11, Esquema del ensayo de migración de cloruros (UNE 83987, 2014).

2.2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.2.1. INTRODUCCIÓN A LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales (RNA), son una herramienta computacional, la cual trata de emular el comportamiento del cerebro humano, el cual se caracteriza por el aprendizaje por medio de la experiencia y de la extracción de datos del conocimiento genético.

Existen numerosas formas de definir a las redes neuronales; desde las definiciones cortas y genéricas hasta las que intentan explicar más detalladamente qué son las redes neuronales. A continuación, podemos citar algunas de las definiciones consultadas en la bibliografía:

“una nueva forma de computación, inspirada en modelos biológicos” (Hilera y Martínez, 1995).

“RNA son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples y con organización jerárquica, las cuales intentan interactuar con los objetos del mundo real del mismo modo que lo hace el sistema nervios biólogo” (Kohonen, 1988).

“las RNA pueden considerarse modelos de calculo caracterizados por algoritmos muy eficientes que operan de forma masivamente paralela y permiten desarrollar tareas cognitivas como el aprendizaje de patrones, la clasificación o la optimización.” (Flórez López, y otros, 2008).

Todas estas definiciones engloban un mismo proceso, el cual consta de un número limitado de elementos interconectados entre sí (nodos o neuronas), distribuidos en una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. La RNA más sencilla consta de una capa de entrada, una capa de neuronas o capa oculta y una capa de salida, en la que las capas y las neuronas están interconectadas como se muestra en la Imagen 12.

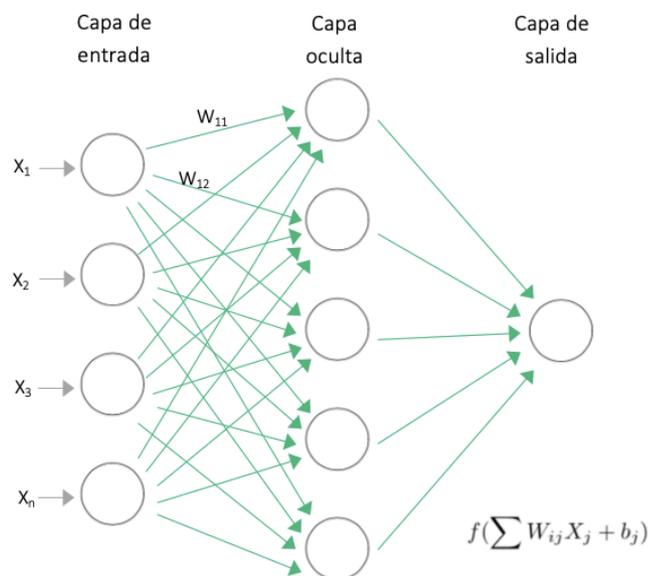


Imagen 12, Topología modelo de una red neuronal artificial.

Ventajas de las redes neuronales artificiales:

- Sintetizan algoritmos a través de un proceso de aprendizaje.
- Para utilizarlas no es necesario conocer sus detalles matemáticos, sino los datos con los que vamos a trabajar.
- Permite trabajar con problemas no lineales, siendo su punto principal.
- Son robustas, pueden llegar a fallar durante el proceso, pero ello no impide que pueda continuar el proceso, como si sucede con la programación tradicional.

Aun así, las redes neuronales artificiales presentan desventajas,

- Se deberá entrenar las redes, ya que se debe conseguir una arquitectura robusta. Ello se logra con una variedad de pruebas, lo cual nos puede consumir varias horas de trabajo computacional.
- Se requiere una gran cantidad de datos, los cuales nos permiten entrenar las RNA.
- Para un operador inicial será complejo realizar cambios en el sistema de aprendizaje.
- No pueden extrapolar resultados fuera del rango.

Las RNA se aplican en una amplia diversidad de problemas de reconocimiento de patrones y de aproximación de funciones, debido a su flexibilidad y facilidad de uso, formando parte del campo de la inteligencia artificial. Dado que las RNA han sido aplicadas de forma satisfactoria en la predicción de diversos problemas en diferentes áreas de conocimiento (biología, medicina, ingeniería, psicología, etc.) obteniendo excelentes resultados respecto a los modelos derivados de la estadística clásica (*Navarro Ferrer, 2016*).

Recientemente, se han encontrado algunas investigaciones que utilizan las redes neuronales artificiales para el procesamiento de parámetros de la durabilidad del hormigón, aunque la mayoría de las investigaciones tienen como objeto de estudio el diseño de las mezclas de hormigón en relación con la resistencia a la compresión. Estas investigaciones han concluido que las redes neuronales han sido muy eficientes en comparación con métodos de regresión simple obtenidos a partir de datos experimentales (*Ha-Won Song, y otros, 2009*).

En este trabajo vamos a utilizar las RNA con el propósito de evaluar el comportamiento de los hormigones, en cuanto a la capacidad de predecir la resistencia a la compresión, permeabilidad y difusión de cloruro, en función de unas variables de entrada.

2.2.2. HISTORIA DE LAS REDES NEURONALES

A continuación, se describe la historia en orden cronológico de cómo ha avanzado la teoría de las Redes Neuronales:

- En 1943 Warren McCulloch y Walter Pitts propusieron el primer modelo neuronal en términos de un modelo computacional. Este era un modelo binario, donde cada neurona tenía un escalón o umbral prefijado. Este modelo sirvió como base para futuras investigaciones.
- En 1949 Donald Hebb por primera vez explicó el proceso de cómo ocurría el aprendizaje cuando ciertos cambios en una neurona eran activados. Según (*Rivas Asanza, y otros, 2017*) todos los trabajos de Hebb fueron las bases para la Teoría de las Redes Neuronales.

- En 1956 Minsky, McCarthy, Rochester, Shanon, desarrollaron una conferencia de Inteligencia Artificial donde se hace la primera toma de contacto con las redes neuronales artificiales.
- A finales de la década del 50, Bernard Widrow crea un sistema lineal y adaptativo, al cual denominó "Adaline" y otro que implementó en dos capas, llamada "Madaline", utilizándolo para conseguir un reconocimiento de voz adecuado.
- En 1959, Frank Rosenblatt, construye una maquina neuronal simple a la cual llamó Perceptón. Esta máquina permitía reconocer patrones e incluso llego a reconocer todo el alfabeto.
- En 1969, se produce una especie de "muerte abrupta" de las redes neuronales. Marvin Minsky y Seymour Papert probaron matemáticamente que el perceptron no era capaz de resolver problemas relativamente fáciles, tales como el aprendizaje de una función no-lineal, las cuales son empleadas en computación y en los problemas del mundo real a menudo.
- En 1986 comenzaron a desarrollarse una mayor cantidad de investigaciones y desarrollo de las redes neuronales. Mc Clelland y Rumelhart publican el libro "Parallel distributed Processing: Explorations in the Microstruture of Cognition". Según *Ponce Cruz*, este libro se convirtió en un clásico de las redes neuronales, además de un impulsor de nuevas investigaciones.

Actualmente, existen numerosas investigaciones y trabajos sobre redes neuronales, que son aplicadas en una amplia cantidad de ramas.

2.2.3. FUNCIONAMIENTO

Las RNA permiten comprender, caracterizar y detectar relaciones complejas y no lineales entre variables, a partir de unidades sencillas como las neuronas artificiales, al disponer varias de esas unidades en paralelo. Las variables se dividen en variables de entrada y de salida, relacionadas por algún tipo de correlación o dependencia (no necesariamente causa-efecto). También es posible que la salida sea la clasificación de las variables de entrada en diferentes grupos (*Navarro Ferrer, 2016*).

Las RNA están formadas por neuronas artificiales, interconectadas entre si y distribuidas por capas. Para que pueda realizarse el traspaso de información es necesario que cada capa se conecta con las neuronas de la capa siguiente y así lograr un aprendizaje.

La primera capa es la entrada, tiene como función recibir la información desde el exterior, luego se encuentra la capa oculta, la cual genera las relaciones de encadenamiento entre la entrada y salida, extraen y refinan las relaciones y características de las variables de entrada para predecir los resultados y por ultimo se encuentra las neuronas de la capa de salida, que son las que proporcionan los resultados de las predicciones realizadas por la red neuronal.

El fundamento matemático de una RNA está basado en el teorema de Kolmogorov, presentado por Kurkova (1992) y Haykin (1999), de tal forma que a partir de 3 capas (de entrada, oculta y de salida), se puede aproximar hasta el nivel deseado cualquier función continua en un intervalo, haciendo de la red multicapa una apropiadora universal de funciones (Leshno y col. 1992). Kolmogorov demostró que una función continua de varias variables podía representarse por la superposición de funciones continuas unidimensionales de las variables de entrada originales. Por tanto, cualquier función continua mapeada en una entrada de n dimensiones, $n \geq 2$, a una

salida de m dimensiones puede ser implementada por una red con una capa oculta. También se ha demostrado que una red con más de una capa oculta puede aproximar relaciones que impliquen funciones discontinuas (Rzempoluck 1998).

El funcionamiento de una neurona consiste en la transformación de los valores de las entradas a través de las conexiones, en una salida. La salida se obtiene a partir de una función de propagación, una función de activación y una función de transferencia.

La función de propagación más común consiste en el sumatorio de todas las entradas multiplicadas por los pesos de las conexiones, más un valor de sesgo o "bias".

$$f \left(\sum W_{ij} X_j + b_j \right)$$

Donde, cada neurona o nodo se denomina j y se asocia a una variable (x_j), y a cada conexión (i,j) se le asocia un peso $w_{i,j}$.

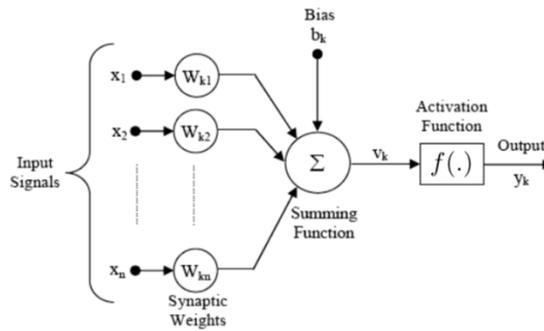


Imagen 13, Funcionamiento de una neurona artificial k (Navarro Ferrer, 2016).

La función de activación corresponde a la activación de salida de la neurona, esta puede existir como no, debido a que las neuronas pueden estar activas o inactivas (Matich, 2001).

La función de transferencia se aplica al resultado de la función de propagación y normalmente, consiste en una función de salida acotada. Se pueden distinguir varias funciones de transferencia típicas, como lineal, escalón o signo, mixta o lineal a tramo, sigmoidea, gaussiana, sinusoidal, etc.

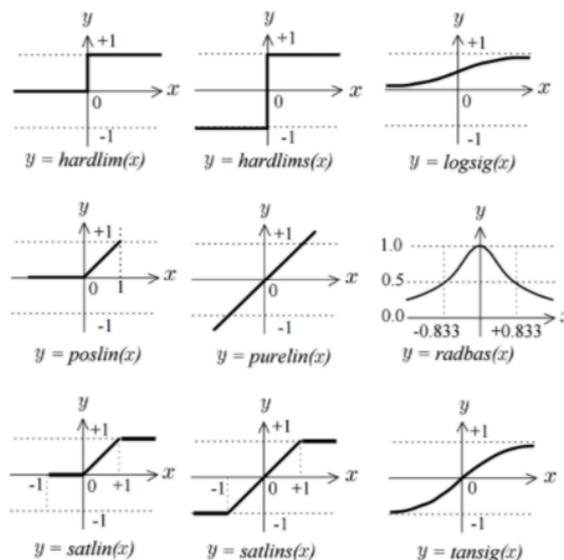


Imagen 14, Tipología de funciones de transferencia (Navarro Ferrer, 2016).

2.2.4. TIPOS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Existen dos tipos de criterios principales para la clasificación de las RNA, ellos son:

Según el tipo de conexiones, es decir entre dos capas de neuronas debe haber una serie de pasos de conexión ellos pueden ser los siguientes:

- *Feedforward*, de propagación hacia delante. En este tipo las conexiones van en un solo sentido desde la capa de entrada hacia la capa de salida.

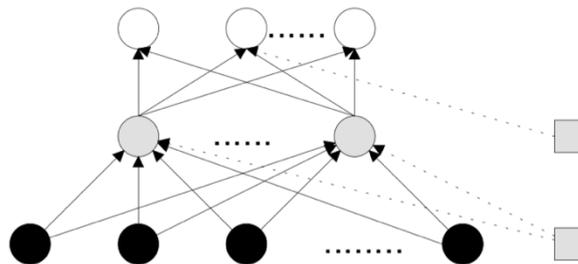


Imagen 15, Conexión Tipo Feedforward.

- *Redes recurrentes*, donde las redes pueden realizar ciclos. Se establecen en todas las direcciones incluso con procesos de realimentación, es decir, las propias neuronas consigo mismas.

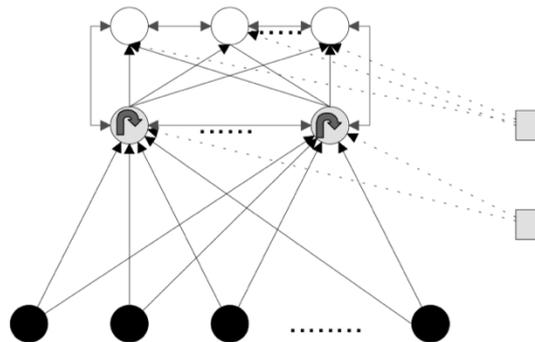


Imagen 16, Conexión Tipo Recurrente.

- *Feedback*: estas conexiones llevan los valores de las neuronas de una capa superior a otras de la capa inferior

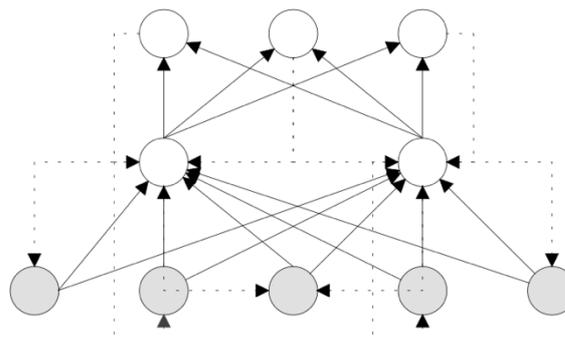


Imagen 17, Conexión Tipo feedback.

Es posible que las redes sean de una capa con el modelo de pesos hacia atrás o bien el modelo multicapa hacia adelante. Es posible así mismo, conectar varias redes de una sola capa para dar lugar a redes más grandes (Marín Diazaraque, 2012).

Según el tipo de aprendizaje:

- Aprendizaje supervisado, los datos o entradas tienen una respuesta conocida o salida, con la cual se ajusta o entrena a la red neuronal. Este tipo de redes son las más populares. El hecho de conocer la salida implica que el entrenamiento se beneficia de la supervisión de un maestro (Marín Diazaraque, 2012).
- Aprendizaje no supervisado o autoorganizado, los datos son solamente entradas. Son redes empleadas fundamentalmente para clasificación y reconocimiento de patrones (Navarro Ferrer, 2016), siendo un aprendizaje no inspeccionado ni controlado por ningún agente externo (Rivas Asanza, y otros, 2017). La red aprende a adaptarse basándose en las experiencias recogidas de los patrones de entrenamiento anteriores (Marín Diazaraque, 2012), para ello se necesitará una gran cantidad de valores de entrada, de tal manera que la red dispondrá de número suficiente de patrones, obteniéndose resultados de calidad.

Otra forma no tan común de clasificar las redes neuronales artificiales es según el número de capas empleadas:

- Redes neuronales monocapas. Este es el tipo más sencillo, se compone de una sola capa y su función es conducir la capa de entrada a una capa de salida en la cual se realizan los cálculos necesarios.
- Redes neuronales multicapa. A diferencia de la anterior, aquí existe un conjunto de capas intermedias entre la entrada y la salida (capas ocultas). Este tipo de red puede estar total o parcialmente conectada (Rivas Asanza, y otros, 2017).

Dado que en el presente trabajo se utilizará una red neuronal de propagación hacia adelante y un aprendizaje supervisado, nos centraremos en las funciones empleadas, al ser estas las que se van a utilizar en el estudio. Rumelhart y col. (1986), han definido las conexiones tipo feedforward, esta corresponde a un tipo de computacional en paralelo donde muchas neuronas (pequeñas unidades de cálculo), están masivamente interconectadas con la capa anterior recibiendo la información y con la capa posterior que es donde la transmiten.

La función de activación será parte de la capa oculta y limitará la salida a un rango cercano y desde esta, la capa de salida puede producir todos los valores de estimación. La función de salida de cada capa es:

$$Y_{N \times 1} = f(W_{N \times M} Y_{M,1} + b_{N,1})$$

donde Y es un vector que contiene la salida de cada una de las N neuronas de una capa dada, W es la matriz que contiene los pesos sinápticos (importancia) para cada una de las M salidas para todas las N neuronas, x es el vector que contiene las entradas, N es el vector que contiene los sesgos (bias), y f es la función de activación.

2.2.5. NUMERO DE NEURONAS DE LA CAPA OCULTA

Las redes con una única capa oculta son capaces de resolver problemas arbitrariamente complejos según Lippman (1987), siempre y cuando la capa oculta incluya un número mínimo de neuronas.

Una forma de calcular la cantidad mínima de neuronas de la capa oculta puede ser la propuesta por la aplicación del teorema de Kolmogorov (Hecht-Nielsen, 1987):

$$k = 2n + 1$$

O bien la propuesta por Tabares y col. (2006) mediante la utilización de la regla de la pirámide:

$$k = \text{redondeo}(\sqrt{nm})$$

donde k el número de neuronas de la capa oculta, n el número de neuronas de la capa de entrada (variables de entrada), y m es el número de neuronas de la capa de salida (variables de salida). Un procedimiento muy usado es iniciar la red con el número mínimo de neuronas ocultas, y si los resultados no son satisfactorios se va aumentando progresivamente el número de estas hasta que el indicador de evaluación es aceptable (Brockett y col. 1997). Para el presente trabajo se aplicará este criterio, comenzando con una neurona e incrementando el número de neuronas hasta obtener el valor óptimo. Se ha decidido evaluar el número óptimo de neuronas correspondientes a la capa oculta, según el coeficiente de correlación R , tal y como se puede observar en la Tabla 15 (Capítulo 5).

En la Tabla 3 se puede observar una recopilación de formulaciones para la obtención del número de neuronas en la capa oculta realizada por Navarro Ferrer (2016).

Número de neuronas de la capa oculta k	Referencias Bibliográficas
Redondeo $\sqrt{n \cdot m}$	Tabares y col. (2006) y Shibata e Ikeda (2009)
$2n+1$	Hecht-Nielsen (1987)
$2n$	Gallant (1993)
$n+m$	Nagendra (1998)
$0.75n$	Ozturan y col. (2008)
n	Lai y Serra (1997) y Dias y Pooliyadda (2001)
$(n+m)/2$	Popovics (1990)

Tabla 3, Numero de neuronas de la capa oculta según diversos autores (Navarro Ferrer, 2016).

Por tanto, se observa que el número de neuronas de la capa oculta se determina usualmente mediante prueba y error y los criterios empíricos para determinar el número de neuronas de la capa oculta k son en función del número de neuronas de la capa de entrada n y del número de neuronas de la capa de salida m (Navarro Ferrer, 2016).

2.2.6. APRENDIZAJE DE LA RED NEURONAL

Uno de los puntos clave de la red neuronal será su habilidad de aprender de su entorno por si sola, y mejorar su rendimiento en base a su propio proceso de aprendizaje.

El objetivo del aprendizaje o entrenamiento es que la red sea capaz de reproducir el comportamiento de los datos aportados y consiste básicamente en la minimización de una función de coste o error, lo que significa que los datos obtenidos en la salida se aproximan a los datos de entrada. La función de coste más utilizada es la de promedio de errores al cuadrado (MSE) (Navarro Ferrer, 2016), dicha función será la utilizada en este trabajo.

Existen varios métodos de ajuste de parámetros (pesos de las conexiones y sesgo de las neuronas), con el fin de optimizar la red neuronal, a partir de unos valores aleatorios o predefinidos (inicialización de la red).

A continuación, definiremos dos tipos de métodos de ajuste:

- Algoritmo de tipo gradiente, que calculan la variación del error al variar cada uno de los parámetros a modo de derivada multidimensional, para posteriormente modificar todos los parámetros de la red y así obtener un error menor. Según Navarro Ferrer (2016), puede entenderse como una búsqueda en serie de la solución o mínimo global.
- Algoritmos genéticos, técnica estocástica de búsqueda, basada en la idea de los mecanismos de selección natural. Por tanto, se generará un determinado número de redes o hijos a través de mutaciones en los parámetros, evaluando el error de la red para cada uno de ellos. Los hijos que tienen un menor error tendrán una mayor probabilidad de convertirse en padres de nuevas generaciones (redes), mientras que los hijos con mayor error desaparecen. Se trata de una búsqueda en paralelo de la solución óptima.

Por tanto, ambos métodos de ajuste de los pesos de las conexiones y sesgo de las neuronas permiten reducir el proceso iterativo de la optimización que se repite hasta cumplir alguno de los criterios de parada. Existen una variedad muy grande de criterios de parada, alguno de ellos puede ser el número de iteraciones realizadas, la obtención de un mínimo de la función de error, o un tiempo de ejecución.

La diferencia entre el algoritmo tipo gradiente y el algoritmo genético, es que en el primero el mínimo encontrado puede ser local, lo cual es un problema, mientras que el segundo realiza una búsqueda multidireccional en base a un proceso aleatorio, por tanto evita el problema de quedarse en una solución local y no en la mejor.

En ingeniería, el algoritmo de aprendizaje más empleado es el backpropagation, generalización del procedimiento de mínimos cuadrados que funciona para redes que tienen capas ocultas entre las de entrada y salida. Estas redes de múltiples capas pueden calcular funciones mucho más complicadas que las redes que carecen de unidades ocultas, pero el aprendizaje generalmente es mucho más lento porque debe explorar el espacio de posibles formas de usar las unidades ocultas.

Este algoritmo consiste en utilizar una optimización basada en derivadas, donde el error es derivable tanto de la función de pesos de la capa de salida y de la función de los pesos de la capa oculta, para lo cual se utiliza la regla de la cadena (*Hinton 1989*), que permite minimizar el error de entrenamiento de la red neuronal (la diferencia entre los valores calculados por la red utilizando un determinado conjunto de pesos, y los valores originales). El error y las correcciones efectuadas a los pesos se trasladan desde la capa de salida hacia atrás hasta la capa de entrada, de donde surge su nombre de propagación hacia atrás.

Moller en 1993 ha definido el método de gradiente descendiente o gradiente conjugado, correspondiente al gradiente conjugado con escalonamiento SCG (Scaled Conjugate Gradient), y evita la búsqueda lineal por un escalonamiento de paso, que depende del éxito en la reducción del error y buen desempeño de la aproximación cuadrática de este. Este tipo de algoritmo es más rápido que los demás, debido a las interacciones de aprendizaje.

Para el método de entrenamiento se utilizará el Algoritmo de Levenberg-Mardquardt, que fue definido por Lourakis (2005), y es una técnica iterativa que localiza el mínimo de una función que es expresada como la suma de los cuadrados de funciones no lineales. La base principal de este

algoritmo es mantener la aproximación de segundo orden del error para acelerar el entrenamiento, pero a la vez evaluando de forma aproximada la matriz del Hessiano. Incluso, cuando la solución actual está lejos de ser la correcta, el algoritmo se comporta como un método de descenso más pronunciado: lento, garantizando que converja. Cuando la solución actual está cerca de la solución correcta, se convierte en un método de Gauss-Newton (Lourakis, 2005).

El utilizar este método se justifica al tener la velocidad de convergencia del MSE más rápida que otros métodos como el de gradiente descendiente, a pesar de su mayor complejidad de cálculos (Navarro Ferrer, 2016).

2.2.7. SOBREAprendizaje DE LA RED

Un posible problema del proceso de aprendizaje o entrenamiento es el sobreaprendizaje o pérdida de generalización. Dado un conjunto de datos, es posible que la red neuronal reproduzca muy bien el comportamiento de dichos datos, pero no el de los datos nuevos. Este problema se acentúa en el caso de que los datos tengan ruido o errores.

Si se entrena una red para que tenga un error de aprendizaje muy bajo, se produce una degradación del error en test, esto puede observarse en la Imagen 18. En una etapa inicial, donde la tasa de error puede oscilar, el error del aprendizaje disminuye monótonamente, mientras que el error en test disminuye hasta un determinado punto, para posteriormente incrementar, lo que ocasiona un excesivo ajuste de la red a los patrones de entrenamiento utilizado, provocando una memorización en vez de la generalización del sistema (Flórez López, y otros, 2008).

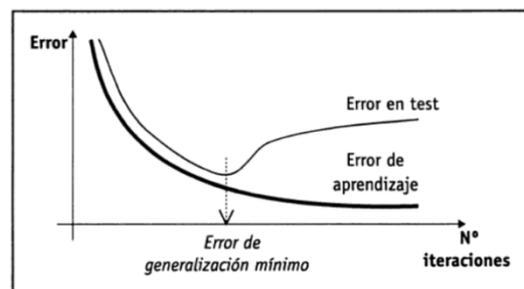


Imagen 18, Análisis del fenómeno de “sobreaprendizaje” de la red (Flórez López, y otros, 2008).

Para evitar el sobreaprendizaje podemos optar por obtener más datos (no siempre es posible) o bien reducir el tamaño de la red (menor número de parámetros). Si reducimos el tamaño de la red, esta es menos flexible y más robusta frente al ruido, aunque si se reduce demasiado puede que no sea capaz de aprender. Dotar a la red neuronal de suficientes parámetros para que sea capaz de aprender y evitar el sobreaprendizaje, es el principal aspecto a tener en cuenta en el dimensionamiento de una red neuronal. Otra forma de evitar el sobreaprendizaje es utilizar procesos de validación cruzada (Cross Validation), esto es entrenando y validando la red simultáneamente con el fin de detectar el punto óptimo de *aprendizaje* (Flórez López, y otros, 2008).

2.2.8. DATOS DE ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y TEST

Con el objetivo de obtener una red que sea capaz de generalizar mejor y controlar el sobreaprendizaje, se propone dividir los datos en tres grupos:

- **Entrenamiento.** Estos son los datos empleados en el ajuste de los parámetros de la red neuronal. Han de ser representativos del total de datos, por lo que normalmente se seleccionan aleatoriamente.

- **Validación.** Se emplean luego de cada iteración en el proceso de entrenamiento, con el fin de comprobar si se produjo sobreaprendizaje.
- **Datos de test.** Se emplean una vez finalizado el entrenamiento.

Una vez definidos los datos destinados a cada grupo es posible definir una técnica para evitar el sobreaprendizaje. Existen una variedad de técnicas que nos permitirán evitarlo, entre ellas podemos encontrar early-stopping, el principio de parsimonia o navaja de Ockham o redes podadas (pruned neural networks).

- La técnica early-stopping, permite durante el proceso iterativo de optimización de los parámetros de la red, ir comparando los errores obtenidos con los datos de entrenamiento y validación. En el caso de que durante sucesivas iteraciones, el error de los datos de validación aumente y el error de los datos de entrenamiento disminuya, se detiene el proceso de ajuste como un criterio de parada adicional.
- El principio de parsimonia o navaja de Ockham, a igualdad de condiciones, la explicación más simple es la correcta. La técnica consiste en agregar el sumatorio ponderado de los pesos de la red en la función de coste, de modo que para un error similar de dos redes neuronales, aquella que tiene menores valores de los pesos es mejor (Navarro Ferrer, 2016).

-

$$MSE_{reg} = \gamma MSE + (1 - \gamma)MSW$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2$$

$$MSW = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N W_j^2$$

Siendo, γ el factor de ponderación, N el número de datos, e_i el error de cada dato calculado como el valor objetivo (target) t_i y el valor calculado para la red neuronal y_i , n es el número de parámetros de la red y W_j son los valores de los pesos y bias de la red neuronal.

- Las redes podadas (pruned neural networks), se realiza una desconexión o eliminación de neuronas (reducción del número de parámetros) y se consiguen redes neuronales más simples empleando una función de coste que tiene en cuenta el número total de parámetros. Un posible tipo de función de coste a emplear en este tipo de redes, que tiene en cuenta el número total de parámetros de la red, es el PSE (Predicted Squared Error) (Navarro Ferrer, 2016).

$$PSE = MSE \left(1 + \frac{2N}{N - n} \right)$$

Con las redes neuronales podadas es posible desconectar neuronas (simplificación de la red) o desconectar entradas (variables redundantes o poco relevantes).

2.2.9. ESTANDARIZACIÓN DE LOS DATOS

Si se estandariza la entrada y salida de la red se podrá obtener un entrenamiento o aprendizaje mas rápido, siempre que entrada y salida se expresen en rangos similares, a modo de cambios de escala. En teoría no es necesario esta transformación, pero el aprendizaje funciona mejor si se emplea esta estandarización, dado que los pesos de una red neuronal se inicializan de manera aleatoria con unos valores pequeños (Navarro Ferrer, 2016). Se puede estandarizar forzando los datos a que se encuentren en un rango determinado, cómo por ejemplo, escalando todos los datos.

2.2.10. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Las redes neuronales pueden evaluar su desempeño usando diversas técnicas, como pueden ser la raíz del promedio de los errores al cuadrado RMSE (Root Mean Square Error), el total de los cuadrados de los errores SSE (Sum of Squares of Error), el error relativo promedio MER (Mean Error Ratio), el promedio de los errores al cuadrado MSE (Mean Square Error), o el factor de correlación al cuadrado R^2 (R^2 Correlation Factor) según Navarro Ferrer (2016).

Se pueden calcular utilizando las siguientes ecuaciones:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2$$

$$MSE = \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2}$$

$$R^1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Siendo t_i es el valor objetivo o deseado, y_i es el valor calculado por la red neuronal, \bar{y}_i es el promedio de los valores calculados y N es el número de datos o registros tomados por cada fase, y en la simulación con el total de la base de datos.

Estas técnicas son algunas de una variedad más grande de la que se puede encontrar en diferentes bibliografías.

3. BASES DE DATOS

Con el fin de generar una base de datos se ha realizado una búsqueda de artículos científicos relacionados con la durabilidad del hormigón, enfocando la búsqueda hacia los ataques químicos por cloruros. Se logró conseguir una gran variedad de artículos, aunque algunos de ellos no contenían información suficiente para la generación de esta. Los artículos seleccionados deberían contener información sobre el diseño de la mezcla, características químicas de los materiales cementantes, resultados de resistencia a la compresión, coeficiente de difusión no estacionario y permeabilidad de cloruros.

En las Tabla 5 y Tabla 6 se puede observar cada uno de los artículos utilizados para la creación de las bases de datos. En estas tablas, se puede ver que tipo de cemento fue utilizado, las adiciones y cuales son los ensayos realizados, además se señala cual ha utilizado las redes neuronales artificiales para el análisis de la durabilidad del hormigón.

Como podemos ver en Tabla 5 y Tabla 6, no fue posible tener resultados que relacionaran permeabilidad y difusión de cloruros, solo unos pocos datos que se consideran insuficientes. Esto supuso la creación de dos bases de datos diferentes, la primera corresponde al ensayo de penetración de cloruros (ASTM C1202-19, RCPT), la cual tiene un total de 843 de datos y fueron utilizados 72 artículos, mientras que la segunda corresponde a los ensayos del coeficiente de difusión de cloruros no estacionarios, esta base consta de 445 datos, pero solo 228 tiene asociados resultados de resistencia a compresión a 28 días (Tabla 4), utilizándose 22 artículos para la confección de la misma.

<i>Ensayos</i>	<i>Nº de datos</i>
<i>Coeficiente de difusión s/resistencia</i>	<i>445</i>
<i>Coeficiente de difusión c/resistencia</i>	<i>218</i>
<i>Permeabilidad de cloruros</i>	<i>843</i>

Tabla 4, Número de datos de cada una de las bases.

A continuación se realizará un pequeño resumen de cada uno de los artículos utilizados para la creación de estas bases de datos. Las tablas correspondientes a la información sobre el diseño de las mezclas y los resultados obtenidos, los cuales formaran la base de datos, se encuentran en el Anexo A.

- *Hossam S. y otros (2016)*, han realizado una investigación experimental para desarrollar una herramienta de diseño que permita optimizar y predecir el comportamiento mecánico y de durabilidad del hormigón con metacaolín a través de análisis estadísticos. Realizaron 53 tipos de mezclas basadas en el método de superficie de respuesta mejorada. Ellos consideraron tres factores: contenido total de cemento (350 kg/m^3 a 600 kg/m^3), porcentaje de metacaolín (0% a 25%) y relación agua-total material cementante (0.3 a 0.5). Las mezclas fueron ensayadas tanto en permeabilidad como en difusión de cloruros y a la resistencia a la compresión.

Concluyeron que, los modelos de predicción pueden utilizarse como una herramienta rápida y útil para diseñar una mezcla óptima.

Además, observaron que aumentar el contenido de cemento, reducir la relación a/tmc y aumentar el porcentaje de metacaolín reduce la permeabilidad y difusión de cloruros y permite obtener mayores resistencias a la compresión. La relación a/tmc, mostró ser el efecto más significativo sobre la resistencia, la permeabilidad y difusión de cloruros.

Autores	Tipo de Cemento	MK	CV	HS	FC	Esc.	Z	CCA	NS	Otros	Coef. de difusión	RCPT	RNA
Hossam S. y otros	OPC	x									x	x	
P. Nath y otros	OPC		x									x	
C.S. Poon y otros	OPC	x		x								x	
A. A.A. Hassan y otros	OPC	x		x								x	
P. Dinakar y otros	OPC		x									x	
Y. Dhandapani y otros	LC3		x									x	
Ali A. Ramezaniapour y otros	OPC				x							x	
A. Kanellopoulos y otros	CEMII			x	x							x	
W. Wongkeo y otros	OPC		x	x								x	
P. Dinakar y otros	PPC		x									x	
B. Hwan Oh y otros	CEM I /CEM V		x	x		x						x	
M. Uysal y otros	CEM I /CEM V		x			x	x					x	
T.H. Wee, y otros	OPC			x								x	
P. Chindapasirt y otros	OPC		x									x	
M. Najimi y otros	Tipo II ASTM							x				x	
J. Sim y otros	OPC		x									x	
Ha-Won Song y otros	OPC		x	x		x					x		
S. Assié y otros	CEM II/A-LL / CEM I					x					x		
J. Zhang y otros	OPC		x	x		x					x		
E. G. Badogiannis y otros	CEM II/B-M	x				x					x		
R. Siddique	OPC		x										x
Z. Zhang y otros	CEM I		x		x	x							x
M. Valipour y otros	CEM II	x		x			x				x		
A. Elahi y otros	CEM I		x	x		x					x		
A. Pilvar y otros	CEMI			x									x
E. G. Moffatt y otros	CEMI		x								x		x
P. Ganesh y otros	OPC			x		x							x
Kang-Shiun Huang y otros	OPC		x										x
Erhan Güneyisi y otros	CEM I - CEM II/A-M CEM II/B-M - CEM III/A CEM V/A												x
Kannan V	OPC	x						x					x
M. Najimi y otros	Tipo I		x	x								x	x
J. Sun y otros	Tipo I				x							x	
A. Bagheri y otros	Tipo II ASTM			x		x						x	
N. Feng y otros	OPC		x	x		x	x					x	
A.L.G. Gastaldini y otros	OPC		x			x		x				x	
M. Nehdi y otros	Tipo I		x	x		x		x				x	
A. A. Ramezaniapour y otros	Tipo I		x	x		x						x	
F. Shaker y otros	CEMII /A-L CEM II/B-L CEM I												x
A. A. Abouhussien y otros	OPC									x	x	x	
F.U.A. Shaikh y otros	Tipo I		x							x	x	x	
A.M. Raiess Ghasemi y otros	Tipo II ASTM			x					x			x	
P. Dinakar y otros	OPC	x										x	
K.A. Gruber y otros	OPC	x									x	x	
Han-Young Moon y otros	OPC				x						x	x	
Chi-Sun Poon y otros	OPC		x	x		x						x	
A.A. Ramezaniapour y otros	Tipo I	x									x	x	
S. Rukzon y otros	Tipo I		x							x		x	
P. Nath y otros	OPC		x									x	
Tyler Deboodt y otros	Tipo I/II		x	x								x	
Kwang-Soo Youm y otros	OPC			x							x	x	

Tabla 5, Parte 1-Articulos correspondientes a la Base de datos.

Autores	Tipo de Cemento	MK	CV	HS	FC	Esc.	Z	CCA	NS	Otros	Coef. de difusión	RCPT	RNA
S.W. Macquarie Supit y otros	Tipo I		x							x		x	
N. Bouzoubaa y otros	OPC/BCG/Tipo III		x									x	
Faiz U.A. Shaikh y otros	Tipo I		x								x	x	
A. Kumer Saha y otros	OPC		x									x	
J. Feng y otros	OPC		x									x	
M. Gesoğlu y otros	CEM I	x										x	
S. Inthata y otros	OPC		x					x		x		x	x
V. Kannan y otros	OPC	x						x				x	
E. Ozbay y otros	CEM I			x								x	
D. Qingjun y otros	OPC		x			x						x	
S.C. Kou y otros	Tipo I		x									x	
D. Burden y otros	OPC		x									x	
S. Cong Kou y otros	Tipo I		x									x	
A. Raif Boğa y otros	CEM I					x						x	x
O. Karahan y otros	OPC		x									x	
E. Güneyisi y otros	CEM I- I/SR-II/A-M- CEM II/B-M-III/ A-V/A												x
P. Kathirvel y otros	OPC/PPC		x		x			x			x	x	
Hong-Sam Kim y otros	OPC	x	x	x								x	
M. Sahmaran y otros	Tipo I		x									x	
M. Gesoğlu	CEM I	x		x								x	
B. Menadi y otros	OPC/PLC				x							x	
A- Mardani-Aghabaglou y otros	OPC											x	
V. Ramasamy	OPC							x				x	
V. Ponmalar y otros	OPC							x				x	
Ha Thanh Le y otros	CEM I			x	x			x				x	
A. R Chini y otros	Tipo II ASTM		x			x						x	
A. A. Ramezaniapour y otros	Tipo I					x						x	
N. Gowripalan y otros	Tipo I				x							x	
Kyong Yun Yeau y otros	Tipo I/V						x					x	
P. Raposeiro da Silva y otros	Tipo I		x		x						x		
Henrik Erndahl SØRENSEN y otr	CEM I/CEM III/B		x	x	x						x		
	CEM I - CEM II/A-V												
	CEM II/B-V												
J. F. Martins Cortês	CEM II/A-D CEM IV/A		x	x							x		
	CEM IV/B												
Jae-Im Park y otros	OPC		x			x					x		
Q. Yuan y otros	CEM I										x		
A. S. Marinos y otros	CEM I/CEM II	x									x		
	Tipo I/Tipoll		x	x	x								
M. Shafikhaniy otros	CEM II/A-L CEM II/A-V- CEM III/B												

Tabla 6, Parte 2-Artículos correspondientes a la Base de datos.

- P. Nath y otros (2011), investigaron las propiedades de durabilidad del hormigón de alta resistencia con grandes volúmenes de cenizas volantes (30-40%). Determinaron la resistencia a compresión y la permeabilidad al cloruro entre otras propiedades que no están incluidas en este trabajo. La resistencia a compresión a 28 días varió entre 65 a 85 MPa, tuvieron una disminución en la resistencia a la compresión a edades tempranas en comparación al hormigón de control, pero con el paso del tiempo aumenta su resistencia igualando o superando a la resistencia obtenida en el hormigón de control. La inclusión de cenizas volantes redujo significativamente la permeabilidad de cloruros a los 28 días y se redujo aún más a la edad de 6 meses, observando que a mayor cantidad de ceniza volante menor permeabilidad al cloruro. Incluso observaron que los hormigones que tienen una baja relación a/tmc tienen una menor permeabilidad que los hormigones con mayor contenido de agua.
- C.S. Poon y otros (2006), relacionan las propiedades mecánicas y durabilidad del hormigón con adiciones de metacaolín (5%, 10% y 20%), y humo de sílice (5% y 10%),

variando la relación a/tmc (0.3 y 0.5). Para ello determinan la resistencia a la compresión y la penetración de cloruros.

Observaron que los hormigones con metacaolín tienen una mayor resistencia a la compresión que los hormigones con humo de sílice pero tiene una permeabilidad al cloruro similar. El hormigón con metacaolín con una relación a/tmc de 0.3 tiene una porosidad más baja y tamaños de poro más pequeños en comparación al hormigón sin adiciones. Según ellos la penetración de cloruros se correlaciona mejor con la porosidad del hormigón que con la porosidad de la pasta.

- *A.Hassan y otros (2012)*, en este artículo el objetivo principal de los autores fue desarrollar y evaluar diferentes mezclas de hormigón autocompactante que contienen metacaolín (3%, 5%, 8%, 11%, 15%, 20 %, y 25%) y humo de sílice (3%, 5%, 8% y 11%), sin variar la relación a/tmc. Las mezclas se evaluaron para resistencia a la compresión y permeabilidad al cloruro.

Observaron que tanto el metacaolín como el humo de sílice aumenta la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días. La resistencia a la compresión máxima para las mezclas con humo de sílice se logró con un remplazo del 8%, mientras que la resistencia de las mezclas con metacaolín aumentó a medida que aumentaba el porcentaje de remplazo de metacaolín. En cuanto a la permeabilidad a cloruros, concluyeron que un remplazo del 20% de cemento por metacaolín redujo la carga total en un 89% con respecto al control. Para los hormigones con humo de sílice la permeabilidad a cloruros muestra que disminuye a medida que aumenta el porcentaje de remplazo de humo de sílice.

- *P. Dinakar y otros (2008)*, para este estudio los autores diseñaron ocho mezclas para un hormigón autocompactante con ceniza volante, con un nivel de remplazo de 0 a 85%. Los resultados indican que hubo una mejora continua y significativa en la resistencia a la compresión más allá de los 28 días.

Lo que respecta a la permeabilidad a cloruros, los hormigones autocompactantes con resistencias de 20, 30 y 60 MPa y porcentajes de remplazo de ceniza volante de 85, 70 y 50% respectivamente, tuvieron permeabilidad a cloruros mucho menores que los hormigones normales. Los grados más altos 90 y 100 MPa, con reemplazos de cenizas volantes de 30 y 10%, tuvieron un desempeño casi similar a los hormigones normales.

Además, se observa que la presencia de cenizas volantes conduce a un aumento en la cantidad de C_3A debido a la mayor cantidad de alúmina presente en la mezcla y a un aumento en el contenido de silicato cálcico hidratado que se forma en las reacciones puzolánicas. Por lo tanto, la capacidad de unión del cloruro a los materiales que componen el hormigón tiende a aumentar con la adición de cenizas volantes y, en consecuencia, se dispone de menos cloruro libre para iniciar el proceso de corrosión.

- *Y. Dhandapani y otros (2018)*, proponen en su estudio la utilización de piedra caliza y arcilla calcinada la cual se encuentra en un cemento comercial llamado LC^3 que según los investigadores ha demostrado tener buen desempeño. LC^3 es un conglomerante hidráulico que consiste en arcilla calcinada y piedra caliza utilizadas en conjunción para hacer un cemento compuesto.

Obtuvieron que la resistencia del hormigón con LC^3 es mayor a las otras mezclas a cualquiera de las edades. Los resultados indican que con una proporción de mezcla

similar, el LC³ proporciona mayores resistencias a la compresión que los compuestos con cemento Portland y ceniza volante.

En cuanto a la permeabilidad de cloruro, los resultados que han obtenido muestran que el hormigón con LC³ presenta una baja permeabilidad, tanto a los 28 días como a los 90 días, lo que para ellos significa que tiene una excelente respuesta al ingreso de cloruro a edades tempranas. Mientras que las mezclas con ceniza volante mostraron también una mejora importante en la permeabilidad pero recién a los 90 días.

- *Ali A. Ramezaniapour y otros (2009)*, este documento describe el efecto del filler calizo (en varias cantidades) sobre la resistencia a la compresión y la permeabilidad al cloruro en los hormigones a los 28, 90 y 180 días. Los porcentajes de remplazo de piedra caliza en esta investigación son 0%, 5%, 10%, 15% y 20% y las relación agua/(cemento + piedra caliza) son 0.37, 0.45 y 0.55 con un total de material cementante de 350 kg/m³ (constante).

Los resultados muestran que la resistencia aumenta con el paso de tiempo, así como también lo hace con relaciones a/tmc mas bajas. Además, cuando se aumenta la cantidad de filler calizo la resistencia a la compresión disminuye, pero observaron que con hasta un 10% de reemplazo de esta no tiene una reducción significativa. A relaciones agua/(cemento + piedra caliza) iguales, se encontró que la resistencia a compresión del hormigón disminuyó con el aumento del contenido de filler calizo.

Se redujo la permeabilidad de cloruros con la disminución de la relación agua/(cemento + piedra caliza). Los hormigones que contenían un 10% y 15% de caliza muestran un buen desempeño frente a la penetración de cloruros. Además, observan que esta reducción se atribuye al efecto de relleno de los poros del hormigón.

- *Kanellopoulos y otros (2012)*, este artículo presenta los resultados de un programa de investigación sobre los principales indicadores que definen la durabilidad de los hormigones autocompactables como sorptividad, porosidad y permeabilidad al ion cloruro, comparando estos indicadores con los parámetros correspondientes del hormigón convencional. Los resultados muestran, que existe una correlación entre los distintos indicadores de durabilidad con los aditivos utilizados en el diseño de la mezcla.

Pudieron observar que las mezclas de hormigón autocompactante presentan una mejor durabilidad en comparación con los hormigones convencionales, incluso cuando los primeros tienen un contenido de agua mayor. Esto se debe al aumento del contenido de finos el en HAC, ya que estos reducen la microestructura y por lo tanto la red de poros del material.

La adición de materiales de sustitución del cemento mejora aún más la durabilidad de la mezcla, debido a la reacción puzolánica, mejorando significativamente el empaquetamiento de las partículas dentro de la microestructura.

- *W. Wongkeo y otros (2014)*, en este estudio se investigó la influencia de cenizas volantes (40–70%) y humo de sílice (10%), como remplazo al cemento Portland tipo I, tanto en la resistencia a la compresión, como en la permeabilidad a cloruro en hormigones autocompactantes. El contenido de agua se mantuvo constante en 180 kg/m³, investigándose la relación agua/tmc de 0,3, 0,35 y 0,4.

Los resultados que obtuvieron muestran que los hormigones con cenizas volantes redujeron la resistencia a la compresión del hormigón en todas las edades. A mayores

contenidos de ceniza volante, mayores pérdidas en la resistencia a la compresión. Esta pérdida de resistencia lo atribuyen a su lenta reacción puzolánica y al efecto de dilución. Mientras que la resistencia a la compresión de las mezclas con humo de sílice fue mayor, superando la resistencia de la mezcla de control, debiéndose a la mayor reacción puzolánica y el efecto de micro relleno del humo de sílice. En lo que refiere a la permeabilidad de cloruro, observaron que tanto cenizas volantes como el humo de sílice disminuyeron la permeabilidad a cloruros de la muestra y tendía a disminuir con el aumento de contenido de ellos. Cuando las mezclas poseían ambas adiciones, la carga que pasaba eran aún más bajas, y disminuía a mayor contenido de humo de sílice.

- *P. Dinakar y otros (2013)*, en su estudio investigan la influencia de la cenizas volantes en las propiedades del hormigón autocompactante, Para ello los autores diseñaron 4 mezclas, para las cuales utilizaron cemento puzolánico Portland (PPC) el cual contenía 28% de ceniza volante. El contenido de cemento fue reemplazado por 10%, 30%, 50% y 70% de cenizas volantes (extra), respectivamente. La relación agua/tmc para todas las mezclas se mantuvo constante en 0,30.

Los resultados les indicaron que las cenizas volantes junto con PPC se pueden utilizar para producir hormigones de alta resistencia, con un reemplazo del 30% de ceniza volante obtuvieron una resistencia de 100 MPa a 56 días. Pero, observaron que para reemplazos mayores al 50% la resistencia disminuye. En lo que tiene que ver a la permeabilidad de cloruros, hay una reducción de esta en los hormigones con cenizas volantes (30% y 50% de reemplazo). La razón de la baja penetración de cloruros la atribuyen a una matriz más densa, al reducir el tamaño de los poros y el grosor de la zona de transición entre el árido y la matriz cementicia.

- *B. Hwan Oh y otros (2002)*, estos investigan la resistencia a la penetración de cloruro de diferentes tipos de hormigón y desarrollan un hormigón de alta resistencia con una baja penetración de cloruro y así poder garantizar una alta durabilidad. Las principales variables son la relación agua/total material cementante, tipo de cemento, tipo y cantidad de adiciones minerales como humo de sílice, cenizas volantes y escoria de alto horno, tamaño máximo de árido y la incorporación de aire. Los resultados de los ensayos muestran que la permeabilidad al cloruro disminuye a medida que disminuye la relación a/tmc.

La sustitución del cemento por adiciones muestra que disminuye la permeabilidad del cloruro, aunque el humo de sílice mostró el mejor comportamiento, ello se debe a que el humo de sílice tiene partículas más finas que otros materiales cementantes y hace que la estructura de la matriz cementicia sea más densa. En cuanto a la ceniza volante, observaron que si bien reduce la permeabilidad no llega a los niveles de las otras dos a 28 días.

- *M. Uysal y otros (2012)*, fijaron su objetivo en evaluar la efectividad de varias adiciones minerales en hormigones autocompactantes frente a la permeabilidad de cloruros. Utilizaron cenizas volantes, escoria de alto horno, filler calizo, polvo de basalto y polvo de mármol.

Los resultados de la prueba indicaron que un reemplazo del 20% del cemento Portland (PC) por escoria de alto horno, resultó en una resistencia de más de 78 MPa a los 28 días. Mientras que la menor permeabilidad de cloruros se logró con una combinación de 60% de escoria de alto horno y un 40% de cemento portland. Al igual que autores anteriores, la presencia de ceniza volante y escoria de alto horno conducen a un aumento en la cantidad de C_3A por la mayor cantidad de alúmina y por tanto un aumento en el

contenido de silicato cálcico hidratado que se forma en las reacciones puzolánicas. Por lo tanto, la capacidad de unión al cloruro del hormigón tiende a aumentar con la adición de estas y se dispone de menos cloruro libre para iniciar el proceso de corrosión.

- *T.H. Wee, y otros (1999)*, investigan la influencia del contenido de árido en una mezcla de hormigón frente a la permeabilidad de cloruros. Para ello, comparan un mortero con un hormigón con distintos contenidos de árido total. Los resultados del estudio indicaron que el hormigón era relativamente más resistente a la penetración de cloruro que el mortero.
- *P. Chindapasirt y otros (2007)*, investigaron la resistencia a la penetración de cloruro de hormigones con cenizas volantes con tres tipos de finuras diferentes. A partir de las pruebas, se encuentra que la resistencia a la penetración de cloruros en el hormigón depende de la finura de las cenizas volantes. Se indica claramente que la carga que pasa por la muestra de hormigón (Coulomb) a una edad de 28 días se reduce significativamente con la incorporación de cenizas volantes. La disminución de la permeabilidad aumenta a medida que aumenta la finura de las cenizas volantes. El uso de cenizas volantes más finas reduce el tamaño medio de los poros de la pasta y esto mejora la resistencia del hormigón a la entrada de soluciones dañinas.

Los autores reconocen que la introducción de puzolanas en los cementos mejora la protección contra la corrosión inducida por cloruro de la armadura, al reducir su permeabilidad/difusión, particularmente en el transporte de iones de cloruro y aumentando la resistividad del hormigón.

- *M. Najimi y otros (2012)*, han investigado la aplicación de zeolita natural (reemplazo de 15% y 30%), como material cementante suplementario. Se estudian propiedades mecánicas y de durabilidad de este hormigón comparado con un hormigón convencional. Los resultados muestran una efectividad en la utilización de la zeolita natural en la penetración de cloruros. Observaron que la incorporación de un 15% de zeolita natural es una opción apropiada para mejorar las propiedades de resistencia y durabilidad del hormigón.

En cuanto a la resistencia a la compresión de los hormigones que contienen zeolita natural fue menor que la del hormigón de control a todas las edades. Sin embargo, los porcentajes de reducción fueron menores en edades posteriores, lo que puede atribuirse a la actividad puzolánica.

- *J. Sim y otros (2011)*, estudiaron las características del hormigón utilizando árido reciclado. Se utilizaron porcentajes del 100% de reemplazo en los áridos gruesos y varios niveles de reemplazo en los finos, además se adicionó ceniza volante.

Independientemente de las condiciones de curado y la adición de cenizas volantes, la resistencia a compresión del hormigón con árido reciclado fue menor que el hormigón de referencia. En cuanto a la permeabilidad, logró una resistencia suficiente a la penetración de iones de cloruro pero mayor que el hormigón de referencia.

- *Ha-Won Song y otros (2009)*, en su artículo evalúan la penetración de cloruros en hormigones de alta prestaciones mediante el uso de redes neuronales. En este estudio, se propone una técnica numérica para la evaluación de la difusión de cloruro. Con el fin de recopilar datos comparativos sobre los coeficientes de difusión en el hormigón utilizan diferentes adiciones, como escoria de alto horno, cenizas volantes y humo de sílice. Para

conocer el coeficiente de difusión se realizaron una serie de ensayos de penetración de cloruro.

Se utilizó una red de neuronas y se aplicó un algoritmo de propagación inversa. En esta red, cada elemento de entrada está conectado a cada neurona de entrada por medio de una matriz de peso. Se utilizaron 7 variables correspondientes a la mezcla, junto con el tiempo de duración del ensayo.

Se utilizaron 120 coeficientes de difusión obtenidos del proceso experimental y se analizaron en dicha red neuronal. Los resultados de la simulación se comparan con los resultados experimentales, y observan que los coeficientes de difusión se pueden estimar con éxito a través de la red neuronal, evaluando que el promedio de diferencia entre los resultados estimados de la red neuronal y de los datos experimentales es del 7,5%. Mencionan que si el conjunto de datos fuese más extenso, esta técnica propuesta puede ser más eficaz para la evaluación de la penetración de cloruro.

- *S. Assié y otros (2007)*, tienen como objetivo en su artículo evaluar la durabilidad de un hormigón autocompactante y un hormigón vibrado, con una resistencia a la compresión similar. Se hicieron varias mezclas de estos tipos de hormigón con las mismas materias primas en proporciones idénticas. Las pruebas realizadas en los hormigones estudiados revelaron que tienen un coeficiente de difusión efectivo equivalente (para cada clase de resistencia) y que es del mismo orden de magnitud.

Los valores de difusión de cloruro obtenidos demuestran que la microestructura más densa del hormigón autocompactante no genera una mejor resistencia a la penetración de cloruro. Esto tiende a mostrar que las propiedades de transporte también dependen de otras características del material, como la tortuosidad o la interconexión de la red porosa.

- *J. Zhang y otros (2018)*, proponen analizar la relación entre la permeabilidad de cloruros y la microestructura del hormigón, para ello fabrican 10 tipos de mezclas con diferentes relaciones de agua/material cementante y aditivos.

Los resultados muestran que la relación agua/material cementante tiene un efecto insignificante en la distribución del tamaño de poro. Además, la utilización de adiciones puede disminuir la porosidad del hormigón. Se observó que existe una correlación entre la difusión de cloruro y la porosidad del hormigón.

- *E. G. Badogiannis y otros (2015)*, evalúan la durabilidad del hormigón autocompactante con la adición de metacaolín. Las propiedades de durabilidad analizadas serán porosidad abierta, sorptividad, permeabilidad al agua y al gas, penetración de cloruros, evaluándose todas las mezclas con una de referencia o control.

La incorporación de metacaolín mejoró la durabilidad, ya que la sustitución de cemento por metacaolín da como resultado una disminución exponencial del coeficiente de difusión de cloruros en estado no estacionario y una mejora de la resistencia a la penetración del cloruro. Los coeficientes de difusión de cloruro se correlacionan muy bien con la resistencia a la compresión para todas las mezclas que incorporan metacaolín.

Este efecto potenciador lo atribuyeron al efecto de relleno de las partículas de metacaolín, las cuales reducen sustancialmente la permeabilidad o la porosidad del hormigón.

- *R. Siddique (2011)*, llevó a cabo un programa experimental para estudiar las propiedades del hormigón autocompactante con adición de cenizas volantes (reemplazo 15% al 35%).

Las mezclas de los hormigones autocompactantes con cenizas volantes mostraron una resistencia muy baja a la permeabilidad de cloruros. Observó que la ceniza volante tiene la capacidad de reducir los poros y las microfisuras de la zona de transición, esto se debe a las partículas esféricas de cenizas volantes, las cuales mejoran la densidad de la matriz y la zona de interfaz entre los áridos y la pasta.

- *Z. Zhang y otros (2016)*, realizaron un estudio comparativo entre las propiedades mecánicas y la durabilidad de hormigones con alto volumen de filler calizo y cenizas volantes.

Los resultados muestran que la microestructura del hormigón con cenizas es más densa que la del hormigón con filler calizo, para una misma relación agua/material cementante. En comparación, las cenizas volantes tienen una baja porosidad interconectada, alta resistencia a la compresión y alta resistencia a la carbonatación y a la penetración de iones de cloruro en comparación al filler calizo.

- *M. Valipour y otros (2013)*, compararon la durabilidad de diferentes tipos de hormigones sustituyendo parte del cemento por zeolita natural (10%, 20% y 30%), metacaolín (5%, 10% y 15%) y humo de sílice (5%, 7,5% y 10%), además se varió la relación agua-cemento (0.35, 0.40, 0.45 y 0.50). La comparación se realizó de acuerdo con los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión, absorción de agua, sorptividad, volumen de huecos, resistencia eléctrica, permeabilidad al gas y difusión de cloruro, y también se investigaron sus interrelaciones.

La investigación sobre la difusión de cloruros ha demostrado que la zeolita natural es mejor que las cenizas volantes, pero no tan buena como el humo de sílice. Esta reduce la penetración de cloruro hasta un 61% en comparación con el hormigón de control, debido a que la zeolita es un aluminosilicato hidratado, y la presencia de zeolita puede retardar el proceso de hidratación, reduciendo así la permeabilidad, la sorptividad y la difusión del hormigón porque reduce la porosidad y mejora la estructura de la zona de transición entre la pasta de cemento y el árido.

Además, se encontró que el uso de las puzolanas en un nivel de reemplazo efectivo es más eficiente que reducir la relación agua-cemento para mejorar la durabilidad del hormigón.

- *Elahi y otros (2010)*, evalúan las propiedades mecánicas y de durabilidad de los hormigones de alto rendimiento que contienen materiales cementantes suplementarios. Las propiedades mecánicas se evaluaron a partir de la resistencia a la compresión, mientras que las características de durabilidad se investigaron en términos de difusión de cloruro. Las variables de prueba incluyeron el tipo y la cantidad de materiales cementante suplementarios (humo de sílice, cenizas volantes y escoria de alto horno).

Los resultados muestran que el humo de sílice funciona mejor que los otros materiales cementantes suplementarios tanto para la resistencia a la compresión como para la difusión de cloruros. Las mezclas que contenían las tres adiciones (escoria de alto horno, cenizas volantes y humo de sílice) obtuvieron el mejor rendimiento entre todas las mezclas frente a la difusión de cloruro. Consideraron que todas las combinaciones ternarias dan como resultado hormigones de alto rendimiento con excelentes propiedades de durabilidad.

- *Pilvar y otros (2016)*, evalúan el rendimiento de cuatro métodos de medición eléctrica, Prueba rápida de permeabilidad de cloruro (RCPT), Prueba rápida de migración de cloruro (RCMT), Resistividad eléctrica de superficie (SR) y Prueba rápida de permeabilidad de cloruro modificada (MRCPT) para evaluar la penetración de cloruro de hormigón y comparan los resultados con el método de difusión masiva. En este estudio se usó humo de sílice.

Los cuatro métodos mostraron una reducción significativa en la permeabilidad al cloruro de las muestras que contienen humo de sílice en comparación con las muestras de control, con el tiempo. Los resultados mostraron que MRCPT tenía la menor sensibilidad al reemplazo de cemento con humo de sílice. Se observaron buenas relaciones entre los resultados de RCMT y MRCPT con el método de difusión masiva.

- *E. G. Moffatt y otros (2017)*, presentan la durabilidad del hormigón que incorpora grandes volúmenes de cenizas volantes expuestas a un ambiente marino.

Encontraron que la profundidad de penetración de cloruro era superior en las muestras sin cenizas volantes, mientras que la presencia de cenizas volantes disminuyó significativamente la profundidad de penetración. Se ha demostrado que las cenizas volantes pueden mitigar la corrosión al impedir la penetración del cloruro y disminuir el contenido de cloruros libres. Las cenizas volantes reaccionan de forma puzolánica con hidróxido de calcio para producir silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), lo que produce una microestructura más densa y reduce la permeabilidad. También se ha informado que aumenta los hidratos de aluminato y produce un gel C-A-S-H, que aumenta la capacidad de unión de cloruros en comparación con el cemento Portland.

La difusión de los iones de cloruro en el hormigón está influenciada principalmente por la estructura de los poros (tamaño, tortuosidad y conectividad de los mismos) y la capacidad de unión de los hidratos; mientras que la conductividad eléctrica del hormigón es principalmente una función de la estructura de los poros y la composición de la solución de los mismos. El hecho de que ambas propiedades (difusión iónica y conductividad eléctrica) sean altamente dependientes de la estructura de los poros es la razón por la cual existe una correlación razonable entre los dos parámetros. Sin embargo, tienen factores secundarios muy diferentes, que es una de las razones por las que hay disparidades entre ellos.

- *P. Ganesh y otros (2019)*, analizan la utilización de escoria de alto horno (hasta 80%), en hormigones de ultra alto rendimiento. Evalúan experimentalmente varias propiedades, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y durabilidad con dos condiciones de curado distintas (agua estándar y curado a temperatura elevada).

Los resultados de la prueba infirieron que las propiedades en estado endurecido son significativas hasta el 40% del nivel de reemplazo de cemento bajo un curado con agua estándar. El curado a temperatura elevada mejora su rendimiento hasta un nivel de reemplazo del 60%.

El estudio de la permeabilidad de cloruros mostró una mayor resistencia, esto podría ser debido a la estructura de poros mejorada del hormigón de ultra alta resistencia.

- *Kang-Shiun Huang y otros (2018)*, realizaron una comparación entre un hormigón con y sin cenizas volantes sometidos al ensayo de permeabilidad de cloruros ASTM C1202 (RCPT).

Se encontró una relación lineal entre la carga eléctrica transportada durante el ensayo de permeabilidad y la cantidad total de cloruro obtenida del perfil de cloruro. La cantidad total de cloruro en el espécimen se puede determinar midiendo la carga transportada del ensayo RCPT. El perfil de cloruro se puede obtener en base a la medición de la carga y el contenido de cloruro en la superficie. Después de completar el RCPT, un paso adicional realizado durante el procedimiento RCPT modificado implica medir el contenido de cloruro en la superficie. Basado en la profundidad de penetración de cloruro obtenida del perfil de cloruro, se usó un método RCPT modificado para calcular el coeficiente de difusión de cloruro y evaluar la permeabilidad al cloruro del hormigón.

- *Güneyisi y Gesoglu (2009)*, investigaron experimentalmente la influencia del tipo de cemento, la condición de curado y la edad de ensayo sobre la permeabilidad del cloruro en el hormigón. Las variables de investigación son el tipo de cemento, la relación agua-cemento (0,65 y 0,45), condición de curado (curado no controlado, controlado y húmedo) y edad de prueba (28, 90 y 180 días).

En función a los resultados obtenidos experimentalmente, propusieron la utilización de una red neuronal para la predicción de la permeabilidad de cloruros en el hormigón en términos de la relación agua-cemento, relación árido-cemento, relación superplastificante-cemento, tipo de cemento, condición de curado y edad de prueba.

Finalmente, se verifica utilizando los datos recopilados de la literatura. Los resultados del ensayo indicaron que los parámetros experimentales seleccionados por los autores tienen influencia sobre la permeabilidad del cloruro. Además, se encontró que el desarrollo de las redes neuronales tiene una alta capacidad de predicción, con un alto coeficiente de determinación.

Los resultados de las pruebas experimentales indicaron que el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la condición de curado y la edad de la prueba son claves en la permeabilidad de cloruros en los hormigones. Los hormigones sometidos a un procedimiento de curado en húmedo resultaron en una menor permeabilidad de cloruro en comparación con las condiciones de curado controladas y no controladas, mientras que la falta de curado agravó significativamente la penetración de cloruro.

En general, los hormigones con cemento con adiciones mostraron una menor permeabilidad de cloruros que los hormigones con cementos tipo I.

- *Kannan V (2018)*, estudió los efectos del sistema ternario sobre el comportamiento de la corrosión del hormigón autocompactante que contiene cenizas de cáscara de arroz y metacaolín.

A partir de los resultados, observó que los hormigones con un remplazo del 15% de cenizas de cáscara de arroz, 10% de metacaolín y 10% cenizas de cáscara de arroz + 10% de metacaolín mostraron un buen rendimiento de resistencia y durabilidad.

- *M. Najimi y otros (2019)*, analizan una red neuronal artificial con un algoritmo de colonia de abejas para la predicción de la penetración de cloruro en hormigones autocompactantes. Para ello, los autores diseñaron una serie de mezclas midiendo la penetración acelerada del cloruro (ASTM C1202-RCPT). Como variables de entrada, de salida, para entrenar y probar la red neuronal, se utilizaron tanto los componentes de las mezclas así como los resultados obtenidos de los ensayos correspondiente a cada mezcla. Para verificar la precisión del modelo, se comparó su rendimiento con los modelos de

regresión lineal, algoritmo genético y optimización de enjambre de partículas. Esta comparación se realizó en tres etapas de capacitación, validación y prueba. Los resultados de este estudio indican una mayor precisión y flexibilidad para determinar la rápida permeabilidad al cloruro del modelo propuesto en comparación con los modelos estadísticos, algoritmo genético y optimización de enjambre de partículas.

Considerando el mejor comportamiento del modelo de red neuronal, el coeficiente de determinación R^2 en las fases de entrenamiento, validación y prueba fue 0.9978, 0.9867 y 0.9911, respectivamente.

- *J. Sun y otros (2018)*, estudiaron las influencias del filler calizo en la resistencia de los hormigones a la penetración de cloruro con una relación constante de agua/total material cementante y una resistencia a la compresión constante a 28 días. También experimentaron con las propiedades del hormigón con respecto al tiempo de curado inicial (húmedo). Los resultados indican que, bajo una condición de relación agua/aglomerante constante, la resistencia a la penetración de cloruro disminuye cuando la relación de reemplazo por filler calizo es de 24%.

En cuanto al curado, observaron que a medida que disminuye el tiempo de curado inicial la magnitud reductora de las propiedades del hormigón que contiene filler calizo es mayor que el hormigón con cemento Portland.

- *Bagheri y otros (2012)*, investigaron el efecto de la incorporación de humo de sílice (2.5%, 5%, 7.5% y 10%), en el desarrollo de la resistencia y las características de durabilidad de los hormigones que contienen una escoria de baja reactividad (15%, 30% y 50%). Los hormigones ternarios incluyeron combinaciones de humo de sílice y escoria en varios niveles de reemplazo de cemento. La relación agua/total material cementante y el contenido total de material cementante se mantuvieron constantes para todas las mezclas.

Los resultados muestran que el uso simultáneo mejora considerablemente su durabilidad. Usando una combinación adecuada de escoria de baja reactividad y humo de sílice, es posible obtener una resistencia de 28 días comparable a la mezcla de control y mejorar la durabilidad, particularmente a largo plazo. Las mezclas ternarias también tienen la ventaja añadida de una menor demanda de agua.

En cuanto a la penetración de cloruros en las muestras ternarias que contienen 10% de humo de sílice y cantidades variables de escoria, estas tienen un mejor desempeño en comparación con el hormigón binario que contiene escoria y la mezcla de control. Además, el coeficiente de difusión ternario que contiene escoria y humo de sílice es más bajo que el de los hormigones de control y binarios.

También se observa que al aumentar el contenido de escoria, se mejora la resistencia a la penetración de cloruro de las mezclas binarias.

- *N. Feng y otros (2002)*, analizan la permeabilidad de cloruro de hormigones con diferentes polvos minerales ultrafinos (humo de sílice, cenizas volantes, zeolita natural, escoria de alto horno) y diferentes relaciones agua/total material cementante.

Los resultados muestran que los polvos ultrafinos reducen la permeabilidad del hormigón en comparación a al hormigón y el orden de reducción es humo de sílice, cenizas volantes, zeolita natural, escoria de alto horno. Además se observó que la permeabilidad disminuyó con relaciones a/tmc más bajas.

- *A.L.G. Gastaldini y otros (2010)*, investigan la influencia del tiempo de curado en la resistencia y penetración de cloruro en el hormigón con diferentes cantidades de ceniza de cascara de arroz (10%, 20% y 30%). Los resultados se compararon con una mezcla de referencia con 100% de cemento Portland y con otras dos mezclas binarias con 35% de cenizas volantes y 50% de escoria de alto horno.

Los aumentos en el contenido de ceniza de cáscara de arroz produjeron permeabilidades mas bajas. Los tiempos de curado más largos redujeron los valores de las cargas de Coulomb para todas las mezclas investigadas. Sin embargo, la extensión del efecto de los tiempos de curado sobre la resistencia a la compresión y la penetración de cloruro en el hormigón está relacionada con el tipo de adición de minerales, la concentración de las sustituciones utilizadas, la relación a/tmc y el tiempo de curado utilizado.

La mejora de las propiedades del hormigón con respecto al curado se debe a la mejor hidratación del cemento y de las puzolanas, al tiempo que evita la liberación temprana de agua del interior del poro. Este proceso crea una microestructura más densa, con un volumen menor de poros capilares y da como resultado una menor permeabilidad.

- *M. Nehdi y otros (2004)*, investigan la permeabilidad a cloruros en hormigones autocompactante realizados con cementos binarios, ternarios y cuaternarios de reemplazo de alto volumen. Los ensayos realizados son la resistencia a la compresión y permeabilidad de cloruros. Los resultados indican que los hormigones autocompactantes con cementos compuestos logran una buena trabajabilidad, alta resistencia a largo plazo y muy baja penetrabilidad de cloruro.

Las mezclas más eficientes para disminuir la penetrabilidad de iones de cloruro durante 28 días fueron las mezclas que incorporan un 6% de humo de sílice o un 6% de ceniza de cascara de arroz.

- *A. Ramezaniapour y otros (1995)*, estudiaron el rendimiento de la escoria, ceniza volante y humo de sílice bajo cuatro regímenes de curado diferentes frente a la resistencia a la compresión y permeabilidad de cloruros. La relación agua/material cementante de todas las mezclas se mantuvo constante (0,50), excepto para la mezcla de hormigón de cenizas volantes que fue 0,35. Las muestras de hormigón se sometieron a los siguientes tipos de curado: curado húmedo continuo, curado a temperatura ambiente luego de desmoldar, curado a temperatura ambiente luego de dos días de curado húmedo y por ultimo un curado a 38 °C y 65% de humedad relativa.

Obtuvieron que la resistencia de los hormigones que contienen cenizas volantes o escorias parece ser más sensible al curado y la sensibilidad aumenta con las cantidades crecientes de cenizas volantes o escorias en las mezclas. La incorporación de escoria o humo de sílice produjo hormigones con una permeabilidad al cloruro muy baja.

El curado en húmedo continuo del hormigón es esencial para lograr la mayor resistencia, la menor porosidad y la mayor resistencia a la penetración de cloruros, mientras que los hormigones que no reciben ningún tipo de curado muestran el peor desempeño. Sin embargo, las muestras curadas en húmedo durante dos días muestran una mejora significativa en comparación con los hormigones sin ningún curado. En cuanto a los hormigones curados a 38°C y 65% de humedad relativa, tuvieron altas resistencia a compresión a edad temprana.

- *F. Shaker y otros (2018)*, investigan el efecto del uso de cementos que contienen adición de filler calizo (CEM II/A-L), CEM II/B-L) en comparación con un cemento Portland tipo CEM I con respecto a propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón.

Tanto los hormigones con cemento CEM II/A-L con 20% de caliza y con CEM II (B-L) con 35% de caliza obtuvieron peores permeabilidades al cloruro en comparación con los hormigones realizados con cemento tipo CEM I.

Esta conclusión es totalmente inversa a lo que determinan tanto las normativas a nivel mundial, como los distintos artículos que se emplean para la elaboración de la base de datos. La Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (2008), determina que un hormigón con cemento tipo CEM I, tiene un coeficiente de difusión casi dos veces mayor que uno con cemento tipo CEM II. Por tanto, este artículo queda descartado en nuestra base de datos.

- *A. Abouhussien y otros (2015)*, utilizan el diseño estadístico para la optimización del diseño de mezclas de hormigón autocompactante que incorpora metacaolín (0%-25%). Los factores estudiados fueron el contenido total de cemento, el porcentaje metacaolín, la relación agua-material cementante y las condiciones de curado. Los resultados obtenidos de los modelos estadísticos desarrollados los utilizaron para determinar los factores más significativos que afectan la permeabilidad al cloruro y la vida útil esperada de las diferentes mezclas ensayadas, para determinar la importancia de las variables y sus interacciones.

Los modelos desarrollados también se utilizaron para optimizar el nivel de cada variable de respuesta para minimizar la permeabilidad al cloruro y maximizar la vida útil del hormigón autocompactante. Los resultados arrojaron que una mezcla óptima con metacaolín logró la permeabilidad de cloruro más baja en comparación con las mezclas equivalentes que contenían cenizas volantes, escorias y humo de sílice. Los resultados también mostraron que el reemplazo de metacaolín es la variable más significativa que afecta la permeabilidad al cloruro, la disminución de la permeabilidad con el tiempo y la vida útil de las mezclas probadas.

- *F.U.A. Shaikh y otros (2015)*, evalúan los efectos de las nano partículas de carbonato cálcico (CaCO_3) sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad de los hormigones con alto volumen de cenizas volantes (40 y 60%). En la primera parte de este estudio, se evalúa el efecto del contenido de nano partículas de CaCO_3 en el rango de 1-4% en peso de cemento sobre la resistencia a la compresión del mortero de cemento. Se ha encontrado que 1% en peso de cemento de nano partículas de CaCO_3 exhibieron la mayor resistencia a la compresión (aproximadamente 42 MPa). En consecuencia, se seleccionó esta mezcla con el 1% en peso de cemento de nano partículas de CaCO_3 y se usó para evaluar su efectividad para mejorar la resistencia a la compresión de los hormigones con alto contenido de ceniza volante.

Los resultados experimentales mostraron que los hormigones reforzados con nano partículas de CaCO_3 tienen una resistencia a la compresión más alta y baja permeabilidad a cloruros en comparación con los hormigones que no contenían carbonato cálcico. También se encontró que el 1% en peso de cemento de nano partículas de CaCO_3 mejoran la microestructura al formar silicatos cálcicos hidratados adicionales y disminuyen la porosidad de los hormigones. También se revela que la adición de nano partículas de CaCO_3 no solo condujo a una microestructura mucho más densa en la matriz del hormigón sino que también cambió la formación de productos de hidratación,

contribuyendo así a la mejora de la resistencia a la compresión a temprana edad y a las propiedades de durabilidad de los hormigones.

- *A.M. Raiess Ghasemi y otros (2010)*, evalúan la influencia de la adición de nano sílice como reemplazo de humo de sílice tanto en las propiedades mecánicas como de durabilidad, estudiadas a través de los ensayos de resistencia a la compresión, la permeabilidad de cloruros (RCPT), la profundidad de penetración de agua.

Los resultados que obtuvieron indicaron hormigones con adiciones del 0,75% de nano sílice más un 3% de humo de sílice aumento las resistencias a la compresión. En cuanto a la permeabilidad de cloruros, la mezcla con una adición del 0,75% de nano sílice y de 6% humo de sílice tuvo la menor permeabilidad a cloruros.

- *P. Dinakar y otros (2013)*, investigan el efecto de la incorporación de metacaolín (5, 10 y 15%), en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón de alta resistencia para una relación constante de agua/material cementante (0,3). De los resultados, observaron que un reemplazo del 10% es el nivel óptimo para la resistencia a la compresión. Más allá del 10% de reemplazo, la resistencia a la compresión se reduce pero aún es más alta que la mezcla de control. En los ensayos de durabilidad, los hormigones con metacaolín han mostrado una alta resistencia en comparación con el de control y la resistencia aumenta a medida que aumenta el contenido de metacaolín.
- *K.A. Gruber y otros (2001)*, evalúan el rendimiento a largo plazo del hormigón que contiene metacaolín de alto rendimiento frente a la resistencia de penetración de cloruro. Los ensayos de difusión indicaron que en los hormigones que contenían metacaolín se redujo sustancialmente la penetración de cloruros con relaciones agua/material cementante de 0.30 y 0.40. La reducción en los coeficientes de difusión en comparación con la mezcla de control estuvo en el entorno del 50% y 60% para un remplazo de 8% y 12% de metacaolín, respectivamente. Esperan que tales reducciones tengan un impacto sustancial en la vida útil de las armaduras en ambientes de cloruro.
- *Han-Young Moon y otros (2004)*, investigaron la difusión del cloruro en hormigones con filler calizo. Para estudiar el efecto de este material, todas las mezclas se prepararon con una relación agua-cemento igual (0,45).

A partir de los resultados, obtuvieron que la resistencia a la compresión de todas las muestras disminuyó al aumentar la cantidad de reemplazo de filler calizo. En cuanto a la difusión de cloruros, observaron que hay una tendencia creciente con el período de curado. A mayor tiempo de curado, menores serán los coeficientes de difusión. En los hormigones con 10% y 20% de remplazo el coeficiente de difusión fue menor que en la muestra de control. Según los autores, esto es independientemente de los niveles de finura del material.

- *Chi-Sun Poon y otros (2001)*, evaluaron la resistencia a compresión y durabilidad de los hormigones puzolánicos normales y de alta resistencia que incorporan humo de sílice, cenizas volantes y escoria de alto horno sometidos a temperaturas elevadas de hasta 800°C. Las variables de durabilidad investigadas fueron: permeabilidad a los cloruros, porosimetría de intrusión de mercurio y patrón de grietas.

Los resultados que obtuvieron mostraron que los hormigones con adiciones puzolánicas, como cenizas volantes y escoria de alto horno, ofrecen el mejor rendimiento, particularmente a temperaturas inferiores a 600°C, en comparación con los hormigones con 100% de cemento. Obtuvieron que el 30% de reemplazo de cemento por cenizas

volantes y el 40% de reemplazo de cemento por escoria de alto horno fue óptimo para obtener la máxima resistencia y durabilidad a altas temperaturas.

- *A.A. Ramezianpour y otros (2012)*, investigan el rendimiento de las mezclas de hormigón que contienen metacaolín (0%, 10%, 12,5% y 15%) en términos de resistencia a la compresión, penetración de agua, permeabilidad del cloruro (RCPT) y resistividad eléctrica. Las relaciones agua/material cementante (a/cm) son de 0,35, 0,4 y 0,5 y todas las mezclas tendrán un total de material cementante de 400 kg/m³.

Los resultados demuestran que el metacaolín logra una mayor resistencia a la compresión y aumento de la durabilidad de los hormigones. Los resultados demuestran que el uso de metacaolín mejora significativamente la resistencia a la penetración de cloruro en comparación con el hormigón sin esta adición. A mayor contenido de metacaolín, se obtiene mayor resistencia a la penetración de cloruros. Además, observan que existe un relación exponencial entre la permeabilidad del cloruro y la resistencia a la compresión.

- *S. Rukzon y otros (2014)*, en esta investigación evalúan el uso de la mezcla ternaria de cemento Portland con dos puzolanas para la realización de un hormigón de alta resistencia. El cemento de Portland de tipo I fue sustituido parcialmente por la ceniza bagazo, ceniza de la cáscara de arroz y ceniza volante con niveles de remplazo de 20% y del 40%. Determinaron la resistencia a la compresión, la porosidad, la penetración de cloruro, la resistencia a la corrosión y el módulo de elasticidad de los hormigones. Los resultados de los ensayos revelan que la resistencia a la penetración de cloruro de hormigón mejora sustancialmente con el reemplazo parcial de ceniza volante y ceniza de bagazo o ceniza volante y ceniza de cascara de arroz, y que esta mejora aumenta con un mayor nivel de reemplazo.
- *P. Nath y otros (2013)*, presentan un estudio experimental sobre el efecto de las proporciones de la mezcla en las propiedades de contracción por secado y permeabilidad de los hormigones de alta resistencia que contienen grandes cantidades de cenizas volantes. Las mezclas de hormigón fueron diseñadas con y sin ajustes en la relación agua/total material cementante (a/tcm) y en el contenido total de material cementante para tener en cuenta la incorporación de cenizas volantes de hasta el 40%.

Los hormigones que incorporaron ceniza volante alcanzaron resistencias de compresión equivalentes al hormigón de control y demostraron también que disminuye la permeabilidad del agua y del cloruro. También observaron que las mejoras de las propiedades de durabilidad fueron menos significativas cuando no se realizaron ajustes en la relación a/tmc y en el contenido total de material cementante, por tanto hay una necesidad de ajustar las proporciones de la mezcla para lograr mejoras en la durabilidad.

- *Tyler Deboodt y otros (2015)*, han realizado una investigación sobre la durabilidad de los hormigones fabricados con áridos ligeros prehúmedos y aditivos reductores de retracción (Aditivos tipo SRA). En este estudio, se determinó la resistencia a la permeabilidad y la contracción por secado del hormigón de alto rendimiento. La adición de estos materiales redujo la permeabilidad de cloruros en un 23%.
- *Kwang-Soo Youm y otros (2016)*, presentaron un estudio sobre las propiedades mecánicas y durabilidad de los hormigones que contienen árido ligero de alta resistencia con humo de sílice. Los hormigones fueron diseñados para alcanzar una resistencia a la compresión de diseño de 60 MPa a los 28 días. Se prepararon nueve mezclas con tres tipos de áridos y un reemplazo de humo de sílice de 0%, 3.5% y 7.0%. Los ensayos fueron

resistencia a la compresión y tracción, módulo de elasticidad resistencia a la penetración de cloruro y coeficiente de difusión de cloruro basado en la medición de la profundidad de penetración de cloruro.

Los resultados indican que la durabilidad contra el deterioro químico de este tipo de hormigón depende de las composiciones de las pastas de cemento, mientras que la durabilidad contra el ataque físico depende del tipo de árido que se utilice.

La incorporación de materiales puzolánicos en el hormigón tiene muchos efectos beneficiosos que potencian las propiedades mecánicas del mismo. Las finas partículas de las puzolanas llenan los espacios entre los granos de Clinker, dando como resultado una matriz de cemento más densa y una zona de transición interfacial entre la matriz de cemento y los áridos, esto se traduce en una menor permeabilidad y en una mayor resistencia a la compresión del hormigón.

- *S.W. Macquarie Supit y otros (2015)*, realizan un estudio experimental sobre la durabilidad del hormigón convencional y de un hormigón con alto contenido de cenizas volantes y nano sílice (2 y 4%), con una relación constante de agua/material cementante de 0,4.

Observaron que el hormigón que contiene 2% de nano sílice tuvo una resistencia a compresión similar que el que contiene 4% de nano sílice. Los resultados muestran que, además de la mejora en la resistencia a la compresión, la adición de 2% nano sílice reduce significativamente la capacidad de absorción de agua, permeabilidad al cloruro y porosidad de los hormigones. También se revela que la durabilidad de los hormigones que contienen un 38% de cenizas volantes y un 2% de nano sílice son superiores al hormigón con 100% de cemento Portland.

- *N. Bouzoubaa y otros (2001)*, estudian las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón realizado con un cemento con adiciones de cenizas volantes de alto volumen, utilizando una ceniza gruesa que no cumple con el requisito de fineza de ASTM C 618.

Los resultados muestran que, excepto por la resistencia del hormigón al deshielo mediante sales, las propiedades mecánicas y la durabilidad fueron superiores.

- *Faiz U.A. Shaikh y otros (2015)*, muestran el efecto de cenizas volantes ultrafinas sobre la resistencia a la compresión y durabilidad. Los ensayos realizados serán corrosión inducida por cloruros, sorptividad, volumen de vacíos permeables, penetración de cloruro, difusión de cloruro y porosidad.

Los resultados que obtuvieron muestran que la adición de un 8% de cenizas volantes ultrafinas mejoró significativamente a edades tempranas la resistencia a la compresión. En cuanto a la durabilidad, observaron que también se mejora en la mayoría de los casos, pero el hormigón que contiene 32% de cenizas volantes y 8% de cenizas ultrafinas mostró el mejor rendimiento.

- *Kumer Saha y otros (2018)*, evalúan la aplicación de cenizas volantes como un reemplazo parcial del cemento frente a la resistencia a la compresión y durabilidad.

Observaron que la resistencia a la compresión de las muestras de cenizas volantes fue inferior a una edad temprana en comparación con la muestra de control. Sin embargo, debido a la reacción puzolánica, la resistencia mejoró gradualmente durante un período de tiempo más largo, mientras que las muestras de control detuvieron el incremento de

la resistencia después de 56 días. La adición de cenizas volantes redujo la porosidad del hormigón. Así mismo, exhibió una menor capacidad de absorción de agua y permeabilidad al cloruro, observando que existe una caída significativa de estas con el paso del tiempo (28 a 180 días).

- *J. Feng y otros (2015)*, utilizaron cenizas volantes ultrafinas en la mezcla de hormigones con remplazo de 20 y 35%. La relación agua/total material cementante fue de 0.28. Se aplicaron métodos de curado estándar y de curado por temperatura.

Los resultados mostraron que disminuyó la resistencia a la compresión a edades tempranas en condiciones de curado estándar, pero se compensó en condiciones de curado con temperatura. En cuanto a la permeabilidad de cloruros, se observó una mejora en el hormigón con cenizas volantes ultrafinas, dado que mejoró la estructura de los poros.

- *M. Gesoğlu y otros (2014)*, realizan un estudio experimental sobre las propiedades de transporte de los hormigones con diferentes caolines calcinados no purificados y metacaolín de alta reactividad. Para el diseño de la mezcla del hormigón se utilizó un reemplazo con 5%, 10%, 15% y 20% tanto de caolín como de metacaolín. Se realizaron ensayos de permeabilidad al gas, permeabilidad al agua y permeabilidad al cloruro.

Los resultados indicaron que los hormigones que incorporaron diferentes tipos de caolín calcinado tenían un rendimiento de permeabilidad comparable con el hormigón con metacaolín. Además, la incorporación de ambas adiciones muestra una permeabilidad mejor que el hormigón de control, independientemente del nivel de reemplazo.

- *S. Inthata y otros (2013)*, este artículo pretende predecir la penetración de cloruros y la resistencia a la compresión mediante redes neuronales. Para ello proponen diferentes diseños de mezclas, variando la relación a/c y utilizando adiciones minerales tales como ceniza volante y ceniza de cascara de arroz. Para la generación de la base de datos realizan el ensayo de penetración de cloruro y los métodos de inmersión. Utilizarán seis parámetros de entrada, relación agua-total material cementante, porcentaje de adición, edades de ensayo, tipos de adición, relación árido/cemento y la resistencia a la compresión real. Para verificar el modelo, se llevan a cabo ecuaciones de regresión lineal y no lineal y se comparan con el modelo de red neuronal. Los resultados indican que la incorporación de cenizas volantes y cenizas de cascara de arroz molidas mejora sustancialmente la trabajabilidad y la permeabilidad al cloruro.

El modelo muestra una predicción muy precisa, obteniendo un R^2 de 0.97, cosa que no se consigue con una regresión lineal y no lineal. Además, concluyeron que las redes neuronales se pueden expandir fácilmente para generar una nueva base de datos adicional y así volver a ingresarlos hasta que el criterio de error esté satisfecho o disponible para reestructurar la arquitectura de la red neuronal, ya sea cambiando el número de neuronas o bien capa oculta.

- *V. Kannan y otros (2014)*, evaluaron en su artículo las propiedades mecánicas y de permeabilidad del hormigón autocompactante con metacaolín, ceniza de cascara de arroz y una combinación de ambas. Para este propósito, se prepararon diferentes mezclas con diferentes cantidades de metacaolín, ceniza de cascara de arroz y el cemento Portland (OPC) con remplazos de 5 a 40% de ambas adiciones.

Como resultado del aumento del porcentaje de metacaolín, ceniza de cascara de arroz y la combinación de ambas, las propiedades mecánicas y de permeabilidad mejoraron

considerablemente. Observaron que la muestra que incorpora 15% de metacaolín y 15% de ceniza de cascara de arroz tiene una mejor trabajabilidad, propiedades mecánicas y de permeabilidad. Además demostraron que esta combinación es la mezcla óptima para lograr el máximo efecto sinérgico.

- *E. Ozbay y otros (2011)*, realizaron la optimización del diseño de mezclas de hormigón de alto desempeño con el fin de evaluarlas según sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Por lo cual investigaron las siguientes variables, relación agua/material cementante, contenido total de material cementante, contenido de humo de sílice, relación de árido fino-material cementante y cantidad de superplastificante.

Realizaron ensayos de resistencia a la compresión, tracción, módulo de elasticidad, ultrasonido, absorción de agua, penetración de agua y el ensayo de penetración de cloruro de las diferentes mezclas. Luego, usando como variables la proporción de mezcla, se obtuvieron formulaciones matemáticas para las distintas propiedades a través de la técnica de regresión. El objetivo era obtener la mezcla óptima que minimice simultáneamente la absorción de agua, la penetración de agua y de cloruro.

Para verificar si la mezcla óptima teórica realmente minimiza las diferentes propiedades de los hormigones de alto rendimiento, se realizó un estudio experimental y se observó que las proporciones de mezcla óptimas propuestas teóricamente pueden satisfacer las propiedades de mínimas esperadas.

- *D. Qingjun y otros (2009)*, estudiaron la corrosión de la armadura de un hormigón de alta resistencia utilizando cenizas volantes y escoria. Los resultados indican que los efectos de la escoria en la capacidad de penetración de cloruros es mejor que los de las cenizas volantes con el mismo nivel de remplazo.
- *S.C. Kou y otros (2009)*, evaluaron las propiedades del hormigón autocompactante, utilizando árido reciclado. Se prepararon tres series de mezclas con áridos reciclados utilizando 100% de remplazo en los áridos gruesos, y se usaron diferentes niveles en los áridos finos (0, 25, 50, 75 y 100%). El contenido de cemento se mantuvo constante para todas las mezclas y la relación agua/material cementante se varió para cada mezcla.

Los resultados indican que no existe una diferencia en las propiedades de un hormigón autocompactantes con de arena de río y uno con áridos finos reciclados triturados.

- *D. Burden y otros (2003)*, estudian el efecto del curado sobre la carbonatación y la permeabilidad del hormigón con cenizas volantes de alto volumen. Se realizaron mezclas con relaciones agua/material cementante (a/mc), de 0.34, 0.40 y 0.50 y niveles de reemplazo de cenizas volantes de 0%, 30%, 40% y 50%. Las muestras se curaron con humedad durante varios períodos (1 a 28 días) antes de la exposición a una de las siguientes condiciones: carbonatación acelerada (aproximadamente 1% de CO_2 por volumen) en interiores con una temperatura de $23^\circ C$ y 50% de humedad relativa o al aire libre.

Los datos indican que los hormigones con ceniza volante de alto volumen se carbonatan a una mayor velocidad que el hormigón con cemento Portland simple con una misma relación a/mc . La tasa de carbonatación aumenta con el nivel de cenizas volantes y las diferencias se vuelven particularmente marcadas a medida que se reduce el grado de curado húmedo o se aumenta a/mc . La mayor sensibilidad de este hormigón se puede compensar bien reduciendo la relación a/mc , extendiendo el período de curado húmedo, o aumentando la profundidad de recubrimiento cuando se usan estos hormigones.

Además, el aumento de la duración del curado húmedo para los hormigones con cenizas volantes de alto volumen da como resultado una mayor resistencia a la compresión, menor permeabilidad y menores tasas de carbonatación.

- *S. Cong Kou y otros (2008)*, determinaron los efectos del uso de cenizas volantes (0% y 25%) y áridos reciclados sobre las propiedades del hormigón. En este estudio, se prepararon cuatro series de mezclas de con relaciones de agua a cemento de 0.55, 0.50, 0.45 y 0.40. Los remplazos de árido reciclado grueso fueron 0%, 20%, 50% y 100%.

Observaron que aunque el uso de áridos reciclados tuvo un efecto negativo en las propiedades mecánicas del hormigón, la adición de cenizas volantes podía mitigar este efecto perjudicial. Además, la adición de cenizas volantes redujo la retracción por secado y mejoró la penetración de cloruro. Además, se descubrió que la contracción por secado y la penetración de cloruro disminuyeron a medida que aumentó la resistencia a la compresión.

- *Raif Boğa y otros (2013)*, investigaron la influencia de la escoria de alto horno y de un inhibidor de corrosión a base de nitrito de calcio sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. Además, determinaron los efectos del tipo de curado y la edad de curado en las mezclas propuestas. Una vez obtenido los valores experimentales, fueron ingresados a una red neuronal de cuatro capas y a un modelo neurodifuso, estas técnicas se pueden utilizar como herramienta alternativa y para detectar las tendencias que son demasiado complejas. Fueron entrenados utilizando 120 de las 162 muestras y se probaron con las otras 42 muestras para cada parámetro.

Utilizaron la caja de herramientas de MATLAB para predecir la resistencia a la compresión, la resistencia a tracción y la permeabilidad de ion cloruro. Las variables de entrada fueron el tipo de curado, la edad de curado, la cantidad de escoria y la de inhibidor de corrosión, mientras que la resistencia a la compresión, tracción y permeabilidad fueron los datos de salida. En la aplicación de la red neuronal artificial llevada a cabo, las relaciones de precisión obtenidas para la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y la permeabilidad de cloruros tuvieron un coeficiente de determinación R^2 de 97.1%, 97.0% y 73.3%, respectivamente.

Concluyeron que las redes neuronales pueden estimar correctamente la resistencia a la compresión, tracción y permeabilidad. Creen que el éxito radica en el entrenamiento, en el conjunto de datos y en la estructura de la red neuronal.

- *O. Karahan y otros (2016)*, este estudio presenta las propiedades mecánicas y de transporte de los hormigones reforzados con fibra de acero. Las propiedades estudiadas incluyen trabajabilidad, resistencia a la compresión, flexión, tracción, absorción de agua, porosidad, sorptividad, permeabilidad de cloruro y contracción por secado. Se realizaron mezclas con una relación a/mc de 0,40, un contenido total de cemento de 500 kg/m³ y un contenido de fibra de acero de 0-0,25-0,50 y 1,00% en volumen de hormigón.

Los resultados mostraron una ligera reducción en la resistencia a la compresión con el uso de fibra de acero. Por otro lado, las fibras de acero mejoraron significativamente la resistencia a la tracción y disminuyeron la retracción por secado. Aunque no se observó un aumento significativo en la absorción, la porosidad y la capacidad de absorción, la permeabilidad de cloruros aumentó drásticamente con el aumento del contenido de fibra de acero.

- *P. Kathirvel y otros (2013)*, fijaron como objetivo obtener el contenido óptimo de cenizas volantes, ceniza de cascara de arroz y filler calizo para el hormigón con respecto a la resistencia y durabilidad.

Observaron que la mezcla cuaternaria es muy efectiva para mejorar la resistencia a la compresión, la tracción y la flexión junto con la durabilidad del hormigón. La mezcla cuaternaria estaba compuesta por 20% de cenizas volantes, 10% de caliza y 10% de ceniza de cascara de arroz y el restante de cemento.

- *Hong-Sam Kim y otros (2007)*, evalúan y comparan las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón con metacaolín. Para ello realizan mezclas con diversos reemplazos de humo de sílice y metacaolín.

Los ensayos de resistencia a la compresión arrojan que una sustitución óptima de metacaolín oscila entre 10% y 15%. En cuanto a la resistencia a la penetración de cloruro, esta se redujo significativamente a medida que aumentaba la proporción de humo de sílice y de metacaolín. Observaron que el efecto de relleno ocasionado por estas adiciones mejora sustancialmente la resistencia a los ataques químicos en comparación con el cemento Portland.

- *M. Sahmaran y otros (2011)*, desarrollaron una serie de hormigones autocompactantes con la incorporación de cemento Portland y cenizas volantes. Demostraron que hasta un 70% de cemento Portland con 30% de adición de cenizas volantes permite la fabricación de un hormigón autocompactante de menor costo con unas adecuadas propiedades mecánicas y de durabilidad.
- *M. Gesoğlu (2010)*, investigó en su trabajo la influencia del curado con vapor sobre la resistencia a la compresión, la velocidad del pulso ultrasónico, la permeabilidad de cloruro y la resistividad eléctrica de los hormigones con adiciones de metacaolín y humo de sílice. Para cada mezcla, las muestras de hormigón se curaron en agua a 23°C o con vapor a una temperatura máxima de 70°C durante un período de 17 h.

Los resultados de las pruebas revelaron que el curado con vapor mejoró la resistencia a la compresión a un día y la velocidad del pulso ultrasónico, al tiempo que redujo la resistencia a largo plazo. Los hormigones curados con vapor tenían una mayor capacidad de absorción de agua y permeabilidad de cloruro. El uso de humo de sílice y metacaolín disminuyó notablemente la capacidad de absorción de agua y la permeabilidad de cloruros de los hormigones, independientemente de la condición de curado.

- *B. Menadi y otros (2009)*, este documento examina la influencia de las partículas de piedra caliza de la arena triturada en las propiedades del hormigón. Las propiedades incluyen resistencia a la compresión, al agua, gas y permeabilidad de cloruro. Se usaron cuatro tipos diferentes de cemento manteniendo una relación agua/cemento constante.

Los resultados muestran que el hormigón que contiene 15% de finos de piedra caliza como reemplazo de arena triturada reduce la permeabilidad al agua y aumenta la permeabilidad a los gases y de cloruro.

- *Mardani-Aghabaglou y otros (2015)*, investigaron los efectos del de mezclas de hormigón con árido reciclado fino y el agregado de vidrio para el desempeño mecánico y de durabilidad. Los áridos reciclados fueron sustituidos por agregado fino como 0, 15, 30, 45 y 60% en peso. Se determinaron el rendimiento mecánico y de durabilidad a 28 días de las mezclas.

La reducción máxima en la resistencia se observó en las muestras que contenían el 60% de sustitución. Además, el aumento del contenido de árido reciclado causó un aumento en la absorción de agua, la profundidad de penetración del agua bajo presión, la penetración de cloruro y la absorción de agua. Sin embargo, en la mezcla que contiene agregado de vidrio reciclado, las propiedades de transporte mejoraron con el aumento del contenido de agregado de vidrio reciclado.

- *V. Ramasamy (2012)*, realizaron una investigación experimental sobre la influencia de la ceniza de cascara de arroz (5%, 10%, 15% y 20%), para evaluar la resistencia a la compresión y estudiar sus propiedades de durabilidad.

La resistencia a compresión del hormigón aumenta a mayores porcentajes de ceniza de cascara de arroz. Además, observaron que la resistencia también aumento con la adición de superplastificante. La porosidad disminuyó de 4.70% a 3.45% cuando se aumento el contenido de ceniza de cascara de arroz de un 5% a un 20%, incluso hay una disminución adicional con la adición de súperplastificante. La permeabilidad de cloruro del hormigón fue muy baja en comparación con el hormigón de control.

- *V. Ponmalar y otros (2015)*, utilizaron 2 tipos de ceniza de cascara de arroz como sustitución de cemento. La diferencia de estas cenizas es que a una se le realizó un proceso de molienda mientras que a la otra no. El porcentaje óptimo de reemplazo de ceniza de cascara de arroz fue de un 10% en peso de cemento para las cenizas no molidas, mientras que para las cenizas molidas fue de un 15%, alcanzando resistencias de entre 4.3% y 11.4% mayores en comparación a la muestra control respectivamente.

La permeabilidad a cloruros de los hormigones con ambos tipos de cenizas de cascara de arroz se redujo en comparación al hormigón de control. Esta reducción fue de 19% para los hormigones con cenizas de cascara de arroz no molidas, mientras que para los hormigones con cenizas de cascara de arroz molidas la reducción es de 52%.

- *Ha Thanh Le y otros (2014)*, realizaron un estudio experimental de mezclas de hormigón con cenizas de cascara de arroz, humo de sílice y filler calizo respecto a la trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad.

Los resultados muestran que la adición de ceniza de cascara de arroz mejoró significativamente la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y la resistencia a la penetración de cloruro. Incluso la permeabilidad a cloruro del hormigón que contiene entre un 10% y 15% de ceniza de cascara de arroz fue comparable con el hormigón que contiene 10% de humo de sílice.

- *R Chini y otros (2005)*, realizaron este estudio para evaluar la resistencia y durabilidad del hormigón curado a altas temperaturas. En el artículo se muestra que las altas temperaturas de curado provocan bajas resistencias de compresión a edades avanzadas.

La utilización de cenizas volantes y escoria permitió una mayor resistencia y durabilidad en comparación con las mezclas de cemento Portland.

- *A. Ramezani-pour y otros (2016)*, presentan una investigación experimental sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión y la resistencia de cloruros de hormigones con escoria de alto horno de baja reactividad.

Los resultados muestran que a pesar del bajo índice de actividad de la escoria, se consiguen buenos resultados, y podría usarse con bajos niveles de reemplazo. Es de destacar su efecto positivo sobre la resistencia a la penetración de cloruro, pero existe una reducción en la resistencia a la compresión, principalmente a edades tempranas.

- *N. Gowripalan y otros (1998)*, realizan una investigación experimental con el fin de evaluar la efectividad del hormigón de alto desempeño. Para el estudio se utilizaron dos mezclas de resistencia normal (30 y 40 MPa a 28 días), y dos mezclas de alta resistencia (50 y 80 MPa a 28 días). No pudieron establecer una correlación entre los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión y la permeabilidad de cloruros.

Los resultados mostraron que el hormigón de alto desempeño redujo significativamente la penetración de cloruros.

- *Kyong Yun Yeau y otros (2005)*, este documento presenta una investigación experimental sobre la resistencia a la corrosión de hormigones realizados con escoria de alto horno y cemento ASTM Tipo I y cemento ASTM Tipo V. Para investigar el problema, se realizaron una serie de ensayos para evaluar la probabilidad de corrosión del acero: permeabilidad al cloruro, difusión de cloruro, corrosión acelerada y de potencial.

Los resultados que obtuvieron muestran que todos los hormigones que adicionaron escoria de alto horno presentan bajos niveles de permeabilidad a cloruros.

- *P.Raposeiro da Silva y otros (2013)*, realizan un estudio experimental sobre el comportamiento del hormigón autocompactante con respecto a la durabilidad del hormigón, con mezclas que incorporan grandes cantidades de ceniza volante y filler calizo.

Los resultados obtenidos indican que las propiedades estudiadas están fuertemente condicionadas por el tipo y la cantidad de adiciones utilizadas. El uso de mezclas que combinan ambas adiciones demuestra ser extremadamente favorables, confirmando un efecto beneficioso frente a propiedades de durabilidad.

- *Jae-Im Park y otros (2016)*, evalúan el coeficiente de difusión de cloruro de hormigones con cemento de tipo I y cementos con adiciones de escoria de alto horno y ceniza volante.

Los resultados obtenidos muestran que el coeficiente de difusión de cloruro está significativamente influenciado por 2 factores, ellos son la relación agua-total de material cementante y el porcentaje de adiciones minerales utilizadas.

- *Q. Yuan y otros (2008)*, en este trabajo investigan el efecto de la temperatura sobre la difusión de cloruro en estado no estacionario, dado que creen que es un factor importante y no es tenido en cuenta. Para los ensayos utilizarán distintos tipos de cemento con relaciones agua-cemento de 0.35, 0.48 y 0.6.

Los resultados muestran que altas temperaturas aumentan el coeficiente de difusión de cloruro. Además, observan que las temperaturas alteran la profundidad de penetración del cloruro, pero no el perfil de cloruro.

- *S. Marinos y otros (2015)*, proponen estudiar el efecto del metacaolín sobre la durabilidad del hormigón. Para las diferentes mezclas se utilizaron dos tipos de cemento (CEM I y II) con hasta 20% de sustitución por metacaolín.

Los resultados experimentales muestran que la adición de metacaolín mejora la resistencia a la compresión y la durabilidad del hormigón. Para ambos tipos de cemento, la sustitución del 10% de metacaolín provocó una disminución de la permeabilidad al cloruro y una mayor resistencia a la compresión. A sustitución más altas, la permeabilidad al cloruro se reduce aún más. Finalmente, observaron una muy buena correlación entre el coeficiente de difusión en estado no estacionario y la conductividad eléctrica.

- *M. Shafikhaniy otros (2019)*, en su estudio emplean datos experimentales reportados en distintos artículos con el fin de evaluar críticamente la exactitud y precisión de los modelos analíticos propuestos para cuantificar el coeficiente de difusión de cloruro en el hormigón. Los modelos evaluados varían desde modelos estadísticos hasta modelos híbridos; el primero emplea herramientas estadísticas para adaptarse a la función de respuesta y el segundo combina la ciencia de los materiales, la ciencia física y las herramientas matemáticas para caracterizar la propiedad. Los datos de los ensayos consideran las siguientes variables de diseño de la mezcla: relación agua/cemento, tipo y contenido de cemento, material de cementación suplementario, fracción de volumen árido y contenido de aire.

Los resultados revelaron que los modelos híbridos son más precisos en comparación con el modelo estadístico. Observan que el "mejor" modelo tiene en cuenta la porosidad capilar, la estructura de los poros, la difusión de la fase sólida y de la pasta de cemento, la fracción de volumen árido y las propiedades de la zona de transición, este modelo obtiene un nivel de confianza de $\pm 95\%$.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN MEDIANTE MODELOS ESTADÍSTICOS CLÁSICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

Mediante un estudio estadístico se busca obtener la influencia de ciertas variables relacionadas al diseño de la mezcla y el curado sobre 3 propiedades del hormigón, siendo ellas la resistencia a la compresión, permeabilidad y difusión de cloruros.

En el tratamiento y análisis estadístico de los resultados se han utilizado dos aplicaciones informáticas, la primera corresponde al software Minitab 19.0.0, Minitab Inc. mientras que el segundo es el IBM SPSS Statistics 20, IBM Corp.

Se realizará un análisis de las variables mediante modelos de regresión lineales simples o modelos múltiples, obteniendo de cada uno de ellos las medidas del coeficiente de correlación al cuadrado R^2 , también denominado coeficiente de determinación. Se comienza intentando explicar cada variable de respuesta en función de aquella variable independiente, obteniendo la variable con la que se encuentra más correlacionada. Igual así, será posible explicar con un mayor porcentaje de la variabilidad aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva (*Navarro Ferrer, 2016*).

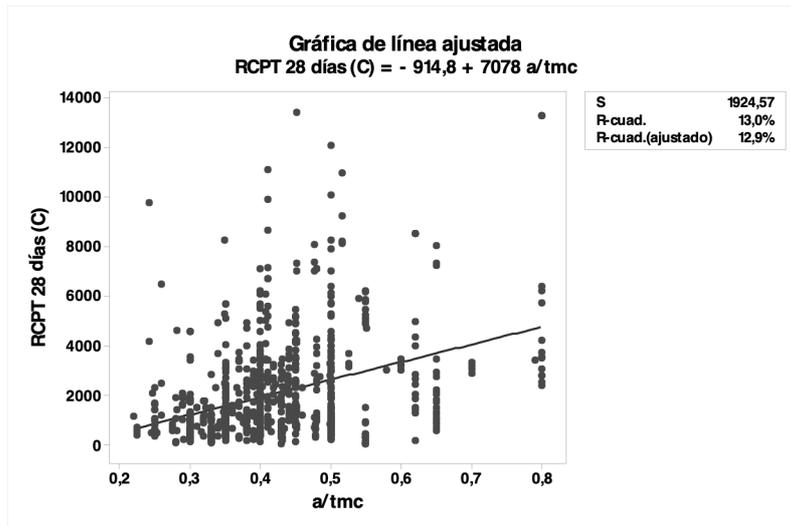
El ajuste de los diferentes modelos se evaluará mediante el coeficiente de determinación R^2 , que se interpreta como la proporción de variación de la variable de respuesta explicada mediante el modelo de regresión lineal, es decir, el coeficiente R^2 es la proporción de la variabilidad explicada por el modelo (*Yepes, y otros, 2009*).

4.2. LA INFLUENCIA DE DIFERENTES VARIABLES Y MODELOS ESTADÍSTICOS.

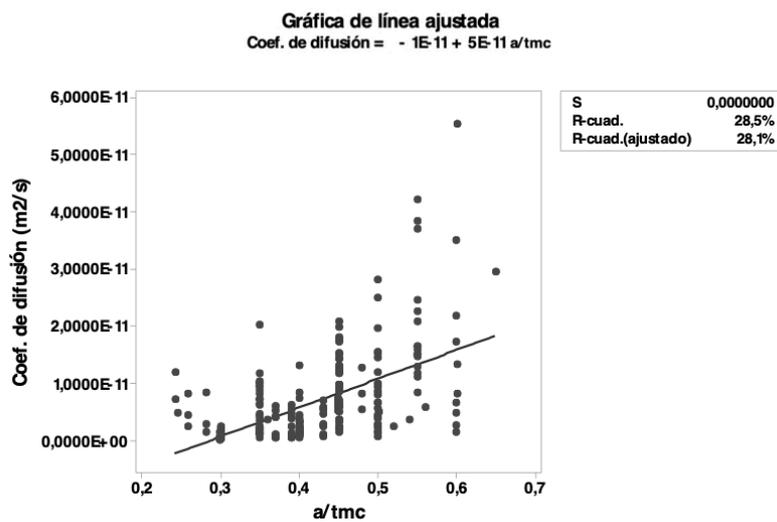
A continuación se realiza un análisis de regresión de las variables tanto de la permeabilidad de cloruro, coeficiente de difusión de cloruro y resistencia a la compresión del hormigón. Para ello se tratará de deducir los modelos lineales simples o múltiples y obtener medidas cuantitativas del grado de relación de las variables a través del coeficiente de determinación R^2 . Los modelos lineales se ajustan por mínimos cuadrados de forma que la variable de respuesta se encuentre suficientemente explicada con un número no excesivamente grande de variables explicativas.

En primer lugar, se intenta explicar cada variable de respuesta en función de aquella variable independiente con la cual se encuentra más correlacionada. Primero se toma como variable independiente la relación agua-total de material cementante (a/tmc), la cual como hemos visto en el capítulo 3 correspondiente a la base de datos, es el factor que rige tanto la permeabilidad como la difusión de los cloruros, lo que se observó en los diversos artículos. A medida que la relación a/tmc aumenta, la permeabilidad y el coeficiente de difusión también, mientras que a menores relaciones se obtendrá un hormigón más duradero.

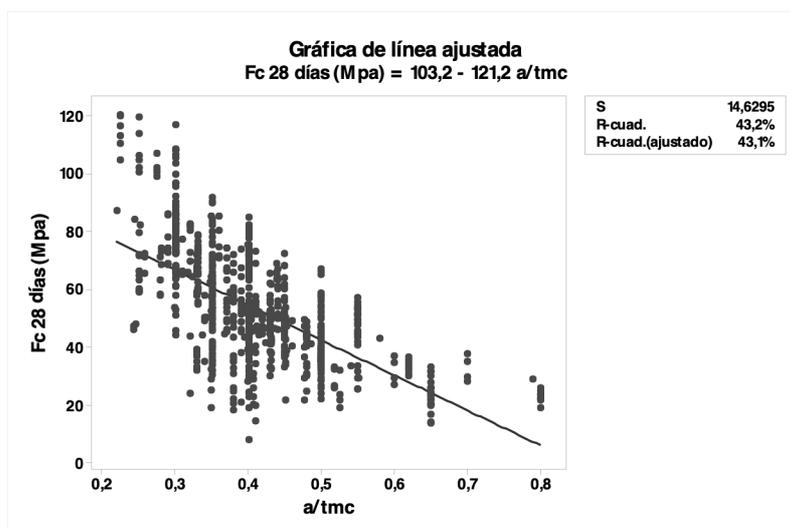
En el primer modelo las variables de respuesta será la permeabilidad de cloruro, resistencia a la compresión y coeficiente de difusión. En las Grafica 1, 2 y 3 se encuentra el ajuste lineal de las variables dependientes en función a la relación a/tmc para todos los ensayos de la base de datos general.



Grafica 1, Permeabilidad de cloruros en función a la relación agua-total de material cementante (843 datos).



Grafica 2, Coeficiente de difusión de cloruros en función a la relación agua-total de material cementante (445 datos).



Grafica 3, Resistencia a la compresión en función a la relación agua-total de material cementante (228 datos).

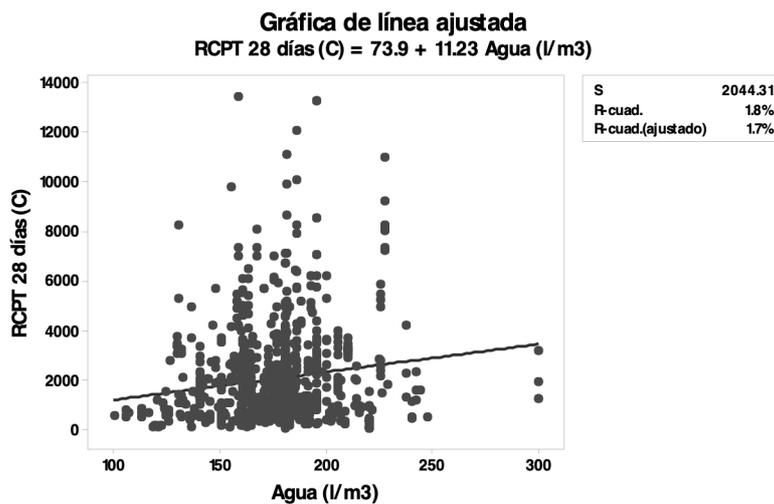
En las Grafica 1 y Grafica 2 se puede apreciar que a medida que se aumenta la reacción a/tmc aumenta la permeabilidad de cloruros y el coeficiente de difusión, esto se puede ver más claro

en el segundo caso que en el primero, dado que el coeficiente de determinación R^2 en el primer caso nos arroja una relación del 13,0 % mientras que en el segundo es de 28,5%. En cuanto a la Grafica 3, muestra que a menores relaciones a/tmc mayores serán las resistencias obtenidas, obteniéndose en este modelo un coeficiente de determinación R^2 de 43.2%.

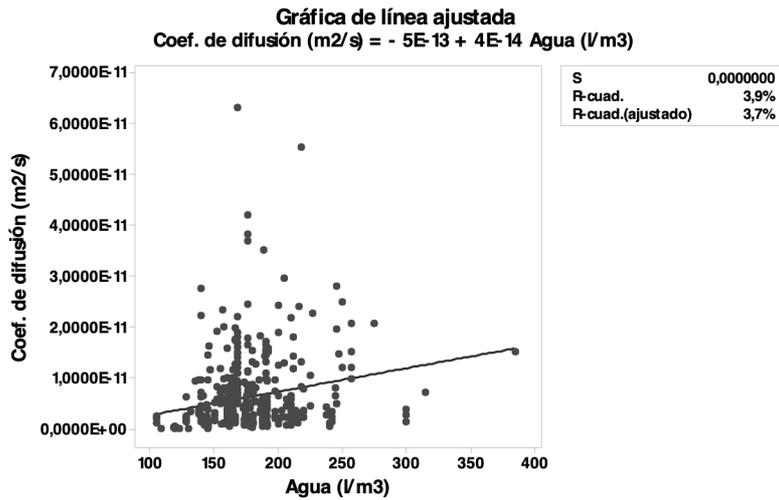
Como se ha visto en el marco teórico, varios autores relacionan la permeabilidad y difusión de cloruros al contenido de agua y al contenido de materiales cementantes. A mayores contenidos de agua, mayor permeabilidad y difusión de cloruros, mientras que a mayores contenidos de material cementante menor permeabilidad y difusión de cloruros, dado que se genera una matriz más densa dada la actividad puzolánica.

En las graficas siguientes, analizaremos por separado la relación del contenido de agua con la permeabilidad, difusión de cloruros y resistencia a la compresión y por otro lado analizaremos las relaciones del material cementante total, así como también cada uno de los materiales cementantes por separado.

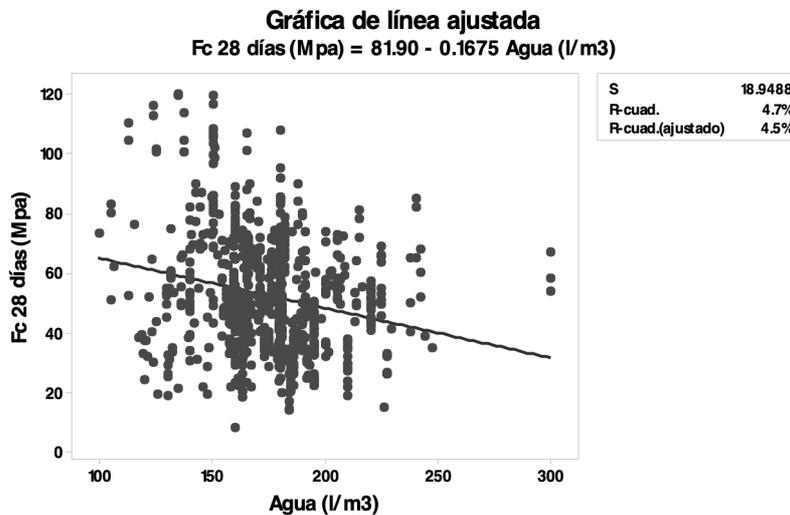
En las Grafica 4, Grafica 5 y Grafica 6, se puede apreciar los modelos de regresión correspondientes a las variables dependientes en función al agua en l/m^3 . En este caso se puede observar que no hay una relación clara en ninguno de los tres modelos, los coeficientes de determinación R^2 son de 1,8% con respecto a la permeabilidad de cloruros, 3,9% para el coeficiente de difusión y un 4,7% para la resistencia del hormigón.



Grafica 4, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de agua (843 datos).

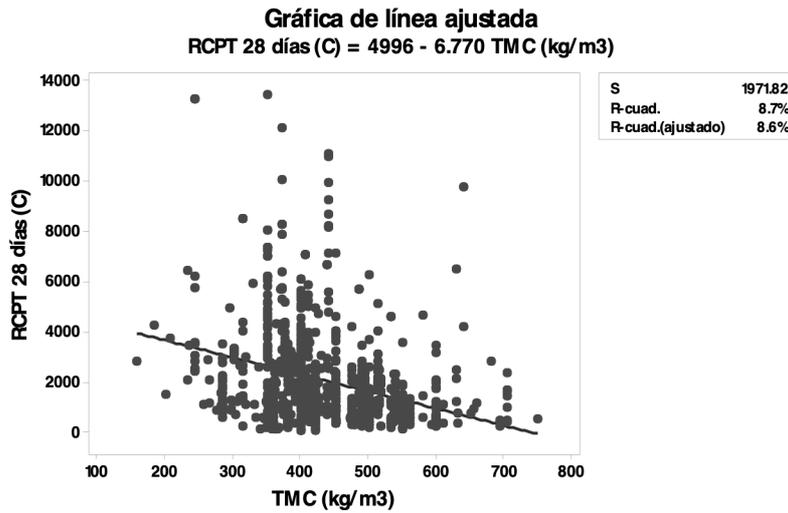


Grafica 5, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido de agua (445 datos).

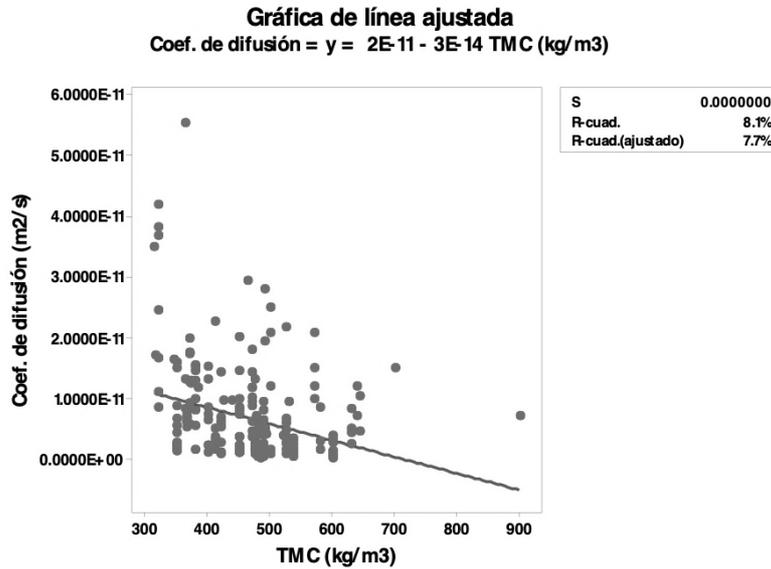


Grafica 6, Resistencia a la compresión en función al contenido de agua (228 datos).

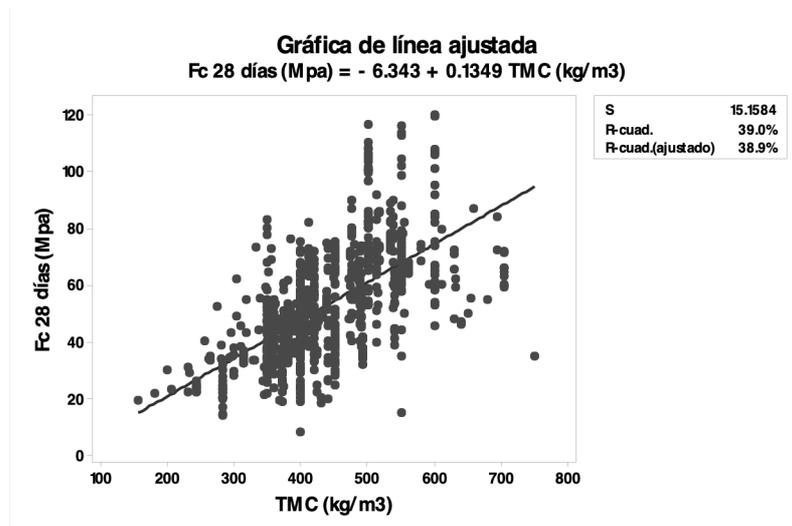
En las Grafica 7, Grafica 8 y Grafica 9, se puede apreciar los modelos de regresión correspondientes a las variables dependientes en función al total de material cementante en kg/m³. En este caso se puede observar que tampoco hay una relación clara en los dos primeros modelos, incluso las relaciones nos arrojan un R² de 8,7% y 8,1 % respectivamente. En el caso de la resistencia a compresión la relación es mas clara, a mayor cantidad de material cementante mayores resistencias a compresión, siendo el coeficiente de determinación del 39%.



Grafica 7, Permeabilidad de cloruros en función al contenido total de material cementante (843 datos).



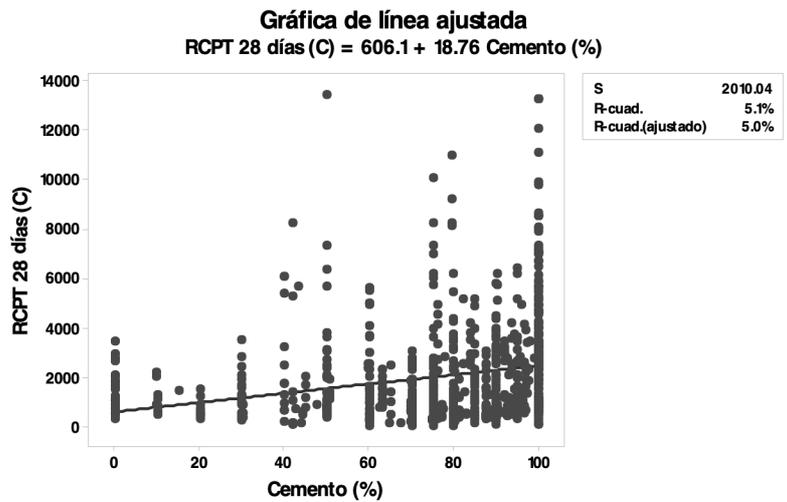
Grafica 8, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido total de material cementante (228 datos).



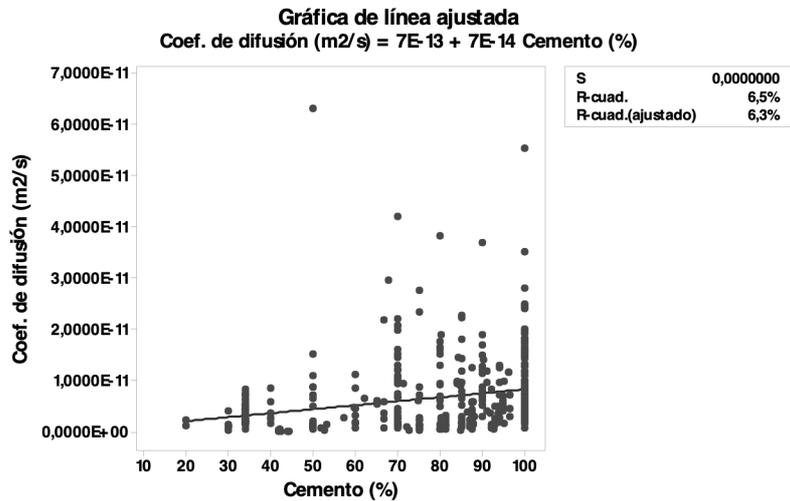
Grafica 9, Resistencia a la compresión en función al contenido total de material cementante (843 datos).

El total de materiales cementantes, engloba diferentes materiales, principalmente cemento y adiciones. En los diferentes artículos del Capítulo 3, se pudo observar que se utilizan una amplia variedad de cementos. En cuanto a las adiciones, se encuentran principalmente el metacaolín, humo de sílice y ceniza volante, y en menor escala tenemos: escorias, filler calizos, cenizas volantes y otros de menor relevancia.

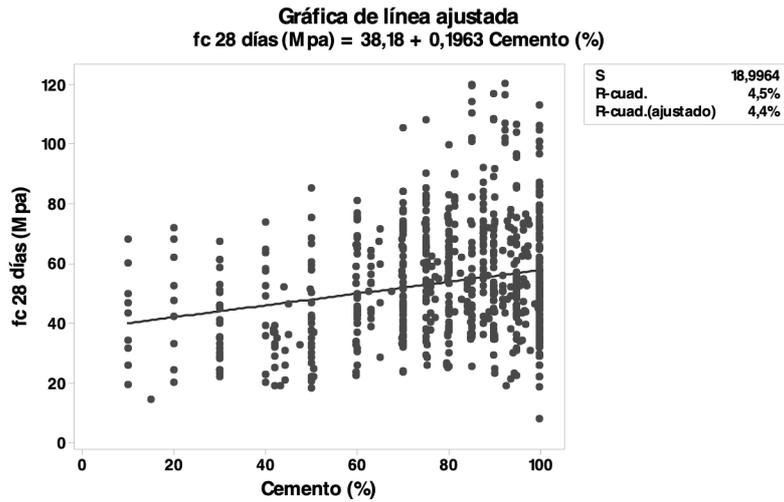
Para la realización del siguiente modelo sólo se ha tenido en cuenta los cementos tipo CEM I, dado que se contaba con una mayor cantidad de datos. En las Grafica 10, Grafica 11 y Grafica 12, se puede apreciar los modelos de regresión correspondientes a las variables dependientes en función del porcentaje de cemento contenido en la mezcla. En este caso se puede observar que tampoco hay una relación clara en los tres modelos, incluso las relaciones nos arrojan un R² de 5,1 % y 6,5 % y 4,5% respectivamente.



Grafica 10, Permeabilidad de cloruros en función al porcentaje de contenido de cemento CEM I.

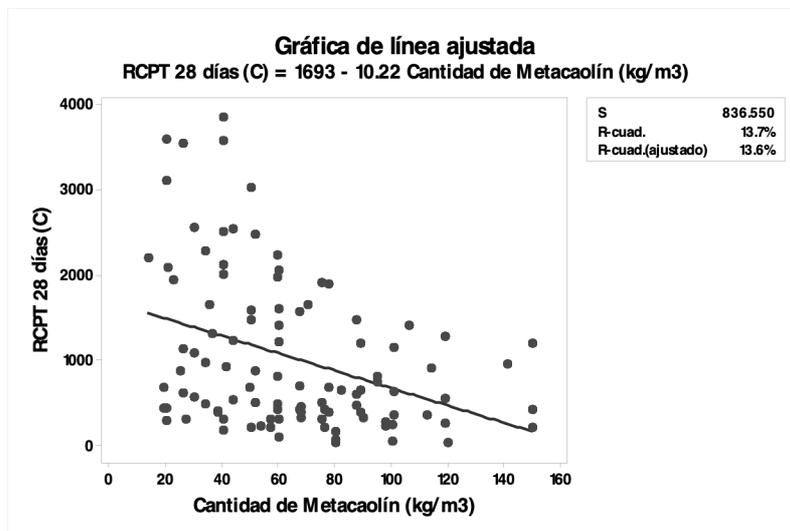


Grafica 11, Coeficiente de difusión de cloruros en función al porcentaje de contenido de cemento CEM I.



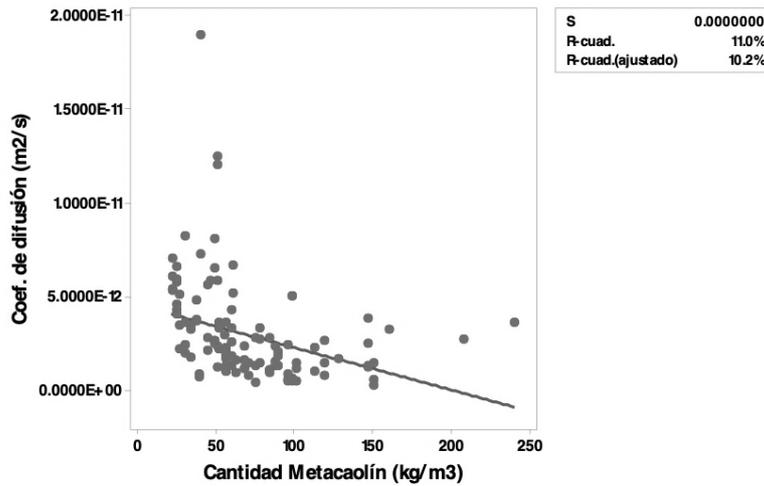
Grafica 12, Resistencia a la compresión en función al porcentaje de contenido de cemento CEM I.

A diferencia del contenido en cemento, el modelo realizado con la cantidad de metacaolín (kg/m^3), presenta un mejor coeficiente de determinación R^2 , y por tanto, se observa que existe una leve tendencia. En los dos primeros modelos, correspondiente a la permeabilidad y difusión de cloruros se puede decir que el aumento del metacaolín mejora la penetración y difusión de los cloruros, obteniéndose un R^2 de 13,7% y 11,0% respectivamente (Grafica 13 y Grafica 14). Con respecto a la resistencia a la compresión este es inferior, siendo de 8,2% (Grafica 15), lo cual se pudo observar en los diferentes artículos resumidos en el Capítulo 3, correspondiente a la Base de datos.



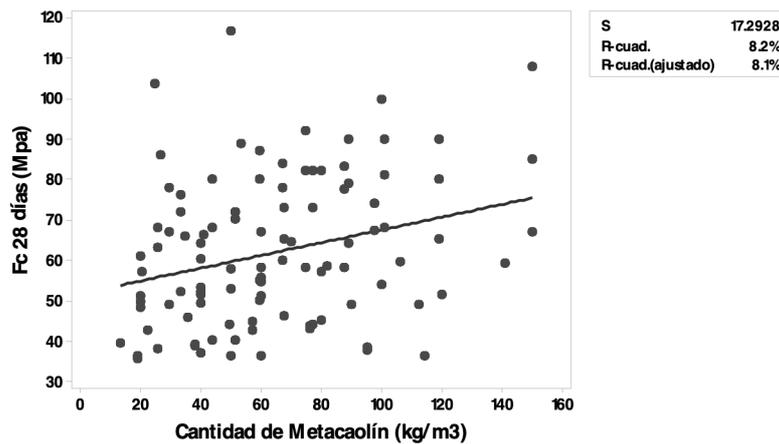
Grafica 13, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de metacaolín.

Gráfica de línea ajustada
Coef. de difusión = $5E-12 - 2E-14$ Cantidad Metacaolín (kg/m³)



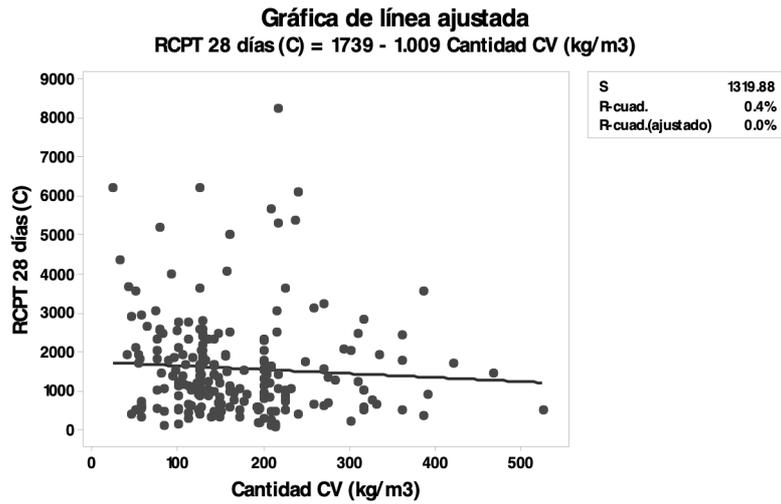
Grafica 14, Coeficiente de difusión en función al contenido de metacaolín.

Gráfica de línea ajustada
Fc 28 días (Mpa) = 51.65 + 0.1585 Cantidad de Metacaolín (kg/m³)

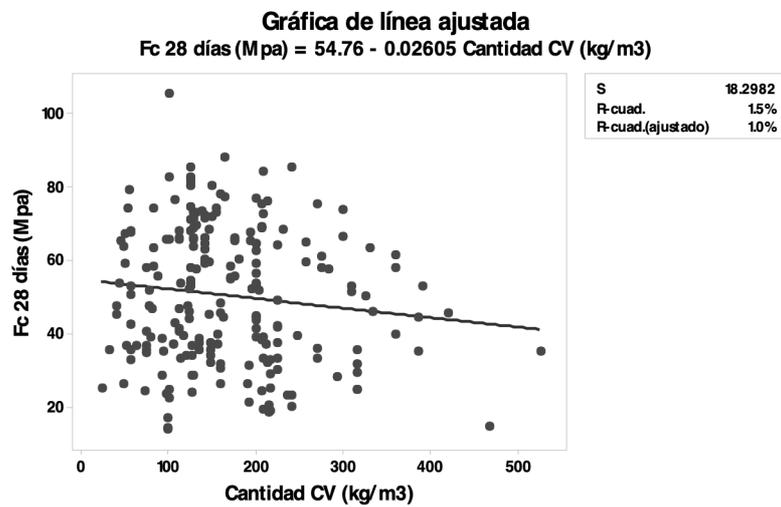


Grafica 15, Resistencia a la compresión en función al contenido de metacaolín.

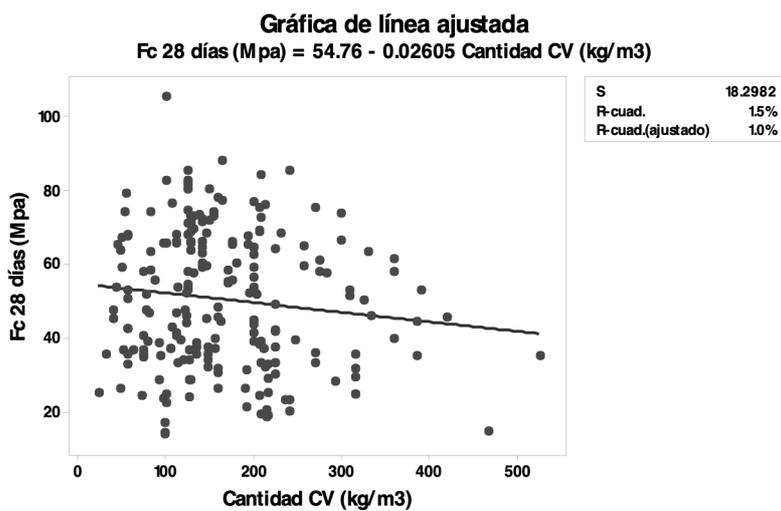
En lo que se refiere al contenido de ceniza volante, ninguno de los tres modelos explica una relación entre esta variable y las variables dependientes. Los coeficientes de determinación R² son 0,4% para la relación con la permeabilidad, 9,5% para el coeficiente de difusión y 1,5% para la resistencia a compresión (Grafica 16, Grafica 17 y Grafica 18).



Grafica 16, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de ceniza volante.



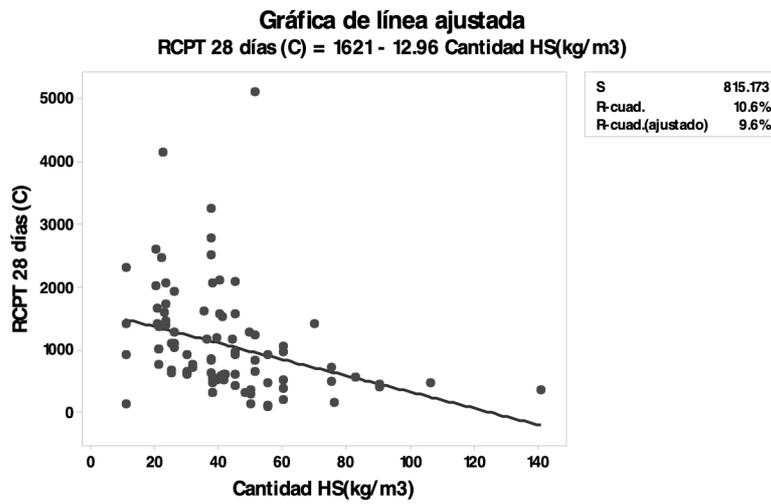
Grafica 17, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido de ceniza volante.



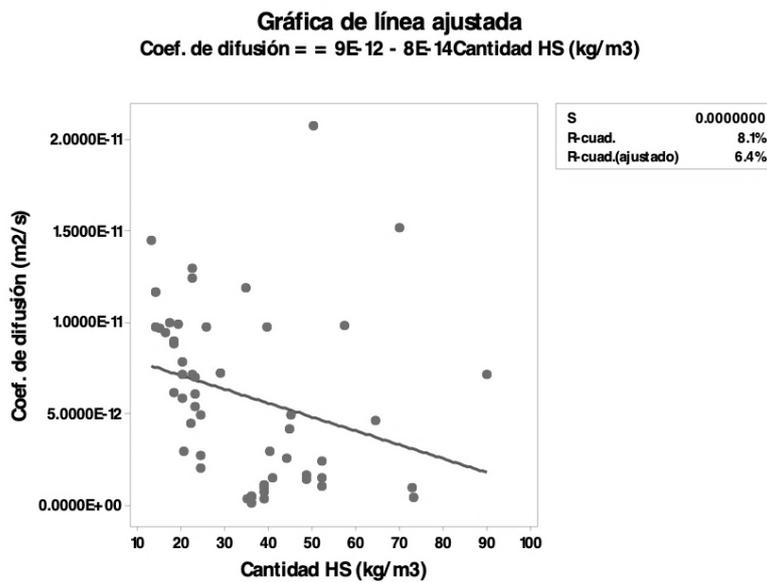
Grafica 18, Resistencia a la compresión en función al contenido de ceniza volante.

Al igual que el contenido de metacaolín, el humo de sílice presenta un mejor coeficiente de determinación, y por tanto se puede observar una tendencia más clara (Grafica 19, Grafica 20 y Grafica 21). En los dos primeros modelos se puede decir que el aumento del humo de sílice

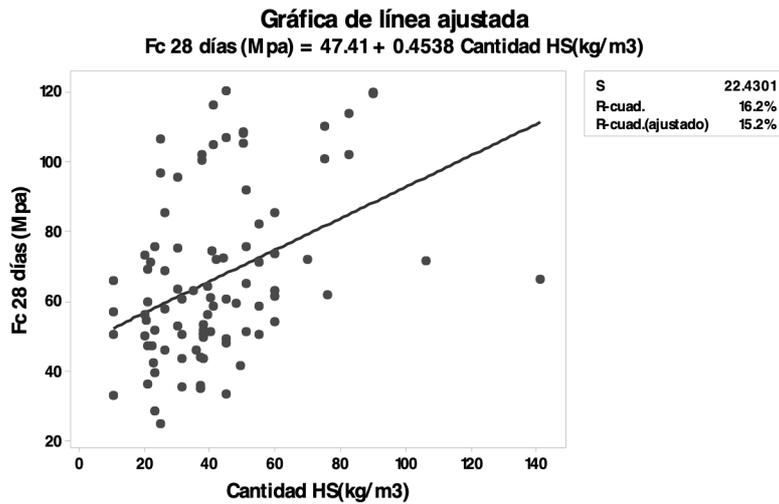
mejora la penetración y difusión de los cloruros, obteniendo un R^2 de 10,6% y 8,1% respectivamente. Con respecto a la resistencia a la compresión se observa que a mayor contenido de humo de sílice mayor será la resistencia, en este caso se obtuvo un R^2 de 16,2%.



Grafica 19, Permeabilidad de cloruros en función al contenido de humo de sílice.

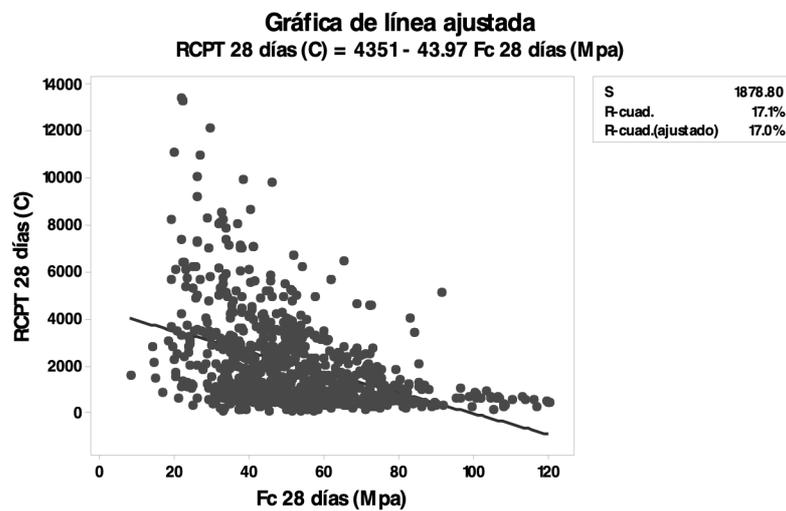


Grafica 20, Coeficiente de difusión de cloruros en función al contenido de humo de sílice.

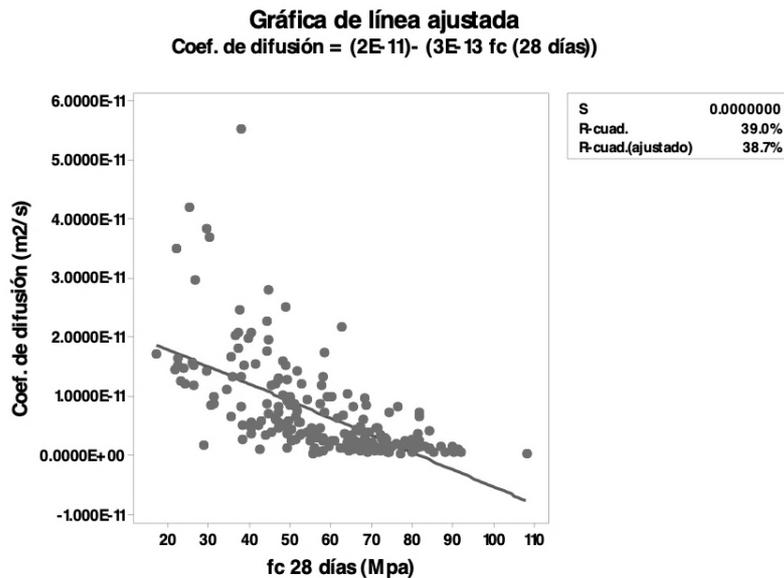


Grafica 21, Resistencia a la compresión en función al contenido de humo de sílice.

Por último, se realizan dos modelos, donde la resistencia a compresión se tomará como una variable independiente y se relacionará tanto con la permeabilidad como la difusión de cloruros. En las Grafica 22 y Grafica 23, se puede apreciar que existe una relación entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad y difusión de cloruros. En ambos modelos se puede observar que a medida que aumenta la resistencia, se obtendrá una menor permeabilidad y difusión de cloruros en el hormigón, aunque en el segundo modelo se aprecia aún más esta tendencia, siendo los coeficientes R^2 obtenidos de 17,1% y 39% respectivamente. Este punto también se pudo observar en distintos artículos empleados para la base de datos.



Grafica 22, Permeabilidad de cloruros en función a la resistencia a la compresión a 28 días.



Grafica 23, Coeficiente de difusión de cloruros en función a la resistencia a la compresión a 28 días.

Dado que en análisis anterior la variabilidad explicada no fue relativamente alta, se intentará aumentar el porcentaje de variabilidad explicada mediante la aplicación de un modelo de regresión múltiple aditiva. Mediante este procedimiento se intenta aumentar el coeficiente de determinación R^2 incorporando variables independientes explicativas, para ello se implementa el método stepwise de pasos sucesivos, el cual consistente en introducir las variables una por una y comprobar si la variable permanece o sale del modelo (Yepes, y otros, 2009). El criterio de inclusión en el modelo será el incremento en la varianza explicada significativo al 5% ($F=0,05$), mientras un decremento del 10% ($F=0,10$) determinará la exclusión de la variable. La primera variable que introduce el modelo será aquella variable que tiene el coeficiente de correlación de Pearson R más alto. A continuación se vuelven a calcular todas las correlaciones eliminando la influencia de aquella que ya ha entrado en el modelo, y se introduce la siguiente con mayor R; de esta forma se consigue que las variables que entren no sean dependientes de las que ya figuraban.

Para realizar el proceso de pasos sucesivos para la variable de respuesta se utilizan 13 variables, siendo estas: el contenido de cemento, tipo de cemento, relación agua-total de material cementante, tipo de curado, temperatura de curado, resistencia a la compresión, contenido de metacaolín, ceniza volante, humo de sílice, escoria, filler calizo, ceniza de cascara de arroz y otros tipos de adiciones, además en los casos de penetración y difusión de cloruros, se adiciona la variable de resistencia a la compresión. Mediante el análisis se tiene 9 modelos como se puede apreciar en la Tabla 7. En cada uno de los modelos se incorpora una variable y no sale ninguna. El orden de incorporación de variables es el siguiente: Resistencia a la compresión, Contenido de cemento (Cem), Temperatura de curado (TempCur), relación agua-total material cementante, contenido de filler calizo (FC), Contenido de metacaolín (Mk), contenido de otras adiciones (Otros), contenido de humo de sílice (HS) y por último el contenido de ceniza de cascara de arroz (CCA).

Resumen del modelo				
<i>Modelo</i>	<i>R</i>	<i>R²</i>	<i>R² ajustado</i>	<i>Error estándar de la estimación</i>
1.000	0.413	0.171	0.170	1878.805
2.000	0.507	0.257	0.255	1779.610
3.000	0.536	0.287	0.285	1743.890
4.000	0.557	0.310	0.307	1716.701
5.000	0.576	0.332	0.328	1690.808
6.000	0.588	0.346	0.341	1673.622
7.000	0.597	0.356	0.351	1661.714
8.000	0.600	0.359	0.353	1658.391
9.000	0.603	0.364	0.357	1653.736

Tabla 7, Pasos sucesivos para la variable de Permeabilidad de cloruros.

Un modelo lineal múltiple con 4 factores es capaz de explicar el 31,00% de la variabilidad de la permeabilidad de cloruros, siendo los factores más influyentes de mayor a menor los siguientes: Resistencia a la compresión, contenido de cemento (*Cem*), temperatura de curado (*TempCur*) y la relación agua-total material cementante (*a/tmc*). Con un factor adicional como es el contenido de filler calizo (FC), el R^2 pasa a ser del 33,20%. En la Tabla 8 se observan las ecuaciones de regresión para estas cinco variables explicativas, pudiéndose apreciar una mayor influencia de la resistencia que del contenido de cemento.

Como se observa, los 3 primeros modelos incorporan las variables que hasta ahora vemos que se repiten y tienen mayor influencia sobre esta variable de respuesta (RCPT), y el cuarto modelo, correspondiente al filler calizo.

Ecuación de regresión	R²
$RCPT = -4350,916 - 43,967 \text{ Resistencia}$	17.10%
$RCPT = 3482,23 - 64,486 \text{ Resistencia} + 5,831 \text{ Cem}$	25.70%
$RCPT = 2320,883 - 63,589 \text{ Resistencia} + 5,797 \text{ Cem} + 48,448 \text{ TempCur}$	28.70%
$RCPT = -126,951 - 50,629 \text{ Resistencia} + 6,121 \text{ Cem} + 48,697 \text{ TempCur} + 3959,114 \text{ a/tmc}$	31.00%

Tabla 8, Ecuaciones de regresión para la permeabilidad de cloruros y valores de R^2 para los distintos modelos de estudio.

Si pasamos de cuatro a nueve variables explicativas, no se mejora el coeficiente de determinación R^2 , ya que tan sólo se pasa de 33,20% a 36,40% como podemos observar en la Tabla 9.

<i>Ecuación de regresión</i>	<i>R²</i>
$RCPT = -4350,916 - 43,967 \text{ Resistencia}$	17.10%
$RCPT = 3482,23 - 64,486 \text{ Resistencia} + 5,831 \text{ Cem}$	25.70%
$RCPT = 2320,883 - 63,589 \text{ Resistencia} + 5,797 \text{ Cem} + 48,448 \text{ TempCur}$	28.70%
$RCPT = -126,951 - 50,629 \text{ Resistencia} + 6,121 \text{ Cem} + 48,697 \text{ TempCur} + 3959,114 \text{ a/tmc}$	31.00%
$RCPT = -478,235 - 47,605 \text{ Resistencia} + 6,171 \text{ Cem} + 49,05 \text{ TempCur} + 4542,305 \text{ a/tmc} + 14,327 \text{ FC}$	33.20%
$RCPT = -819,167 - 43,262 \text{ Resistencia} + 6,041 \text{ Cem} + 47,213 \text{ TempCur} + 4879,723 \text{ a/tmc} + 13,793 \text{ FC} - 10,692 \text{ Mk}$	34.60%
$RCPT = -853,696 - 41,484 \text{ Resistencia} + 6,066 \text{ Cem} + 46,563 \text{ TempCur} + 4898,73 \text{ a/tmc} + 13,301 \text{ FC} - 11,728 \text{ Mk} - 9,897 \text{ Otros}$	35.60%
$RCPT = -885,626 - 39,201 \text{ Resistencia} + 6,016 \text{ Cem} + 46,969 \text{ TempCur} + 4832,09 \text{ a/tmc} + 13,014 \text{ FC} - 12,692 \text{ Mk} - 10,744 \text{ Otros} - 8,654 \text{ HS}$	35.90%
$RCPT = -644,131 - 35,994 \text{ Resistencia} + 4,979 \text{ Cem} + 46,344 \text{ TempCur} + 4889,661 \text{ a/tmc} + 12,712 \text{ FC} - 13,411 \text{ Mk} - 11,395 \text{ Otros} - 10,047 \text{ HS} - 2,334 \text{ CCA}$	36.40%

Tabla 9, Ecuaciones de regresión para la permeabilidad de cloruros y valores de R² para los distintos modelos de estudio.

A continuación, se realizará el mismo procedimiento para la variable de respuesta coeficiente de difusión de cloruros con las mismas variables utilizadas anteriormente. En este caso tenemos 4 modelos como se aprecia en la Tabla 10. El orden de incorporación de las variables es el siguiente: Tipo de cemento (TipoCem), contenido de ceniza volante (CV), Cantidad de cemento (CantCem) y humo de sílice (HS).

<i>Resumen del modelo</i>				
<i>Modelo</i>	<i>R</i>	<i>R²</i>	<i>R² ajustado</i>	<i>Error estándar de la estimación</i>
1	0.549	0.301	0.298	14.623
2	0.680	0.463	0.458	12.850
3	0.721	0.520	0.513	12.176
4	0.732	0.536	0.527	11.998

Tabla 10, Pasos sucesivos para la variable de Coeficiente de difusión de cloruros.

En el segundo modelo lineal múltiple es posible con tan sólo 2 variables explicar el 46,30% de la variabilidad de la difusión de cloruros en el hormigón, siendo el tipo de cemento el factor más influyente. Con un factor adicional como la cantidad de cemento (*CantCem*), el R² pasa a ser del 52,00%.

Cabe mencionar, que los modelos obtenidos coinciden con las variables que tiene en cuenta la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (2008). Como se puede apreciar en la Tabla 11, un cemento CEM I tiene un coeficiente de difusión 6 veces mayor que un cemento CEM III para una relación a/c de 0,40. Pero como podemos ver nuestro análisis no tiene en cuenta la relación a/c, lo cual si se puede apreciar EHE-08. Por ejemplo comúnmente en el mercado se trabaja con relaciones 0,50 la cuales tiene un coeficiente de difusión de $15,8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para un CEM I. Si se deseará extender la vida útil de nuestra estructura de hormigón, bien se podría trabajar con otro tipo de cemento, que incluyeran algún tipo de puzolana, reducir la relaciona a/c o bien una combinación de ambas.

Además, se puede observar que el tercer modelo incorpora la ceniza volante, lo cual también se puede encontrar en la Instrucción EHE-08, más precisamente en el CEM II/A-V, el cual tiene coeficientes menores de difusión que el cemento CEM I.

La ceniza volante se utiliza en muchos países a nivel mundial que solo cuentan con cementos de tipo CEM I, con el fin de conseguir una mejor compacidad del hormigón y así reducir el tamaño del poro, por tanto a menores tamaños de estos, menor será la permeabilidad y difusión de cloruros, pero también obtendremos una mayor resistencia a la compresión.

Tipo de Cemento	Coeficiente $D(t_0)$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)				
	a/c=0,40	a/c=0,45	a/c=0,50	a/c=0,55	a/c=0,60
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

Tabla 11, Tabla A.9.4 correspondiente a la Instrucción EHE-08, Anejo 9, punto 1.2.2.2.

Además, la Instrucción propone un modelo para la definición del coeficiente de difusión de cloruro el cual tiene en cuenta las variables estudiadas anteriormente y el tiempo, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

donde $D(t_0)$ es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t_0 , $D(t)$ es el coeficiente a la edad t , y n es el factor de edad, que puede tomarse 0,5, si no hay un valor obtenido mediante ensayos específicos.

Al igual que el valor de n , el coeficiente de difusión $D(t_0)$ se obtiene mediante ensayos de difusión a una edad determinada t_0 , o bien se puede emplear los valores de la Tabla 11, que generalmente se utilizan dada la falta de datos debido a la problemática de la metodología de ensayos existentes. En el caso de emplear los valores de la Tabla 11 t_0 será igual a 0,0767.

En la Tabla 12 se observan las ecuaciones de regresión para estas 4 variables explicativas.

Ecuación de regresión	R ²
Coef. Dif= 104,739 -111,786 TipoCem	30,10%
Coef. Dif= 96,131 -104,645 TipoCem +0,172 CV	46,30%
Coef. Dif= 88,03 -129,148 TipoCem + 0,163 CV + 17,366 CantCem	52,00%
Coef. Dif= 90,091 -129,278 TipoCem + 0,148 CV + 16,653 CantCem - 0,047 HS	53,60%

Tabla 12, Ecuaciones de regresión para el coeficiente de difusión de cloruros y valores de R² para los distintos modelos de estudio.

Así mismo, se realiza el mismo procedimiento para la variable de respuesta resistencia a la compresión. En este caso hay 10 modelos, siendo el orden de incorporación de las variables el siguiente: relación agua-total material cementante (a/tmc), cantidad de cemento (Cem), contenido de ceniza de cascara de arroz (CCA) contenido de metacaolín (MK), contenido de humo de sílice (HS), contenido de otros (otros), tipo de cemento (TipoCem), tipo de curado (TipoCur) y por ultimo contenido de filler calizo (FC).

Resumen del modelo				
<i>Modelo</i>	<i>R</i>	<i>R²</i>	<i>R² ajustado</i>	<i>Error estándar de la estimación</i>
1	0.657	0.432	0.431	14.630
2	0.721	0.520	0.518	13.459
3	0.740	0.548	0.547	13.059
4	0.759	0.576	0.574	12.653
5	0.777	0.603	0.601	12.249
6	0.784	0.615	0.612	12.080
7	0.789	0.622	0.619	11.969
8	0.794	0.630	0.626	11.855
9	0.795	0.632	0.628	11.833
10	0.796	0.634	0.630	11.799

Tabla 13, Pasos sucesivos para la variable de Resistencia a la compresión

Como se puede observar en la Tabla 13, en este modelo es posible explicar el 54,80% de la variabilidad de la resistencia a compresión con sólo 3 factores, siendo por orden de mayor a menor influencia, la relación agua-total material cementante, la cantidad de cemento y el contenido de ceniza de cascara de arroz. Con el total de las variables incorporadas el coeficiente de determinación incrementa sólo un 8,60%

En la Tabla 14 se observan las ecuaciones de regresión para estas diez variables explicativas, pudiéndose apreciar una mayor influencia en la relación agua-total de material cementante.

Ecuación de regresión	R²
$F_c = 103,179 - 121,245 a/tmc$	43.20%
$F_c = 75,235 - 95,294 a/tmc + 0,051Cem$	52.00%
$F_c = 65,089 - 90.696 a/tmc + 0,072 Cem + 0,540 CCA$	54.80%
$F_c = 65,671 - 92.225 a/tmc + 0,069 Cem + 0,055 CCA + 0,1370MK$	57.60%
$F_c = 61,433 - 84,928 a/tmc + 0,069 Cem + 0,058 CCA + 0,152 MK + 0,223 HS$	60.30%
$F_c = 60,025 - 82,744 a/tmc + 0,068 Cem + 0,059 CCA + 0,161 MK + 0,240 HS + 0,099 Otros$	61.50%
$F_c = 61,162 - 82,41 a/tmc + 0,069 Cem + 0,057 CCA + 0,154 MK + 0,233 HS + 0,103 Otros - 0,911 TipoCem$	62.20%
$F_c = 62,404 - 82,196 a/tmc + 0,068 Cem + 0,054 CCA + 0,150 MK + 0,230 HS + 0,114 Otros - 0,952 TipoCem - 0,500 TipoCur$	63.00%
$F_c = 68,323 - 88,032 a/tmc + 0,061 Cem + 0,046 CCA + 0,144 MK + 0,229 HS + 0,108 Otros - 0,992 TipoCem - 0,529 TipoCur - 0,013 CV$	63.20%
$F_c = 70,589 - 90,274 a/tmc + 0,058 Cem + 0,043 CCA + 0,139 MK + 0,223 HS + 0,102 Otros - 0,975 TipoCem - 0,516 TipoCur - 0,017 CV - 0,048 FC$	63.40%

Tabla 14, Ecuaciones de regresión para la resistencia a la compresión y valores de R² para los distintos modelos de estudio.

Se puede observar que los modelos de regresión lineal simple y múltiple explican porcentajes de variabilidad bajos, especialmente en el modelo de regresión lineal simple, donde muchas de las variables de respuesta no son explicadas. Sin embargo, en el Capítulo 3 correspondiente a la Base

de datos se ha observado que esto no es así, teniendo las variables independientes influencia en la resistencia a la compresión, permeabilidad y difusión de cloruros. Otro ejemplo claro, pero en el modelo de regresión lineal múltiple, es el caso del coeficiente de difusión de cloruros, en el que la variable explicativa que explica mayor variabilidad es el tipo de cemento, pero no así la relación agua/total de material cementante.

Aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva podemos solo alcanzar un coeficiente de determinación $R^2=36,40\%$ para la permeabilidad de cloruros con nueve variables explicativas, un $R^2=53,60\%$ para el coeficiente de difusión de cloruros con cuatro variables y para la resistencia a la compresión se alcanza un coeficiente de determinación $R^2=63,40\%$ con diez variables.

Después de este análisis, se concluye que estos modelos con R^2 tan bajos obligan a la búsqueda de modelos predictivos mejores y más potentes.

5. APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

5.1. ELABORACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Para la creación de las redes neuronales artificiales (RNA), se ha usado Neural Network Toolbox de Matlab R2018b. También se ha utilizado la aplicación informática Microsoft Office Excel. La tipología de la RNA usada corresponde a una red multicapa feedforward, siendo el algoritmo de aprendizaje elegido para entrenar la red el Algoritmo de Levenberg-Marquardt (la función de entrenamiento es `trainlm`) debido a sus prestaciones frente al clásico `backpropagation` (Navarro Ferrer, 2016).

Para evitar el problema de sobreaprendizaje se ha utilizado la técnica de división de datos para entrenamiento-validación-test denominada validación cruzada (K-Fold Cross Validation) con $K = 3$ (Navarro Ferrer, 2016). La elección de k tiene que ser aquella que permita un tamaño razonable de datos para cada conjunto, de manera que cada parte represente las características del sistema y además permita tener suficientes conjuntos como para repetir el proceso un número suficiente de veces (Aguilar, y otros, 2019).

Este método divide al conjunto de datos inicial en K subconjuntos, de los K subconjuntos un solo subconjunto se guarda como datos de validación para probar el modelo, y los otros $K-1$ subconjuntos son usados como datos de entrenamiento. El proceso *cross-validation* se repite K veces (Correa, y otros, 2008).

La función de transferencia cumple con el objetivo de limitar el rango de salida de la neurona y se selecciona de acuerdo con el problema y al criterio del investigador, generalmente por ensayo y error (Navarro Ferrer, 2016), aunque también pueden depender de la precisión y de la velocidad requerida por el investigador y del algoritmo de aprendizaje escogido. En problemas de predicción en redes multicapa se suele utilizar como función de transferencia la tangente hiperbólica (`tansig`) (Piekniewski y Rybicki, 2004), la cual se seleccionó en este trabajo.

En el presente trabajo, se ha configurado la RNA con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Las neuronas de la capa de entrada son variables para cada red neuronal y la capa de salida tiene una única neurona. En cuanto a las neuronas de la capa oculta, se ha decidido que sean 50 neuronas para todas las redes neuronales artificiales elaboradas, ya que en la red neuronal artificial RNA 5 vemos que el valor del coeficiente de correlación R máximo obtenido se encuentra cercano a las 50 neuronas en la capa oculta, tal y como se puede apreciar en la Tabla 15 y como es el caso de algunos autores consultados (Navarro Ferrer, 2016).

Nº de Neuronas en la capa Ocultas	Valor de R
1	0,762
2	0,831
5	0,893
10	0,939
15	0,927
20	0,949
30	0,959
40	0,973
50	0,973

Tabla 15, Valores de R obtenidos en función del número de neuronas en la capa oculta en la RNA 5.

Como se ha señalado con anterioridad se utiliza el método de validación cruzada y en todas las redes neuronales artificiales elaboradas se ha dividido el numero de datos en los siguientes porcentajes, 80% de los datos serán destinados para el aprendizaje o entrenamiento, el 10 % de los datos será para la validación y 10 % restante serán los datos en test.

En la Imagen 19 se pueden apreciar los coeficientes de correlación R para aprendizaje, test y validación, además del R total.

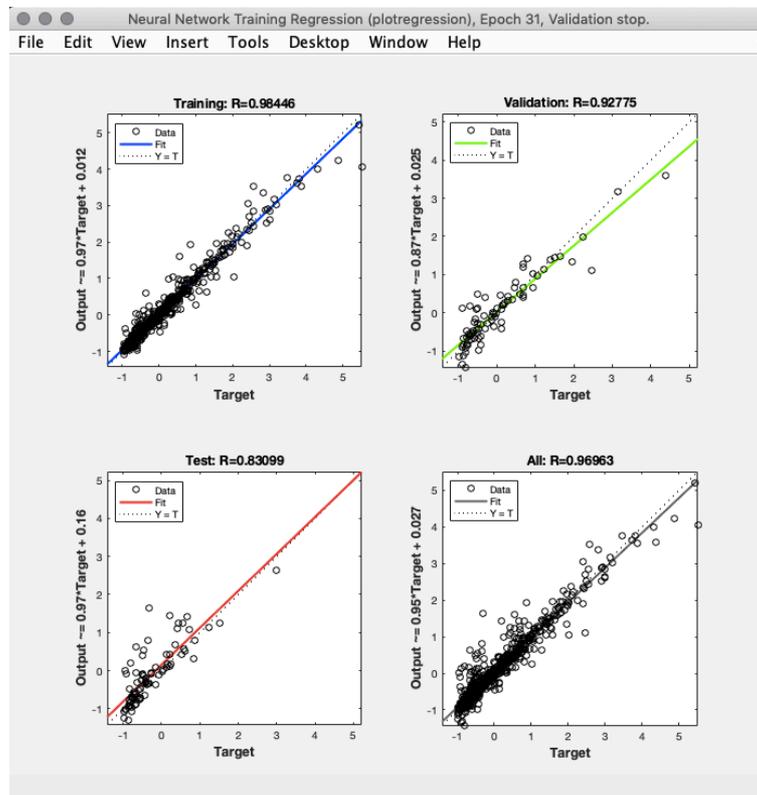


Imagen 19, Coeficientes de correlación.

En el código desarrollado se han tenido en cuenta: los criterios de parada, como evitar el sobreaprendizaje, el entrenamiento de la red y el calculo de MSE, RMSE y PSE.

El error cuadrático medio MSE se calcula según la siguiente ecuación:

$$MSE = mean((astd - tstd)^2)$$

El error cuadrático medio relativo a la varianza es:

$$RMSE = MSE/var(tstd)$$

Y el valor de PSE es:

$$PSE = MSE * (1 + 2 * NPar/(N - Npar))$$

Además, para cada ejecución de la red neuronal se calcula el factor de correlación R (para aprendizaje, test, validación y total), los valores correspondientes a MSE, RMSE y PSE. En el entorno de red neuronal en Matlab R2018b también tenemos información del numero de iteraciones y del tiempo empleado. En la Imagen 20 se puede observar la información dada por el software, habiendo registrado estos valores para algunas redes neuronales, tal y como se

puede ver en las tablas. El valor del coeficiente de correlación R que figura en todas las tablas se corresponde con el total.

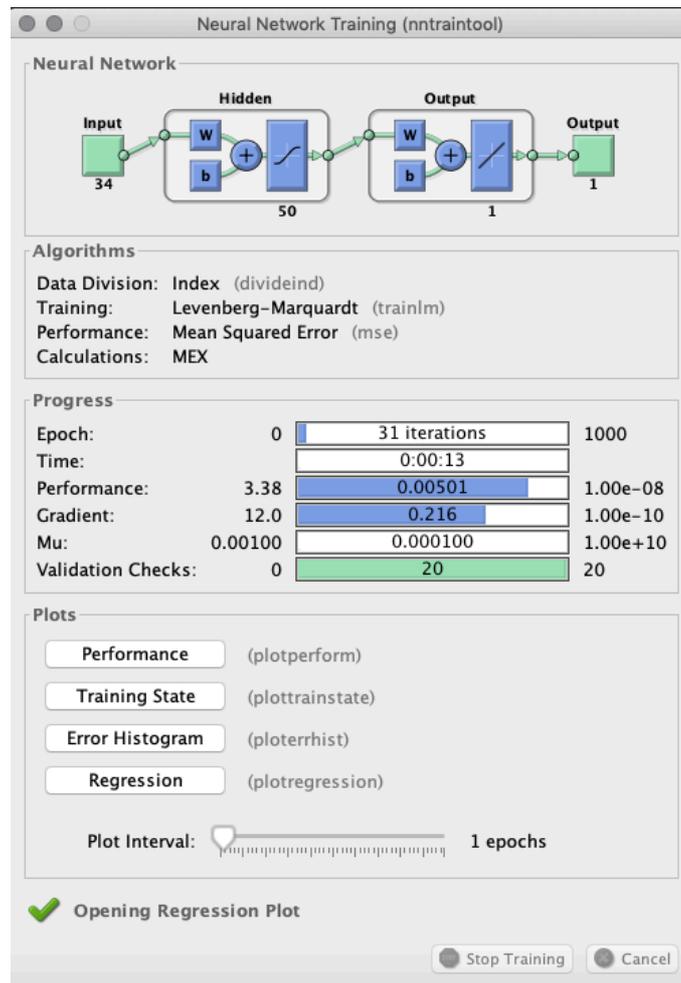


Imagen 20, Información de red neuronal en Matlab R2018b.

Para cada red neuronal artificial se realizan 9 ejecuciones de acuerdo a la metodología propuesta por Paya-Zaforteza y col. (2010) y García-Segura y col.(2015) basada en la teoría del valor extremo, y los valores de salida calculados por la misma se corresponden con los valores promedio de las 9 ejecuciones correspondientes.

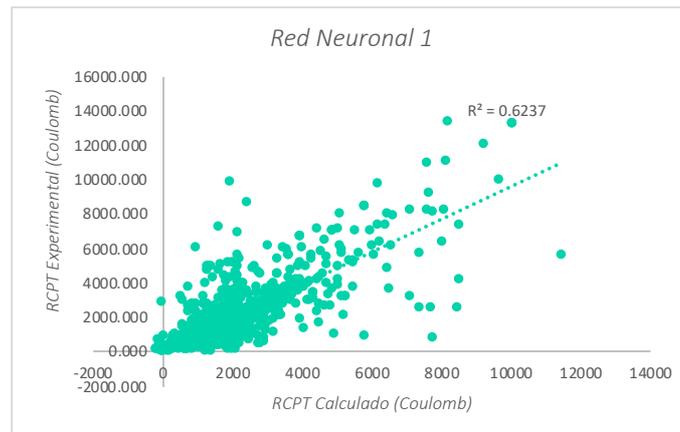
Se van a plantear varias redes neuronales con el fin de evaluar el comportamiento de los distintos hormigones, en cuanto a la capacidad de predecir en función de unas variables de entrada, las siguientes variables de salida: permeabilidad de cloruros, difusión de cloruros y resistencia a la compresión.

Las variables de entrada que conforman las neuronas de la capa de entrada se pueden consultar en la Tabla 17 y Tabla 18, las primeras 8 redes neuronales artificiales (desde RNA 1 a RNA 8) tienen como variable de salida la permeabilidad de cloruro, las siguientes 5 redes neuronales (desde RNA 9 a RNA 13), la variable de salida será el coeficiente de difusión de cloruros, mientras que las últimas 5 redes neuronales (desde RNA 14 a RNA 18) tienen como variable de salida la resistencia a la compresión (Tabla 16).

Variable de salida	RNA																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Permeabilidad	x	x	x	x	x	x	x	x												x
Coef. De difusion									x	x	x	x	x							x
Resistencia a la Compresión														x	x	x	x	x		

Tabla 16, Variables de salida en las distintas RNA.

La primera red neuronal artificial RNA 1, se plantea con el objetivo de predecir la permeabilidad de cloruros, teniendo 7 variables de entrada. Como ya hemos señalado con anterioridad, la base de datos consta de 843 datos. El coeficiente de determinación obtenido para la permeabilidad de cloruro calculadas en la simulación y los resultados experimentales nos da un valor de $R^2 = 0,6237$ (Grafica 24).



Datos	843							N° Neuronas ocultas		50
Variables	7							Variable de Salida		RCPT
MSE	0.3031	0.3664	0.2569	0.2913	0.2868	0.3672	0.2534	0.2273	0.2929	
RMSE	0.3031	0.3664	0.2569	0.2913	0.2868	0.3672	0.2534	0.2273	0.2929	
PSE	0.8519	1.0297	0.722	0.8187	0.806	1.0319	0.712	0.6388	0.8232	
interacciones	40	29	48	31	31	25	39	54	40	
R	0.83460	0.79933	0.86199	0.84164	0.84434	0.79601	0.86405	0.87889	0.84767	

Grafica 24, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 1.

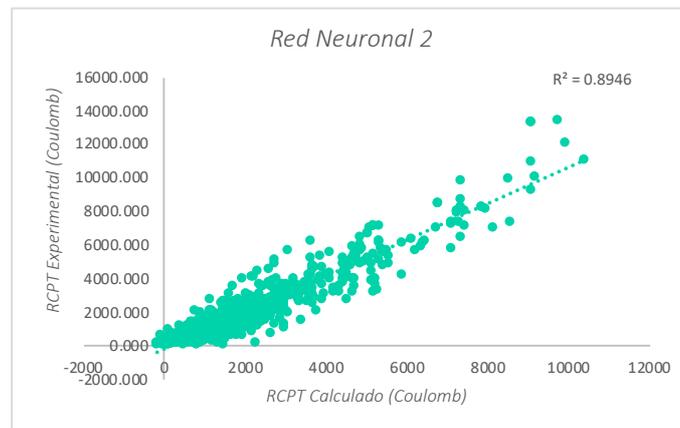
RNA: Variable de Salida RCPT								
Variables	1	2	3	4	5	6	7	8
Cantidad Cemento	x	x	x	x	x	x	x	x
Tipo de Cemento	x	x	x	x	x	x	x	x
Cao						x	x	x
SiO₂						x	x	x
Al₂O₃						x	x	x
Cantidad MK			x	x	x	x	x	x
SiO₂						x	x	x
Al₂O₃						x	x	x
Cantidad CV			x	x	x	x	x	x
Cao						x	x	x
SiO₂						x	x	x
Al₂O₃						x	x	x
Cantidad HS			x	x	x	x	x	x
SiO₂						x	x	x
Cantidad FillerCalizo			x	x	x	x	x	x
Cao						x	x	x
Cantidad Escoria			x	x	x	x	x	x
Cao						x	x	x
SiO₂						x	x	x
Al₂O₃						x	x	x
Cantidad CCA			x	x	x	x	x	x
SiO₂						x	x	x
Cantidad MP			x	x	x	x	x	x
SiO₂						x	x	x
Cantidad Otros			x	x	x	x	x	x
Cao						x	x	x
SiO₂						x	x	x
a/tmc	x						x	x
agua		x	x	x	x	x		
Árido Fino		x	x	x	x	x	x	x
Árido Grueso		x	x	x	x	x	x	x
Resistencia	x	x	x	x		x	x	
Tipo de curado	x	x	x		x	x	x	x
Temperatura de Curado	x	x	x		x	x	x	x
Aditivo		x	x	x	x	x	x	x
Variables	7	10	18	16	17	35	35	34
Tot. de datos	843	843	843	843	843	843	843	843

Tabla 17, Variables de entrada para las distintas redes neuronales artificiales.

RNA: Variable de Salida Resistencia a Compresión						RNA: Variable de Salida Coeficiente de Difusión					
Variables	9	10	11	12	13	Variables	14	15	16	17	18
Cantidad Cemento	x	x	x	x	x	Cantidad Cemento	x	x	x	x	x
Tipo de Cemento	x	x	x	x	x	Tipo de Cemento	x	x	x	x	x
Cao				x	x	Cao					
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Al ₂ O ₃				x	x	Al ₂ O ₃					
Cantidad MK		x	x	x	x	Cantidad MK			x	x	x
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Al ₂ O ₃				x	x	Al ₂ O ₃					
Cantidad CV		x	x	x	x	Cantidad CV			x	x	x
Cao				x	x	Cao					
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Al ₂ O ₃				x	x	Al ₂ O ₃					
Cantidad HS		x	x	x	x	Cantidad HS			x	x	x
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Cantidad FillerCalizo		x	x	x	x	Cantidad FillerCalizo			x	x	x
Cao				x	x	Cao					
Cantidad Escoria		x	x	x	x	Cantidad Escoria			x	x	x
Cao				x	x	Cao					
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Al ₂ O ₃				x	x	Al ₂ O ₃					
Cantidad CCA		x	x	x	x	Cantidad CCA					
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Cantidad MP		x	x	x	x	Cantidad MP					
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
Cantidad Otros		x	x	x	x	Cantidad Otros			x	x	x
Cao				x	x	Cao					
SiO ₂				x	x	SiO ₂					
a/tmc					x	a/tmc	x	x	x	x	x
agua	x	x	x	x		agua					
Árido Fino	x	x	x	x	x	Árido Fino		x	x	x	x
Árido Grueso	x	x	x	x	x	Árido Grueso		x	x	x	x
RCPT	x	x	x	x	x	Resistencia	x	x	x	x	
Tipo de curado	x	x		x	x	Tipo de curado	x	x	x		x
Temperatura de Curado	x	x		x	x	Temperatura de Curado	x	x	x		x
Aditivo	x	x	x	x	x	Aditivo					
Variables	10	18	16	35	35	Variables	7	9	15	13	14
Tot. de datos	843	843	843	843	843	Tot. de datos	218	218	218	218	369

Tabla 18, Variables de entrada para las distintas redes neuronales artificiales.

Dado que se pensaba que el ajuste podía mejorar, se decidió crear una red neuronal artificial RNA 2 incorporando nuevas variables de entrada como la cantidad de áridos (finos y gruesos) y si la mezcla contenía o no algún tipo de aditivo, además se cambio la relación a/tmc por el contenido de agua, por tanto ahora se tiene un total de 10 variables. El ajuste entre los valores de la permeabilidad de cloruro calculadas en la simulación y los resultados experimentales nos da un coeficiente de determinación de valor $R^2=0,8946$, como se puede ver es sensiblemente superior al de la RNA 1 (Grafica 25).



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	10				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.1389	0.1944	0.1389	0.2981	0.174	0.1686	0.2069	0.1441	0.1434
RMSE	0.1389	0.1944	0.1389	0.2981	0.174	0.1686	0.2069	0.1441	0.1434
PSE	0.6632	0.9283	0.663	1.4233	0.8308	0.8047	0.9878	0.688	0.6845
interacciones	34	26	34	24	43	30	27	45	40
R	0.92796	0.89845	-92807	0.83912	0.91161	0.91213	0.89145	0.92733	0.92625

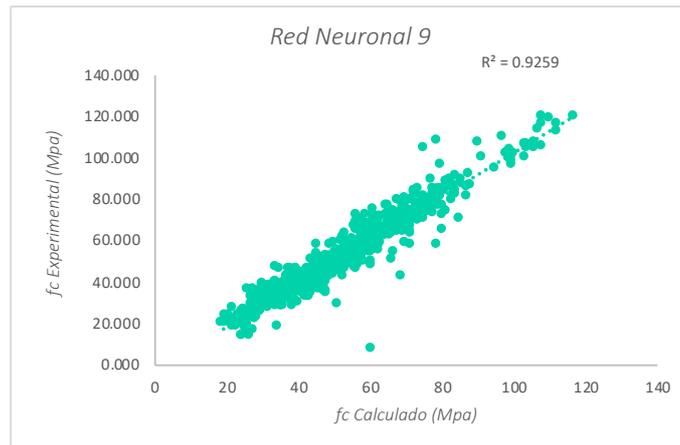
Grafica 25, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 2.

Con la misma lógica que las RNA 1 y 2, se realizaron redes neuronales para predecir la resistencia a la compresión y el coeficiente de difusión de cloruros.

La RNA 9, se plantea con el objetivo de predecir la resistencia a la compresión a 28 días, la cual tiene las mismas 10 variables de entrada que la RNA 2. El coeficiente de determinación obtenido para las resistencias a la compresión a 28 días calculadas en la simulación y los resultados experimentales nos da un valor de $R^2= 0,9259$ (Grafica 26).

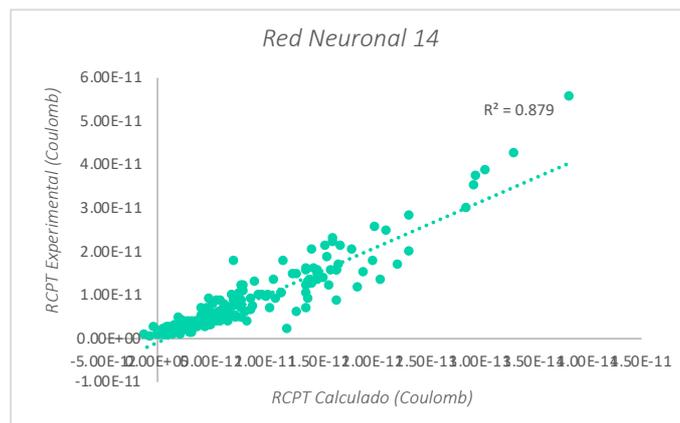
Con las mismas variables de entrada que la RNA 1 (7 variables), se genera la RNA 14, la cual tiene como variable de salida el coeficiente de difusión de cloruros a 28 días. En este caso la base cuenta con 218 datos para la predicción de la variable. El coeficiente de determinación obtenido para el coeficiente de difusión de cloruros calculados en la simulación y los resultados experimentales nos da un valor de $R^2= 0,879$ (Grafica 27).

Si en la RNA 2, el coeficiente de determinación R^2 aumento con la inclusión adicional de 3 variables de entrada, es posible que también aumente para el coeficiente de difusión de cloruros. Por tanto, se realiza la RNA 15, la cual tiene las mismas variables de entrada que la RNA 2 a excepción del contenido de aditivos. El coeficiente de determinación obtenido para el coeficiente de difusión de cloruros calculados en la simulación y los resultados experimentales nos da un valor de $R^2= 0,8977$ (Grafica 28).



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	10				Variable de Salida				Resistencia
MSE	0.1396	0.0855	0.1226	0.1193	0.1469	0.1603	0.2157	0.0927	0.1009
RMSE	0.1396	0.0855	0.1226	0.1193	0.1469	0.1603	0.2157	0.0927	0.1009
PSE	0.6665	0.4083	0.5852	0.5694	0.7012	0.7652	1.0299	0.4427	0.4819
iteraciones	27	31	25	28	28	26	21	43	29
R	0.92756	0.95625	0.93689	0.94115	0.92848	0.91875	0.88693	0.95259	0.94818

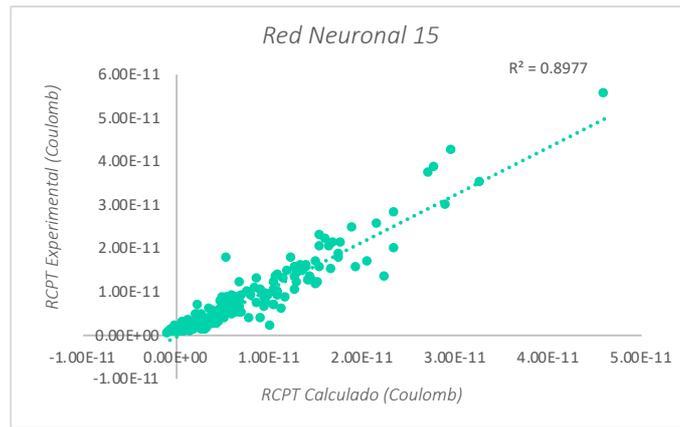
Grafica 26, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 9.



Datos	218				N° Neuronas ocultas				50
Variables	7				Variable de Salida				Coefficiente de Difusión
MSE	0.1313	0.2365	0.5034	0.1631	0.2308	0.2773	0.1819	0.1664	0.1708
RMSE	0.1313	0.2365	0.5034	0.1631	0.2308	0.2773	0.1819	0.1664	0.1708
PSE	-0.444	-0.8	-1.7027	-0.5516	-0.7807	-0.938	-0.6153	-0.563	-0.5777
iteraciones	25	54	24	26	26	22	24	26	25
R	0.93320	0.90079	0.72905	0.91590	0.87898	0.85638	0.91427	0.91380	0.91348

Grafica 27, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 14.

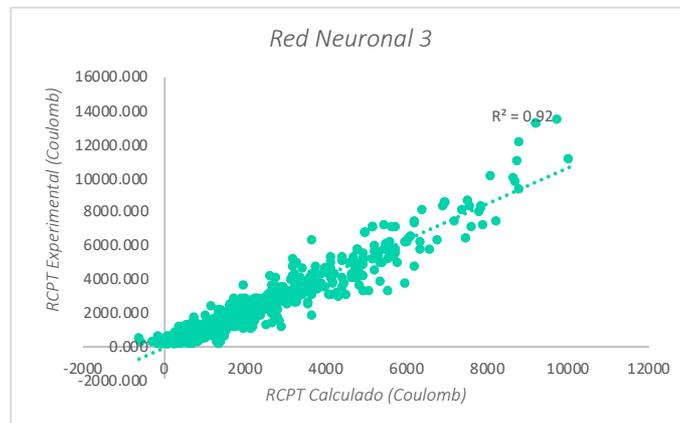
Dado que en los diferentes artículos utilizados para la creación de esta base de datos, y lo observado en el estado del conocimiento, el contenido de adiciones tiene una incidencia importante en lo que respecta a la durabilidad del hormigón, se analiza cual es la influencia de esta variable dependiente en las tres variables de salida, elaborándose para ello las RNA 3, RNA 10 y la RNA 16.



Datos	218				N° Neuronas ocultas				50
Variables	9				Variable de Salida				Coefficiente de Difusión
MSE	0.172	0.1412	0.1627	0.2488	0.17	0.1704	0.1714	0.1857	0.1741
RMSE	0.172	0.1412	0.1627	0.2488	0.17	0.1704	0.1714	0.1857	0.1741
PSE	-0.4369	-0.3587	-0.4133	-0.6321	-0.4318	-0.433	-0.4355	-0.4718	-0.4424
Interacciones	23	26	24	23	24	26	24	23	25
R	0.91161	0.92754	0.91993	0.86621	0.91070	0.91194	0.91021	0.90319	0.91348

Grafica 28, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 15.

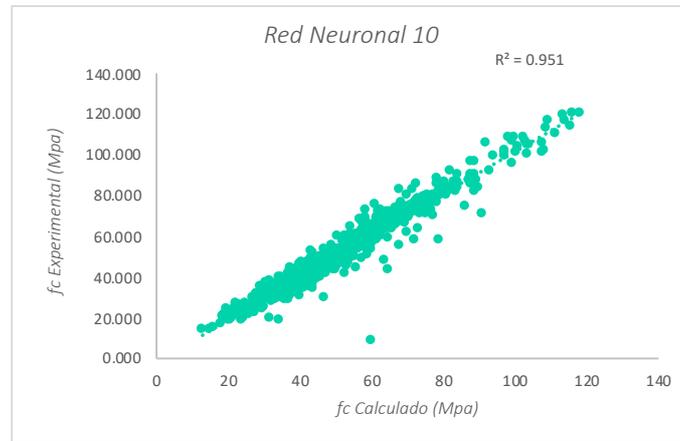
La RNA 3 ha incorporado nuevas variables de entrada, estas son todos los contenidos de adiciones, por tanto ahora se tiene un total de 18 variables. El ajuste entre los valores de la permeabilidad de cloruro calculadas en la simulación y los resultados experimentales nos da un coeficiente de determinación de valor $R^2=0,920$, como se puede ver se consigue una mejor predicción de la permeabilidad de cloruros y por tanto se observa lo analizado en los diferentes artículos, las adiciones minerales tienen una gran influencia sobre esta variable (Grafica 29).



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	18				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.1192	0.1536	0.243	0.1707	0.136	0.2419	0.1715	0.1632	0.1042
RMSE	0.1192	0.1536	0.243	0.1707	0.136	0.2419	0.1715	0.1632	0.1042
PSE	-1.9796	-2.5522	-4.0368	-2.8349	-2.259	-4.0181	-2.8484	-2.7101	-1.731
Interacciones	28	27	24	26	37	28	28	27	32
R	0.93863	0.92009	0.87081	0.91081	0.93155	0.87416	0.91411	0.91634	0.94668

Grafica 29, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 3.

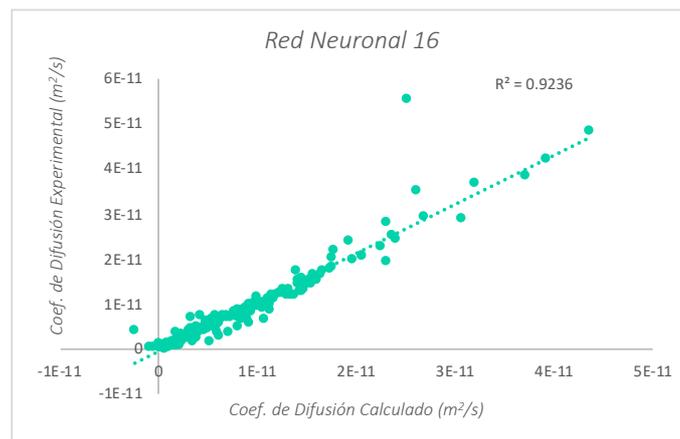
Con estas mismas variables que la RNA 3 se creará la RNA 10, siendo la variable de salida la resistencia a la compresión. El coeficiente de determinación obtenido para las resistencias a la compresión a 28 días calculadas en la simulación y los resultados experimentales nos da un valor de $R^2 = 0,951$ (Grafica 30).



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	18				Variable de Salida				Resistencia
MSE	0.1556	0.0715	0.0631	0.1853	0.0884	0.1452	0.0846	0.1377	0.1092
RMSE	0.1556	0.0715	0.0631	0.1853	0.0884	0.1452	0.0846	0.1377	0.1092
PSE	-2.5849	-1.1876	-1.0481	-3.0784	-1.4682	-2.4115	-1.405	-2.2878	-1.814
iteraciones	25	25	30	24	27	25	28	27	25
R	0.91946	0.9636	0.96801	0.90614	0.95652	0.92843	0.95683	0.93325	0.94470

Grafica 30, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 10.

Al igual que se realizó anteriormente, se creará la RNA 16, incorporando como variables de entrada los contenidos de las distintas adiciones, dado que en la base de datos correspondiente al coeficiente de difusión de cloruros hay una menor cantidad de adiciones y por tanto las variables incorporadas no serán 8 como en las RNA 3 y RNA 10, sino serán 6. El coeficiente de determinación obtenido para el coeficiente de difusión de cloruros calculados en la simulación y los resultados experimentales nos da un valor de $R^2 = 0,9236$ (Grafica 31).



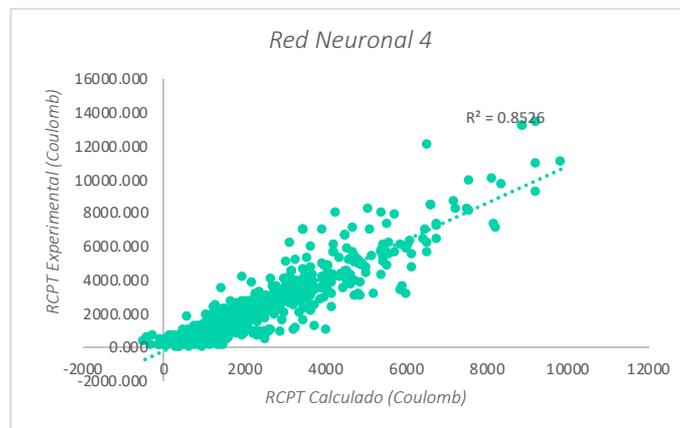
Datos	218				N° Neuronas ocultas				50
Variables	15				Variable de Salida				Coefficiente de Difusión
MSE	0.1307	0.1989	0.0892	0.1264	0.1526	0.1445	0.3078	0.1886	0.2369
RMSE	0.1307	0.1989	0.0892	0.1264	0.1526	0.1445	0.3078	0.1886	0.2369
PSE	-0.2353	-0.3581	-0.1607	-0.2276	-0.2747	-0.2602	-0.5542	-0.3396	-0.4266
iteraciones	27	22	49	25	87	23	25	23	28
R	0.93365	0.89925	0.95422	0.93603	0.92132	0.92707	0.84604	0.90098	0.87413

Grafica 31, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 16.

En varios artículos de la base de datos, investigan la influencia tanto del tipo de curado como de la temperatura del curado, por tanto se decide realizar 3 redes neuronales que excluyan estas 2 variables, ya que las anteriores las contemplaban. Por tanto, se crearan las RNA 4, RNA 11 y RNA 17 correspondientes a las variables de respuesta: permeabilidad, resistencia a la compresión y coeficiente de difusión respectivamente.

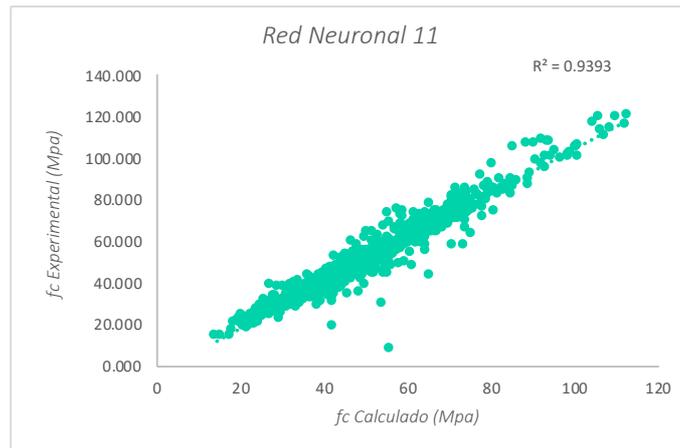
Para la RNA 4, el ajuste de la red neuronal da un coeficiente de determinación $R^2=0,8526$ (Grafica 32), mientras que para las redes RNA 11 y RNA 17 los coeficientes de determinación son de $R^2=0,9393$ (Grafica 33), y $R^2=0,832$ (Grafica 34), respectivamente.

Como se puede observar, el curado tiene importancia en lo que refiere a la permeabilidad y difusión de cloruros en el hormigón, ya que ambos coeficientes de determinación decrecieron considerablemente, lo cual indica la fuerte relación de estas dos variables.



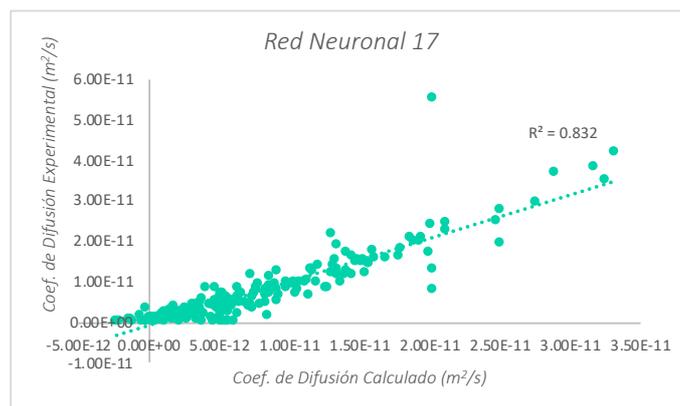
Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	16				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.1815	0.235	0.1669	0.1774	0.232	0.28	0.242	0.1997	0.211
RMSE	0.1815	0.235	0.1669	0.1774	0.232	0.28	0.242	0.1997	0.211
PSE	-38.4399	-49.7674	-35.3369	-37.5665	-49.1304	-59.2836	-51.2416	-42.2911	-44.6831
interacciones	33	25	30	29	27	24	25	27	26
R	0.90500	0.87617	0.91265	0.87795	0.85155	0.87095	0.8951	0.88889	0.85260

Grafica 32, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 4.



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	16				Variable de Salida				Resistencia
MSE	0.0904	0.263	0.1905	0.0805	0.0864	0.1147	0.0596	0.1045	0.2097
RMSE	0.0904	0.263	0.1905	0.0805	0.0864	0.1147	0.0596	0.1045	0.2097
PSE	-19.1481	-55.6906	-40.3345	-17.0385	-18.2879	-24.2955	-12.6106	-22.1244	-44.3969
iteraciones	27	23	24	27	28	26	55	25	24
R	0.95424	0.85892	0.90538	0.95928	0.95637	0.95637	0.96986	0.91683	0.89623

Grafica 33, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 11.

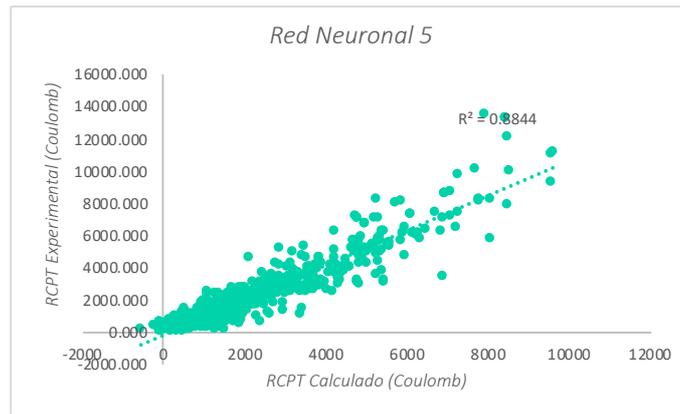


Datos	243				N° Neuronas ocultas				50
Variables	13				Variable de Salida				Coefficiente de Difusión
MSE	0.2547	0.1719	0.1736	0.2948	0.4943	0.2643	0.1607	0.3214	1.0099
RMSE	0.2547	0.1719	0.1736	0.2948	0.4943	0.2643	0.1607	0.3214	1.0099
PSE	-0.5249	-0.3542	-0.3578	-0.6075	-1.0187	-0.5447	-0.3312	-0.6624	-2.0815
iteraciones	24	23	39	23	23	24	25	24	21
R	0.86439	0.91236	0.90971	0.84679	0.73310	0.86049	0.91621	0.84838	0.51641

Grafica 34, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 17.

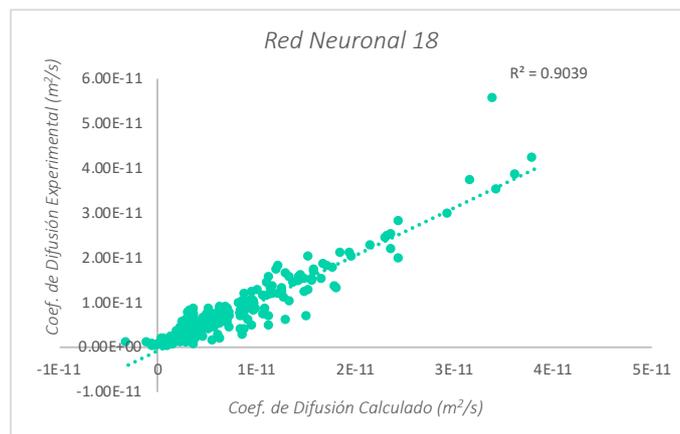
Dado que en el análisis estadístico mostró una clara relación entre la durabilidad y la resistencia a la compresión, se plantea crear 2 redes neuronales para evaluar dicha relación. La RNA 5 utiliza 17 variables de las redes excluyendo la variable de resistencia a la compresión para la predicción de la permeabilidad de cloruros, mientras que la red RNA 18 tiene 14 variables y la variable de salida es el coeficiente de difusión.

Para la RNA 5, se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2=0,8844$ (Grafica 35), mientras que en la RNA 18 fue de $R^2= 0,9039$ (Grafica 36).



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	17				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.1656	0.2099	0.2441	0.1637	0.1348	0.2623	0.1078	0.1746	0.1925
RMSE	0.1656	0.2099	0.2441	0.1637	0.1348	0.2623	0.1078	0.1746	0.1925
PSE	-4.9799	-6.3109	-7.3397	-4.9227	-4.0543	-7.8871	-3.24	-5.2498	-5.7868
iteraciones	26	25	27	27	29	25	35	28	29
R	0.91376	0.88888	0.87197	0.91561	0.93019	0.86002	0.94512	0.90847	0.89910

Grafica 35, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 5.



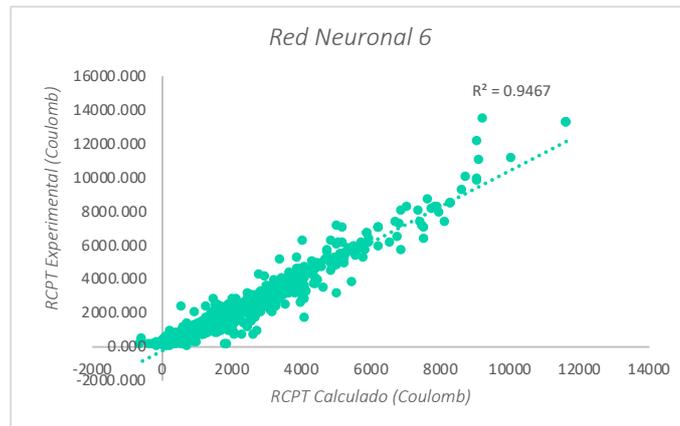
Datos	369				N° Neuronas ocultas				50
Variables	14				Variable de Salida				Coefficiente de Difusión
MSE	0.4278	0.2996	0.3551	0.2038	0.2622	0.3925	0.3737	0.3095	0.355
RMSE	0.4278	0.2996	0.3551	0.2038	0.2622	0.3925	0.3737	0.3095	0.355
PSE	-1.126	-0.7886	-0.9348	-0.5363	-0.69	-1.0332	-0.9835	-0.8148	-0.9345
iteraciones	24	24	26	23	27	42	26	25	24
R	0.87725	0.87773	0.94309	0.71396	0.92060	0.96659	0.94263	0.90519	0.81777

Grafica 36, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 18.

Nuevamente, se puede apreciar que disminuyeron ambos coeficientes de determinación, por lo tanto, volvemos a confirmar que existe una clara relación entre la resistencia a la compresión y la permeabilidad y difusión de cloruros.

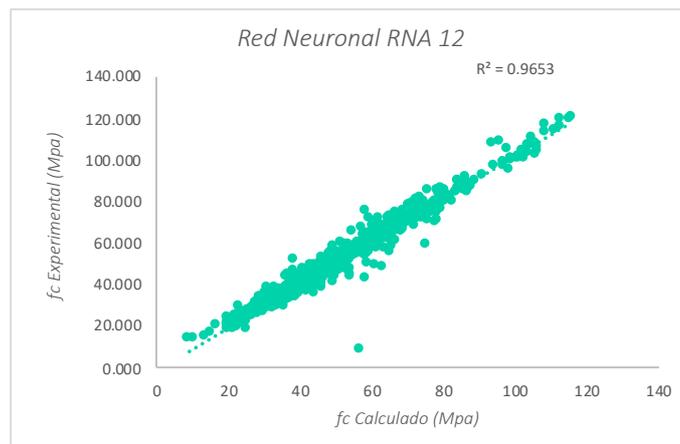
Si bien los valores obtenidos de los coeficientes de determinación indican una explicación de la variabilidad elevada, se decide aumentar las variables de entrada, ya que se considera que pueden llegar a tener una influencia tanto en la resistencia a la compresión como a la permeabilidad de cloruros. Las variables adicionadas a la red serán las composiciones químicas

de los materiales cementantes, para lo cual se crean las redes RNA 6 y RNA 12, teniendo ambas redes 35 variables de entrada y 843 datos.



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	35				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.0793	0.1765	0.1218	0.1135	0.1626	0.165	0.1307	0.097	0.1245
RMSE	0.0793	0.1765	0.1218	0.1135	0.1626	0.165	0.1307	0.097	0.1245
PSE	-0.2187	-0.4872	-0.3362	-0.3133	-0.4487	-0.4554	-0.3606	-0.2677	-0.3435
interacciones	32	24	27	33	26	24	24	36	26
R	0.96070	0.90752	0.93902	0.9446	0.91705	0.91565	0.9327	0.95190	0.93625

Grafica 37, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 6.



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	35				Variable de Salida				Resistencia
MSE	0.1259	0.1087	0.1061	0.0664	0.0925	0.0974	0.0838	0.1163	0.0942
RMSE	0.1259	0.1087	0.1061	0.0664	0.0925	0.0974	0.0838	0.1163	0.0942
PSE	-0.3474	-0.3	-0.2928	-0.1834	-0.2553	-0.2687	-0.2312	-0.3209	-0.2599
interacciones	24	25	25	28	51	26	25	25	25
R	0.93672	0.9458	0.94654	0.96659	0.95674	0.95180	0.95753	0.94455	0.95254

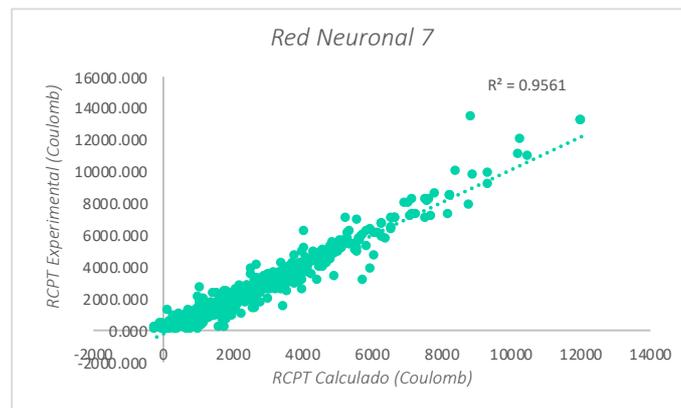
Grafica 38, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 12.

Como se puede ver en las Grafica 37 y Grafica 38, se obtuvo un incremento en los coeficientes de determinación, obteniendo una mejor predicción de las variables de salida. Los valores de R^2 fueron de 0,9467 para la permeabilidad de cloruros y de 0,9653 para la resistencia a la compresión. Se puede observar que se obtuvo para ambas variables un aumento en los coeficientes de determinación en comparación a las RNA 3 y RNA 10.

A modo de revisión, se crearon 3 redes neuronales, las dos primeras corresponden a las RNA 7 y RNA 13, las cuales son iguales a las últimas dos redes, pero se varió una de las variables. Hasta el

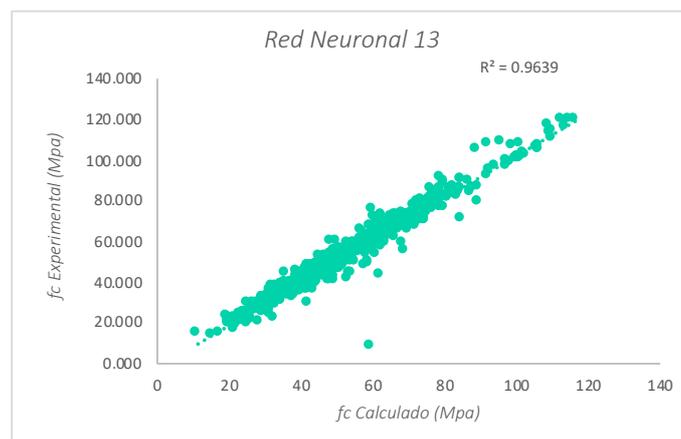
momento para las variables de permeabilidad de cloruros y resistencia a la compresión se había utilizado la cantidad de agua, habiéndose decidido cambiar este por la relación agua/total de material cementante. Mientras que la tercera red RNA 8, será similar a la red neuronal RNA 5, la cual no contempla la resistencia a la compresión, pero se incluirán los componentes químicos.

Para las redes neuronales RNA 7 y RNA 13, se obtuvieron los siguientes coeficientes de determinación: $R^2=0,9561$ para la permeabilidad de cloruro y $R^2=0,9639$ para la resistencia a la compresión (Grafica 39 y Grafica 40). Se observa que se obtuvo para ambas variables un aumento en los coeficientes de determinación en comparación a las RNA 6 y RNA 12.



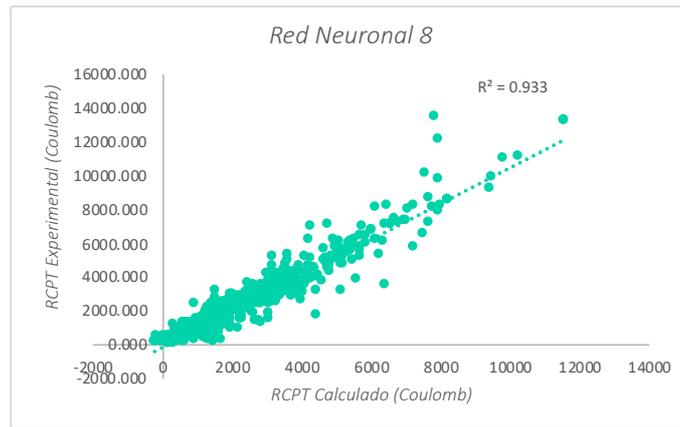
Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	35				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.0903	0.0941	0.1194	0.0903	0.1474	0.2634	0.1033	0.1048	0.2258
RMSE	0.0903	0.0941	0.1194	0.0903	0.1474	0.2634	0.1033	0.1048	0.2258
PSE	-0.2491	-0.2596	-0.3296	-0.2491	-0.4069	-0.7269	-0.285	-0.2892	-0.6233
interacciones	33	31	32	29	27	26	27	26	26
R	0.95561	0.95497	0.93948	0.95418	0.92638	0.87617	0.94812	0.94652	0.88459

Grafica 39, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 7.



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	35				Variable de Salida				Resistencia
MSE	0.0758	0.1412	0.0957	0.106	0.065	0.1351	0.0891	0.0959	0.1298
RMSE	0.0758	0.1412	0.0957	0.106	0.065	0.1351	0.0891	0.0959	0.1298
PSE	-0.2092	-0.3897	-0.2641	-0.2925	-0.1794	-0.3728	-0.246	-0.2646	-0.3582
interacciones	27	24	25	25	26	25	26	26	25
R	0.96169	0.92787	0.95149	0.94677	0.96762	0.93291	0.95487	0.95487	0.93300

Grafica 40, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 13.



Datos	843				N° Neuronas ocultas				50
Variables	34				Variable de Salida				RCPT
MSE	0.138	0.1038	0.1405	0.2329	0.2109	0.2368	0.1805	0.1565	0.0967
RMSE	0.138	0.1038	0.1405	0.2329	0.2109	0.2368	0.1805	0.1565	0.0967
PSE	-0.3942	-0.2965	-0.4014	-0.6653	-0.6025	-0.6766	-0.5157	-0.4471	-0.2763
Interacciones	27	28	30	57	27	25	25	27	30
R	0.92852	0.94681	0.92941	0.89154	0.89269	0.87425	0.90523	0.91902	0.95045

Grafica 41, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 8.

Volviendo a las bases de datos, se procede a elaborar 2 nuevas redes neuronales artificiales RNA 19 y RNA 20 ojo con la numeración debe de estar mal, para conseguir tener modelos de comportamiento de la permeabilidad y difusión de cloruros en función a la relación agua-total de material cementante. El procedimiento a seguir es el siguiente: se realiza el aprendizaje de cada red neuronal artificial con la base de datos general y con las variables de entrada que se indique en la Tabla 22. Posteriormente se toman los datos de un ensayo tipo, haciéndose variar la variable que nos interesa dentro del intervalo que figura en la base de datos general, dado que las redes neuronales artificiales interpolan, no extrapolan. Así, la red neuronal artificial nos dará unos valores de la variable de salida en función a la variable que hemos decidido variar.

RNA: Variable de Salida RCPT								
	1	2	3	4	5	6	7	8
Variables	7	10	18	16	17	35	35	34
Interacciones	37	34	26	27	28	28	29	29
Tot. de datos	843	843	843	843	843	843	843	843
R ²	0.6237	0.8946	0.92	0.8526	0.8844	0.9467	0.9561	0.9330

Tabla 19, Resumen de redes neuronales-Permeabilidad de cloruros a 28 días como variable de salida.

RNA: Variable de Salida Resistencia a Compresión					
	9	10	11	12	13
Variables	10	18	16	35	35
Interacciones	27	26	29	28	25
Tot. de datos	843	843	843	843	843
R ²	0.9259	0.951	0.9393	0.9653	0.9639

Tabla 20, Resumen de redes neuronales-Resistencia a la compresión a 28 días como variable de salida.

RNA: Variable de Salida Coeficiente de Difusión					
	14	15	16	17	18
Variables	7	9	15	13	14
Interacciones	28	26	34	25	27
Tot. de datos	218	218	218	218	369
R²	0.8790	0.8977	0.9236	0.832	0.9039

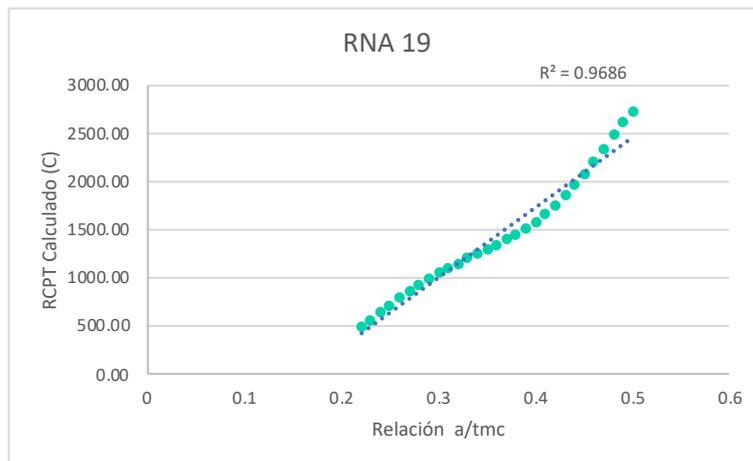
Tabla 21, Resumen de redes neuronales-Coeficiente de difusión de cloruros a 28 días como variable de salida.

	RNA	
Variables	19	20
Cantidad Cemento	x	x
Tipo de Cemento	x	x
Cantidad MK	x	x
Cantidad CV	x	x
Cantidad HS	x	x
Cantidad FillerCalizo	x	x
Cantidad Escoria	x	x
Cantidad CCA	x	x
Cantidad MP	x	x
Cantidad Otros	x	x
a/tmc	x	x
agua		
Árido Fino	x	x
Árido Grueso	x	x
Resistencia		
Tipo de curado	x	x
Temperatura de Curado	x	x
Variables	16	16
Tot. de datos	843	369

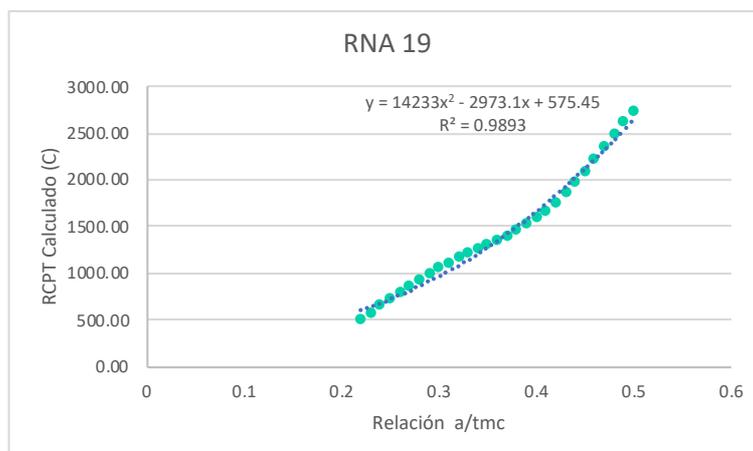
Tabla 22, Variables de entrada para las distintas redes neuronales artificiales.

Para las RNA 19 y RNA 20 las variables de salida serán la permeabilidad y difusión de cloruros respectivamente, para estas redes neuronales se toman los datos de un ensayo tipo, que en nuestro caso se ha tomado un ensayo el cual utilizara cemento del tipo I y que no incluyera ningún tipo de adición mineral. La variable estudiada será la relación agua- total de material cementante (a/tmc). El rango de la relación a/tmc para la RNA 19 será desde 0,22 a 0,50 y para la RNA 20 el rango será de 0,40 a 0,61. Para conseguir lo anterior se procede tal y como se indicó en el párrafo anterior, es decir, la red neuronal artificial aprende de la base de datos general con las 16 variables de entrada que figuran en la Tabla 22 (entre las que no contemplamos la resistencia a la compresión). Se creará una base de datos nueva en la que todas las variables de entrada se mantienen constantes (siendo las correspondientes al primer ensayo) salvo la relación a/tmc la cual varía según el rango mencionado anteriormente. Se obtiene como resultado tanto la permeabilidad como el coeficiente de difusión de cloruro en cada una de estas dos redes (RNA 19 y RNA 20), en función a la relación a/tmc. Se realizan 9 ejecuciones de la red neuronal artificial, tal y como viene siendo habitual.

El resultado final obtenido para la permeabilidad de cloruros (RNA 19), es el valor promedio de las 9 ejecuciones. Este valor de la permeabilidad se representa en función de la relación a/tmc, se puede obtener tanto un ajuste lineal como un ajuste polinómico de segundo grado, obteniendo un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0,9686$ para el primer ajuste (Grafica 42) y un $R^2 = 0,9893$ para el segundo (Grafica 43). Ambos valores son elevados, pero el segundo tiene un mejor ajuste y por tanto una mejor predicción del coeficiente de permeabilidad de cloruros.

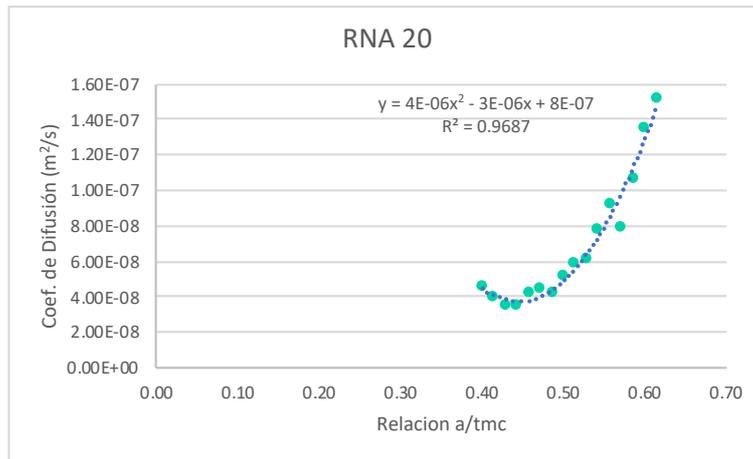


Grafica 42, Ajuste Lineal de las redes neuronales artificiales RNA 19.



Grafica 43, Ajuste Polinómico de las redes neuronales artificiales RNA 19.

Mientras que para el coeficiente de difusión de cloruros (RNA 20), se obtiene un polinomio de segundo grado con un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 0,9687$ (Grafica 44), en este caso un ajuste lineal no es suficiente, ya que se obtiene un $R^2 = 0,7946$.



Gráfica 44, Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 20.

En los modelos de comportamiento obtenidos con la aplicación de las redes neuronales RNA 19 y RNA 20, se deduce un aumento en el coeficiente de difusión y permeabilidad de cloruros en el hormigón tal y como aumenta la relación agua-total de material cementante, resultados que están de acuerdo con numerosos autores como Hossam S. y otros (2016), Feng y otros (2002), Güneysi y otros (2011), Ramezani pour y otros (2012), Nath y otros (2013), Gastaldini y otros (2010), entre otros. Se entiende que al contener menor cantidad de agua y una mayor cantidad de material cementante se puede reducir cantidad, tamaño y distribución de los poros, los cuales permiten el ingreso de agentes agresivos.

5.2. RESUMEN DE LA APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

En el presente trabajo se han elaborado redes neuronales artificiales con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Las neuronas de la capa de entrada son variables para cada red neuronal (entre 7 y 35) y la capa de salida tiene una única neurona que se corresponde con el resultado de la predicción realizada por la red neuronal. De las 20 redes neuronales elaboradas, las salidas se corresponden con: la predicción de la permeabilidad de cloruros en 9 redes neuronales, la resistencia a la compresión a 28 días en 5 redes neuronales y el coeficiente de difusión de cloruros no estacionario en 6 redes neuronales.

En cuanto al número de neuronas de la capa oculta se obtiene que el valor del coeficiente de correlación R máximo obtenido se corresponde con valores cercanos a 50 neuronas en la capa oculta.

La elaboración de las redes neuronales se ha llevado a cabo mediante un código utilizando el "Neural Network Toolbox" de Matlab R2018b. Las características de cada red se pueden consultar en el apartado correspondiente, realizándose para cada una de las mismas 9 ejecuciones con un número de iteraciones bajo (25-37). Los valores de salida calculados por cada red se corresponden con los valores promedio de las 9 ejecuciones correspondientes.

Los valores del coeficiente de determinación R^2 obtenidos para las tres variables calculadas mediante las redes neuronales artificiales y los resultados experimentales, nos muestran un buen comportamiento de estimación para las diferentes redes como se aprecia en la Tabla 23, sobre todo si se cuenta con un alto número de variables de entrada, tales son los casos de la RNA 7, RNA 12 y RNA 16, con coeficientes de determinación R^2 95,60% (35 variables), 96,53% (35 variables) y 92,40% (15 variables), respectivamente. Si las variables de entrada se reducen a 7 tanto en las redes RNA 7 como en la RNA 16 la estimación empeora bajando a un R^2 de 62,37% para la primera red y de 87,90% para la segunda, mientras que la red RNA 12 si reducimos las variables a 10, R^2 es de 92,59%.

RNA	Número de Variables	Variable de Salida	R²
RNA 1	7	Permeabilidad	0.6237
RNA 2	10	Permeabilidad	0.8946
RNA 3	18	Permeabilidad	0.9200
RNA 4	16	Permeabilidad	0.8526
RNA 5	17	Permeabilidad	0.8844
RNA 6	35	Permeabilidad	0.9467
RNA 7	35	Permeabilidad	0.9561
RNA 8	34	Permeabilidad	0.9330
RNA 9	10	Resistencia	0.9259
RNA 10	18	Resistencia	0.9510
RNA 11	16	Resistencia	0.9393
RNA 12	35	Resistencia	0.9653
RNA 13	35	Resistencia	0.9639
RNA 14	7	Difusión	0.8790
RNA 15	9	Difusión	0.8977
RNA 16	15	Difusión	0.9236
RNA 17	13	Difusión	0.8320
RNA 18	14	Difusión	0.9039
RNA 19	16	Permeabilidad	0.9893
RNA 20	16	Difusión	0.9687

Tabla 23, Valores del coeficiente R2 para distintas redes neuronales artificiales.

Si se predicen tanto la permeabilidad como el coeficiente de difusión de cloruro en función a la relación a/tmc (RNA 19 y RNA 20), los resultados obtenidos muestran que ambos modelos predictivos tienen un elevado coeficiente de determinación, la RNA 19 obtiene un R² de 98,9 % mientras que la RNA 20 el R² es 96,9%.

6. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

El presente trabajo ha tenido como objeto de estudio la durabilidad del hormigón frente a los ataques por cloruros, para lo cual se ha realizado dos bases de datos con el fin de predecir el comportamiento del hormigón frente a la penetración y difusión de cloruros. Se lleva a cabo mediante dos modelos de análisis distintos, estadística clásica y redes neuronales artificiales.

Cada una de las bases de datos cuenta con una serie de variables, pertenecientes al diseño y dosificación de la mezcla y otras correspondientes al curado, todas son independientes a las variables de respuesta, siendo estas la resistencia a compresión, la permeabilidad y la difusión de cloruros.

A continuación se resumen las conclusiones principales, tanto generales como específicas, del presente trabajo, así como se indican futuras líneas de investigación que se estiman interesantes en esta área de conocimiento.

6.1. CONCLUSIONES GENERALES

Los modelos estadísticos clásicos empleados para la predicción de la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la difusión de cloruros no han sido capaces de explicar las relaciones, obteniendo coeficientes de determinación no aceptables. En cambio, las redes neuronales artificiales, han sido capaces de dar resultados óptimos, permitiéndonos predecir dichas variables de respuesta. Mediante las redes neuronales artificiales y con una base de datos adecuada, podremos diseñar hormigones resistentes a los ataques por cloruros, sin la necesidad de una exhaustiva campaña experimental.

Dados los resultados obtenidos, se observa que los materiales constituyentes del hormigón y su dosificación afectan a las propiedades mecánicas así como a la penetración y la difusión de cloruros, siendo las variables más influyentes la relación agua/total material cementante, el tipo de cemento y el contenido de adiciones.

6.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

La revisión de la base de datos obtenidas permite concluir que:

- Los materiales que constituyen el hormigón y su dosificación afectan tanto a las propiedades mecánicas del hormigón como a las de durabilidad, siendo las variables relación agua/total material cementante, tipo de cemento, cantidad y tipo de adición las más importantes.
- En cuanto a las adiciones minerales, se pudo observar que la permeabilidad y difusión de cloruros fue menor con la adición de metacaolín, ceniza volante, humo de sílice, ceniza de cascara de arroz, entre otras, en todos los casos.
- Del estudio de las base de datos obtenidas, se puede deducir que la estructura y tamaño de poros del hormigón tienen influencia en cuanto a la permeabilidad y difusión de cloruros. Esta estructura, dependerá del diseño y de los métodos de compactación que se utilicen.

- Las variables que se utilizaron dependieron de las diversas bases de datos obtenidas. Se buscó que estuvieran en todas las bases de datos las variables que considerábamos claves para este estudio. Por tanto, existen variables que podrían brindarnos más información, pero al no existir en la totalidad de las bases de datos consultadas no fue posible utilizarlas para este estudio.

Del estudio estadístico clásico se puede concluir que:

- Los modelos de regresión lineal simple y múltiple nos permiten explicar porcentajes de variabilidad bajos, donde muchas variables explicativas afectan a la variable de respuesta. En nuestro caso la variable que nos explica mayor variabilidad en el caso de la permeabilidad de cloruros es la resistencia a la compresión y la relación agua/total material cementante.
- Aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva podemos alcanzar un coeficiente de determinación $R^2=36,40\%$ para la penetración de cloruros con diez variables explicativas, mientras que para la difusión de cloruros se obtiene un $R^2= 53,6\%$ con tan solo cuatro variables.
- La variable que nos explica mayor variabilidad para el caso del coeficiente de difusión es el tipo de cemento con un R^2 de $30,10\%$ mientras que para la permeabilidad es la resistencia con un R^2 de $17,10\%$.

De la aplicación de redes neuronales artificiales, se extraen las conclusiones siguientes:

- Las redes neuronales artificiales mejoran la predicción de la resistencia a compresión, la permeabilidad y la difusión de cloruros frente a los modelos de estadística clásica. Solo con siete variables se obtuvo un $R^2=87,9\%$ para la predicción de la penetración de cloruros y un $R^2=62,37\%$ para el coeficiente de difusión, siendo estos valores superiores a los obtenidos en los modelos de estadísticos. Si se aumenta el número de variables se pueden obtener coeficientes de determinación R^2 aún más altos. Los valores máximos obtenidos en este estudio fueron de $95,61\%$ para la permeabilidad de cloruros y de $92,36\%$ para el coeficiente de difusión. Por último, en la resistencia a la compresión se obtuvo un $96,53\%$, para el máximo de variables.
- Se han elaborado dos redes neuronales artificiales para obtener el comportamiento tanto de la permeabilidad como de la difusión de cloruros en función a la relación agua/total material cementante, como resultado de este análisis se obtuvo altos coeficientes de determinación R^2 . Si comparamos los datos obtenidos con la bibliografía consultada, se obtienen las mismas conclusiones, a menor relación agua/total material cementante menor será la permeabilidad y difusión de cloruros.
- Frente a los resultados obtenidos, se puede decir que las redes neuronales artificiales son una herramienta muy eficaz, que nos permite predecir comportamientos con coeficientes de determinación elevados y con tiempos de respuesta muy bajos (15-30 segundos).

6.3. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

A continuación se proponen los siguientes aspectos a continuar estudiando, algunos de los cuales pueden ser de utilidad:

- Investigar otras variables que no fueron contempladas en este estudio, y que pueden llegar a influir en el comportamiento mecánico y de durabilidad del hormigón. Algunas de ellas pueden ser los contenidos y tipos de aditivos, ya que este estudio sólo se tuvo en cuenta si la mezcla contenía o no. Con referencia al cemento, queda pendiente estudiar los contenidos de Clinker en él. También puede resultar interesante el estudio de la granulometría y naturaleza de los áridos y la temperatura ambiente y temperatura del hormigón.
- Analizar la relación que existe entre ambos parámetros de durabilidad, es decir relacionar difusión con permeabilidad de cloruros, ya que en este estudio no fue posible dado que no se contaba con la cantidad de datos suficientes para llevarlo a cabo.
- Si bien las bases de datos se crearon a partir de distintos hormigones, no se diferenciaron los tipos de hormigones que se estudiaba, es decir diferenciar un hormigón convencional de uno autocompactante.

7.

8. BIBLIOGRAFÍA

Feng Naiqian y Feng Xiaoxin Effect of ultrafine mineral powder on the charge passed of the concrete. *Cement and Concrete Research*. - 2002. - Vol. 32. - págs. 623–627 .

Ha-Won Song y Seung-Jun Kwon Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure. *Cement and Concrete Research*. - 2009. - Vol. 39. - págs. 814–824.

Hecht-Nielsen Robert Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. 1st International Conference on Neural Networks. - 1987. - págs. 247, 248.

Nehdi M., Pardhanb M. y Koshowskic S. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. *Cement and Concrete Research*. - 2004. - Vol. 34. - págs. 2103–2112.

Shaker Fatma, Rashad Ahmed y Allam Mohamed Properties of concrete incorporating locally produced Portland limestone cement. *Ain Shams Engineering Journal*. - 2018. - Vol. 9. - págs. 2301–2309.

Abouhussien Ahmed A. y Hassan Assem A.A. Optimizing the durability and service life of self-consolidating concrete containing metakaolin using statistical analysis. *Construction and Building Materials*. - 2015. - Vol. 76. - págs. 297–306.

Aguilar R.M. y Torres J.M. Aprendizaje Automático en la Identificación de Sistemas. Un Caso de Estudio en la Predicción de la Generación Eléctrica de un Parque Eólico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. - 2019. - Vol. 16. - págs. 114-127.

Ali A. Ramezaniapour [y otros] Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes. *Cement & Concrete Composites* 31. - 2009. - págs. 715–720.

Antonios Kanellopoulos, Michael F. Petrou y Ioannis Ioannou Durability performance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 37. - 2012. - págs. 320–325.

Assem A.A. Hassan, Mohamed Lachemi y Khandaker M.A. Hossain Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement & Concrete Composites* 34. - 2012. - págs. 801–807.

Assié Stéphan , Escadeillas Gilles y Waller Vincent Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. *Construction and Building Materials*. - 2007. - 1909–1917 : Vol. 21.

ASTM-C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. - 2019.

ASTM-C1556 Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. - 2016.

Badogiannis Efstratios G., Sfikas Ioannis P. y Voukia Dimitra V. Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*. - 2015. - Vol. 82. - págs. 133–141.

Bermúdez Odriozola Miguel Ángel Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. - Madrid : Tesis Doctoral, Unoversidad Politécnica de Madrid. 2007.

Bernal Camacho Jesús Manuel Evaluación de parámetros que influyen en el transporte de cloruros en hormigón parcialmente saturado. - Madrid : Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, 2014.

Bouzoubaa N., Zhang M.H. y Malhotra V.M. Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash. *Cement and Concrete Research*. - 2001. - Vol. 31. - págs. 1393–1402.

Burden Donald The Durability of Concrete Containing High Levels of Fly Ash. *PCA R&D Serial* . - 2003. - 2989.

C.S. Poon, S.C. Kou y L. Lam Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials* . - 2008. - págs. 858–865.

Chindaprasirt P. y otros. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. *Construction and Building Materials*. - 2007. - Vol. 21. - págs. 356–361.

Cong Kou Shi , Sun Poon Chi y Chan Dixon Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*. - 2008. - Vol. 41. - págs. 1191–1201.

Correa M. [y otros] Redes bayesianas vs redes neuronales en modelos para la predicción del acabado superficial. Congreso de máquinas-herramienta y tecnologías de fabricación. - San Sebastian : Ivema, 2008.

Deboodt Tyler, Fu Tengfei y Ideke Jason H. Durability assessment of high-performance concrete with SRAs and FLWAs. *Cement & Concrete Composites*. - 2015. - Vol. 57. - págs. 94–101.

Delnavaz Ali y Akbar Ramezaniapour Ali The assessment of carbonation effect on chloride diffusion in concrete based on artificial neural network model. *Magazine of Concrete Research*. - 2012. - Vol. 64. - págs. 877-884.

Dinakar P., Sahoo Pradosh K. y Sriram G. Effect of Metakaolin Content on the Properties of High Strength Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. - 2013. - Vol. 7. - págs. 215–223.

DING Qingjun y GENG Jian Different Effects of Fly Ash and Slag on Anti-Rebar Corrosion Ability of Concrete with Chloride Ion. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*. - 2009. - Vol. 13. - págs. 355-361.

EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, 2008.

Elahi A. [y otros] Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. *Construction and Building Materials*. - 2010. - Vol. 24. - págs. 292–299.

Feng Jingjing , Liu Shuhua y Wang Zhigang Effects of ultrafine fly ash on the properties of high-strength concrete. *J Therm Anal Calorim.* - 2015. - Vol. 121. - págs. 1213–1223.

Flórez López Raquel y Fernández Fernández José Miguel Las Redes Neuronales Artificiales, Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas.- A Coruña, España : NETBIBLO, 2008.

Güneyisi Erhan y Gesoğlu Mehmet Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age. *Construction and Building Materials* . - 2009. - Vol. 23. - págs. 469–481.

Güneyisi Erhan , Özturan Turan y Gesoglu Mehmet Examining the electrical properties of plain and blended cement concretes: Relationship between charge passed and initial current. *Composites: Part B.* - 2011. - Vol. 42. - págs. 1517–1524.

Ganesh P. y Ramachandra Murthy A. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. *Construction and Building Materials.* - 2019. - Vol. 197. - págs. 667–680.

Gastaldini A.L.G., Isaia G.C. y Saciloto A.P. Influence of curing time on the chloride penetration resistance of concrete containing rice husk ash: A technical and economical feasibility study. *Cement & Concrete Composites.* - 2010 : Vol. 32. - págs. 783–793.

Gesoğlu Mehmet, y otros. Permeability properties of concretes with high reactivity metakaolin and calcined impure kaolin. *Materials and Structures.* - 2014. - Vol. 47. - págs. 709–728.

Gruber K.A. [y otros] Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. *Cement & Concrete Composites.* - 2001. - Vol. 23. - págs. 479-484.

Güneyisi Erhan , Gesoğlu Mehmet y Özturan Turan Estimation of chloride permeability of concretes by empirical modeling: Considering effects of cement type, curing condition and age. *Construction and Building Materials.* - 2009. - Vol. 23. - págs. 469–481.

Hecht-Nielsen Robert Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. 1st International Conference on Neural Networks. - 1987. - págs. 247, 248.

Hossam S. Al-alaily y Assem A.A. Hassan Refined statistical modeling for chloride permeability and strength of concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials.* - 2016. - págs. 564–579.

Huang Kang-Shiun y Yang Chung-Chia Using RCPT determine the migration coefficient to assess the durability of concrete. *Construction and Building Materials.* - 2018. - Vol. 167. - págs. 822–830.

Hwan Oh Byung, Won Cha Soo y Otros Development of high-performance concrete having high resistance to chloride penetration. *Nuclear Engineering and Design* . - 2002. - 221–231 : Vol. 212.

J. Lizarazo-Marriaga y P. Claisse Determination of the transport properties of a blended concrete from its electrical properties measured during a migration test. *Magazine of Concrete Research,*. - 2010. - Vol. 62. - págs. 163–175.

J. Luciano y M. Miltenberger Predicting chloride diffusion coefficients from concrete mixture proportions. *ACI Mater. J.*. - 1999. - 96. - págs. 698–702..

Kanellopoulos A., Petrou Michael F. y Ioannou Ioannis Durability performance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials* 37. - 2012. - págs. 320–325.

Kannan V Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*. - 2018. - Vol. 160. - págs. 169–179.

Kannan V. y Ganesan K. Synergic Effect of Pozzolanic Materials on the Structural Properties of Self-Compacting Concrete. *Arab J Sci Eng.* - 2014. - 2601–2609 : Vol. 39.

Karahan Okan , Ozbay Erdogan y Atis Cengiz D. Effects of Milled Cut Steel Fibers on the Properties of Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*. - 2016. - Vol. 20. - págs. 2783-2789.

Kou S.C. y Poon C.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*. - 2009. - Vol. 31. - págs. 622–627.

Kowtanapanich, W. y Cheerarot, R. Prediction of chloride permeability of concretes containing ground pozzolans by artificial neural networks. *Materials and Structures*. - 2013. - Vol. 46. - págs. 1707–1721.

Kumer Saha Ashish Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*. - 2018. - Vol. 28. - págs. 25-31.

Li, H y Lu, CH Neural Network Analysis of Chloride Penetration in Stressed Concrete. *International Conference on Modelling and Simulation/3rd International Conference on Information and Computing Science*. - Jiangnan Univ, China : Modelling and Simulation-World Academic Union, 2010. - págs. 187-190.

Lippmann R. An introduction to computing with neural nets. *ASSP Magazine, IEEE*. - 1987. - págs. 4-22.

Lourakis Manolis I. A. A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by levmar. *Institute of Computer Science Foundation for Research and Technology*, 2005.

M. Shafikhani y S.E. Chidiac Quantification of concrete chloride diffusion coefficient – A critical review. *Cement and Concrete Composites*. - 2019. - Vol. 99. - págs. 225–250.

Macquarie Supit Steve Wilben y Ahmed Shaikh Faiz Uddin Durability properties of high volume fly ash concrete containing nano-silica. *Materials and Structures*. - 2015. - Vol. 48. - págs. 2431–2445.

Marín Diazaraque Juan Miguel *Introducción a las Redes Neuronales Aplicadas*. - Madrid : Universidad Carlos III de Madrid, 2012.

Matich Damián Jorge *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. - 2001.

Miura N. y otros. Application of super workable concrete to reinforced concrete structures with difficult construction conditions. *ACI SP-140*. - 1993.

Moffatt Edward G., Thomas Michael D.A. y Fahim Andrew Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. *Cement and Concrete Research*. - 2017. - Vol. 102. - págs. 127–135.

Moller Martin Efficient Training of FeedForward Neural Networks. Tesis Doctoral. - Arthus University, Denmark, 1993.

Moon Han-Young, Jung Ho-Seop y Kim Jong-Pil Diffusion of Chloride Ions in Limestone Powder Concrete. Journal of the Korea Concrete Institute. - 2004. - Vol. 16. - págs. 859-865.

Najimi Meysam [y otros] An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. Construction and Building Materials. - 2012. - Vol. 35. - págs. 1023–1033.

Najimi Meysam, Ghafoori Nader y Nikoo Mehdi Modeling chloride penetration in self-consolidating concrete using artificial neural network combined with artificial bee colony algorithm. Journal of Building Engineering . - 2019. - Vol. 22. - págs. 216–226.

Najjar, YM y Basheer, IA Characterizing the durability of concrete pavement aggregate by neuronets, Numerical Models in Geomechanics. - 1997. - págs. 697-702.

Nath Pradip y Kumar Sarker Prabir Effect of Mixture Proportions on the Drying Shrinkage and Permeation Properties of High Strength Concrete Containing Class F Fly Ash. Journal of Civil Engineering. - 2013. - Vol. 17. - págs. 1437-1445.

Navarro Ferrer Ferran Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales.- Tesis doctoral, Valencia, España : Universidad Politécnica de Valencia, 2016.

Nilsson, L. O. Chloride Penetration into Concrete, State of the Art, Transport Processes, Corrosion Initiation, Test Methods and Prediction Models. The Report. - 1996. - Vol. 53. - págs. 4-16.

NT BUILS 492 Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.- 1999.

Ozbay Erdogan, Gesoglu Mehmet y Guneyisi Erhan Transport properties based multi-objective mix proportioning optimization of high performance concretes. Materials and Structures. - 2011. - Vol. 44. - págs. 139–154.

P. Dinakar, K.G. Babu y Manu Santhanam Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. Cement & Concrete Composites 30 . - 2008. - págs. 880–886.

P. Dinakar, M. Kartik Reddy y Mudit Sharma Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash. Materials and Design 46. - 2013. - págs. 609–616.

P. Nath y P. Sarker Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete. Procedia Engineering . - 2011. - págs. 1149–1156.

Parthiban Thirumalai , Ravi R. y Parthiban G.T. Neural network analysis for corrosion of steel in concrete. Corrosion Science . - 2005. - Vol. 47. - págs. 1625–1642.

Peng, J, Li, ZJ y Ma, BG Neural network analysis of chloride diffusion in concrete. Journal of materials in civil engineering. - 2002. - Vol. 14. - págs. 327-333.

Pilvar Amirreza, Ramezaniapour Ali Akbar y Rajaie Hossein Comparison of Four Electrical Measurement Methods with Bulk Diffusion for Assessing the Chloride Resistance of Concretes. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng. - 2016. - Vol. 40. - págs. 327–336.

Ponce Cruz Pedro Inteligencia Artificial, con aplicaciones a la ingeniería. - Mexico, Alfaomega Grupo Editorial, 2010.

Poon Chi-Sun y otros Comparison of the strength and durability performance of normal and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. Cement and Concrete Research.- 2001. - Vol. 31. - págs. 1291–1300.

Raiess Ghasemi A.M., Parhizkar T. y Ramezaniapour A.A. Influence of Colloidal Nano-SiO₂ Addition as Silica Fume Replacement Material in Properties of Concrete. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. - Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy : 2010.

Raif Boga Ahmet y Öztürk Murat Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNI. Composites: Part B . - 2013. - Vol. 45. - págs. 688–696.

Ramezaniapour A. A. Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume. Cement&Concrete Composites. - 1995. - Vol. 17. - págs. 125-133.

Ramezaniapour A.A. y Bahrami Jovein H. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. Construction and Building Materials. - 2012. - Vol. 30. - págs. 470–479.

Reza Bagheri Ali , Zanganeh Hamed y Mehdi Moalemi Mohamad Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. Cement & Concrete Composites. - 2012. - Vol. 34. - págs. 663–670.

Rivas Asanza Wilmer y Mazón Olivo Bertha Redes neuronales artificiales aplicadas al reconocimiento de patrones. REDES 2017. - 2017.

Rukzon Sumrerng y Chindaprasirt Prinya Use of Ternary Blend of Portland Cement and Two Pozzolans to Improve Durability of High-strength Concrete. KSCE Journal of Civil Engineering. - 2014. - Vol. 18. - págs. 1745-1752.

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. y Williams, R. J. Learning internal representations by error propagation. Cambridge (USA): MIT Press. - 1986. - págs. vid. pág. 247.

S. Inthata, W. Kowtanapanich y R. Cheerarot Prediction of chloride permeability of concretes containing ground pozzolans by artificial neural networks. Materials and Structures. - 2013. - Vol. 46. - págs. 1707–1721.

Sanchez de Rojas María José Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. - Tesis Doctoral, Alicante, España, Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Escuela Politécnica Superior de Alicante, 2004.

Seung-Jun Kwon y Sang-Chel Kim Concrete mix design for service life of RC structures exposed to chloride attack. *Computers and Concrete*. - 2012. - Vol. 10. - págs. 587-607 .

Shafikhani M. y Chidiac S.E. Quantification of concrete chloride diffusion coefficient – A critical review. *Cement and Concrete Composites*. - 2019. - Vol. 99. - págs. 225–250.

Shaikh F.U.A. y Supit S.W.M. Compressive strength and durability of high-volume fly ash concrete reinforced with calcium carbonate nanoparticles. Curtin University, Perth, WA, Australia.

Shaikh Faiz U.A. y Supit Steve W.M. Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*. - 2015. - Vol. 82. - págs. 192–205.

Siddique Rafat Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials and Design*. - 2011. - Vol. 32. - págs. 1501–1507.

Sim Jongsung y Park Cheolwoo Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. - 2011. - Vol. 31. - págs. 2352–2360.

Sun Jianwei y Chen Zhonghui Influences of limestone powder on the resistance of concretes to the chloride ion penetration and sulfate attack. *Powder Technology*. - 2018. - Vol. 338. - págs. 725–733.

Tabaresa Héctor, Branchb John y Valenciaa Jaime Generación dinámica de la topología de una red neuronal artificial del tipo perceptron multicapa. Medellín, Colombia : Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2006. - 38. - págs. 146-162.

Ueli Angst [y otros] Critical chloride content in reinforced concrete — A review. *Cement and Concrete Research* 39 . - 2009. - págs. 1122–1138.

Ulloa Mayorga Vivian Andrea Durabilidad de hormigones armados, con árido reciclado: Una evaluación de la corrosión en un ambiente marino. Tesis Doctoral Valencia, España : Universidad Politécnica de Valencia, 2012.

UNE 83987 Determinación de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el hormigón endurecido, Método multirrégimen, Durabilidad del hormigón. - AENOR, 2014.

Uysal Mucteba, Yilmaz Kemalettin y Ipek Metin The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. - 2012. - Vol. 27. - págs. 263–270.

Valcuende Manuel Payá, Marco Empar Serrano y Jardón Rafael Giner, Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura. - Valencia.

Valipour Mahdi, Pargar Farhad y Shekarch Mohammad Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*. - 2013. - Vol. 41. - págs. 879–888.

Watcharapong Wongkeo y Pailyn Thongsanitgarn Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials and Design* 64 (2014) 261–269. - 2014. - págs. 261-269.

Wee T.H., Suryavanshi Arvind K. y Tin San San Influence of aggregate fraction in the mix on the reliability of the rapid chloride permeability test. *Cement and Concrete Composites* . - 1999. - Vol. 21. - págs. 59-72.

Yepes V. [y otros] Caracterización Estadística de Tableros Pretensados para Carreteras. *Revista de la Construcción..* - 2009. - Vol. 8. - págs. 196-203.

Youm Kwang-Soo [y otros] Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. *Construction and Building Materials*. - 2016. - Vol. 114. - págs. 517–527.

Yuvaraj Dhandapani [y otros] Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research* 107. - 2018. - págs. 136–151.

Zhang Junzhi, Bian Fan y Zhang Yurong Effect of pore structures on gas permeability and chloride diffusivity of concrete. *Construction and Building Materials*. - 2018. - Vol. 163. - págs. 402–413.

Zhang Zengqi, Wang Qiang y Chen Honghui Properties of high-volume limestone powder concrete under standard curing and steam-curing conditions. *Powder Technology*. - 2016. - Vol. 301. - págs. 16–25.

Zhuang Yizhou, Chen Baochun y Huang Zhibin Behavioral Prediction of Reactive Powder Concrete Based on Artificial Neural Network. *Advanced materials research*. - 2011. - Vols. 168-170. - págs. 1030-1033.

ANEXO A: TABLAS DE DOSIFICACIÓN CORRESPONDIENTES A LAS BASES DE DATOS

Muestra	Total de material cementante	Relación a/tmc	MK (%)	MK (kg/m ³)	Cemento OPC (kg/m ³)	Contenido de Agua (kg/m ³)	Árido Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia cubica (Mpa)	RCPT (Coulombs)	Coef. Difusión $\times 10^{-12}$ (m ² /s)
1	600	0.5	25	150.0	450.0	300	589.2	707	Bajo agua 20°C	67	1192	1.385
2	350	0.5	0	0.0	350.0	175	843.7	1012.4	Bajo agua 20°C	35	4545	6.526
3	350	0.3	0	0.0	350.0	105	926.4	1111.7	Bajo agua 20°C	51	788	2.484
4	600	0.5	0	0.0	600.0	300	602.2	722.6	Bajo agua 20°C	54	3144	3.825
5	350	0.3	25	87.5	262.5	105	918.8	1102.6	Bajo agua 20°C	83	455	1.227
6	600	0.3	0	0.0	600.0	180	744	892.8	Bajo agua 20°C	84	400	0.798
7	600	0.3	25	150.0	450.0	180	731	877.2	Bajo agua 20°C	108	203	0.200
8	350	0.5	25	87.5	262.5	175	836.1	1003.3	Bajo agua 20°C	58	1460	2.309
9	600	0.5	12.5	75.0	525.0	300	595.7	714.8	Bajo agua 20°C	58	1901	2.771
10	475	0.3	25	118.8	356.3	142.5	824.9	989.9	Bajo agua 20°C	90	254	0.724
11	600	0.3	12.5	75.0	525.0	180	737.5	885	Bajo agua 20°C	92	300	0.399
12	600	0.4	25	150.0	450.0	240	660.1	792.1	Bajo agua 20°C	85	420	0.479
13	350	0.4	0	0.0	350.0	140	885.1	1062.1	Bajo agua 20°C	47	1763	4.408
14	475	0.5	0	0.0	475.0	237.5	722.9	867.5	Bajo agua 20°C	40	4181	4.366
15	475	0.5	25	118.8	356.3	237.5	712.7	855.2	Bajo agua 20°C	65	1267	2.626
16	350	0.3	12.5	43.8	306.3	105	922.6	1107.2	Bajo agua 20°C	80	520	2.087
17	600	0.4	0	0.0	600.0	240	673.1	807.7	Bajo agua 20°C	65	1091	3.175
18	350	0.5	12.5	43.8	306.3	175	839.9	1007.9	Bajo agua 20°C	40	2546	5.547
19	350	0.4	25	87.5	262.5	140	877.5	1053	Bajo agua 20°C	77.5	590	1.474
20	475	0.3	0	0.0	475.0	142.5	835.2	1002.2	Bajo agua 20°C	77	450	1.584
21	350	0.4	12.5	43.8	306.3	140	881.3	1057.5	Bajo agua 20°C	68	1228	2.734
22	600	0.4	12.5	75.0	525.0	240	666.6	799.9	Bajo agua 20°C	82	500	1.265
23	475	0.3	12.5	59.4	415.6	142.5	830.1	996.1	Bajo agua 20°C	87	410	1.242
24	475	0.5	12.5	59.4	415.6	237.5	717.8	861.4	Bajo agua 20°C	50	2231	4.268
25	475	0.4	0	0.0	475.0	190	779.1	934.9	Bajo agua 20°C	50	1314	2.320
26	475	0.4	25	118.8	356.3	190	768.8	922.6	Bajo agua 20°C	80	540	1.394
27	537.5	0.45	6.25	33.6	503.9	241.875	691.4	829.7	Bajo agua 20°C	52	2273	3.386
28	537.5	0.35	6.25	33.6	503.9	188.125	754.9	905.9	Bajo agua 20°C	76	470	1.722
29	412.5	0.35	18.75	77.3	335.2	144.375	849.7	1019.7	Bajo agua 20°C	82	388	1.421
30	537.5	0.45	18.75	100.8	436.7	241.875	685.6	822.7	Bajo agua 20°C	68	1146	1.391
31	537.5	0.35	18.75	100.8	436.7	188.125	749.1	898.9	Bajo agua 20°C	90	350	0.418
32	412.5	0.45	18.75	77.3	335.2	185.625	801	961.2	Bajo agua 20°C	43.8	1890	3.237
33	412.5	0.45	6.25	25.8	386.7	185.625	805.5	966.5	Bajo agua 20°C	38	3540	5.027
34	412.5	0.35	6.25	25.8	386.7	144.375	854.2	1025	Bajo agua 20°C	68	604	2.129
35	412.5	0.35	12.5	51.6	360.9	144.375	852	1022.4	Bajo agua 20°C	70	494	2.127
36	412.5	0.4	6.25	25.8	386.7	165	829.8	995.8	Bajo agua 20°C	63	1125	3.407
37	537.5	0.45	12.5	67.2	470.3	241.875	688.5	826.2	Bajo agua 20°C	60	1566	2.332
38	475	0.45	18.75	89.1	385.9	213.75	743.3	892	Bajo agua 20°C	64	1190	1.983
39	475	0.35	18.75	89.1	385.9	166.25	799.4	959.3	Bajo agua 20°C	89.7	382	1.222
40	475	0.35	12.5	59.4	415.6	166.25	802	962.4	Bajo agua 20°C	80	480	1.775
41	475	0.4	18.75	89.1	385.9	190	771.4	925.6	Bajo agua 20°C	79	643	1.809
42	475	0.35	6.25	29.7	445.3	166.25	804.6	965.5	Bajo agua 20°C	78	553	2.393
43	537.5	0.4	12.5	67.2	470.3	215	720.3	864.3	Bajo agua 20°C	78	694	1.585
44	412.5	0.4	12.5	51.6	360.9	165	827.6	993.1	Bajo agua 20°C	72	864	3.301
45	475	0.45	6.25	29.7	445.3	213.75	748.4	898.1	Bajo agua 20°C	49	2554	3.567
46	537.5	0.4	18.75	100.8	436.7	215	717.4	860.8	Bajo agua 20°C	81	625	1.077
47	537.5	0.4	6.25	33.6	503.9	215	723.2	867.8	Bajo agua 20°C	72	958	3.170
48	475	0.45	12.5	59.4	415.6	213.75	745.9	895	Bajo agua 20°C	50	1973	2.527
49	412.5	0.45	12.5	51.6	360.9	185.625	803.2	963.9	Bajo agua 20°C	40	2474	3.604
50	412.5	0.4	18.75	77.3	335.2	165	825.4	990.4	Bajo agua 20°C	73	665	2.707
51	537.5	0.35	12.5	67.2	470.3	188.125	752	902.4	Bajo agua 20°C	84	405	1.122
52	475	0.4	6.25	29.7	445.3	190	776.5	931.8	Bajo agua 20°C	67	1076	1.947
53	475	0.4	12.5	59.4	415.6	190	773.9	928.7	Bajo agua 20°C	55	810	3.263

Tabla 24, Diseño de Mezcla por Hossam S. Al-alaily, y otros, 2016

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	Relación a/tmc	CV (%)	CV (kg/m ³)	Árido Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Aditivo	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
1	355	355	0.41	0	0	740	1185	5.11	Bajo agua 23°C	68.8	2722
2	440	308	0.32	30	132	661	1185	4.77	Bajo agua 23°C	72.8	1757.5
3	440	264	0.31	40	176	665	1185	4.75	Bajo agua 23°C	65.1	1493
4	517	517	0.29	0	0	594	1185	6.77	Bajo agua 23°C	85.4	2070.5
5	517	362	0.29	30	155	570	1185	4.80	Bajo agua 23°C	72.8	1881
6	518	311	0.29	40	207	561	1185	4.24	Bajo agua 23°C	68.5	1574

Tabla 25, Diseño de Mezcla por Nath, y otros, 2013

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Árido Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Aditivo (l/m ³)	Tipo de curado	Resistencia Cubica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
Control	500	500	0	0	0.3	150	725	1087	0.5	Bajo agua 27°C	96.5	1035
5%MK	500	475	25	0	0.3	150	721	1087	0.6	Bajo agua 27°C	103.6	862
10%MK	500	450	50	0	0.3	150	717	1087	0.8	Bajo agua 27°C	116.8	199
20%MK	500	400	100	0	0.3	150	708	1087	1	Bajo agua 27°C	99.6	240
5%HS	500	475	0	25	0.3	150	716	1087	0.6	Bajo agua 27°C	106.5	665
10%HS	500	450	0	50	0.3	150	707	1087	0.8	Bajo agua 27°C	107.9	360
Control	410	410	0	0	0.5	205	662	1081	0	Bajo agua 27°C	52.1	2971
5%MK	410.5	390	20.5	0	0.5	205	659	1081	0	Bajo agua 27°C	57.1	2079
10%MK	410	369	41	0	0.5	205	656	1081	0	Bajo agua 27°C	66.2	918
20%MK	410	328	82	0	0.5	205	653	1081	0	Bajo agua 27°C	58.4	640
5%HS	410.5	390	0	20.5	0.5	205	655	1081	0	Bajo agua 27°C	54.3	1641
10%HS	410	369	0	41	0.5	205	648	1081	0	Bajo agua 27°C	58.4	1523

Tabla 26, Diseño de Mezcla por C.S. Poon, y otros, 2008

Muestra	Cemento Tipo I (ASTM) (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	SF (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Árido Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Aditivo (l/m ³)	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
11SF	400.5	0	49.5	0.4	180	921	891	4.862	Bajo Agua	41.3	1276
8SF	414	0	36	0.4	180	923	893	4.5	Bajo Agua	45.9	1150
5SF	427.5	0	22.5	0.4	180	926	896	4.292	Bajo Agua	41.9	1580
3SF	436.5	0	13.5	0.4	180	927	898	3.792	Bajo Agua	37.9	225
Control	450	0	0	0.4	180	930	900	3.615	Bajo Agua	40.2	2817
3MK	436.5	13.5	0	0.4	180	929	899	4.038	Bajo Agua	39.4	2197
5MK	427.5	22.5	0	0.4	180	928	898	4.231	Bajo Agua	42.6	1937
8MK	414	36	0	0.4	180	926	897	4.231	Bajo Agua	45.6	1299
11MK	400.5	49.5	0	0.4	180	925	895	4.308	Bajo Agua	43.9	667
15MK	382.5	67.5	0	0.4	180	23	893	4.462	Bajo Agua	45.9	448
20MK	360	90	0	0.4	180	21	891	4.577	Bajo Agua	48.9	316
25MK	337.5	112.5	0	0.4	180	919	889	4.692	Bajo Agua	48.8	353

Tabla 27, Diseño de Mezcla por Assem A.A. Hassan, y otros, 2012

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (ASTM) (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos (kg/m ³)	Aditivo (l/m ³)	Días de Curado	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
NC20	234.0	234.0	0.0	0.8	184.9	1874	0.0	28.0	Bajo Agua	29	3413
SCC558	550.0	83.0	467.5	0.4	225.5	1418	2.0	28.0	Bajo Agua	14.64	1424
NC30	319.0	319.0	0.0	0.6	185.0	1681	0.0	28.0	Bajo Agua	43	2983
SCC557	550.0	165.0	385.0	0.3	187.0	1491	2.0	28.0	Bajo Agua	34.9	352
SCC757	750.0	225.0	525.0	0.3	247.5	1107	2.0	28.0	Bajo Agua	34.83	500
NC60	500.0	500.0	0.0	0.4	185.0	1462	0.0	28.0	Bajo Agua	74	1688
SCC555	550.0	275.0	275.0	0.3	187.0	1571	2.5	28.0	Bajo Agua	57.9	659
SCC655	650.0	325.0	325.0	0.3	221.0	1388	2.0	28.0	Bajo Agua	50.07	740
NC90	552.0	552.0	0.0	0.3	160.1	1465	1.0	28.0	Bajo Agua	78	1008
SCC553	550.0	385.0	165.0	0.3	170.5	1663	2.5	28.0	Bajo Agua	77.08	737
SCC530	500.0	350.0	150.0	0.4	180.0	1608	1.7	28.0	Bajo Agua	71.62	629
NC120	659.0	659.0	0.0	0.2	145.0	1334	1.0	28.0	Bajo Agua	87	1115
SCC551	550.0	495.0	0.0	0.3	159.5	1718	3.0	28.0	Bajo Agua	86.41	NA

Tabla 28, Diseño de Mezcla por P. Dinakar, y otros, 2008

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos 10mm (kg/m ³)	Áridos Gruesos 20mm (kg/m ³)	Aditivo (%)	Slump (mm)	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
OPC M30	310	310	0	0.50	155	695	496	744	0.02	100	Camara Humeda 90%	45.6	2635
FA30 M30	310	217	93	0.45	139.5	723	491	737	0.65	100	Camara Humeda 90%	38.4	1360
LC3 M30	310	310	0	0.50	155	708	491	736	1.00	80	Camara Humeda 90%	44.9	121
OPC M50	360	360	0	0.40	144	703	477	716	0.65	90	Camara Humeda 90%	54.9	2040
FA30 M50	380	266	114	0.35	133	699	475	713	0.60	120	Camara Humeda 90%	53.5	1000
LC3 M50	340	340	0	0.40	136	704	488	732	0.85	120	Camara Humeda 90%	55.1	95
OPC Cmix	360	360	0	0.45	162	721	463	694	0.10	90	Camara Humeda 90%	47.4	2310
FA30 Cmix	360	252	108	0.45	162	721	463	694	0.23	90	Camara Humeda 90%	42.8	1665
LC3 Cmix	360	360	0	0.45	162	687	476	715	0.36	120	Camara Humeda 90%	49.9	100

Tabla 29, , Diseño de Mezcla por Y. Dhandapani y otros, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I ASTM (kg/m ³)	Caliza (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo (%)	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
A-0	350	350	0	0.37	129.5	960	973.9	1.10	Bajo agua 23°C	55	3329
A-5	350	332.5	17.5	0.37	129.5	960	971.6	1.10	Bajo agua 23°C	53.5	3445
A-10	350	315	35	0.37	129.5	960	969.6	1.10	Bajo agua 23°C	52.3	3027
A-15	350	297.5	52.5	0.37	129.5	960	967.4	1.10	Bajo agua 23°C	49.3	3344
A-20	350	280	70	0.37	129.5	960	965.3	1.10	Bajo agua 23°C	45.2	3707
B-0	350	350	0	0.45	157.5	950	912.3	0.00	Bajo agua 23°C	42.9	4842
B-5	350	332.5	17.5	0.45	157.5	950	910.2	0.00	Bajo agua 23°C	45.1	5142
B-10	350	315	35	0.45	157.5	950	908.1	0.00	Bajo agua 23°C	37.9	4448
B-15	350	297.5	52.5	0.45	157.5	950	906	0.00	Bajo agua 23°C	36.4	5154
B-20	350	280	70	0.45	157.5	950	903.9	0.00	Bajo agua 23°C	33	5432
C-0	350	350	0	0.55	192.5	1050	740.8	0.00	Bajo agua 23°C	33.6	5073
C-5	350	332.5	17.5	0.55	192.5	1050	738.7	0.00	Bajo agua 23°C	31.7	6151
C-10	350	315	35	0.55	192.5	1050	736.6	0.00	Bajo agua 23°C	29.2	5754
C-15	350	297.5	52.5	0.55	192.5	1050	734.5	0.00	Bajo agua 23°C	25.6	4870
C-20	350	280	70	0.55	192.5	1050	732.4	0.00	Bajo agua 23°C	25.6	6171

Tabla 30, Diseño de Mezcla por Ali A. Ramezianpour, y otros, 2009.

Muestra	Total de material cementicio	Cemento CEMII 42,5 (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo PCWRA (kg/m ³)	Aditivo PNSP (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica (Mpa)	RCPT (Coulombs)
SCC1	350	350	0	175	0.60	210	771	800	6.1	0	Bajo agua	44	6373
SCC2	350	350	0	175	0.50	175	771	800	7.2	0	Bajo agua	63	4235
SCC3	350	350	0	175	0.45	157	771	800	13	0	Bajo agua	60	4195
SCC4	350	333	17	175	0.50	175	771	800	8	0	Bajo agua	70	1862
SCC5	350	313	37	175	0.50	175	771	800	8	0	Bajo agua	75	897
SCC6	350	301	49	175	0.50	175	771	800	9.3	0	Bajo agua	78	710
NVC1	400	400	0	0	0.50	200	670	955	0	0	Bajo agua	56	4932
NVC2	400	400	0	0	0.50	200	670	955	0	6.4	Bajo agua	64	5181

Tabla 31, Diseño de Mezcla por A. Kanellopoulos, y otros, 2012.

Muestra	Total de material cementante	Cemento CEMI (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo (%)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28 días (coulomb)
PC	600	600	0	0	0.30	180	1084	595	1.19	Bajo agua 23°C	84.0	3400
50FA	600	300	0	300	0.30	180	958	595	0.25	Bajo agua 23°C	66.4	2025
60FA	600	240	0	360	0.30	180	933	595	0.17	Bajo agua 23°C	58.0	1750
70FA	600	180	0	420	0.30	180	908	595	0.12	Bajo agua 23°C	45.6	1700
55F	600	570	30	0	0.30	180	1072	595	1.33	Bajo agua 23°C	95.3	610
10SF	600	540	60	0	0.30	180	1059	595	1.43	Bajo agua 23°C	100.5	250
45FA55F	600	300	30	270	0.30	180	958	595	0.37	Bajo agua 23°C	75.2	600
55FA55F	600	240	30	330	0.30	180	933	595	0.30	Bajo agua 23°C	63.4	650
65FA55F	600	180	30	390	0.30	180	908	595	0.20	Bajo agua 23°C	52.7	900
40FA10SF	600	300	60	240	0.30	180	958	595	0.60	Bajo agua 23°C	85.2	380
50FA10SF	600	240	60	300	0.30	180	933	595	0.48	Bajo agua 23°C	73.6	190
60FA10SF	600	180	60	360	0.30	180	908	595	0.38	Bajo agua 23°C	61.2	500
PC	514	514	0	0	0.35	180	1131	621	1.50	Bajo agua 23°C	83.0	4000
50FA	514	257	0	257	0.35	180	1023	621	0.26	Bajo agua 23°C	59.2	3085
60FA	515	206	0	309	0.35	180	1001	621	0.19	Bajo agua 23°C	52.6	2450
70FA	514	154	0	360	0.35	180	980	621	0.13	Bajo agua 23°C	39.8	2400
55F	515	489	26	0	0.35	180	1120	621	1.60	Bajo agua 23°C	85.3	1080
10SF	514	463	51	0	0.35	180	1110	621	1.75	Bajo agua 23°C	91.6	5100
45FA55F	514	257	26	231	0.35	180	1023	621	0.40	Bajo agua 23°C	68.4	1025
55FA55F	515	206	26	283	0.35	180	1001	621	0.32	Bajo agua 23°C	57.4	1260
65FA55F	514	154	26	334	0.35	180	980	621	0.22	Bajo agua 23°C	45.9	1910
40FA10SF	514	257	51	206	0.35	180	1023	621	0.62	Bajo agua 23°C	75.4	810
50FA10SF	514	206	51	257	0.35	180	1001	621	0.50	Bajo agua 23°C	64.7	650
60FA10SF	514	154	51	309	0.35	180	908	621	0.40	Bajo agua 23°C	51.1	1215
PC	450	450	0	0	0.40	180	1166	640	1.80	Bajo agua 23°C	72.4	4570
50FA	450	225	0	225	0.40	180	1072	640	0.26	Bajo agua 23°C	41.9	3600
60FA	450	180	0	270	0.40	180	1053	640	0.21	Bajo agua 23°C	35.7	3200
70FA	450	135	0	315	0.40	180	1034	640	0.13	Bajo agua 23°C	31.7	2800
55F	451	428	23	0	0.40	180	1157	640	1.90	Bajo agua 23°C	75.3	1440
10SF	450	405	45	0	0.40	180	1147	640	2.10	Bajo agua 23°C	79.0	659
45FA55F	451	225	23	203	0.40	180	1072	640	0.43	Bajo agua 23°C	51.5	1380
55FA55F	451	180	23	248	0.40	180	1053	640	0.34	Bajo agua 23°C	39.2	1720
65FA55F	451	135	23	293	0.40	180	1034	640	0.28	Bajo agua 23°C	28.2	2045
40FA10SF	450	225	45	180	0.40	180	1072	640	0.64	Bajo agua 23°C	60.3	900
50FA10SF	450	180	45	225	0.40	180	1053	640	0.52	Bajo agua 23°C	49.1	945
60FA10SF	450	135	45	270	0.40	180	1034	640	0.46	Bajo agua 23°C	33.1	1550

Tabla 32, Diseño de Mezcla por W. Wongkeo y otros, 2014.

Muestra	Total de material cementante	Cemento CPP (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (kg/m ³)	Aditivo VMA (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28 días (coulomb)
SCC10	550	495	55	0.3	165	836	907	6.60	0.55	Bajo agua 27°C	78.97	1812
SCC30	550	385	165	0.3	165	818	888	7.15	1.1	Bajo agua 27°C	88.06	923
SCC50	550	275	275	0.3	165	800	869	7.15	1.1	Bajo agua 27°C	60.83	1312
SCC70	550	165	385	0.3	165	783	848	8.80	2.75	Bajo agua 27°C	44.21	3520

Tabla 33, Diseño de Mezcla por P. Dinakar, y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	Cemento Tipo IV (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (% del peso tmc)	Incluidor de aire (% del peso tmc)	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)
N1-0-0	380	380	0	0	0	0	0.43	164	850	1040	1.7	0.00	42.3	2766
N1-F15-0	380	323	0	57	0	0	0.43	164	850	1040	1.5	0.00	42.5	565
N1-F30-0	380	266	0	114	0	0	0.43	164	850	1040	1.2	0.00	32.9	597
N1-F15-0,04	380	323	0	57	0	0	0.43	164	850	1040	1.3	0.04	42.2	707
N1-S10-0	380	342	0	0	38	0	0.43	164	850	1040	1.4	0.00	51.5	465
N1-S20-0	380	304	0	0	76	0	0.43	164	850	1040	1.5	0.00	61.8	144
N1-S10-0,04	380	342	0	0	38	0	0.43	164	850	1040	1.5	0.04	50.1	503
N1-B12,5-0	380	332.5	0	0	0	47.5	0.43	164	850	1040	1.8	0.00	42.1	1572
N1-B25-0	380	285	0	0	0	95	0.43	164	850	1040	1.7	0.00	41.8	967
N1-F15-S10-0,04	380	285	0	57	38	0	0.43	164	850	1040	1.6	0.04	52.9	544
N1-0-0 (25)	380	380	0	0	0	0	0.43	164	850	1040	1.9	0.00	41.2	2312
N1-F15-0,04 (25)	380	323	0	57	0	0	0.43	164	850	1040	1.4	0.04	35.3	535
N1-S10-0,04 (25)	380	342	0	0	38	0	0.43	164	850	1040	1.5	0.04	49.3	297
N1-F15-S10-0,04 (25)	380	285	0	57	38	0	0.43	164	850	1040	1.5	0.04	50.5	302
H1-0-0	550	550	0	0	0	0	0.28	154	609	1142	1.8	0.00	57.9	1891
H1-F15-0,04	550	467.5	0	82.5	0	0	0.28	154	609	1142	1.7	0.04	63.3	1048
H1-S10-0,04	550	495	0	0	55	0	0.28	154	609	1142	1.7	0.04	71	95
H1-F15-S10-0,04	550	412.5	0	82.5	55	0	0.28	154	609	1142	1.6	0.04	58.2	79
N5-0-0	380	0	380	0	0	0	0.43	164	850	1040	1.2	0.00	38.2	3453
N5-F15-0,04	380	0	323	57	0	0	0.43	164	850	1040	0.6	0.04	32.5	2919
N5-S10-0,04	380	0	342	0	38	0	0.43	164	850	1040	0.8	0.04	43.5	2048
N5-B12,5-0	380	0	332.5	0	0	47.5	0.43	164	850	1040	1	0.00	37.6	2897

Tabla 34, Diseño de Mezcla por Hwan Oh, y otros, 2002.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I 42,5 (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	LP (kg/m ³)	BP (kg/m ³)	MP (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (% tmc)	Incluidor de aire (% tmc)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)
Control	550	550	0	0	0	0	0	0.33	182	869	778	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	78.89	1160
FA15	550	467	83	0	0	0	0	0.33	182	865	762	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	74.21	460
FA25	550	412	138	0	0	0	0	0.33	182	887	752	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	73.36	290
FA35	550	357	193	0	0	0	0	0.33	182	878	742	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	67.47	160
GBFS20	550	440	0	110	0	0	0	0.33	182	866	775	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	78.48	450
GBFS40	550	330	0	220	0	0	0	0.33	182	863	739	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	74.77	165
GBFS60	550	220	0	330	0	0	0	0.33	182	861	769	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	71.59	116
LP10	550	495	0	0	55	0	0	0.33	182	866	775	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	69.30	985
LP20	550	440	0	0	110	0	0	0.33	182	863	771	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	65.17	1190
LP30	550	385	0	0	165	0	0	0.33	182	860	768	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	60.21	1465
BP10	550	495	0	0	0	55	0	0.33	182	866	775	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	72.09	1058
BP20	550	440	0	0	0	110	0	0.33	182	963	772	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	65.91	1200
BP30	550	385	0	0	0	165	0	0.33	182	861	769	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	62.20	988
MP10	550	495	0	0	0	0	55	0.33	182	867	777	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	76.28	705
MP20	550	440	0	0	0	0	110	0.33	182	865	774	1.6	0.00	Bajo agua 20°C	73.47	680
MP30	550	385	0	0	0	0	165	0.33	182	863	775	1.6	0.04	Bajo agua 20°C	70.80	640

Tabla 35, , Diseño de Mezcla por M. Uysal, y otros, 2012

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I 42,5 (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Tipo de Curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
PC1	328	328	0	0.54	177	830	1000	0	Bajo agua 20°C	33.5	5900
100FA1	373	261	112	0.49	180	810	975	0	Bajo agua 20°C	41	2750
45FA1	373	261	112	0.46	172	815	980	0	Bajo agua 20°C	40.5	2300
10FA1	373	261	112	0.44	163	820	980	0	Bajo agua 20°C	46.5	650
PC2	362	362	0	0.48	175	800	970	0	Bajo agua 20°C	48.5	4250
100FA2	411	288	123	0.41	169	780	940	0	Bajo agua 20°C	46	1150
45FA2	411	288	123	0.42	172	785	945	0	Bajo agua 20°C	44	900
10FA2	411	288	123	0.42	172	790	950	0	Bajo agua 20°C	52	500
PC3	611	611	0	0.25	146	600	970	12.2	Bajo agua 20°C	79.5	1050
100FA3	694	486	208	0.25	162	555	895	13.9	Bajo agua 20°C	84	450
45FA3	694	486	208	0.30	153	565	905	13.9	Bajo agua 20°C	72.5	220
10FA3	694	486	208	0.22	142	570	915	13.9	Bajo agua 20°C	71	220

Tabla 36, Diseño de Mezcla por P. Chindaprasirt, y otros, 2007.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo II (kg/m ³)	Zeolita (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (% tmc)	Curado (días)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28 días (coulomb)
NZ (control)	350	350	0	0.5	175	870	870	0	28	Bajo Agua	38	6970
NZ15	350	297.5	52.5	0.5	175	870	870	0.4	28	Bajo Agua	36.6	1914
NZ30	350	245	105	0.5	175	870	870	1.2	28	Bajo Agua	28.7	572

Tabla 37, Diseño de Mezcla por Najimi, y otros, 2012

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos Nat (kg/m ³)	Áridos Finos RCA (kg/m ³)	Áridos Gruesos RCA (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28 días (coulomb)
0	493	493	0	0.35	173	659	0	925	Ver articulo	52.0	2120
0	493	419	74	0.35	173	648	0	910	Ver articulo	50.0	990
0	493	345	148	0.35	173	638	0	895	Ver articulo	43.5	300
30	493	493	0	0.35	173	446	191	925	Ver articulo	50.5	2090
30	493	419	74	0.35	173	439	188	910	Ver articulo	47.5	2000
30	493	345	148	0.35	173	432	185	895	Ver articulo	43.5	550
60	493	493	0	0.35	173	246	370	925	Ver articulo	50.0	2350
60	493	419	74	0.35	173	242	364	910	Ver articulo	47.5	2300
60	493	345	148	0.35	173	238	358	895	Ver articulo	47.0	1190
100	493	493	0	0.35	173	0	587	925	Ver articulo	40.5	1890
100	493	419	74	0.35	173	0	577	910	Ver articulo	44.0	1800
100	493	345	148	0.35	173	0	568	895	Ver articulo	36.5	800

Tabla 38, Diseño de Mezcla por J. Sim, y otros, 2011.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (% tmc)	Aditivo AE (% tmc)	Diff Coe. 28 días x10 ¹¹ (m ² /s)
NPC100-37	454	454	0	0	0	0.37	168	767	952	1	0.017	1.3
NPC100-42	400	400	0	0	0	0.42	168	787	976	0.9	0.015	1.5
NPC100-47	357	357	0	0	0	0.47	168	838	960	0.85	0.017	1.8
G30N70-37	454	318	0	136	0	0.37	168	762	946	0.8	0.018	0.93
G30N70-42	400	280	0	120	0	0.42	168	783	972	0.75	0.013	1.1
G30N70-47	357	250	0	107	0	0.47	168	835	956	0.65	0.015	1.2
G50N50-37	454	227	0	227	0	0.37	168	760	943	0.75	0.017	6.3
G50N50-42	400	200	0	200	0	0.42	168	780	969	0.7	0.0135	0.86
G50N50-47	357	178	0	179	0	0.47	168	832	953	0.6	0.015	1.1
F10N90-37	454	409	45	0	0	0.37	168	760	943	0.75	0.018	1.4
F10N90-42	400	360	40	0	0	0.42	168	780	969	0.9	0.021	1.5
F10N90-47	357	321	36	0	0	0.47	168	832	952	0.75	0.017	1.7
F20N80-37	454	363	91	0	0	0.37	168	752	934	0.75	0.018	1.3
F20N80-42	400	320	80	0	0	0.42	168	774	961	0.85	0.025	1.6
F20N80-47	357	286	71	0	0	0.47	168	826	946	0.7	0.017	1.9
F30N70-37	454	318	136	0	0	0.37	168	745	952	0.75	0.2	1.3
F30N70-42	400	280	120	0	0	0.42	168	768	953	0.75	0.015	1.6
F30N70-47	357	250	107	0	0	0.47	168	820	939	0.65	0.019	2.2
F10S05-37	454	386	45	0	23	0.37	168	756	938	1	0.023	0.69
F10S05-42	400	340	40	0	20	0.42	168	777	965	0.9	0.021	0.78
F10S05-47	357	303	36	0	18	0.47	168	829	950	0.9	0.021	0.89
F20S05-37	454	340	91	0	23	0.37	168	749	929	0.9	0.023	0.6
F20S05-42	400	300	80	0	20	0.42	168	771	957	0.85	0.025	0.71
F20S05-47	357	268	71	0	18	0.47	168	810	927	0.9	0.025	0.88
G30S05-37	454	295	0	136	23	0.37	168	759	942	0.75	0.015	0.53
G30S05-42	400	260	0	120	20	0.42	168	765	949	0.75	0.015	0.58
G30S05-47	357	232	0	107	18	0.47	168	832	952	0.8	0.015	0.61
G35F15-37	454	227	68	159	0	0.37	168	751	932	0.65	0.014	0.5
G35F15-42	400	200	60	140	0	0.42	168	773	959	0.65	0.014	0.65
G35F15-47	357	178	54	125	0	0.47	168	804	921	0.7	0.014	0.88

Tabla 39, Diseño de Mezcla por Ha-Won Song, y otros, 2009.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo II/A-LL (kg/m ³)	Cemento Tipo I 52,5 (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	Coe. Dif. 128 días (m ² /s)	Coe. Dif. 28 días x EHE08 x10 ¹² (m ² /s)
VC20	315	315	0	0	0.60	189	981	841	1.4	Camara Humeda 100% 20°C	21.80	3.50E-11	7.48E-11
SCC20	465	315	0	150	0.65	205	900	771	8.0	Camara Humeda 100% 20°C	26.40	2.95E-11	6.31E-11
VC40	350	0	350	0	0.50	175	962	857	6.9	Camara Humeda 100% 20°C	50.80	8.60E-12	1.84E-11
SCC40	490	0	350	140	0.50	191	888	791	12.6	Camara Humeda 100% 20°C	49.60	9.40E-12	2.01E-11
VC60	450	0	450	0	0.36	164	751	108.8	5.9	Camara Humeda 100% 20°C	68.60	3.70E-12	7.91E-12
SCC60	520	0	450	70	0.40	189	884	793	13.5	Camara Humeda 100% 20°C	69.20	3.80E-12	8.12E-12

Tabla 40, Diseño de Mezcla por Assié, y otros, 2007

Muestra	Total de material cementante	Cemento CEMI (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	Coe. Dif. 28 días x10 ¹² (m ² /s)
A1	475	475	0	0	0	0.40	190	552	1174	Camara 20°C/95% HR	35.4	1.32E-11
A2	422	422	0	0	0	0.45	189.9	567	1204	Camara 20°C/95% HR	29.0	1.43E-11
A3	380	380	0	0	0	0.50	190	578	1229	Camara 20°C/95% HR	25.7	1.56E-11
A4	346	346	0	0	0	0.55	190.3	589	1249	Camara 20°C/95% HR	21.9	1.64E-11
A5	317	317	0	0	0	0.60	190.2	597	1269	Camara 20°C/95% HR	16.9	1.72E-11
A6	380	304	0	76	0	0.50	190	578	1269	Camara 20°C/95% HR	22.2	1.52E-11
A7	380	266	0	114	0	0.50	190	578	1269	Camara 20°C/95% HR	21.2	1.45E-11
A8	380	361	0	0	19	0.50	190	578	1269	Camara 20°C/95% HR	28.6	1.54E-12
A9	380	361	19	0	0	0.50	190	578	1269	Camara 20°C/95% HR	31.0	9.85E-12

Tabla 41, Diseño de Mezcla por Zhang, y otros, 2018

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo II/B-M 42,5 N (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	Diff Coe. 28 días x10 ¹² (m ² /s)
RM	350	350	0	175	0.60	210	1050	500	4.5	Bajo agua 20°C	62.3	2.18E-11
SCC1	350	326	24	175	0.60	210	1050	500	6	Bajo agua 20°C	62.9	6.58E-12
SCC2	350	313	37	175	0.60	210	1050	500	5	Bajo agua 20°C	67.2	4.79E-12
SCC3	350	301	49	175	0.60	210	1050	500	4.9	Bajo agua 20°C	73.4	2.61E-12
SCC4	350	280	70	175	0.60	210	1050	500	6	Bajo agua 20°C	74.9	1.42E-12
SCC5	374	350	24	151	0.56	210	1050	500	4.5	Bajo agua 20°C	67.6	5.86E-12
SCC6	387	350	37	138	0.54	210	1050	500	5.5	Bajo agua 20°C	81.2	3.62E-12
SCC7	399	350	49	126	0.52	210	1050	500	5.5	Bajo agua 20°C	79.8	2.47E-12
SCC8	420	350	70	105	0.50	210	1050	500	6.3	Bajo agua 20°C	91.00	7.70E-13

Tabla 42, Diseño de Mezcla por Badogiannis, y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 90 días (Coulomb)
SCC1	550	465	85	0.41	227.7	910	590	10.23	Bajo agua 31°C	35.19	662
SCC2	550	440	110	0.42	228.6	910	590	11.01	Bajo agua 32°C	33.15	649
SCC3	550	415	135	0.42	233.3	910	590	9.91	Bajo agua 32°C	31.47	594
SCC4	550	385	165	0.43	234.4	910	590	9.91	Bajo agua 33°C	30.66	634
SCC5	550	355	195	0.44	242.6	910	590	9.91	Bajo agua 32°C	29.62	610

Tabla 43, Diseño de Mezcla por R. Siddique, 2011.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I 42,5 (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Tipo de curado	Resistencia Cubo 28 días (Mpa)	Resistencia Cilíndrica 28 días (Mpa)	RCPT 28 días (Coulomb)
F	400	240	160	0	0	0.4	160	736	1104	6.36	Bajo agua 20°C	50.5	45.45	2500
L1	400	240	0	0	160	0.4	160	736	1104	6.36	Bajo agua 20°C	46	41.4	5600
L2	400	240	0	0	160	0.34	136	746	1118	8.18	Bajo agua 20°C	55.5	49.95	3650
L3	400	240	0	40	120	0.4	160	746	1104	6.36	Bajo agua 20°C	47.5	42.75	3600
F	400	240	160	0	0	0.4	160	736	1104	6.36	7d vapor 45°C, luego Bajo Agua	53.5	48.15	1100
L1	400	240	0	0	160	0.4	160	736	1104	6.36	7d vapor 45°C, luego Bajo Agua	44.5	40.05	5500
L2	400	240	0	0	160	0.34	136	746	1118	8.18	7d vapor 45°C, luego Bajo Agua	54.5	49.05	4900
L3	400	240	0	40	120	0.4	160	746	1104	6.36	7d vapor 45°C, luego Bajo Agua	48.5	43.65	3000

Tabla 44, Diseño de Mezcla por Z. Zhang, y otros, 2016.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo II (kg/m ³)	Zeolita (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (%)	Áridos Gruesos (%)	Aditivo SP (l/m ³)	Tipo de curado	Resistencia Cubo 28 días (Mpa)	Resistencia Cilíndrica 28 días (Mpa)	Coe. Dif. 270 días x 10 ¹¹ (m ² /s)	Coe. Dif. 28 días x EHE x 10 ¹¹ (m ² /s)
C1	400	400	0	0	0	0.35	140	38	68	0.35	Humedad	34.5	31.05	0.575	1.23
C2	400	400	0	0	0	0.40	160	38	68	0.20	Humedad	27	24.3	1	2.14
C3	400	400	0	0	0	0.45	180	38	68	0.10	Humedad	23.5	21.15	1.3	2.78
C4	400	400	0	0	0	0.50	200	38	68	0.00	Humedad	17.5	15.75	1.93	4.13
ZE1	400	360	40	0	0	0.40	160	38	68	4.00	Humedad	38	34.2	0.4	0.86
ZE2	400	320	80	0	0	0.40	160	38	68	8.00	Humedad	26	23.4	0.375	0.80
ZE3	400	280	120	0	0	0.40	160	38	68	14.00	Humedad	22	19.8	0.35	0.75
MK1	400	380	0	20	0	0.40	160	38	68	1.20	Humedad	32	28.8	0.325	0.69
MK2	400	370	0	30	0	0.40	160	38	68	1.40	Humedad	34	30.6	0.35	0.75
MK3	400	360	0	40	0	0.40	160	38	68	1.60	Humedad	39	35.1	0.2	0.43
SF1	400	380	0	0	20	0.40	160	38	68	0.80	Humedad	33.5	30.15	0.325	0.69
SF2	400	360	0	0	40	0.40	160	38	68	1.40	Humedad	41.5	37.35	0.2	0.43
SF3	400	340	0	0	60	0.40	160	38	68	1.60	Humedad	38	34.2	0.35	0.75

Tabla 45, Diseño de Mezcla por Valipour, y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (% Cem)	Tipo de curado	Resistencia Cubo 28 días (Mpa)	Resistencia Cilíndrica 28 días (Mpa)	Coe. Dif. 7 días (m ² /s)	Coe. Dif. 28 días norma EHE08 (m ² /s)
HP-CC	485	485	0	0	0	0.30	145	689	1148	1.1	Bajo agua 20°C	81.00	72.90	3.13E-11	1.5625E-23
HP-SF7.5	485	449	36	0	0	0.30	145	673	1141	1.35	Bajo agua 20°C	88.86	79.97	8.75E-12	4.375E-24
HP-SF15	485	412	73	0	0	0.30	145	652	1144	1.75	Bajo agua 20°C	97.85	88.06	7.50E-12	3.75E-24
HP-BS50	486	243	0	243	0	0.30	145	676	1166	1.75	Bajo agua 20°C	79.87	71.88	1.00E-11	5E-24
HP-BS70	486	146	0	340	0	0.30	145	665	1167	3	Bajo agua 20°C	63.10	56.79	7.50E-12	3.75E-24
HP-SF+BS50	485	206	36	243	0	0.30	145	657	1114	2.5	Bajo agua 20°C	85.70	77.13	1.25E-12	6.25E-25
HP-FA20	485	388	0	0	97	0.30	145	668	1152	1.75	Bajo agua 20°C	64.40	57.96	1.13E-11	5.625E-24
HP-FA40	485	291	0	0	194	0.30	145	646	1154	1.75	Bajo agua 20°C	46.98	42.28	1.50E-11	7.5E-24
HP-SF+FA20	485	352	36	0	97	0.30	145	652	1144	1.75	Bajo agua 20°C	76.38	68.74	7.50E-12	3.75E-24
HP-SF+FA40	484	255	35	0	194	0.30	145	633	1151	2.25	Bajo agua 20°C	61.56	55.40	5.00E-12	2.5E-24

Tabla 46, Diseño de Mezcla por Elahi, y otros, 2010.

Muestra	Total de material cementicio	Cemento Tipo I (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo de curado	RCPT 28 días (Coulomb)
4045SF0	400	400	0	0.45	180	1037	692	Bajo agua 23°C	5706
4035SF0	400	400	0	0.35	140	1099	732	Bajo agua 23°C	3807
3545SF0	350	350	0	0.45	157.5	1096	731	Bajo agua 23°C	4802
3535SF0	350	350	0	0.35	122.5	1150	766	Bajo agua 23°C	3158
4045SF7.5	400	370	30	0.45	180	1037	692	Bajo agua 23°C	1918
4035SF7.5	400	370	30	0.35	140	1099	732	Bajo agua 23°C	1262
3545SF7.5	350	323.75	26.25	0.45	157.5	1096	731	Bajo agua 23°C	1772
3535SF7.5	350	323.75	26.25	0.35	122.5	1150	766	Bajo agua 23°C	1243
4045SF15	400	340	60	0.45	180	1037	692	Bajo agua 23°C	1143
4035SF15	400	340	60	0.35	140	1099	732	Bajo agua 23°C	796
3545SF15	350	297.5	52.5	0.45	157.5	1096	731	Bajo agua 23°C	1062
3535SF15	350	297.5	52.5	0.35	122.5	1150	766	Bajo agua 23°C	750

Tabla 47, Diseño de Mezcla por Pilvar, y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Áridos polvo cuarzo (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Fibras Metalicas (% Vol horm.)	Tipo de curado	Resistencia Cilíndrica 28días (Mpa)	RCPT (coulomb)
G-0	1104	960	144	0	0.15	163	902	115	115	34	2			143
G-1	1104	960	144	0	0.15	163	902	115	115	34	2	Ver articulo	116	134.1
G-2	1104	960	144	0	0.15	163	902	115	115	34	2			139.5
G-20	1104	768	144	192	0.15	163	902	115	115	34	2			104.4
G-21	1104	768	144	192	0.15	163	902	115	115	34	2	Ver articulo	121	92.7
G-22	1104	768	144	192	0.15	163	902	115	115	34	2			104.4
G-40	1104	576	144	384	0.15	163	902	115	115	34	2			75.6
G-41	1104	576	144	384	0.15	163	902	115	115	34	2	Ver articulo	118	86.4
G-42	1104	576	144	384	0.15	163	902	115	115	34	2			63
G-60	1104	384	144	576	0.15	163	902	115	115	34	2			79.2
G-61	1104	384	144	576	0.15	163	902	115	115	34	2	Ver articulo	110	87.3
G-62	1104	384	144	576	0.15	163	902	115	115	34	2			61.2
G-80	1104	192	144	768	0.15	163	902	115	115	34	2			69.2
G-81	1104	192	144	768	0.15	163	902	115	115	34	2	Ver articulo	102	72.9
G-82	1104	192	144	768	0.15	163	902	115	115	34	2			98.1

Tabla 48, Diseño de Mezcla por Ganesh, y otros, 2019.

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo de curado	RCPT 28días (coulomb)
C0-30	533	533	0	0.30	155	790	956	5	Bajo agua 23°C	2548
C0-35	457	457	0	0.35	156	856	956	4	Bajo agua 23°C	2871
C0-40	400	400	0	0.40	160	915	956	0	Bajo agua 23°C	3252
C0-45	356	356	0	0.45	160	953	956	0	Bajo agua 23°C	3785
C0-50	320	320	0	0.50	160	983	956	0	Bajo agua 23°C	4250
C0-55	291	291	0	0.55	160	1008	956	0	Bajo agua 23°C	5187
C0-60	267	267	0	0.60	160	1028	956	0	Bajo agua 23°C	5661
C0-65	246	246	0	0.65	160	1046	956	0	Bajo agua 23°C	6285
F2-35	457	366	91	0.34	156	825	956	4	Bajo agua 23°C	1062
F2-45	355	284	71	0.45	160	928	956	0	Bajo agua 23°C	1564
F2-55	291	233	58	0.55	160	987	956	0	Bajo agua 23°C	1877
F2-65	246	197	49	0.65	160	1028	956	0	Bajo agua 23°C	2580
F3-35	457	320	137	0.34	156	809	956	4	Bajo agua 23°C	886
F3-45	356	249	107	0.45	160	908	956	0	Bajo agua 23°C	1137
F3-55	291	204	87	0.55	160	971	956	0	Bajo agua 23°C	1370
F3-65	246	172	74	0.65	160	1015	956	0	Bajo agua 23°C	1874

Tabla 49, Diseño de Mezcla por Huang, y otros, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento I (kg/m ³)	Cemento II/A-M (kg/m ³)	Cemento II/B-M (kg/m ³)	Cemento III/A (kg/m ³)	Cemento V/A(kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Tipo de curado	RCPT 28días (coulomb)
1	308.1	308.1	0	0	0	0	0.65	200.3	729.4	1174.3	0.77	UC	7441
2	302.8	0	302.8	0	0	0	0.65	196.8	715.7	1152.2	0.76	UC	8610
3	304.7	0	0	304.7	0	0	0.65	198.1	716.8	1154	0.76	UC	7694
4	304.7	0	0	0	304.7	0	0.65	198.1	722.3	1163	0.77	UC	8883
5	306.4	0	0	0	0	306.4	0.65	199.2	718.1	1156.2	0.77	UC	6249
6	405.4	405.4	0	0	0	0	0.45	182.4	700.5	1127.8	3.04	UC	5801
7	399.6	0	399.6	0	0	0	0.45	179.8	689	1109.5	3.00	UC	5427
8	399.5	0	0	399.5	0	0	0.45	179.8	684.2	1101.6	3.00	UC	4286
9	400.7	0	0	0	400.7	0	0.45	180.3	687.2	1106.4	4.01	UC	4186
10	399.8	0	0	0	0	399.8	0.45	179.9	680.7	1095.9	4.00	UC	5067
11	308.1	308.1	0	0	0	0	0.65	200.3	729.4	1174.3	0.77	CC	7118
12	302.8	0	302.8	0	0	0	0.65	196.8	715.7	1152.2	0.76	CC	6933
13	304.7	0	0	304.7	0	0	0.65	198.1	716.8	1154	0.76	CC	5608
14	306.4	0	0	0	306.4	0	0.65	199.2	722.3	1163	0.77	CC	4382
15	306.4	0	0	0	0	306.4	0.65	199.2	718.1	1156.2	0.77	CC	2395
16	405.4	405.4	0	0	0	0	0.45	182.4	700.5	1127.8	3.04	CC	4869
17	399.6	0	399.6	0	0	0	0.45	179.8	689	1109.5	3.00	CC	5230
18	399.5	0	0	399.5	0	0	0.45	179.8	684.2	1101.6	3.00	CC	3475
19	400.7	0	0	0	400.7	0	0.45	180.3	687.2	1106.4	4.01	CC	3083
20	399.8	0	0	0	0	399.8	0.45	179.9	680.7	1095.9	4.00	CC	1922
21	308.1	308.1	0	0	0	0	0.65	200.3	729.4	1174.3	0.77	WC	6828
22	302.8	0	302.8	0	0	0	0.65	196.8	715.7	1152.2	0.76	WC	6425
23	304.7	0	0	304.7	0	0	0.65	198.1	716.8	1154	0.76	WC	4922
24	306.4	0	0	0	306.4	0	0.65	199.2	722.3	1163	0.77	WC	3279
25	306.4	0	0	0	0	306.4	0.65	199.2	718.1	1156.2	0.77	WC	1384
26	405.4	405.4	0	0	0	0	0.45	182.4	700.5	1127.8	3.04	WC	4575
27	399.6	0	399.6	0	0	0	0.45	179.8	689	1109.5	3.00	WC	4786
28	399.5	0	0	399.5	0	0	0.45	179.8	684.2	1101.6	3.00	WC	2998
29	400.7	0	0	0	400.7	0	0.45	180.3	687.2	1106.4	4.01	WC	1911
30	399.8	0	0	0	0	399.8	0.45	179.9	680.7	1095.9	4.00	WC	1231

Tabla 50, Diseño de Mezcla por Güneysisi, y otros, 2009.

Muestra	Total de material cementicio	Cemento Tipo I (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Tipo de curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
CS	380	380	0	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	38.80	1885
CS-R1	380	361	19	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	34.50	1070
CS-R2	380	342	38	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	37.00	845
CS-R3	380	323	57	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	39.15	585
CS-R4	380	304	76	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	37.20	505
CS-R5	380	285	95	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	35.50	750
CS-R6	380	266	114	0	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	33.90	1000
CS-M1	380	361	0	19	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	36.10	435
CS-M2	380	342	0	38	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	39.10	380
CS-M3	380	323	0	57	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	44.80	300
CS-M4	380	304	0	76	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	43.70	420
CS-M5	380	285	0	95	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	38.20	745
CS-M6	380	266	0	114	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	36.20	900
CS-R+M1	380	342	19	19	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	35.60	670
CS-R+M2	380	304	38	38	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	38.45	390
CS-R+M3	380	266	57	57	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	42.60	205
CS-R+M4	380	228	76	76	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	43.00	195
CS-R+M5	380	190	95	95	0.5	190	755	685	7.6	Bajo agua	37.70	800

Tabla 51, Diseño de Mezcla por Kannan V, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo VMA (g/kg tmc)	Aditivo AEA (g/kg tmc)	Aditivo HRWR (g/kg tmc)	Tipo de curado	RCPT (Coulomb)
386-0.35	385.6	316.2	57.8	11.6	0.35	135	866.2	1005	7.81	0.00	12.66	Bajo agua	1125
386-0.40	385.6	316.2	57.8	11.6	0.40	154	842.5	978.3	9.11	0.92	10.20	Bajo agua	1924
386-0.45	385.6	316.2	57.8	11.6	0.45	174	819.9	950.4	9.11	1.22	4.64	Bajo agua	3322
445-0.35	444.9	364.9	66.7	13.3	0.35	156	817.5	948.1	9.11	0.45	7.03	Bajo agua	1774
445-0.40	444.9	364.9	66.7	13.3	0.40	178	790.2	916.6	9.11	2.26	5.63	Bajo agua	2737
445-0.45	444.9	364.9	66.7	13.3	0.45	200	763.5	885.8	9.11	3.20	3.38	Bajo agua	4900
504-0.35	504.2	413.5	75.6	15.1	0.35	176	768.3	891.1	9.11	0.63	4.92	Bajo agua	2775
504-0.40	504.2	413.5	75.6	15.1	0.40	202	737.4	855.5	9.11	2.78	3.16	Bajo agua	4350
504-0.45	504.2	413.5	75.6	15.1	0.45	227	707.2	819.9	9.11	3.48	1.97	Bajo agua	6208
564-0.35	563.6	462.2	84.5	16.9	0.35	197	719.1	834.1	9.11	0.94	3.69	Bajo agua	4180
564-0.40	563.6	462.2	84.5	16.9	0.40	225	684.6	794.4	9.11	3.02	2.88	Bajo agua	6130
564-0.45	563.6	462.2	84.5	16.9	0.45	254	650.8	754.6	9.11	3.48	1.20	Bajo agua	6880
386-0.35	385.6	316.2	57.8	11.6	0.35	135	866.2	1005	7.81	0.00	12.66	Bajo agua	1335
386-0.40	385.6	316.2	57.8	11.6	0.40	154	842.5	978.3	9.11	0.92	10.20	Bajo agua	1978
386-0.45	385.6	316.2	57.8	11.6	0.45	174	819.9	950.4	9.11	1.22	4.64	Bajo agua	3392
445-0.35	444.9	364.9	66.7	13.3	0.35	156	817.5	948.1	9.11	0.45	7.03	Bajo agua	1704
445-0.40	444.9	364.9	66.7	13.3	0.40	178	790.2	916.6	9.11	2.26	5.63	Bajo agua	2897
445-0.45	444.9	364.9	66.7	13.3	0.45	200	763.5	885.8	9.11	3.20	3.38	Bajo agua	4820
504-0.35	504.2	413.5	75.6	15.1	0.35	176	768.3	891.1	9.11	0.63	4.92	Bajo agua	2715
504-0.40	504.2	413.5	75.6	15.1	0.40	202	737.4	855.5	9.11	2.78	3.16	Bajo agua	4286
504-0.45	504.2	413.5	75.6	15.1	0.45	227	707.2	819.9	9.11	3.48	1.97	Bajo agua	6150
564-0.35	563.6	462.2	84.5	16.9	0.35	197	719.1	834.1	9.11	0.94	3.69	Bajo agua	4228
564-0.40	563.6	462.2	84.5	16.9	0.40	225	684.6	794.4	9.11	3.02	2.88	Bajo agua	5845
564-0.45	563.6	462.2	84.5	16.9	0.45	254	650.8	754.6	9.11	3.48	1.20	Bajo agua	6990
386-0.35	385.6	316.2	57.8	11.6	0.35	135	866.2	1005	7.81	0.00	12.66	Bajo agua	1186
386-0.40	385.6	316.2	57.8	11.6	0.40	154	842.5	978.3	9.11	0.92	10.20	Bajo agua	1924
386-0.45	385.6	316.2	57.8	11.6	0.45	174	819.9	950.4	9.11	1.22	4.64	Bajo agua	3448
445-0.35	444.9	364.9	66.7	13.3	0.35	156	817.5	948.1	9.11	0.45	7.03	Bajo agua	1762
445-0.40	444.9	364.9	66.7	13.3	0.40	178	790.2	916.6	9.11	2.26	5.63	Bajo agua	2823
445-0.45	444.9	364.9	66.7	13.3	0.45	200	763.5	885.8	9.11	3.20	3.38	Bajo agua	4739
504-0.35	504.2	413.5	75.6	15.1	0.35	176	768.3	891.1	9.11	0.63	4.92	Bajo agua	2805
504-0.40	504.2	413.5	75.6	15.1	0.40	202	737.4	855.5	9.11	2.78	3.16	Bajo agua	4350
504-0.45	504.2	413.5	75.6	15.1	0.45	227	707.2	819.9	9.11	3.48	1.97	Bajo agua	6175
564-0.35	563.6	462.2	84.5	16.9	0.35	197	719.1	834.1	9.11	0.94	3.69	Bajo agua	3980
564-0.40	563.6	462.2	84.5	16.9	0.40	225	684.6	794.4	9.11	3.02	2.88	Bajo agua	5876
564-0.45	563.6	462.2	84.5	16.9	0.45	254	650.8	754.6	9.11	3.48	1.20	Bajo agua	6919
386-0.35	385.6	316.2	57.8	11.6	0.35	135	866.2	1005	7.81	0.00	12.66	Bajo agua	1315
386-0.40	385.6	316.2	57.8	11.6	0.40	154	842.5	978.3	9.11	0.92	10.20	Bajo agua	2180
386-0.45	385.6	316.2	57.8	11.6	0.45	174	819.9	950.4	9.11	1.22	4.64	Bajo agua	3510
445-0.35	444.9	364.9	66.7	13.3	0.35	156	817.5	948.1	9.11	0.45	7.03	Bajo agua	1613
445-0.40	444.9	364.9	66.7	13.3	0.40	178	790.2	916.6	9.11	2.26	5.63	Bajo agua	3001
445-0.45	444.9	364.9	66.7	13.3	0.45	200	763.5	885.8	9.11	3.20	3.38	Bajo agua	5138
504-0.35	504.2	413.5	75.6	15.1	0.35	176	768.3	891.1	9.11	0.63	4.92	Bajo agua	2842
504-0.40	504.2	413.5	75.6	15.1	0.40	202	737.4	855.5	9.11	2.78	3.16	Bajo agua	4310
504-0.45	504.2	413.5	75.6	15.1	0.45	227	707.2	819.9	9.11	3.48	1.97	Bajo agua	6089
564-0.35	563.6	462.2	84.5	16.9	0.35	197	719.1	834.1	9.11	0.94	3.69	Bajo agua	3989
564-0.40	563.6	462.2	84.5	16.9	0.40	225	684.6	794.4	9.11	3.02	2.88	Bajo agua	5912
564-0.45	563.6	462.2	84.5	16.9	0.45	254	650.8	754.6	9.11	3.48	1.20	Bajo agua	6999
386-0.35	385.6	316.2	57.8	11.6	0.35	135	866.2	1005	7.81	0.00	12.66	Bajo agua	1218
386-0.40	385.6	316.2	57.8	11.6	0.40	154	842.5	978.3	9.11	0.92	10.20	Bajo agua	2001
386-0.45	385.6	316.2	57.8	11.6	0.45	174	819.9	950.4	9.11	1.22	4.64	Bajo agua	3498
445-0.35	444.9	364.9	66.7	13.3	0.35	156	817.5	948.1	9.11	0.45	7.03	Bajo agua	1853
445-0.40	444.9	364.9	66.7	13.3	0.40	178	790.2	916.6	9.11	2.26	5.63	Bajo agua	2950
445-0.45	444.9	364.9	66.7	13.3	0.45	200	763.5	885.8	9.11	3.20	3.38	Bajo agua	4952
504-0.35	504.2	413.5	75.6	15.1	0.35	176	768.3	891.1	9.11	0.63	4.92	Bajo agua	2750
504-0.40	504.2	413.5	75.6	15.1	0.40	202	737.4	855.5	9.11	2.78	3.16	Bajo agua	4253
504-0.45	504.2	413.5	75.6	15.1	0.45	227	707.2	819.9	9.11	3.48	1.97	Bajo agua	6214
564-0.35	563.6	462.2	84.5	16.9	0.35	197	719.1	834.1	9.11	0.94	3.69	Bajo agua	3950
564-0.40	563.6	462.2	84.5	16.9	0.40	225	684.6	794.4	9.11	3.02	2.88	Bajo agua	6007
564-0.45	563.6	462.2	84.5	16.9	0.45	254	650.8	754.6	9.11	3.48	1.20	Bajo agua	6821
386-0.35	385.6	316.2	57.8	11.6	0.35	135	866.2	1005	7.81	0.00	12.66	Bajo agua	1220
386-0.40	385.6	316.2	57.8	11.6	0.40	154	842.5	978.3	9.11	0.92	10.20	Bajo agua	1950
386-0.45	385.6	316.2	57.8	11.6	0.45	174	819.9	950.4	9.11	1.22	4.64	Bajo agua	3942
445-0.35	444.9	364.9	66.7	13.3	0.35	156	817.5	948.1	9.11	0.45	7.03	Bajo agua	1685
445-0.40	444.9	364.9	66.7	13.3	0.40	178	790.2	916.6	9.11	2.26	5.63	Bajo agua	3517
445-0.45	444.9	364.9	66.7	13.3	0.45	200	763.5	885.8	9.11	3.20	3.38	Bajo agua	4895
504-0.35	504.2	413.5	75.6	15.1	0.35	176	768.3	891.1	9.11	0.63	4.92	Bajo agua	2814
504-0.40	504.2	413.5	75.6	15.1	0.40	202	737.4	855.5	9.11	2.78	3.16	Bajo agua	4320
504-0.45	504.2	413.5	75.6	15.1	0.45	227	707.2	819.9	9.11	3.48	1.97	Bajo agua	6280
564-0.35	563.6	462.2	84.5	16.9	0.35	197	719.1	834.1	9.11	0.94	3.69	Bajo agua	4091
564-0.40	563.6	462.2	84.5	16.9	0.40	225	684.6	794.4	9.11	3.02	2.88	Bajo agua	5987
564-0.45	563.6	462.2	84.5	16.9	0.45	254	650.8	754.6	9.11	3.48	1.20	Bajo agua	6790

Tabla 52, Diseño de Mezcla por Najimi, y otros, 2019.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	Filler calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo de Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)
C-0,45	400	400	0	0.45	180	788	1044	Tipo 1	53.00	3200
C-0,45	400	400	0	0.45	180	788	1044	Tipo 2	51.50	3450
C-0,45	400	400	0	0.45	180	788	1044	Tipo 3	50.25	3800
L1-0,45	400	368	32	0.45	180	788	1044	Tipo 1	50.50	3000
L1-0,45	400	368	32	0.45	180	788	1044	Tipo 2	51.00	3100
L1-0,45	400	368	32	0.45	180	788	1044	Tipo 3	48.00	3450
L2-0,45	400	336	64	0.45	180	788	1044	Tipo 1	47.00	3500
L2-0,45	400	336	64	0.45	180	788	1044	Tipo 2	45.50	3800
L2-0,45	400	336	64	0.45	180	788	1044	Tipo 3	43.75	4200
L3-0,45	400	304	96	0.45	180	788	1044	Tipo 1	43.25	4100
L3-0,45	400	304	96	0.45	180	788	1044	Tipo 2	40.50	4500
L3-0,45	400	304	96	0.45	180	788	1044	Tipo 3	37.75	4900
L1-0,43	400	368	32	0.43	172	792	1051	Tipo 1	52.50	2650
L1-0,43	400	368	32	0.43	172	792	1051	Tipo 2	50.50	2950
L1-0,43	400	368	32	0.43	172	792	1051	Tipo 3	50.75	3200
L2-0,39	400	336	64	0.39	156	799	1060	Tipo 1	54.25	2450
L2-0,39	400	336	64	0.39	156	799	1060	Tipo 2	52.75	2700
L2-0,39	400	336	64	0.39	156	799	1060	Tipo 3	51.25	2950
L3-0,35	400	304	96	0.35	140	806	1069	Tipo 1	52.25	2250
L3-0,35	400	304	96	0.35	140	806	1069	Tipo 2	53.50	2700
L3-0,35	400	304	96	0.35	140	806	1069	Tipo 3	50.25	3300

Tabla 53, Diseño de Mezcla por Sun, y otros, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Aditivo SP (%)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Resistencia Cubo 28días (Mpa)	Resistencia Cilíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Control	420	420	0	0	0.38	159.6	0.44	876	876	64.0	57.6	4900
SF-2,5	420	409.5	0	10.5	0.38	159.6	0.48	874	874	73.0	65.7	2300
SF-5	420	399	0	21	0.38	159.6	0.51	872	872	76.5	68.9	1000
SF-7,5	420	388.5	0	31.5	0.38	159.6	0.54	870	870	48.0	43.2	700
SF-10	420	378	0	42	0.38	159.6	0.56	869	869	80.0	72.0	600
SL-15	420	357	63	0	0.38	159.6	0.4	873	873	61.5	55.4	3950
SL-30	420	294	126	0	0.38	159.6	0.37	870	870	54.0	48.6	2600
SL-50	420	210	210	0	0.38	159.6	0.33	866	866	39.0	35.1	2100
SL 15-SF2,5	420	346.5	63	10.5	0.38	159.6	0.42	872	872	63.0	56.7	1400
SL 15-SF5	420	336	63	21	0.38	159.6	0.44	870	870	66.0	59.4	1350
SL 15-SF7,5	420	325.5	63	31.5	0.38	159.6	0.46	868	868	67.0	60.3	700
SL 30-SF2,5	420	283.5	126	10.5	0.38	159.6	0.38	869	869	56.0	50.4	135
SL 30-SF5	420	273	126	21	0.38	159.6	0.4	867	867	52.0	46.8	1000
SL 30-SF7,5	420	262.5	126	31.5	0.38	159.6	0.42	865	865	56.0	50.4	750
SL 50-SF2,5	420	199.5	210	10.5	0.38	159.6	0.34	865	865	36.5	32.9	900
SL 50-SF5	420	189	210	21	0.38	159.6	0.36	863	863	40.0	36.0	750
SL 50-SF7,5	420	178.5	210	31.5	0.38	159.6	0.38	861	861	39.0	35.1	700

Tabla 54, Diseño de Mezcla por Reza Bagheri, y otros, 2012.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Zeolita (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Curado (días)	RCPT 28días (Coulomb)
OPC	400	400	0	0	0	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	2869
SF 20	400	380	0	20	0	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1043
SF 40	400	360	0	40	0	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	393
NZ40	400	360	0	0	0	40	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	2337
NZ60	400	340	0	0	0	60	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1976
FA 40	400	360	0	0	40	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1880
FA 80	400	320	0	0	80	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1748
FA 120	400	280	0	0	120	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1581
GBFS 60	400	340	60	0	0	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	3039
GBFS 100	400	300	100	0	0	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1895
GBFS 140	400	260	140	0	0	0	0.42	168	2.4	700	1150	Bajo agua	1671
OPC	450	450	0	0	0	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	2659
SF 22,5	450	427.5	0	22.5	0	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	794
SF 45	450	405	0	45	0	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	293
NZ 45	450	405	0	0	0	45	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	2103
NZ 67,5	450	382.5	0	0	0	67.5	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	1786
FA 45	450	405	0	0	45	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	1844
FA 90	450	360	0	0	90	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	1495
FA135	450	315	0	0	135	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	828
GBFS 67,5	450	382.5	67.5	0	0	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	2759
GBFS 112,5	450	337.5	112.5	0	0	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	1797
GBFS 157,5	450	292.5	157.5	0	0	0	0.36	162	3.6	690	1100	Bajo agua	812
OPC	500	500	0	0	0	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	2524
SF 25	500	475	0	25	0	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	583
SF 50	500	450	0	50	0	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	276
NZ 50	500	450	0	0	0	50	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	1935
NZ 75	500	425	0	0	0	75	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	1698
FA 50	500	450	0	0	50	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	1795
FA 100	500	400	0	0	100	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	1353
FA 150	500	350	0	0	150	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	598
GBFS 75	500	425	75	0	0	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	2629
GBFS 125	500	375	125	0	0	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	1679
GBFS 175	500	325	175	0	0	0	0.32	160	6.0	680	1060	Bajo agua	495
OPC	550	550	0	0	0	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	2361
SF 27,5	550	522.5	0	27.5	0	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	483
SF 55	550	495	0	55	0	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	224
NZ 55	550	495	0	0	0	55	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	1770
NZ 82,5	550	467.5	0	0	0	82.5	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	1459
FA 55	550	495	0	0	55	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	1732
FA 120	550	440	0	0	110	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	1083
FA 165	550	385	0	0	165	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	459
GBFS 82,5	550	467.5	82.5	0	0	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	2352
GBFS 137,5	550	412.5	137.5	0	0	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	1535
GBFS 192,5	550	357.5	192.5	0	0	0	0.28	154	8.8	660	1050	Bajo agua	335

Tabla 55, Diseño de Mezcla por Feng, y otros, 2002.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m³)	CCA (kg/m³)	Escoria (kg/m³)	CV (kg/m³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m³)	Aditivo SP (%)	Áridos Finos (kg/m³)	Áridos Gruesos (kg/m³)	Tipo de Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
REF	488	0	488	0	0	0.35	171	0.2	632	1076	Ver Articulo	40.2	1600
REF	359	0	359	0	0	0.5	180	0	739	1055	Ver Articulo	32.8	2650
REF	284	0	284	0	0	0.65	185	0	802	1043	Ver Articulo	20.4	3450
REF	488	0	488	0	0	0.35	171	0.2	632	1076	Ver Articulo	45.8	1100
REF	359	0	359	0	0	0.5	180	0	739	1055	Ver Articulo	40.7	1850
REF	284	0	284	0	0	0.65	185	0	802	1043	Ver Articulo	24.1	2900
REF	488	0	488	0	0	0.35	171	0.2	632	1076	Ver Articulo	53.7	1050
REF	359	0	359	0	0	0.5	180	0	739	1055	Ver Articulo	47.3	1500
REF	284	0	284	0	0	0.65	185	0	802	1043	Ver Articulo	27.6	1800
10RHA	488	49	439	0	0	0.35	171	0.5	614	1076	Ver Articulo	49.9	600
10RHA	359	36	323	0	0	0.5	180	0.2	726	1055	Ver Articulo	34.2	1300
10RHA	283	28	255	0	0	0.65	184	0	791	1043	Ver Articulo	19.6	2200
10RHA	488	49	439	0	0	0.35	171	0.5	614	1076	Ver Articulo	60.1	600
10RHA	359	36	323	0	0	0.5	180	0.2	726	1055	Ver Articulo	43.2	1100
10RHA	283	28	255	0	0	0.65	184	0	791	1043	Ver Articulo	26	2000
10RHA	488	49	439	0	0	0.35	171	0.5	614	1076	Ver Articulo	68.1	500
10RHA	359	36	323	0	0	0.5	180	0.2	726	1055	Ver Articulo	46.9	800
10RHA	283	28	255	0	0	0.65	184	0	791	1043	Ver Articulo	31.7	850
20RHA	488	98	390	0	0	0.35	171	0.95	596	1076	Ver Articulo	62	550
20RHA	359	72	287	0	0	0.5	180	0.5	713	1055	Ver Articulo	42.3	850
20RHA	284	57	227	0	0	0.65	185	0.3	781	1043	Ver Articulo	20.1	1500
20RHA	488	98	390	0	0	0.35	171	0.95	596	1076	Ver Articulo	68.2	500
20RHA	359	72	287	0	0	0.5	180	0.5	713	1055	Ver Articulo	47.7	600
20RHA	284	57	227	0	0	0.65	185	0.3	781	1043	Ver Articulo	24.5	1200
20RHA	488	98	390	0	0	0.35	171	0.95	596	1076	Ver Articulo	72	300
20RHA	359	72	287	0	0	0.5	180	0.5	713	1055	Ver Articulo	52.3	400
20RHA	284	57	227	0	0	0.65	185	0.3	781	1043	Ver Articulo	33.2	700
30RHA	488	146	342	0	0	0.35	171	1.95	579	1076	Ver Articulo	58.7	400
30RHA	359	108	251	0	0	0.5	180	1.05	700	1055	Ver Articulo	41.2	850
30RHA	284	85	199	0	0	0.65	185	0.7	771	1043	Ver Articulo	21.9	1300
30RHA	488	146	342	0	0	0.35	171	1.95	579	1076	Ver Articulo	61.3	350
30RHA	359	108	251	0	0	0.5	180	1.05	700	1055	Ver Articulo	44.9	550
30RHA	284	85	199	0	0	0.65	185	0.7	771	1043	Ver Articulo	23.2	1250
30RHA	488	146	342	0	0	0.35	171	1.95	579	1076	Ver Articulo	67.4	250
30RHA	359	108	251	0	0	0.5	180	1.05	700	1055	Ver Articulo	50.1	350
30RHA	284	85	199	0	0	0.65	185	0.7	771	1043	Ver Articulo	29.9	550
35FA	488	0	317	0	171	0.35	171	0.25	572	1076	Ver Articulo	54.9	1050
35FA	359	0	233	0	126	0.5	180	0.1	695	1055	Ver Articulo	23.8	2000
35FA	283	0	184	0	99	0.65	184	0	767	1043	Ver Articulo	13.8	2750
35FA	488	0	317	0	171	0.35	171	0.25	572	1076	Ver Articulo	55.1	500
35FA	359	0	233	0	126	0.5	180	0.1	695	1055	Ver Articulo	28.5	1200
35FA	283	0	184	0	99	0.65	184	0	767	1043	Ver Articulo	14.2	2100
35FA	488	0	317	0	171	0.35	171	0.25	572	1076	Ver Articulo	58.2	300
35FA	359	0	233	0	126	0.5	180	0.1	695	1055	Ver Articulo	36.6	550
35FA	283	0	184	0	99	0.65	184	0	767	1043	Ver Articulo	16.7	850
50S	488	0	244	244	0	0.35	171	0.17	616	1076	Ver Articulo	46.3	750
50S	358	0	179	179	0	0.5	179	0	728	1055	Ver Articulo	30.8	1050
50S	284	0	142	142	0	0.65	185	0	793	1043	Ver Articulo	20.2	1700
50S	488	0	244	244	0	0.35	171	0.17	616	1076	Ver Articulo	49.3	600
50S	358	0	179	179	0	0.5	179	0	728	1055	Ver Articulo	32.8	900
50S	284	0	142	142	0	0.65	185	0	793	1043	Ver Articulo	21.8	1050
50S	488	0	244	244	0	0.35	171	0.17	616	1076	Ver Articulo	52.8	500
50S	358	0	179	179	0	0.5	179	0	728	1055	Ver Articulo	35.2	700
50S	284	0	142	142	0	0.65	185	0	793	1043	Ver Articulo	23.2	1050

Tabla 56, Diseño de Mezcla por Gastaldini , y otros 2010.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m³)	CV (kg/m³)	Escoria (kg/m³)	CCA (kg/m³)	HS (kg/m³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m³)	Aditivo HRWR (kg/m³)	Aditivo VMA (kg/m³)	Áridos Finos (kg/m³)	Áridos Gruesos (kg/m³)	Tipo de Curado	Resistencia cubo 28días (Mpa)	Resistencia Cilíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Ref	425	425	0	0	0	0	0.38	161.5	1.9	0	930	900	Bajo agua 23°C	35.5	31.95	4700
Ba	430	215	215	0	0	0	0.38	163.4	1.5	0	925	905	Bajo agua 23°C	20.4	18.36	2480
Bb	430	215	215	0	0	0	0.38	163.4	3.3	0.1	925	905	Bajo agua 23°C	18.2	16.38	3040
Ta	425	215	105	105	0	0	0.38	161.5	1.3	0	920	905	Bajo agua 23°C	36.9	33.21	1900
Tb	425	215	105	105	0	0	0.38	161.5	4.9	0.2	920	905	Bajo agua 23°C	36.9	33.21	1375
Qa	425	215	100	85	0	25	0.38	161.5	3	0	915	915	Bajo agua 23°C	24.7	22.23	1100
Qb	425	215	100	85	25	0	0.38	161.5	3.2	0	915	915	Bajo agua 23°C	22.2	19.98	1200

Tabla 57, Diseño de Mezcla por Nehdi, y otros, 2004.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Aditivo AEA (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo de Curado	Resistencia cubo 28días (Mpa)	Resistencia Cíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
RA1	372.0	372.0	0.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	1	39.3	35.37	4251
RA2	372.0	280.0	0.0	92.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	1	41.4	37.26	2343
RA3	372.0	186.0	0.0	186.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	1	35.3	31.77	1083
RA4	372.0	280.0	92.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	1	31.5	28.35	3963
RA5	372.0	156.0	216.0	0.0	0.0	0.3	130	3.60	0.22	681	1209	1	32.1	28.89	1030
RA6	372.2	335.0	0.0	0.0	37.2	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	1	48.4	43.56	823
RA1	372.0	372.0	0.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	2	32.6	29.34	12066
RA2	372.0	280.0	0.0	92.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	2	28.7	25.83	10029
RA3	372.0	186.0	0.0	186.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	2	16.4	14.76	-
RA4	372.0	280.0	92.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	2	23.0	20.70	-
RA5	372.0	156.0	216.0	0.0	0.0	0.3	130	3.60	0.22	681	1209	2	21.0	18.90	8218
RA6	372.2	335.0	0.0	0.0	37.2	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	2	38.7	34.83	3250
RA1	372.0	372.0	0.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	2	37.3	33.57	7860
RA2	372.0	280.0	0.0	92.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	3	36.5	32.85	5698
RA3	372.0	186.0	0.0	186.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	3	29.7	26.73	5651
RA4	372.0	280.0	92.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	3	29.9	26.91	-
RA5	372.0	156.0	216.0	0.0	0.0	0.3	130	3.60	0.22	681	1209	3	27.7	24.93	5265
RA6	372.2	335.0	0.0	0.0	37.2	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	3	39.6	35.64	2768
RA1	372.0	372.0	0.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	3	35.2	31.68	811
RA2	372.0	280.0	0.0	92.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	4	31.8	28.62	8227
RA3	372.0	186.0	0.0	186.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	4	24.4	21.96	6351
RA4	372.0	280.0	92.0	0.0	0.0	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	4	25.1	22.59	-
RA5	372.0	156.0	216.0	0.0	0.0	0.3	130	3.60	0.22	681	1209	4	36.1	32.49	1391
RA6	372.2	335.0	0.0	0.0	37.2	0.5	186	0.00	0.00	655	1165	4	38.6	34.74	2507

Tabla 58, Diseño de Mezcla por Ramezianpour, 1995.

Muestra	Total de material cementante	Cemento Tipo I (kg/m ³)	Cemento II (A-L) (kg/m ³)	Cemento I 32,5N (kg/m ³)	Cemento II (B-L) (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Curado (días)	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
1	300	300	0	0	0	0.7	210	760	1020	Bajo Agua	29.6	3183
2	300	0	300	0	0	0.7	210	760	1020	Bajo Agua	35.1	3060
3	300	0	0	300	0	0.7	210	760	1020	Bajo Agua	37.6	2864
4	300	0	0	0	300	0.7	210	760	1020	Bajo Agua	28.1	3299
5	350	350	0	0	0	0.6	210	710	1030	Bajo Agua	34.5	3168
6	350	0	350	0	0	0.6	210	710	1030	Bajo Agua	36.9	3010
7	350	0	0	350	0	0.6	210	710	1030	Bajo Agua	26.9	3417
8	350	0	0	0	350	0.6	210	710	1030	Bajo Agua	29.3	3210
9	400	400	0	0	0	0.525	210	640	1060	Bajo Agua	32.1	3150
10	400	0	400	0	0	0.525	210	640	1060	Bajo Agua	18.83	3650
11	400	0	0	400	0	0.525	210	640	1060	Bajo Agua	21.5	3269
12	400	0	0	0	400	0.525	210	640	1060	Bajo Agua	23.5	3230

Tabla 59, Diseño de Mezcla por Shaker, y otros, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	SCM (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Aditivo HRWRA (l/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Curado (días)	Resistencia cubo 28días (Mpa)	Resistencia Cíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)	Coe. Dif. 28días (10 ⁻¹² m ² /s)
1	420.00	336.42	83.58	0.37	155.40	10.43	964.94	868.45	180/Agua 23°C	74.8	67.3	293	0.89
2	480.00	455.52	24.48	0.37	177.60	4.00	914.42	822.98	180/Agua 23°C	74.0	66.6	1132	4.01
3	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.57	920.98	828.88	180/Agua 23°C	76.5	68.9	341	1.04
4	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.57	920.98	828.88	180/Agua 23°C	77.8	70.0	365	1.11
5	480.00	384.48	95.52	0.43	206.40	4.86	867.89	781.10	180/Agua 23°C	72.5	65.3	288	0.78
6	450.00	393.75	56.25	0.45	202.50	3.29	890.19	801.18	180/Agua 23°C	67.3	60.6	439	2.22
7	450.00	393.75	56.25	0.35	157.50	15.43	951.77	856.59	180/Agua 23°C	78.3	70.5	329	0.99
8	400.00	350.00	50.00	0.40	160.00	8.14	970.70	873.63	180/Agua 23°C	62.1	55.9	356	1.15
9	420.00	398.58	21.42	0.37	155.40	8.71	971.17	874.05	180/Agua 23°C	54.1	48.7	1518	5.26
10	450.00	337.50	112.50	0.40	180.00	7.33	915.35	823.82	180/Agua 23°C	79.9	71.9	315	0.95
11	420.00	336.42	83.58	0.43	180.60	6.14	930.46	837.41	180/Agua 23°C	68.9	62.0	345	1.06
12	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	5.29	920.98	828.88	180/Agua 23°C	79.1	71.2	367	1.07
13	480.00	455.52	24.48	0.43	206.40	2.57	875.00	787.50	180/Agua 23°C	61.1	55.0	1319	4.57
14	420.00	398.58	21.42	0.43	180.60	3.57	936.68	843.02	180/Agua 23°C	58.1	52.3	1597	5.38
15	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.71	920.98	828.88	180/Agua 23°C	77.8	70.0	373	1.13
16	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.57	920.98	828.88	180/Agua 23°C	80.2	72.2	327	0.99
17	480.00	384.48	95.52	0.37	177.60	9.57	907.30	816.57	180/Agua 23°C	82.3	74.1	240	0.42
18	500.00	437.50	62.50	0.40	200.00	4.29	871.27	784.14	180/Agua 23°C	82.2	74.0	351	0.87
19	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	5.29	920.98	828.88	180/Agua 23°C	81.9	73.7	347	1.08
20	450.00	450.00	0.00	0.40	180.00	2.33	926.62	833.95	180/Agua 23°C	57.0	51.3	3739	7.29
MK	489.96	392.30	97.66	0.39	191.08	10.77	884.27	795.85	180/Agua 23°C	82.1	73.9	217	0.43
MK-V	450.00	382.50	67.50	0.40	180.00	5.29	919.86	827.87	180/Agua 23°C	81.2	73.1	311	1.14
SG	490.00	343.00	147.00	0.39	191.10	1.54	888.31	799.47	180/Agua 23°C	54.3	48.9	1120	1.16
FA	490.00	343.00	147.00	0.39	191.10	2.00	868.90	782.01	180/Agua 23°C	66.0	59.4	1325	1.23
SF	490.00	450.80	39.20	0.39	191.10	3.08	887.45	798.70	180/Agua 23°C	71.4	64.3	509	0.69
NC1	490.00	490.00	0.00	0.39	191.10	0.00	894.05	804.65	180/Agua 23°C	62.7	56.4	2309	3.96
NC2	490.00	490.00	0.00	0.39	191.10	0.00	894.05	804.65	180/Agua 23°C	57.5	51.8	2614	5.33
1	420.00	336.42	83.58	0.37	155.40	10.43	964.94	868.45	180/Agua 23°C	70.3	63.3	329	1.01
2	480.00	455.52	24.48	0.37	177.60	4.00	914.42	822.98	180/Agua 23°C	73.5	66.2	1156	4.24
3	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.57	920.98	828.88	180/Agua 23°C	74.1	66.7	400	1.82
4	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.57	920.98	828.88	180/Agua 23°C	75.8	68.2	390	1.65
5	480.00	384.48	95.52	0.43	206.40	4.86	867.89	781.10	180/Agua 23°C	64.1	57.7	571	2.37
6	450.00	393.75	56.25	0.45	202.50	3.29	890.19	801.18	180/Agua 23°C	62.0	55.8	760	3.57
7	450.00	393.75	56.25	0.35	157.50	15.43	951.77	856.59	180/Agua 23°C	77.7	69.9	361	1.25
8	400.00	350.00	50.00	0.40	160.00	8.14	970.70	873.63	180/Agua 23°C	60.9	54.8	542	2.29
9	420.00	398.58	21.42	0.37	155.40	8.71	971.17	874.05	180/Agua 23°C	51.1	46.0	2066	6.05
10	450.00	337.50	112.50	0.40	180.00	7.33	915.35	823.82	180/Agua 23°C	72.8	65.5	451	2.24
11	420.00	336.42	83.58	0.43	180.60	6.14	930.46	837.41	180/Agua 23°C	62.6	56.3	678	2.76
12	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	5.29	920.98	828.88	180/Agua 23°C	73.6	66.2	412	2.05
13	480.00	455.52	24.48	0.43	206.40	2.57	875.00	787.50	180/Agua 23°C	54.7	49.2	1948	5.74
14	420.00	398.58	21.42	0.43	180.60	3.57	936.68	843.02	180/Agua 23°C	49.3	44.4	2649	6.97
15	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.71	920.98	828.88	180/Agua 23°C	70.9	63.8	407	1.98
16	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	4.57	920.98	828.88	180/Agua 23°C	73.1	65.8	405	1.85
17	480.00	384.48	95.52	0.37	177.60	9.57	907.30	816.57	180/Agua 23°C	78.6	70.7	280	0.55
18	500.00	437.50	62.50	0.40	200.00	4.29	871.27	784.14	180/Agua 23°C	78.1	70.3	388	1.58
19	450.00	393.75	56.25	0.40	180.00	5.29	920.98	828.88	180/Agua 23°C	75.9	68.3	397	1.79
20	450.00	450.00	0.00	0.40	180.00	2.33	926.62	833.95	180/Agua 23°C	55.3	49.8	3987	8.43
MK	489.96	392.30	97.66	0.39	191.08	10.77	884.27	795.85	180/Agua 23°C	74.7	67.2	268	0.58
MK-V	450.00	382.50	67.50	0.40	180.00	5.29	919.86	827.87	180/Agua 23°C	72.2	65.0	378	1.58
SG	490.00	343.00	147.00	0.39	191.10	1.54	888.31	799.47	180/Agua 23°C	42.4	38.2	1715	2.46
FA	490.00	343.00	147.00	0.39	191.10	2.00	868.90	782.01	180/Agua 23°C	50.1	45.1	2450	3.8
SF	490.00	450.80	39.20	0.39	191.10	3.08	887.45	798.70	180/Agua 23°C	62.1	55.9	1180	0.78
NC1	490.00	490.00	0.00	0.39	191.10	0.00	894.05	804.65	180/Agua 23°C	54.1	48.7	2773	4.72
NC2	490.00	490.00	0.00	0.39	191.10	0.00	894.05	804.65	180/Agua 23°C	51.1	46.0	3396	6.17

Tabla 60, Diseño de Mezcla por Abouhussien, y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	NC (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Curado (días)	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)	Coe. Dif. 60días Da (10 ⁻¹² m ² /s)	Coe. Dif. 28días EHE08 (10 ⁻¹² m ² /s)
PC	400	400	0	0	0.41	163	674	1235	Bajo agua	29	3442	4.1	6.0
FA40	400	240	160	0	0.41	163	674	1235	Bajo agua	26	4995	3.14	4.6
FA60	400	160	240	0	0.41	163	674	1235	Bajo agua	20.1	6075	3.57	5.2
NC1	400	396	0	4	0.41	163	674	1235	Bajo agua	46.5	2749	3.5	5.1
NC2	400	392	0	8	0.41	163	674	1235	Bajo agua	31	3413	-	-
FA39.NC1	400	240	156	4	0.41	163	674	1235	Bajo agua	39.8	4057	2.81	4.1
FA59.NC1	400	160	236	4	0.41	163	674	1235	Bajo agua	23	5360	3.47	5.1

Tabla 61, Diseño de Mezcla por Shaikh, y otros 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Nano Silice (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Árido (kg/m ³)	Aditivo HRWRA (%)	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
CON	400	400	0	0	0.45	180	1750	0.17	48.5	5221
NS2.25/SF0	400	382	0	18	0.45	180	1730	0.24	51.9	4795
NS0.75/SF3	400	382	12	6	0.45	180	1740	0.27	55.5	3030
NS0/SF4.5	400	382	18	0	0.45	180	1743	0.12	50.9	1794
NS1.5/SF4.5	400	370	18	12	0.45	180	1730	0.4	55.1	1739
NS0.75/SF6	400	370	24	6	0.45	180	1735	0.3	58.7	1311
NS0/SF7.5	400	370	30	0	0.45	180	1740	0.31	56.9	1246

Tabla 62, Diseño de Mezcla por Raiess Ghasemi, y otros, 2010.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kgm ³)	Tipo de Curado	Resistencia Cúbica 28días (Mpa)	Resistencia Cíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
MK0	533.33	533.33	0.0	0.30	160	677	1201	2.13	Bajo agua 27°C	91.87	82.683	1162
MK5	533.34	506.67	26.7	0.30	160	666	1182	2.93	Bajo agua 27°C	95.60	86.04	305
MK10	533.33	480	53.3	0.30	160	655	1163	3.47	Bajo agua 27°C	98.81	88.929	218
MK15	533.33	453.33	80.0	0.30	160	645	1144	4.26	Bajo agua 27°C	91.04	81.936	148

Tabla 63, Diseño de Mezcla por Dinakar y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Reductor de agua (ml/100kg)	Aditivo SP (ml/100kg)	Inclusor de Aire (ml/100kg)	Tipo de Curado	RCPT 28días (coulomb)	Coe. Dif. 28días Da (10 ⁻¹² m ² /s)
1	380	380	0	0.4	152	655	1100	325	400	40	Bajo agua 23°C	277	19.1
2	380	350	30	0.4	152	647	1100	325	600	40	Bajo agua 23°C	560	8.2
3	380	334	46	0.4	152	641	1100	325	800	40	Bajo agua 23°C	310	5.8
4	460	460	0	0.3	138	619	1100	325	700	40	Bajo agua 23°C	2350	9.6
5	460	423	37	0.3	138	608	1100	325	900	40	Bajo agua 23°C	400	3.7
6	460	405	55	0.3	138	601	1100	325	1100	40	Bajo agua 23°C	230	2.9

Tabla 64, Diseño de Mezcla por Gruber, y otros, 2001.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	FC (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (% tmc)	RCPT 28días (coulomb)	Coe. Dif. 28días Da (10 ⁻¹² m ² /s)
Control	367	367	0	0.45	165	675	1076	1.8	3950	6
LSA10	367	330	36.7	0.45	165	662	1055	1.8	3900	5.2
LSA20	366	293	73.3	0.45	165	648	1033	1.8	3850	6.1
LSA30	367	257	110	0.45	165	635	1012	1.8	4300	6.65
LSB10	367	330	36.7	0.45	165	662	1055	1.8	4000	6.05
LSB20	366	293	73.3	0.45	165	648	1033	1.8	4200	6.4
LSB30	367	257	110	0.45	165	635	1012	1.8	4500	6.75
LSC10	367	330	36.7	0.45	165	662	1055	1.8	4100	6.9
LSC20	366	293	73.3	0.45	165	648	1033	1.8	4300	7
LSC30	367	257	110	0.45	165	635	1012	1.8	4900	7.45

Tabla 65, Diseño de Mezcla por Moon, y otros, 2004.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (% tmc)	Curado (días)	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días 20C (coulomb)
HS-CC	500	500	0	0	0	0.30	150	758	927	0.5	Ver Artículo	85.9	941
HS-SF5	500	475	25	0	0	0.30	150	710	1066	0.6	Ver Artículo	96.5	610
HS-SF10	500	450	50	0	0	0.30	150	620	1151	0.8	Ver Artículo	108.3	285
HS-FA20	500	400	0	100	0	0.30	150	618	1147	0.8	Ver Artículo	82.7	533
HS-FA30	500	350	0	150	0	0.30	150	615	1143	0.7	Ver Artículo	80.2	449
HS-FA40	500	300	0	200	0	0.30	150	613	1139	0.7	Ver Artículo	76.7	269
HS-SF+FA	500	350	50	100	0	0.30	150	615	1142	0.8	Ver Artículo	105.3	122
HS-BS30	500	350	0	0	150	0.30	150	616	1145	0.7	Ver Artículo	83.9	334
HS-BS40	500	300	0	0	200	0.30	150	615	1142	0.7	Ver Artículo	80.9	245
NS-CC	390	390	0	0	0	0.50	195	768	917	0	Ver Artículo	35.8	2941
NS-FA30	390	273	0	117	0	0.50	195	626	1133	0	Ver Artículo	39.3	1826
NS-FA40	390	234	0	156	0	0.50	195	625	1129	0	Ver Artículo	36.9	1454
NS-BS30	390	273	0	0	117	0.50	195	626	1135	0	Ver Artículo	46.4	1389
NS-BS40	390	234	0	0	156	0.50	195	625	1132	0	Ver Artículo	39.8	1181

Tabla 66, Diseño de Mezcla por Poon y otros, 2001

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo de Curado	Resistencia Cúbica 28días (Mpa)	Resistencia Cíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)	Coe. Dif. 28días Da 10 ¹² (m ² /s)
OPC	400	400	0	0.50	200	935.0	765.0	Bajo agua	35.5	31.95	5266	24.27
MK10	400	360	40	0.50	200	935.0	765.0	Bajo agua	41	36.9	3578	18.89
MK12,5	400	350	50	0.50	200	935.0	765.0	Bajo agua	40	36	3018	12.46
MK15	400	340	60	0.50	200	935.0	765.0	Bajo agua	40	36	2053	6.59
OPC	400	400	0	0.40	160	990.0	810.0	Bajo agua	33	29.7	2843	15.77
MK10	400	360	40	0.40	160	990.0	810.0	Bajo agua	54.8	49.32	2116	7.21
MK12,5	400	350	50	0.40	160	990.0	810.0	Bajo agua	58.5	52.65	1579	5.79
MK15	400	340	60	0.40	160	990.0	810.0	Bajo agua	56.5	50.85	1594	5.16
OPC	400	400	0	0.35	140	1017.5	832.5	Bajo agua	59	53.1	2914	-
MK10	400	360	40	0.35	140	1017.5	832.5	Bajo agua	67	60.3	2004	-
MK12,5	400	350	50	0.35	140	1017.5	832.5	Bajo agua	64	57.6	1469	-
MK15	400	340	60	0.35	140	1017.5	832.5	Bajo agua	64.6	58.14	1206	-

Tabla 67, Diseño de Mezcla por Ramezianpour y otros, 2012.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	BA (kg/m ³)	RB (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)
CT	560	560	0	0	0	0.3	168	710	924	7.50	Bajo agua 23°C	65.5	1280
20FA	560	448	112	0	0	0.3	168	713	902	5.00	Bajo agua 23°C	68.0	1100
40FA	560	336	224	0	0	0.3	168	720	922	2.50	Bajo agua 23°C	64.0	710
20BA	560	448	0	112	0	0.3	168	711	888	10.00	Bajo agua 23°C	67.5	980
40BA	560	336	0	224	0	0.3	168	707	883	21.20	Bajo agua 23°C	64.0	530
20RB	560	448	0	0	112	0.3	168	706	920	9.00	Bajo agua 23°C	66.5	880
40RB	560	336	0	0	224	0.3	168	703	900	20.00	Bajo agua 23°C	64.0	310
20FABA	560	448	56	56	0	0.3	168	709	899	8.00	Bajo agua 23°C	68.0	650
40FABA	560	336	112	112	0	0.3	168	714	903	13.20	Bajo agua 23°C	65.5	420
20FARB	560	448	56	0	56	0.3	168	710	910	7.50	Bajo agua 23°C	67.5	560
40FARB	560	336	112	0	112	0.3	168	713	912	11.50	Bajo agua 23°C	66.0	280

Tabla 68, Diseño de Mezcla por Ramezianpour Rukzon, y otros, 2014.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)
A00	355	355	0	0.41	145.5	740	1185	5.11	Bajo agua 23°C	73.0	2700
A30	440	308	132	0.32	141	661	1185	4.77	Bajo agua 23°C	69.5	1750
A40	440	264	176	0.31	136.5	665	1185	4.75	Bajo agua 23°C	66.0	1500
B00	517	517	0	0.29	150	594	1185	6.77	Bajo agua 23°C	86.0	205
B30	517	362	155	0.29	150	570	1185	4.8	Bajo agua 23°C	74.0	1900
B40	518	311	207	0.29	150	561	1185	4.24	Bajo agua 23°C	69.0	1600

Tabla 69, Diseño de Mezcla por Nath y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Áridos LWFA (kg/m ³)	Aditivo SRA (kg/m ³)	Aditivo AE (ml/tmc)	Aditivo HRWR (ml/tmc)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT (Coulomb)
Control	374.8	248	112	14.8	0.37	139	659	1074	0	0	16.3	240	Ver Artículo	36.8	860
SRA	374.8	248	112	14.8	0.35	131	659	1074	0	7.5	31.9	275	Ver Artículo	33.2	660
Clay1	374.8	248	112	14.8	0.37	139	517	1074	61.7	0	12.7	240	Ver Artículo	30.4	880
Clay2	374.8	248	112	14.8	0.37	139	482	1074	77.1	0	14.5	240	Ver Artículo	38	920
Shale1	374.8	248	112	14.8	0.37	139	451	1074	132	0	12.7	240	Ver Artículo	34.4	885
Shale2	374.8	248	112	14.8	0.37	139	400	1074	164	7.5	12.7	240	Ver Artículo	39.2	925
SRA+Shale	374.8	248	112	14.8	0.35	131	400	1074	164	7.5	35.5	245	Ver Artículo	39.7	

Tabla 70, Diseño de Mezcla por Deboodt, y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Natural (kg/m ³)	Áridos LWFA I (kg/m ³)	Áridos LWFA II (kg/m ³)	Áridos Grueso (kg/m ³)	Tipo de Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)	Coe. Dif. 28días (10 ¹² m ² /s)
NN-00	580	580	0	0.28	163	702.6	0	0	950.1	Bajo agua 20°C	68.6	4612	8.4
NN-3.5	580	559.7	20.3	0.28	163	700	0	0	946.5	Bajo agua 20°C	73.0	1402	2.9
NN-7.0	580	539.4	40.6	0.28	163	697.3	0	0	943	Bajo agua 20°C	74.2	565	1.4
ST-00	630	630	0	0.26	163	0	685	0	520	Bajo agua 20°C	65.4	6450	8.2
ST-3.5	630	608	22	0.26	163	0	682	0	518	Bajo agua 20°C	71.0	2456	4.4
ST-7.0	630	586	44	0.26	163	0	679	0	515	Bajo agua 20°C	72.3	1166	2.5
AG-00	640	640	0	0.24	155	0	0	696.8	530.7	Bajo agua 20°C	46.1	9751	11.9
AG-3.5	640	617.6	22.4	0.24	155	0	0	693.9	528.5	Bajo agua 20°C	47.0	4146	7.1
AG-7.0	630	585.2	44.8	0.25	155	0	0	690.9	526.2	Bajo agua 20°C	47.9	2075	4.9

Tabla 71, Diseño de Mezcla por Youm y otros, 2016.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	NS (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	RCPT 28días (Coulomb)
PC	400	400	0	0	0.41	163	684	1184	140	Bajo agua	3443
FA40	400	240	0	160	0.41	163	684	1184	160	Bajo agua	4996
FA60	400	160	0	240	0.41	163	684	1184	200	Bajo agua	6076
NS2	400	392	8	0	0.41	163	684	1184	80	Bajo agua	2497
NS4	400	384	16	0	0.41	163	684	1184	50	Bajo agua	1999
FA38.NS2	400	264	8	128	0.41	163	684	1184	140	Bajo agua	3088
FA58.NS2	400	160	8	232	0.41	163	684	1184	160	Bajo agua	5592

Tabla 72, Diseño de Mezcla por Macquarie Supit y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento LPCC (kg/m ³)	Cemento BCG (kg/m ³)	Cemento LPC (kg/m ³)	Cemento III (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Aditivo AEA (l/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (coulomb)
1	374	168	0	0	0	206	0.32	120	701	1052	2.5	0.486	Camara húmeda 23°C/50%	24.0	1170
2	379	170	0	0	0	209	0.32	122	710	1066	2.5	0.305	Camara húmeda 23°C/50%	30.5	-
3	391	0	391	0	0	0	0.32	125	740	1111	3.6	0.509	Camara húmeda 23°C/50%	43.8	333
4	391	0	391	0	0	0	0.32	125	740	1111	3.6	0.509	Camara húmeda 23°C/50%	43.3	-
5	385	0	0	385	0	0	0.40	154	729	1094	1	0.116	Camara húmeda 23°C/50%	38.6	2580
6	385	0	0	385	0	0	0.40	154	729	1094	0.9	0.106	Camara húmeda 23°C/50%	38.8	-
7	389	0	0	0	389	0	0.42	164	729	1093	2.2	0.174	Camara húmeda 23°C/50%	46.3	2432
8	384	0	0	0	384	0	0.42	162	720	1081	1.4	0.172	Camara húmeda 23°C/50%	42.1	-

Tabla 73, Diseño de Mezcla por Bouzoubaa y otros, 2001.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Ultrafino CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)	Coe. Dif. 28días (10 ¹² m ² /s)
PC	400	400	0	0	0.4	160	1100	1184	Bajo agua	29.0	3443	4.10
FA40	400	240	160	0	0.4	160	1100	1184	Bajo agua	31.5	4996	3.16
FA60	400	160	240	0	0.4	160	1100	1184	Bajo agua	23.0	6076	3.57
UFFA8	400	368	0	32	0.4	160	1100	1184	Bajo agua	45.0	2775	1.28
FA32-UFFA8	400	240	128	32	0.4	160	1100	1184	Bajo agua	28.5	2459	1.60
FA52-UFFA8	400	160	208	32	0.4	160	1100	1184	Bajo agua	19.0	5637	2.70

Tabla 74, Diseño de Mezcla por Shaikh y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
FA0	400	400	0	0.35	140	700	1200	4	Camara 23°C/50%	57.5	2300
FA10	400	360	40	0.35	140	700	1200	4	Camara 23°C/50%	47.5	1900
FA20	400	320	80	0.35	140	700	1200	4	Camara 23°C/50%	39.0	1450
FA30	400	280	120	0.35	140	700	1200	4	Camara 23°C/50%	34.0	1100
FA40	400	240	160	0.35	140	700	1200	4	Camara 23°C/50%	30.5	970

Tabla 75, Diseño de Mezcla por Kumer Saha, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia Cubo 28días (Mpa)	Resistencia Cíndrica 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
C	550	550	0	0.28	154	751	995	Camara Humeda 20°C 95%	79.0	71.10	2600
F20	550	440	110	0.28	154	751	995	Camara Humeda 20°C 95%	77.0	69.30	3500
F35	550	357.5	192.5	0.28	154	751	995	Camara Humeda 20°C 95%	76.0	68.40	1700
BC	550	550	0	0.28	154	751	995	Camara Humeda 20°C 95%	78.5	70.65	300
BF20	550	440	110	0.28	154	751	995	Camara Humeda 20°C 95%	80.0	72.00	1200
BF35	550	357.5	192.5	0.28	154	751	995	Camara Humeda 20°C 95%	77.0	69.30	100

Tabla 76, Diseño de Mezcla por Feng, y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	Tipo K DV (kg/m ³)	Tipo K DC (kg/m ³)	Tipo K CC (kg/m ³)	Tipo K BMK (kg/m ³)	Tipo K MK (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	RCPT 28días (Coulomb)
Control	350	350	0	0	0	0	0	0.4	140	893.4	1092.9	3.5	2800
DV5	350	332.5	17.5	0	0	0	0	0.4	140	892.1	1090.4	4.2	1690
DV10	350	315	35	0	0	0	0	0.4	140	889.8	1087.4	5.3	1760
DV15	350	297.5	52.5	0	0	0	0	0.4	140	887.3	1084.5	6.3	1480
DV20	350	280	70	0	0	0	0	0.4	140	885.2	1081.9	7.4	1120
DC5	350	332.5	0	17.5	0	0	0	0.4	140	892.2	1090.6	4.1	1690
DC10	350	315	0	35	0	0	0	0.4	140	890	1087.7	5	1420
DC15	350	297.5	0	52.5	0	0	0	0.4	140	887.6	1084.9	6.1	1280
DC20	350	280	0	70	0	0	0	0.4	140	885.7	1082.5	7.2	1510
CC5	350	332.5	0	0	17.5	0	0	0.4	140	892	1090.2	4	1610
CC10	350	315	0	0	35	0	0	0.4	140	889.4	1087	4.8	1560
CC15	350	297.5	0	0	52.5	0	0	0.4	140	886.8	1083.8	5.9	1420
CC20	350	280	0	0	70	0	0	0.4	140	884.6	1081.1	7	1360
BMK5	350	332.5	0	0	0	17.5	0	0.4	140	892.4	1090.7	4.2	1870
BMK10	350	315	0	0	0	35	0	0.4	140	890.2	1088	5.5	1630
BMK15	350	297.5	0	0	0	52.5	0	0.4	140	888	1085.4	6.6	1490
BMK20	350	280	0	0	0	70	0	0.4	140	886.2	1083	7.7	1790
MK5	350	332.5	0	0	0	0	17.5	0.4	140	892.1	1090.4	6.5	1340
MK10	350	315	0	0	0	0	35	0.4	140	889.8	1087.4	7.4	1260
MK15	350	297.5	0	0	0	0	52.5	0.4	140	887.3	1084.4	8.1	1090
MK20	350	280	0	0	0	0	70	0.4	140	885.2	1081.9	8.7	1020

Tabla 77, Diseño de Mezcla por Gesoğlu, y otros, 2014.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	Tipo GCV (kg/m ³)	Tipo GCF (kg/m ³)	Tipo CCA (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos (kg/m ³)	Aditivo SP (%tcm)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
CC0-0,80	243.8	243.8	0	0	0	0.80	195	1820.8	0.0	Bajo agua 23°C	22.2	13226
10-0,80	243.8	219.8	24	0	0	0.80	195	1815.1	0.0	Bajo agua 23°C	24.8	6200
20-0,80	243.8	194.8	49	0	0	0.80	195	1811.2	0.0	Bajo agua 23°C	26	3527
30-0,80	243.8	170.8	73	0	0	0.80	195	1806.5	0.0	Bajo agua 23°C	24.1	3031
40-0,80	243.8	145.8	98	0	0	0.80	195	1802.9	0.0	Bajo agua 23°C	23.5	2523
CC0-0,62	314.5	314.5	0	0	0	0.62	195	1761.3	0.0	Bajo agua 23°C	32.4	8489
10-0,62	314.5	282.5	32	0	0	0.62	195	1748.8	0.0	Bajo agua 23°C	35.2	4324
20-0,62	314.5	251.5	63	0	0	0.62	195	1750.6	0.0	Bajo agua 23°C	36.7	2637
30-0,62	314.5	219.5	95	0	0	0.62	195	1736.4	0.0	Bajo agua 23°C	34.9	1843
40-0,62	314.5	188.5	126	0	0	0.62	195	1740.0	0.0	Bajo agua 23°C	33.8	1398
CC0-0,48	406.3	406.3	0	0	0	0.48	195	1694.1	0.0	Bajo agua 23°C	41	7056
10-0,48	406.3	365.3	41	0	0	0.48	195	1683.8	0.0	Bajo agua 23°C	44.9	3651
20-0,48	406.3	325.3	81	0	0	0.48	195	1675.0	0.0	Bajo agua 23°C	46.6	2458
30-0,48	406.3	284.3	122	0	0	0.48	195	1671.4	0.0	Bajo agua 23°C	47.2	1170
40-0,48	406.3	244.3	162	0	0	0.48	195	1665.8	0.2	Bajo agua 23°C	44.2	973
CC0-0,41	439.0	439.0	0	0	0	0.41	180	1694.6	0.7	Bajo agua 23°C	51.6	6661
10-0,41	439.0	395.0	44	0	0	0.41	180	1686.8	0.4	Bajo agua 23°C	53.5	2887
20-0,41	439.0	351.0	88	0	0	0.41	180	1677.9	0.4	Bajo agua 23°C	55.6	1741
30-0,41	439.0	307.0	132	0	0	0.41	180	1670.2	0.1	Bajo agua 23°C	57.5	986
40-0,41	439.0	263.0	176	0	0	0.41	180	1662.3	0.3	Bajo agua 23°C	55.5	714
CC0-0,35	485.7	485.7	0	0	0	0.35	170	1685.4	0.7	Bajo agua 23°C	61.7	5652
10-0,35	485.7	436.7	49	0	0	0.35	170	1677.0	0.5	Bajo agua 23°C	63.8	2100
20-0,35	485.7	388.7	97	0	0	0.35	170	1667.6	0.6	Bajo agua 23°C	65.7	1497
30-0,35	485.7	339.7	146	0	0	0.35	170	1661.2	0.5	Bajo agua 23°C	68.1	664
40-0,35	485.7	291.7	194	0	0	0.35	170	1654.0	0.3	Bajo agua 23°C	65	516
CC0-0,30	533.3	533.3	0	0	0	0.30	160	1669.3	0.8	Bajo agua 23°C	72.3	4557
10-0,30	533.3	480.3	53	0	0	0.30	160	1662.0	1.2	Bajo agua 23°C	74.2	1687
20-0,30	533.3	426.3	107	0	0	0.30	160	1649.9	1.0	Bajo agua 23°C	76.2	1144
30-0,30	533.3	373.3	160	0	0	0.30	160	1642.7	0.8	Bajo agua 23°C	78.1	558
40-0,30	533.3	320.3	213	0	0	0.30	160	1636.9	0.7	Bajo agua 23°C	75.8	463
CC0-0,80	243.8	243.8	0	0	0	0.80	195	1820.8	0.0	Bajo agua 23°C	22.2	13226
10-0,80	243.8	219.8	0	24	0	0.80	195	1815.1	0.0	Bajo agua 23°C	22.3	6385
20-0,80	243.8	194.8	0	49	0	0.80	195	1811.2	0.0	Bajo agua 23°C	23.1	3702
30-0,80	243.8	170.8	0	73	0	0.80	195	1806.5	0.0	Bajo agua 23°C	21.5	4195
40-0,80	243.8	145.8	0	98	0	0.80	195	1802.9	0.0	Bajo agua 23°C	19.2	2772
CC0-0,62	314.5	314.5	0	0	0	0.62	195	1761.3	0.0	Bajo agua 23°C	32.4	8489
10-0,62	314.5	282.5	0	32	0	0.62	195	1748.8	0.0	Bajo agua 23°C	34.1	4936
20-0,62	314.5	251.5	0	63	0	0.62	195	1750.6	0.0	Bajo agua 23°C	33.9	2814
30-0,62	314.5	219.5	0	95	0	0.62	195	1736.4	0.0	Bajo agua 23°C	31	2017
40-0,62	314.5	188.5	0	126	0	0.62	195	1740.0	0.0	Bajo agua 23°C	29.9	1482
CC0-0,48	406.3	406.3	0	0	0	0.48	195	1694.1	0.0	Bajo agua 23°C	41	7056
10-0,48	406.3	365.3	0	41	0	0.48	195	1683.8	0.0	Bajo agua 23°C	43.7	3911
20-0,48	406.3	325.3	0	81	0	0.48	195	1675.0	0.0	Bajo agua 23°C	44	2581
30-0,48	406.3	284.3	0	122	0	0.48	195	1671.4	0.0	Bajo agua 23°C	43.2	1262
40-0,48	406.3	244.3	0	162	0	0.48	195	1665.8	0.6	Bajo agua 23°C	40.2	1059
CC0-0,41	439.0	439.0	0	0	0	0.41	180	1694.6	0.7	Bajo agua 23°C	51.6	6661
10-0,41	439.0	395.0	0	44	0	0.41	180	1686.8	1.1	Bajo agua 23°C	52.3	3399
20-0,41	439.0	351.0	0	88	0	0.41	180	1677.9	1.3	Bajo agua 23°C	53.2	1919
30-0,41	439.0	307.0	0	132	0	0.41	180	1670.2	1.7	Bajo agua 23°C	54.7	1041
40-0,41	439.0	263.0	0	176	0	0.41	180	1662.3	1.7	Bajo agua 23°C	52.5	845
CC0-0,35	485.7	485.7	0	0	0	0.35	170	1685.4	0.7	Bajo agua 23°C	61.7	5652
10-0,35	485.7	436.7	0	49	0	0.35	170	1677.0	1.3	Bajo agua 23°C	62.4	2364
20-0,35	485.7	388.7	0	97	0	0.35	170	1667.6	1.7	Bajo agua 23°C	63.5	1639
30-0,35	485.7	339.7	0	146	0	0.35	170	1661.2	1.6	Bajo agua 23°C	64.5	804
40-0,35	485.7	291.7	0	194	0	0.35	170	1654.0	1.9	Bajo agua 23°C	62.5	673
CC0-0,30	533.3	533.3	0	0	0	0.30	160	1669.3	0.8	Bajo agua 23°C	72.3	4557
10-0,30	533.3	480.3	0	53	0	0.30	160	1662.0	0.9	Bajo agua 23°C	73.1	1848
20-0,30	533.3	426.3	0	107	0	0.30	160	1649.9	1.4	Bajo agua 23°C	74.6	1324
30-0,30	533.3	373.3	0	160	0	0.30	160	1642.7	1.0	Bajo agua 23°C	76.3	676
40-0,30	533.3	320.3	0	213	0	0.30	160	1636.9	1.3	Bajo agua 23°C	73.2	530
CC0-0,80	243.8	243.8	0	0	0	0.80	195	1820.8	0.0	Bajo agua 23°C	22.2	13226
10-0,80	243.8	219.8	0	0	24	0.80	195	1815.1	0.0	Bajo agua 23°C	23.4	5693
20-0,80	243.8	194.8	0	0	49	0.80	195	1811.2	0.0	Bajo agua 23°C	25.1	3468
30-0,80	243.8	170.8	0	0	73	0.80	195	1806.5	0.0	Bajo agua 23°C	23.5	2765
40-0,80	243.8	145.8	0	0	98	0.80	195	1802.9	0.0	Bajo agua 23°C	22.4	2365
CC0-0,62	314.5	314.5	0	0	0	0.62	195	1761.3	0.0	Bajo agua 23°C	32.4	8489
10-0,62	314.5	282.5	0	0	32	0.62	195	1748.8	0.0	Bajo agua 23°C	34.7	3969
20-0,62	314.5	251.5	0	0	63	0.62	195	1750.6	0.0	Bajo agua 23°C	35.8	2402
30-0,62	314.5	219.5	0	0	95	0.62	195	1736.4	0.0	Bajo agua 23°C	33.2	175
40-0,62	314.5	188.5	0	0	126	0.62	195	1740.0	0.0	Bajo agua 23°C	32.7	1278
CC0-0,48	406.3	406.3	0	0	0	0.48	195	1694.1	0.0	Bajo agua 23°C	41	7056
10-0,48	406.3	365.3	0	0	41	0.48	195	1683.8	0.0	Bajo agua 23°C	43.7	3173
20-0,48	406.3	325.3	0	0	81	0.48	195	1675.0	0.0	Bajo agua 23°C	44.6	2198
30-0,48	406.3	284.3	0	0	122	0.48	195	1671.4	0.0	Bajo agua 23°C	45.4	1095
40-0,48	406.3	244.3	0	0	162	0.48	195	1665.8	0.3	Bajo agua 23°C	42.5	958
CC0-0,41	439.0	439.0	0	0	0	0.41	180	1694.6	0.7	Bajo agua 23°C	51.6	6661
10-0,41	439.0	395.0	0	0	44	0.41	180	1686.8	0.8	Bajo agua 23°C	53	2590
20-0,41	439.0	351.0	0	0	88	0.41	180	1677.9	0.9	Bajo agua 23°C	54.4	1483
30-0,41	439.0	307.0	0	0	132	0.41	180	1670.2	1.0	Bajo agua 23°C	55.8	845
40-0,41	439.0	263.0	0	0	176	0.41	180	1662.3	1.2	Bajo agua 23°C	53.3	676
CC0-0,35	485.7	485.7	0	0	0	0.35	170	1685.4	0.7	Bajo agua 23°C	61.7	5652
10-0,35	485.7	436.7	0	0	49	0.35	170	1677.0	0.7	Bajo agua 23°C	62.8	1887
20-0,35	485.7	388.7	0	0	97	0.35	170	1667.6	0.6	Bajo agua 23°C	64.3	1171
30-0,35	485.7	339.7	0	0	146	0.35	170	1661.2	0.8	Bajo agua 23°C	65.9	572
40-0,35	485.7	291.7	0	0	194	0.35	170	1654.0	1.1	Bajo agua 23°C	63	478
CC0-0,30	533.3	533.3	0	0	0	0.30	160	1669.3	0.8	Bajo agua 23°C	72.3	4557
10-0,30	533.3	480.3	0	0	53	0.30	160	1662.0	0.5	Bajo agua 23°C	73.4	1230
20-0,30	533.3	426.3	0	0	107	0.30	160	1649.9	0.6	Bajo agua 23°C	75.2	984
30-0,30	533.3	373.3	0	0	160	0.30	160	1642.7	1.4	Bajo agua 23°C	77.1	423
40-0,30	533.3	320.3	0	0	213	0.30	160	1636.9	1.2	Bajo agua 23°C	74.5	329

Tabla 78, Diseño de Mezcla por S. Inthata, y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (%tmc)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
SCC	400	400	0	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	40.77	1486.28
SCC-MK05	400	380	20	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	48.28	431.23
SCC-MK10	400	360	40	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	51.91	299.32
SCC-MK15	400	340	60	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	54.53	292.98
SCC-MK20	400	320	80	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	57.17	59.74
SCC-MK25	400	300	100	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	53.74	34.67
SCC-MK30	400	280	120	0	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	51.40	28.23
SCC-RHA05	400	380	0	20	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	43.30	438.62
SCC-RHA10	400	360	0	40	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	47.71	389.18
SCC-RHA15	400	340	0	60	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	51.03	306.22
SCC-RHA20	400	320	0	80	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	44.19	876.96
SCC-RHA25	400	300	0	100	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	41.92	904.70
SCC-RHA30	400	280	0	120	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	3702.00	1089.00
SCC-MK05+RHA05	400	360	20	20	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	49.52	286.72
SCC-MK10RHA10	400	320	40	40	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	53.22	173.60
SCC-MK15+RHA15	400	280	60	60	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	55.67	86.30
SCC-MK20+RHA20	400	240	80	80	0.55	220	880	800	8	Bajo agua	45.00	25.43

Tabla 79, Diseño de Mezcla por Kannan, y otros, 2014.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
M1	500	500	0	0.225	112.5	805	950	21	Bajo agua 23°C	104.6	670
M2	550	508.75	41.25	0.225	123.75	827	832	24	Bajo agua 23°C	116.2	517
M3	600	510	90	0.225	135	840	720	27	Bajo agua 23°C	119.8	383
M4	500	500	0	0.250	125	852	858	24	Bajo agua 23°C	100.6	762
M5	550	508.75	41.25	0.250	137.5	868	744	27	Bajo agua 23°C	104.6	585
M6	600	510	90	0.250	150	706	834	21	Bajo agua 23°C	119.5	441
M7	500	462.5	37.5	0.275	137.5	761	900	27	Bajo agua 23°C	100.4	840
M8	550	467.5	82.5	0.275	151.25	787	792	21	Bajo agua 23°C	101.9	553
M9	600	600	0	0.275	165	817	700	24	Bajo agua 23°C	100.9	600
M10	500	425	75	0.225	112.5	923	792	24	Bajo agua 23°C	110.2	494
M11	550	550	0	0.225	123.75	764	904	27	Bajo agua 23°C	113	641
M12	600	555	45	0.225	135	794	798	21	Bajo agua 23°C	120.2	419
M13	500	462.5	37.5	0.250	125	916	786	21	Bajo agua 23°C	101.8	612
M14	550	467.5	82.5	0.250	137.5	738	872	24	Bajo agua 23°C	113.9	544
M15	600	600	0	0.250	150	774	778	27	Bajo agua 23°C	106	591
M16	500	425	75	0.275	137.5	820	826	27	Bajo agua 23°C	100.7	699
M17	550	550	0	0.275	151.25	863	740	21	Bajo agua 23°C	98.8	672
M18	600	555	45	0.275	165	692	816	24	Bajo agua 23°C	106.8	593

Tabla 80, Diseño de Mezcla por Ozbay y otros, 2011.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
B51	480	480	0	0	0.32	152	705	1057	7.2	Ver Artículo	65.8	509
B52	500	450	50	0	0.33	165	694	1041	7.0	Ver Artículo	67.0	497
B53	500	400	100	0	0.33	165	694	1041	7.0	Ver Artículo	65.7	484
B54	500	375	125	0	0.33	165	694	1041	7.0	Ver Artículo	67.8	391
B55	500	400	0	100	0.33	165	694	1041	6.5	Ver Artículo	69.5	383
B56	500	350	0	150	0.33	165	694	1041	6.5	Ver Artículo	71.7	375
B57	500	400	50	50	0.33	165	694	1041	7.0	Ver Artículo	58.8	483
B58	500	350	45	105	0.33	165	694	1041	7.0	Ver Artículo	65.2	363
B59	500	250	75	175	0.33	165	694	1041	7.0	Ver Artículo	57.8	532

Tabla 81, Diseño de Mezcla por DING Qingjun y otros, 2009.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	r-FA (kg/m ³)	f-FA (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Arena Nat (kg/m ³)	Áridos Arena Rec (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Aditivo VMA (l/m ³)	Curado	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT (Coulomb)
Control1	540	340	200	0	0.34	182	695	0	895	8.5	1.0	28	Bajo agua 27°C	44.3	2290
RF25	540	340	200	0	0.37	198	521	153	895	8.5	1.5	28	Bajo agua 27°C	44.5	2285
RF50	540	340	200	0	0.39	213	348	305	895	8.5	1.5	28	Bajo agua 27°C	43.4	2000
RF75	540	340	200	0	0.42	229	174	458	895	8.5	1.5	28	Bajo agua 27°C	41.3	1775
RF100	540	340	200	0	0.45	244	0	610	895	8.5	1.5	28	Bajo agua 27°C	38.7	1540
Control2	610	340	200	70	0.30	182	662	0	850	8.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	53.7	1735
RCF25	610	340	200	70	0.32	197	497	145	850	8.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	64.3	1500
RCF50	610	340	200	70	0.35	212	331	291	850	8.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	62.3	1290
RCF75	610	340	200	70	0.37	226	166	436	850	8.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	56.3	1100
RCF100	610	340	200	70	0.40	241	0	581	850	8.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	53.2	930
RF100A	610	340	200	70	0.40	241	0	581	850	8.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	53.2	930
RF100B	610	340	200	70	0.38	229	0	616	850	9	0.0	28	Bajo agua 27°C	59.1	850
RF100C	610	340	200	70	0.35	213	0	662	850	9.5	0.0	28	Bajo agua 27°C	64.2	775

Tabla 82, Diseño de Mezcla por Kou, y otros, 2009.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV SD (kg/m ³)	CV CM (kg/m ³)	CV BR (kg/m ³)	CV TB (kg/m ³)	CV RP (kg/m ³)	CV SD (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (ml/m ³)	reductor de agua (ml/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
CM	340	340	0	0	0	0	0	0	0.50	170	758	1111	850	850	Ver Artículo	38.8	6967
CM2	400	400	0	0	0	0	0	0	0.40	160	716	1109	1429	1200	Ver Artículo	48	6158
CM3	465	465	0	0	0	0	0	0	0.34	158	692	1106	5714	1755	Ver Artículo	60.5	4930
30F	340	238	102	0	0	0	0	0	0.50	170	709	1110	0	648	Ver Artículo	29.5	5887
30F2	400	280	120	0	0	0	0	0	0.40	160	658	1108	0	1000	Ver Artículo	36.8	5487
30F3	450	315	135	0	0	0	0	0	0.34	153	629	1109	762	1755	Ver Artículo	47.1	4695
40F	340	204	136	0	0	0	0	0	0.50	170	680	1110	0	0	Ver Artículo	26.3	7871
40F2	400	240	160	0	0	0	0	0	0.40	160	639	1110	952	0	Ver Artículo	39.2	4557
40F3	450	270	180	0	0	0	0	0	0.34	153	612	1108	762	1755	Ver Artículo	48.5	5326
50F	340	170	170	0	0	0	0	0	0.50	170	710	1080	0	0	Ver Artículo	21.7	5535
50F2	400	200	200	0	0	0	0	0	0.40	160	621	1008	500	0	Ver Artículo	36.3	5376
50F3	450	225	225	0	0	0	0	0	0.34	153	589	1008	476	1755	Ver Artículo	45.9	4995
c	340	170	0	170	0	0	0	0	0.50	170	659	1008	0	0	Ver Artículo	22	10314
BR	340	170	0	0	170	0	0	0	0.50	170	659	1008	0	0	Ver Artículo	26	3405
TB	340	170	0	0	0	170	0	0	0.50	170	659	1111	0	0	Ver Artículo	23.7	5011
RP	340	170	0	0	0	0	170	0	0.50	170	659	1111	0	0	Ver Artículo	19	7478
CC	340	170	0	0	0	0	0	170	0.50	170	666	1109	0	0	Ver Artículo	-	-

Tabla 83, Diseño de Mezcla por D. Burden, 2003.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Áridos Grueso Rec (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
R0	410	410	0	0.55	225	642	1048	0	0.0	Bajo agua 27°C	48.6	6280
R20	410	410	0	0.55	225	642	840	204	0.0	Bajo agua 27°C	45.3	6570
R50	410	410	0	0.55	225	642	524	506	0.0	Bajo agua 27°C	42.5	6690
R100	410	410	0	0.55	225	642	0	1017	0.0	Bajo agua 27°C	38.1	6920
R0 F25	512.5	384.4	128	0.44	225	582	992	0	0.0	Bajo agua 27°C	52.9	3660
R20 F25	512.5	384.4	128	0.44	225	582	794	193	0.0	Bajo agua 27°C	50.1	3850
R50 F25	512.5	384.4	128	0.44	225	582	496	482	0.0	Bajo agua 27°C	48.1	4000
R100F25	512.5	384.4	128	0.44	225	582	0	963	0.0	Bajo agua 27°C	45.3	4230
R0	410	410	0	0.50	205	662	1081	0	0.0	Bajo agua 27°C	54.1	4540
R20	410	410	0	0.50	205	662	865	210	0.0	Bajo agua 27°C	51.7	4730
R50	410	410	0	0.50	205	662	541	525	0.0	Bajo agua 27°C	47.1	4980
R100	410	410	0	0.50	205	662	0	1049	0.0	Bajo agua 27°C	43.4	5250
R0 F25	512.5	384.375	128	0.40	205	618	1009	0	1.8	Bajo agua 27°C	57.6	2120
R20 F25	512.5	384.375	128	0.40	205	618	802	196	1.8	Bajo agua 27°C	55.8	2370
R50 F25	512.5	384.375	128	0.40	205	618	505	489	1.8	Bajo agua 27°C	52.5	2690
R100F25	512.5	384.375	128	0.40	205	618	0	979	1.8	Bajo agua 27°C	51.2	3000
R0	400	400	0	0.45	180	708	1108	0	5.6	Bajo agua 27°C	66.8	3240
R20	400	400	0	0.45	180	708	886	215	5.6	Bajo agua 27°C	62.4	3550
R50	400	400	0	0.45	180	708	554	538	5.6	Bajo agua 27°C	56.8	3880
R100	400	400	0	0.45	180	708	0	1075	5.6	Bajo agua 27°C	52.1	4250
R0 F25	500	375	125	0.36	180	665	1040	0	6.8	Bajo agua 27°C	70.1	1290
R20 F25	500	375	125	0.36	180	665	808	202	6.8	Bajo agua 27°C	67.3	1480
R50 F25	500	375	125	0.36	180	665	520	504	6.8	Bajo agua 27°C	63.4	1620
R100F25	500	375	125	0.36	180	665	0	1009	6.8	Bajo agua 27°C	61.1	1879
R0	400	400	0	0.40	160	729	1140	0	7.8	Bajo agua 27°C	72.3	2550
R20	400	400	0	0.40	160	729	912	221	7.8	Bajo agua 27°C	69.6	2790
R50	400	400	0	0.40	160	729	570	554	7.8	Bajo agua 27°C	65.3	2980
R100	400	400	0	0.40	160	729	0	1107	7.8	Bajo agua 27°C	58.5	3230
R0 F25	500	375	125	0.32	160	685	1071	0	8.6	Bajo agua 27°C	76.7	840
R20 F25	500	375	125	0.32	160	685	814	208	8.6	Bajo agua 27°C	73.9	1010
R50 F25	500	375	125	0.32	160	685	536	520	8.6	Bajo agua 27°C	70.1	1000
R100F25	500	375	125	0.32	160	685	0	1040	8.6	Bajo agua 27°C	68.7	1280

Tabla 84, Diseño de Mezcla por Cong Lua, 2018.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (%)	Aditivo CNI (l/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
GGBFS0	350	350.0	0.0	0.50	175	835	1028	1	0	Ambiente	38.69	6910
GGBFS25	350	262.5	87.5	0.50	175	832	1025	1	0	Ambiente	34.18	4653
GGBFS50	350	175.0	175.0	0.50	175	830	1021	1	0	Ambiente	27.57	3826
CNI10	350	350.0	0.0	0.48	167	835	1028	1	10	Ambiente	35	8121
CNI20	350	350.0	0.0	0.45	158	835	1028	1	20	Ambiente	36.25	10359
GGBFS25CNI10	350	262.5	87.5	0.48	167	832	1025	1	10	Ambiente	29.04	8373
GGBFS25CNI20	350	262.5	87.5	0.45	158	832	1025	1	20	Ambiente	29.61	10229
GGBFS50CNI10	350	175.0	175.0	0.48	167	830	1021	1	10	Ambiente	21.13	12733
GGBFS50CNI20	350	175.0	175.0	0.45	158	830	1021	1	10	Ambiente	20.22	11043
GGBFS0	350	350.0	0.0	0.50	175	835	1028	1	0	Bajo agua 20°C	42.3	3184
GGBFS25	350	262.5	87.5	0.50	175	832	1025	1	0	Bajo agua 20°C	41.6	1099
GGBFS50	350	175.0	175.0	0.50	175	830	1021	1	0	Bajo agua 20°C	36.89	649
CNI10	350	350.0	0.0	0.48	167	835	1028	1	10	Bajo agua 20°C	44.3	4444
CNI20	350	350.0	0.0	0.45	158	835	1028	1	20	Bajo agua 20°C	43.69	4658
GGBFS25CNI10	350	262.5	87.5	0.48	167	832	1025	1	10	Bajo agua 20°C	41.34	1528
GGBFS25CNI20	350	262.5	87.5	0.45	158	832	1025	1	20	Bajo agua 20°C	37.72	2365
GGBFS50CNI10	350	175.0	175.0	0.48	167	830	1021	1	10	Bajo agua 20°C	33.2	1018
GGBFS50CNI20	350	175.0	175.0	0.45	158	830	1021	1	10	Bajo agua 20°C	31.72	1339

Tabla 85, Diseño de Mezcla por Raif Boğa, y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	HRWR (kg/m ³)	MCS Fibras (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Control	500	375	125	0.4	200	809	794	0	0.0	Camara humeda 22°C	57.8	1659
MCS25	500	375	125	0.4	200	805	790	0.12	19.5	Camara humeda 22°C	53.4	2569
MCS50	500	375	125	0.4	200	802	787	0.24	39.0	Camara humeda 22°C	52.8	3627
MCS100	500	375	125	0.4	200	795	780	0.41	78.0	Camara humeda 22°C	54.2	6202

Tabla 86, Diseño de Mezcla por Karahan y otros, 2016.

Muestra	Total de material cementante	Cemento CEM I 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM I/SR 32,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/A-M 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 32,5a (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 32,5b (kg/m ³)	Cemento CEM III/A 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM V/A 42,5 (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	RCPT 28días (Coulomb)
CEM I 42,5	308.1	308.1	0	0	0	0	0	0	0	0.65	200.3	729.4	1174.3	0.77	Sin control	7441
CEM I 42,5	405.4	405.4	0	0	0	0	0	0	0	0.45	182.4	700.5	1127.8	3.04	Sin control	5801
CEM I/SR 32,5	308.3	0	308.3	0	0	0	0	0	0	0.65	200.4	726.7	1170	0.77	Sin control	9734
CEM I/SR 32,5	402.8	0	402.8	0	0	0	0	0	0	0.45	181.3	692.1	1114.2	3.02	Sin control	5778
CEM II/A-M 42,5	302.8	0	0	302.8	0	0	0	0	0	0.65	196.8	715.7	1152.2	0.76	Sin control	8610
CEM II/A-M 42,5	399.6	0	0	399.6	0	0	0	0	0	0.45	179.8	689.1	1109.5	3	Sin control	5427
CEM II/B-M 42,5	304.7	0	0	0	304.7	0	0	0	0	0.65	198.1	716.8	1154	0.76	Sin control	7694
CEM II/B-M 42,5	399.5	0	0	0	399.5	0	0	0	0	0.45	179.8	684.2	1101.6	3	Sin control	4286
CEM II/B-M 32,5a	304.9	0	0	0	0	304.9	0	0	0	0.65	198.2	715.4	1151.8	0.76	Sin control	8883
CEM II/B-M 32,5a	404.5	0	0	0	0	404.5	0	0	0	0.45	182.0	689.2	1109.7	4.45	Sin control	4186
CEM II/B-M 32,5b	303.8	0	0	0	0	0	303.8	0	0	0.65	197.5	712.4	1147	0.76	Sin control	6249
CEM II/B-M 32,5b	401	0	0	0	0	0	401	0	0	0.45	180.5	682.7	1099.3	4.41	Sin control	5067
CEM III/A 42,5	306.4	0	0	0	0	0	0	306.4	0	0.65	199.2	718.1	1156.2	0.77	Sin control	9345
CEM III/A 42,5	399.8	0	0	0	0	0	0	399.8	0	0.45	179.9	680.7	1095.9	4	Sin control	5806
CEM V/A 42,5	306.5	0	0	0	0	0	0	0	306.5	0.65	199.2	722.3	1163	0.77	Sin control	772
CEM V/A 42,5	400.7	0	0	0	0	0	0	0	400.7	0.45	180.3	687.2	1106.4	4.01	Sin control	8354

Tabla 87, Diseño de Mezcla por Güneysi y otros, 2011 (Parte I).

Muestra	Total de material cementante	Cemento CEM I 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM I/SR 32,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/A-M 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 32,5a (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 32,5b (kg/m ³)	Cemento CEM III/A 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM V/A 42,5 (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	RCPT 28días (Coulomb)
CEM I 42,5	308.1	308.1	0	0	0	0	0	0	0	0.65	200.3	729.4	1174.3	0.77	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	7118
CEM I 42,5	405.4	405.4	0	0	0	0	0	0	0	0.45	182.4	700.5	1127.8	3.04	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	4869
CEM I/SR 32,5	308.3	0	308.3	0	0	0	0	0	0	0.65	200.4	726.7	1170	0.77	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	9679
CEM I/SR 32,5	402.8	0	402.8	0	0	0	0	0	0	0.45	181.3	692.1	1114.2	3.02	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	4943
CEM II/A-M 42,5	302.8	0	0	302.8	0	0	0	0	0	0.65	196.8	715.7	1152.2	0.76	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	6933
CEM II/A-M 42,5	399.6	0	0	399.6	0	0	0	0	0	0.45	179.8	689.1	1109.5	3	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	5230
CEM II/B-M 42,5	304.7	0	0	0	304.7	0	0	0	0	0.65	198.1	716.8	1154	0.76	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	5608
CEM II/B-M 42,5	399.5	0	0	0	399.5	0	0	0	0	0.45	179.8	684.2	1101.6	3	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	3475
CEM II/B-M 32,5a	304.9	0	0	0	0	304.9	0	0	0	0.65	198.2	715.4	1151.8	0.76	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	4382
CEM II/B-M 32,5a	404.5	0	0	0	0	404.5	0	0	0	0.45	182.0	689.2	1109.7	4.45	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	3083
CEM II/B-M 32,5b	303.8	0	0	0	0	0	303.8	0	0	0.65	197.5	712.4	1147	0.76	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	2395
CEM II/B-M 32,5b	401	0	0	0	0	0	401	0	0	0.45	180.5	682.7	1099.3	4.41	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	1922
CEM III/A 42,5	306.4	0	0	0	0	0	0	306.4	0	0.65	199.2	718.1	1156.2	0.77	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	8523
CEM III/A 42,5	399.8	0	0	0	0	0	0	399.8	0	0.45	179.9	680.7	1095.9	4	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	3820
CEM V/A 42,5	306.5	0	0	0	0	0	0	0	306.5	0.65	199.2	722.3	1163	0.77	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	7703
CEM V/A 42,5	400.7	0	0	0	0	0	0	0	400.7	0.45	180.3	687.2	1106.4	4.01	7 Bajo agua 20°C+camara humeda	5780

Tabla 88, Diseño de Mezcla por Güneysi y otros, 2011 (Parte II).

Muestra	Total de material cementante	Cemento CEM I 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM I/SR 32,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/A-M 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 32,5a (kg/m ³)	Cemento CEM II/B-M 32,5b (kg/m ³)	Cemento CEM III/A 42,5 (kg/m ³)	Cemento CEM V/A 42,5 (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	RCPT 28días (Coulomb)
CEM I 42,5	308.1	308.1	0	0	0	0	0	0	0	0.65	200.3	729.4	1174.3	0.77	Bajo agua 20°C	6828
CEM I 42,6	405.4	405.4	0	0	0	0	0	0	0	0.45	182.4	700.5	1127.8	3.04	Bajo agua 20°C	4575
CEM I/SR 32,5	308.3	0	308.3	0	0	0	0	0	0	0.65	200.4	726.7	1170	0.77	Bajo agua 20°C	6717
CEM I/SR 32,5	402.8	0	402.8	0	0	0	0	0	0	0.45	181.3	692.1	1114.2	3.02	Bajo agua 20°C	4257
CEM II/A-M 42,5	302.8	0	0	302.8	0	0	0	0	0	0.65	196.8	715.7	1152.2	0.76	Bajo agua 20°C	6425
CEM II/A-M 42,5	399.6	0	0	399.6	0	0	0	0	0	0.45	179.8	689.1	1109.5	3	Bajo agua 20°C	4786
CEM II/B-M 42,5	304.7	0	0	0	304.7	0	0	0	0	0.65	198.1	716.8	1154	0.76	Bajo agua 20°C	4922
CEM II/B-M 42,5	399.5	0	0	0	399.5	0	0	0	0	0.45	179.8	684.2	1101.6	3	Bajo agua 20°C	2998
CEM II/B-M 32,5a	304.9	0	0	0	0	304.9	0	0	0	0.65	198.2	715.4	1151.8	0.76	Bajo agua 20°C	3279
CEM II/B-M 32,5a	404.5	0	0	0	0	404.5	0	0	0	0.45	182.0	689.2	1109.7	4.45	Bajo agua 20°C	1911
CEM II/B-M 32,5b	303.8	0	0	0	0	0	303.8	0	0	0.65	197.5	712.4	1147	0.76	Bajo agua 20°C	1384
CEM II/B-M 32,5b	401	0	0	0	0	0	401	0	0	0.45	180.5	682.7	1099.3	4.41	Bajo agua 20°C	1231
CEM III/A 42,5	306.4	0	0	0	0	0	0	306.4	0	0.65	199.2	718.1	1156.2	0.77	Bajo agua 20°C	2215
CEM III/A 42,5	399.8	0	0	0	0	0	0	399.8	0	0.45	179.9	680.7	1095.9	4	Bajo agua 20°C	1943
CEM V/A 42,5	306.5	0	0	0	0	0	0	0	306.5	0.65	199.2	722.3	1163	0.77	Bajo agua 20°C	4792
CEM V/A 42,5	400.7	0	0	0	0	0	0	0	400.7	0.45	180.3	687.2	1106.4	4.01	Bajo agua 20°C	3223

Tabla 89, Diseño de Mezcla por Güneysi y otros, 2011 (Parte III).

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	Cemento PPC (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
P	400	0	320	80	0	0	0.48	191.6	540	1175	30.7	840	1.69E-08
PRL5	400	0	288	72	20	20	0.48	191.6	540	1175	33.1	660	1.54E-08
PRL10	400	0	256	64	40	40	0.48	191.6	540	1175	34.4	580	1.06E-08
PRL15	400	0	224	56	60	60	0.48	191.6	540	1175	30.0	370	1.16E-08
PRL20	400	0	192	48	80	80	0.48	191.6	540	1175	24.8	270	1.13E-08

Tabla 90, Diseño de Mezcla por Kathirvel, y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Control	704	563	141	0	0	0.25	176	532	915	Bajo agua	60	2300
MK05	704	528	141	35	0	0.25	176	529	909	Bajo agua	66	1640
MK10	704	493	141	70	0	0.25	176	525	903	Bajo agua	64.5	1650
MK15	705	458	141	106	0	0.25	176	522	897	Bajo agua	59.5	1400
MK20	704	422	141	141	0	0.25	176	518	891	Bajo agua	59	950
SF05	704	528	141	0	35	0.25	176	530	911	Bajo agua	63	1600
SF10	704	493	141	0	70	0.25	176	528	908	Bajo agua	72	1400
SF15	705	458	141	0	106	0.25	176	526	904	Bajo agua	71.5	450
SF20	704	422	141	0	141	0.25	176	524	900	Bajo agua	66	350

Tabla 91, Diseño de Mezcla por Kim, y otros, 2007.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos SFS (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
OFA-0SF5	450	450	0	0.4	180	850	0	850	2.03	Bajo agua 23°C	49.0	3800
OFA-25SF5	450	450	0	0.4	180	638	201	850	3.33	Bajo agua 23°C	41.0	3950
OFA-50SF5	450	450	0	0.4	180	425	402	850	5.63	Bajo agua 23°C	44.0	4000
OFA-100SF5	450	450	0	0.4	180	0	803	850	12.88	Bajo agua 23°C	37.5	7100
30FA-0SF5	450	315	135	0.4	180	831	0	831	1.80	Bajo agua 23°C	37.5	1000
30FA-25SF5	450	315	135	0.4	180	623	196	831	3.15	Bajo agua 23°C	35.4	850
30FA-50SF5	450	315	135	0.4	180	415	393	831	4.90	Bajo agua 23°C	37.5	1200
30FA-100SF5	450	315	135	0.4	180	0	785	831	7.60	Bajo agua 23°C	38.5	2300
50FA-0SF5	450	225	225	0.4	180	818	0	818	1.58	Bajo agua 23°C	41.5	500
50FA-25SF5	450	225	225	0.4	180	614	193	818	2.53	Bajo agua 23°C	37.3	750
50FA-50SF5	450	225	225	0.4	180	409	386	818	3.88	Bajo agua 23°C	30.0	1000
50FA-100SF5	450	225	225	0.4	180	0	773	818	5.20	Bajo agua 23°C	33.0	850
70FA-0SF5	450	135	315	0.4	180	805	0	805	1.15	Bajo agua 23°C	35.5	500
70FA-25SF5	450	135	315	0.4	180	604	190	805	2.10	Bajo agua 23°C	29.0	550
70FA-50SF5	450	135	315	0.4	180	403	380	805	3.05	Bajo agua 23°C	24.4	1000
70FA-100SF5	450	135	315	0.4	180	0	760	805	3.22	Bajo agua 23°C	24.4	1000

Tabla 92, Diseño de Mezcla por Sahmaran, y otros, 2011.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Control	400	400	0	0	0.44	176	962	857	5	Bajo agua 20°C	60	3450
5MK	400	380	20	0	0.44	176	959	855	5.4	Bajo agua 20°C	61	3100
10MK	400	360	40	0	0.44	176	956	852	6	Bajo agua 20°C	64	2500
15MK	400	340	60	0	0.44	176	954	849	6.6	Bajo agua 20°C	67	1200
5SF	400	380	0	20	0.44	176	958	853	5.4	Bajo agua 20°C	56	2000
10SF	400	360	0	40	0.44	176	954	849	6	Bajo agua 20°C	61	1550
15SF	400	340	0	60	0.44	176	949	845	6.6	Bajo agua 20°C	63	950
Control	400	400	0	0	0.44	176	962	857	5	Tratamiento de Calor	46	4900
5MK	400	380	20	0	0.44	176	959	855	5.4	Tratamiento de Calor	51	3600
10MK	400	360	40	0	0.44	176	956	852	6	Tratamiento de Calor	51.5	3850
15MK	400	340	60	0	0.44	176	954	849	6.6	Tratamiento de Calor	54.5	1400
5SF	400	380	0	20	0.44	176	958	853	5.4	Tratamiento de Calor	50	2600
10SF	400	360	0	40	0.44	176	954	849	6	Tratamiento de Calor	51	2100
15SF	400	340	0	60	0.44	176	949	845	6.6	Tratamiento de Calor	54	1050

Tabla 93, Diseño de Mezcla por Gesoğlu, 2010.

Muestra	Total de material cementante	Cemento A (kg/m ³)	Cemento B (kg/m ³)	Cemento C (kg/m ³)	Cemento D (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT (Coulomb)
A0	350	350	0	0	0	0.65	227.5	0	601	1150	Bajo agua 20°C	25.9	7200
A15	440	350	0	0	0	0.52	227.5	90	510	1150	Bajo agua 20°C	26.6	10950
B0	350	0	350	0	0	0.65	227.5	0	601	1150	Bajo agua 20°C	25.8	7300
B15	440	0	350	0	0	0.52	227.5	90	510	1150	Bajo agua 20°C	25.9	9200
C0	350	0	0	350	0	0.65	227.5	0	601	1150	Bajo agua 20°C	31.7	8000
C15	440	0	0	350	0	0.52	227.5	90	510	1150	Bajo agua 20°C	33	8200
D0	350	0	0	0	350	0.65	227.5	0	601	1150	Bajo agua 20°C	309	7700
D15	440	0	0	0	350	0.52	227.5	90	510	1150	Bajo agua 20°C	32.25	8100

Tabla 94, Diseño de Mezcla por Menadi, y otros, 2009.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT (Coulomb)
Control	433	433	0.45	195	676	1036	C.Humeda 95%/20°C	50.2	800
RG-15	432	432	0.45	195	675	1033	C.Humeda 95%/20°C	49.4	790
RG-30	430	430	0.45	194	672	1029	C.Humeda 95%/20°C	48.5	780
RG-45	427	427	0.45	193	667	1023	C.Humeda 95%/20°C	47.2	770
RG-60	425	425	0.45	191	663	1016	C.Humeda 95%/20°C	44.9	750
RC-15	431	431	0.45	194	674	1032	C.Humeda 95%/20°C	49.9	810
RC-30	429	429	0.45	193	670	1027	C.Humeda 95%/20°C	49.3	840
RC-45	425	425	0.45	191	663	1016	C.Humeda 95%/20°C	48.1	875
RC-60	420	420	0.45	189	656	1006	C.Humeda 95%/20°C	46.4	890

Tabla 95, Diseño de Mezcla por Kathirvel, y otros, 2013.

Muestra	Total de material cementante	Cemento OPC (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (%)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
BC	420	420	0	0.43	181	621.00	1108	0.00	Bajo agua 27°C	47	1740
BR1	420	399	21	0.43	181	582.00	1108	0.00	Bajo agua 27°C	49	920
BR2	420	378	42	0.43	181	542.00	1108	0.00	Bajo agua 27°C	49.5	560
BR3	420	357	63	0.43	181	503.00	1108	0.00	Bajo agua 27°C	41	400
BR4	420	336	84	0.43	181	464.00	1108	0.00	Bajo agua 27°C	33	34
CC	474	474	0	0.35	166	636.00	1113	0.00	Bajo agua 27°C	70	2420
CR1	474	447	27	0.35	166	585.10	1113	0.00	Bajo agua 27°C	71	900
CR2	474	420	54	0.35	166	535.61	1113	0.00	Bajo agua 27°C	72	660
CR3	472	391	81	0.35	165	483.21	1113	0.00	Bajo agua 27°C	62	560
CR4	474	366	108	0.35	166	433.72	1113	0.00	Bajo agua 27°C	48	410
BC	420	420	0	0.43	181	621.00	1108	0.40	Bajo agua 27°C	44.5	910
BR1	420	399	21	0.43	181	582.00	1108	0.40	Bajo agua 27°C	46	770
BR2	420	378	42	0.43	181	542.00	1108	0.80	Bajo agua 27°C	47.5	530
BR3	420	357	63	0.43	181	503.00	1108	1.40	Bajo agua 27°C	38.5	390
BR4	420	336	84	0.43	181	464.00	1108	2.80	Bajo agua 27°C	30	310
CC	474	474	0	0.35	166	636.00	1113	1.80	Bajo agua 27°C	62	960
CR1	474	447	27	0.35	166	585.10	1113	2.00	Bajo agua 27°C	59.5	720
CR2	474	420	54	0.35	166	535.61	1113	3.20	Bajo agua 27°C	56	380
CR3	472	391	81	0.35	165	483.21	1113	4.50	Bajo agua 27°C	48	460
CR4	474	366	108	0.35	166	433.72	1113	5.80	Bajo agua 27°C	42	350

Tabla 96, Diseño de Mezcla por Ramasamy, 2012.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CCA 1 (kg/m ³)	CCA 2 (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Control	330	330	0.0	0.0	0.5	165	689	1229	0.0	33.5	1053
NRHA-10	330	297	33.0	0.0	0.5	165	689	1229	1.2	35.0	853
NRHA-15	330	280.5	49.5	0.0	0.5	165	689	1229	1.8	34.0	1498
NRHA-20	330	264	66.0	0.0	0.5	165	689	1229	2.3	33.5	2050
GRHA-10	330	297	0.0	33.0	0.5	165	689	1229	1.4	35.0	873
GRHA-15	330	280.5	0.0	49.5	0.5	165	689	1229	2.0	38.5	998
GRHA-20	330	264	0.0	66.0	0.5	165	689	1229	2.5	35.0	1120

Tabla 97, Diseño de Mezcla por Ponmalar, y otros, 2015.

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Filler Calizo (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (%)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
REF	530	530	0	0	150	0.33	175	448	1045	0.12	Bajo agua 20°C	54.90	2800
5RHA	530	505	25	0	125	0.33	175	452	1055	0.12	Bajo agua 20°C	55.40	900
10RHA	530	482	48	0	102	0.33	175	456	1064	0.11	Bajo agua 20°C	62.30	700
15RHA	530	461	69	0	81	0.33	175	460	1073	0.11	Bajo agua 20°C	60.30	300
20RHA	530	442	88	0	62	0.33	175	463	1081	0.11	Bajo agua 20°C	60.20	250
10SF	530	482	0	48	102	0.33	175	456	1064	0.11	Bajo agua 20°C	59.00	300

Tabla 98, Diseño de Mezcla por Ha Thanh Le, y otros, (2014)

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Reductor de agua (ml)	Aditivo AE (ml)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
Mix1	441	441	0	0	0.41	181	555	1036	722	118	Temp. 23°C	51.5	4720
Mix2	440	362	78	0	0.41	181	545	1026	722	118	Temp. 23°C		
Mix3	392	196	0	196	0.40	158	632	59	976	148	Temp. 23°C		
Mix1	441	441	0	0	0.41	181	555	1036	722	118	Temp. 71°C	34.2	7110
Mix2	440	362	78	0	0.41	181	545	1026	722	118	Temp. 71°C		
Mix3	392	196	0	196	0.40	158	632	59	976	148	Temp. 71°C		
Mix1	441	441	0	0	0.41	181	555	1036	722	118	Temp. 93°C	19.8	11070
Mix2	440	362	78	0	0.41	181	545	1026	722	118	Temp. 93°C		
Mix3	392	196	0	196	0.40	158	632	59	976	148	Temp. 93°C		
Mix1	441	441	0	0	0.41	181	555	1036	722	118	Temp. 23°C	45.7	5562
Mix2	440	362	78	0	0.41	181	545	1026	722	118	Temp. 23°C	51.5	5173
Mix3	392	196	0	196	0.40	158	632	59	976	148	Temp. 23°C	53.3	2692
Mix1	441	441	0	0	0.41	181	555	1036	722	118	Temp. 71°C	40.2	8633
Mix2	440	362	78	0	0.41	181	545	1026	722	118	Temp. 71°C	47.3	2548
Mix3	392	196	0	196	0.40	158	632	59	976	148	Temp. 71°C	49.5	1931
Mix1	441	441	0	0	0.41	181	555	1036	722	118	Temp. 82°C	38.1	9888
Mix2	440	362	78	0	0.41	181	545	1026	722	118	Temp. 82°C	47.3	2503
Mix3	392	196	0	196	0.40	158	632	59	976	148	Temp. 82°C	45.4	2329

Tabla 99, Diseño de Mezcla por Chini, y otros, (2005)

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	Escoria 1 (kg/m ³)	Escoria 2 (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo HRWRA (%)	RCPT 28días (Coulomb)
CTL0,5	375	375	0	0	0.50	188	959	785	0.00	5160
CTL0,4	375	375	0	0	0.40	150	1012	828	0.36	3690
CTL0,35	375	375	0	0	0.35	131	1038	850	0.52	3042
S1-0,5(20)	375	300	75	0	0.50	188	955	782	0.00	4244
S1-0,4(20)	375	300	75	0	0.40	150	1008	825	0.30	3494
S1-0,35(20)	375	300	75	0	0.35	131	1035	847	0.52	3120
S2-0,5(20)	375	300	0	75	0.50	188	955	782	0.12	4349
S2-0,4(20)	375	300	0	75	0.40	150	1008	825	0.40	3513
S2-0,35(20)	375	300	0	75	0.35	131	1035	847	0.57	3211

Tabla 100, Diseño de Mezcla por Ramezianpour, y otros, (2016)

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Áridos Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (l/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
I (NSC)	350	350	0	0.55	193	616	1251	0	Camara 23°C/95%	29.1	4700
II (NSC)	350	350	0	0.45	158	616	1251	1.75	Camara 23°C/95%	34.6	4200
III (NSC)	555	500	55	0.34	190	685	1000	5.67	Camara 23°C/95%	50.1	900
IV (NSC)	555	500	55	0.25	140	640	1170	11.67	Camara 23°C/95%	82.1	450

Tabla 101, Diseño de Mezcla por Gowripalan, y otros, (1998)

Muestra	Total de material cementante	Cemento I (kg/m ³)	Cemento V (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28 días (Mpa)	RCPT 28días (Coulomb)
B1	385	385	0	0	0.42	161	1640	977	1.60	Bajo agua	46	3150
B2	385	289	0	96	0.42	161	1640	977	1.60	Bajo agua	47	2600
B3	385	231	0	154	0.42	161	1640	977	1.55	Bajo agua	44.5	2000
B4	385	173	0	212	0.42	161	1640	977	1.60	Bajo agua	46.5	1700
B1	385	0	385	0	0.42	161	1640	977	1.70	Bajo agua	49.5	3200
B2	385	0	289	96	0.42	161	1640	977	1.20	Bajo agua	51	2700
B3	385	0	231	154	0.42	161	1640	977	1.70	Bajo agua	50	2300
B4	385	0	173	212	0.42	161	1640	977	1.20	Bajo agua	46	2000

Tabla 102, Diseño de Mezcla por Yun Yeau, y otros, (2005)

Muestra	Total de material cementante	Cemento I (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Aditivo SP (Kg/m ³)	Tipo Curado	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
1	365	365	0	0	0	0.40	146	1072	795	2.8	Bajo agua 20°C	1.63E-11
2	379	322	57	0	0	0.37	140	1045	808	2.3	Bajo agua 20°C	2.23E-11
3	400	300	100	0	0	0.35	140	1009	812	2.2	Bajo agua 20°C	2.75E-11
4	448	336	112	0	0	0.35	157	1027	704	2.9	Bajo agua 20°C	2.33E-11
5	354	340	0	14	0	0.42	147	1072	795	2.7	Bajo agua 20°C	1.16E-11
6	357	300	43	14	0	0.39	140	1054	815	2.9	Bajo agua 20°C	9.70E-12
7	369	310	44	15	0	0.39	145	1117	796	3.8	Bajo agua 20°C	9.60E-12
8	328	276	39	13	0	0.44	145	1080	802	2.6	Bajo agua 20°C	1.44E-11
9	393	330	47	16	0	0.34	135	1045	808	3.6	Bajo agua 20°C	9.40E-12
10	417	350	50	17	0	0.39	163	1041	713	3.4	Bajo agua 20°C	9.90E-12
11	360	360	0	0	0	0.40	144	1062	788	2.3	Bajo agua 20°C	2.50E-12
12	375	375	0	0	0	0.40	150	1083	804	2.6	Bajo agua 20°C	2.80E-12
13	410	410	0	0	0	0.40	164	1039	712	2.9	Bajo agua 20°C	2.30E-12
14	360	108	0	0	252	0.40	144	1063	788	2.9	Bajo agua 20°C	4.10E-12
15	354	340	0	14	0	0.42	147	1072	795	3.7	Bajo agua 20°C	1.16E-11

Tabla 103, Diseño de Mezcla por SØRENSEN, y otros, (2014)

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28 días (Mpa)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
1	450.00	450	0.000	0.000	0.35	158	821.74	468.3	Camara humeda 50% 22°C	49.7	9.90E-12
2	400.00	400	0.000	0.000	0.45	180	811.27	468.3	Camara humeda 50% 22°C	41.2	1.53E-11
3	470.59	400	70.588	0.000	0.45	212	795.568	468.3	Camara humeda 50% 22°C	37.1	1.81E-11
4	571.43	400	171.429	0.000	0.45	257	777.249	468.3	Camara humeda 50% 22°C	36.8	2.07E-11
5	350.00	350	0.000	0.000	0.55	193	824.355	468.3	Camara humeda 50% 22°C	38.4	1.51E-11
6	450.00	450	0.000	0.000	0.35	158	821.738	234.15	Camara humeda 50% 22°C	36.2	2.01E-11
7	400.00	400	0.000	0.000	0.45	180	811.27	234.15	Camara humeda 50% 22°C	31	8.50E-12
8	470.59	400	70.588	0.000	0.45	212	795.568	234.15	Camara humeda 50% 22°C	26.1	1.18E-11
9	571.43	400	171.429	0.000	0.45	257	777.249	234.15	Camara humeda 50% 22°C	23.7	1.20E-11
10	372.34	350	0.000	22.340	0.45	168	803.419	234.15	Camara humeda 50% 22°C	22.6	1.24E-11
11	450.00	450	0.000	0.000	0.55	248	824.355	234.15	Camara humeda 50% 22°C	23.6	1.46E-11
12	450.00	450	0.000	0.000	0.35	158	821.738	939.05	Camara humeda 50% 22°C	76.3	8.10E-12
13	529.41	450	79.412	0.000	0.35	185	803.419	939.05	Camara humeda 50% 22°C	68.1	9.50E-12
14	642.86	450	192.857	0.000	0.35	225	785.1	939.05	Camara humeda 50% 22°C	63.7	1.04E-11
15	478.72	450	0.000	28.723	0.35	168	813.887	939.05	Camara humeda 50% 22°C	74.3	7.20E-12
16	494.51	450	0.000	44.505	0.35	173	7874.553	939.05	Camara humeda 50% 22°C	84.2	4.10E-12
17	642.86	450	128.571	64.286	0.35	225	782.483	939.05	Camara humeda 50% 22°C	71.4	4.60E-12
18	900.00	450	360.000	90.000	0.35	315	758.93	939.05	Camara humeda 50% 22°C	58.2	7.10E-12
19	400.00	400	0.000	0.000	0.45	180	811.27	939.05	Camara humeda 50% 22°C	57.7	1.31E-11
20	470.59	400	70.588	0.000	0.45	212	795.568	939.05	Camara humeda 50% 22°C	51.4	1.42E-11
21	571.43	400	171.429	0.000	0.45	257	777.249	939.05	Camara humeda 50% 22°C	48.7	1.51E-11
22	425.53	400	0.000	25.532	0.45	191	803.419	939.05	Camara humeda 50% 22°C	59.8	9.70E-12
23	439.56	400	0.000	39.560	0.45	198	798.185	939.05	Camara humeda 50% 22°C	58.8	9.70E-12
24	571.43	400	114.286	57.143	0.45	257	774.632	939.05	Camara humeda 50% 22°C	48.5	9.80E-12
25	350.00	350	0.000	0.000	0.55	193	824.355	939.05	Camara humeda 50% 22°C	47.8	1.58E-11
26	411.76	350	61.765	0.000	0.55	226	808.653	939.05	Camara humeda 50% 22°C	44.1	2.26E-11
27	372.34	350	0.000	22.340	0.55	205	816.504	939.05	Camara humeda 50% 22°C	47	1.29E-11
28	384.62	350	0.000	34.615	0.55	212	811.27	939.05	Camara humeda 50% 22°C	45	1.18E-11
29	500.00	350	100.000	50.000	0.55	275	792.951	939.05	Camara humeda 50% 22°C	40.1	2.07E-11
30	700.00	350	280.000	70.000	0.55	385	772.015	939.05	Camara humeda 50% 22°C	25.9	1.51E-11

Tabla 104, Diseño de Mezcla por Martins Cortês, (s/año)

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia 28 días (Mpa)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
1	470.00	470	0.000	0.000	0.35	164.5	689	978	Bajo Agua 20°C	57.50	1.16E-11
2	470.00	376	0.000	94.000	0.35	164.5	687	974	Bajo Agua 20°C	61.50	6.27E-12
3	470.00	282	0.000	188.000	0.35	164.5	686	970	Bajo Agua 20°C	57.00	4.43E-12
4	470.00	188	0.000	282.000	0.35	164.5	681	966	Bajo Agua 20°C	52.50	3.54E-12
5	470.00	423	47.000	0.000	0.35	164.5	683	68	Bajo Agua 20°C	57.00	8.70E-12
6	470.00	376	94.000	0.000	0.35	164.5	676	958	Bajo Agua 20°C	54.00	9.32E-12
7	470.00	329	141.000	0.000	0.35	164.5	669	948	Bajo Agua 20°C	48.00	1.01E-11
8	370.00	370	0.000	0.000	0.45	166.5	773	971	Bajo Agua 20°C	58.20	1.73E-11
9	370.00	296	0.000	74.000	0.45	166.5	771	968	Bajo Agua 20°C	49.00	9.18E-12
10	370.00	222	0.000	148.000	0.45	166.5	768	965	Bajo Agua 20°C	44.00	8.52E-12
11	370.00	148	0.000	222.000	0.45	166.5	766	962	Bajo Agua 20°C	42.50	5.80E-12
12	370.00	333	37.000	0.000	0.45	166.5	768	964	Bajo Agua 20°C	49.00	1.27E-11
13	370.00	296	74.000	0.000	0.45	166.5	762	957	Bajo Agua 20°C	44.00	1.76E-11
14	370.00	259	111.000	0.000	0.45	166.5	756	950	Bajo Agua 20°C	39.50	1.98E-11
15	320.00	320	0.000	0.000	0.55	176.0	815	944	Bajo Agua 20°C	37.30	2.45E-11
16	320.00	256	0.000	64.000	0.55	176.0	813	942	Bajo Agua 20°C	35.00	1.65E-11
17	320.00	192	0.000	128.000	0.55	176.0	811	939	Bajo Agua 20°C	34.00	1.11E-11
18	320.00	128	0.000	192.000	0.55	176.0	809	937	Bajo Agua 20°C	30.20	8.38E-12
19	320.00	288	32.000	0.000	0.55	176.0	810	939	Bajo Agua 20°C	30.00	3.69E-11
20	320.00	256	64.000	0.000	0.55	176.0	805	933	Bajo Agua 20°C	29.00	3.83E-11
21	320.00	224	96.000	0.000	0.55	176.0	800	927	Bajo Agua 20°C	25.00	4.20E-11

Tabla 105, Diseño de Mezcla por Park, y otros, (2016)

Muestra	Total de material cementante	Cemento (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Tipo Curado	Resistencia (Mpa)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
1	363.00	363	0.60	218.0	559	1162	cabina x 13días 5°C	37.8	5.53E-11
2	364.00	364	0.60	218.0	559	1162	cabina x 13días 20°C	37.8	1.32E-11
3	365.00	365	0.60	218.0	559	1162	cabina x 13días 40°C	37.8	8.20E-12
4	380.00	380	0.48	182.0	627	1217	cabina x 13días 5°C	46.7	1.28E-11
5	381.00	381	0.48	182.0	627	1217	cabina x 13días 20°C	46.7	8.13E-12
6	382.00	382	0.48	182.0	627	1217	cabina x 13días 40°C	46.7	5.38E-12
7	400.00	400	0.35	140.0	660	1281	cabina x 13días 5°C	81.7	7.22E-12
8	401.00	401	0.35	140.0	660	1281	cabina x 13días 20°C	81.7	6.35E-12
9	402.00	402	0.35	140.0	660	1281	cabina x 13días 40°C	81.7	2.31E-12

Tabla 106, Diseño de Mezcla por Yuan, y otros, 2008.

Muestra	Total de material cementante	Cemento I (kg/m ³)	Cemento II (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos Finos (kg/m ³)	Árido Gruesos (kg/m ³)	Aditivo (%)	Tipo Curado	Resistencia 28días (Mpa)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
a	500	500	0	0	0.5	250	1502	0	si	Camara 19-23°C 55%	48.5	2.50E-11
b	500	450	0	50	0.5	250	1502	0	si	Camara 19-23°C 55%	52.5	1.20E-11
c	492	0	492	0	0.5	246	1478	0	si	Camara 19-23°C 55%	44.4	2.80E-11
d	490	0	441	49	0.5	245	1472	0	si	Camara 19-23°C 55%	51.0	8.00E-12
e	491	0	393	98	0.5	246	1474	0	si	Camara 19-23°C 55%	42.0	5.00E-12
c	492	0	492	0	0.5	246	1478	0	si	Bajo agua 20°C	44.4	1.95E-11
d	490	0	441	49	0.5	245	1472	0	si	Bajo agua 20°C	51.0	6.50E-12
e	491	0	393	98	0.5	246	1474	0	si	Bajo agua 20°C	42.0	5.00E-12

Tabla 107, Diseño de Mezcla por Marinos, y otros, 2015

Muestra	TCM	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (%)	Tipo Curado (temp °C)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
1	485	485.00	0.00	0.00	0.00	0.30	145.50	1079.52	0	19.85	3.10E-12
2	485	446.20	0.00	38.80	0.00	0.30	145.50	1079.52	1	19.85	8.50E-13
3	485	412.25	0.00	72.75	0.00	0.30	145.50	1030.63	1	19.85	7.30E-13
4	485	242.50	0.00	0.00	242.50	0.30	145.50	1079.52	0	19.85	9.80E-13
5	485	145.50	0.00	0.00	339.50	0.30	145.50	1030.63	0	19.85	7.30E-13
6	485	203.70	0.00	38.80	242.50	0.30	145.50	1030.63	1	19.85	2.00E-10
7	485	388.00	97.00	0.00	0.00	0.30	145.50	1079.52	0	19.85	1.17E-12
8	485	291.00	194.00	0.00	0.00	0.30	145.50	1030.63	0	19.85	1.52E-12
9	485	349.20	97.00	38.80	0.00	0.30	145.50	1030.63	1	19.85	7.20E-13
10	485	252.20	194.00	38.80	0.00	0.30	145.50	1079.52	1	19.85	5.50E-13
11	400	400.00	0.00	0.00	0.00	0.40	160.00	890.32	0	21.85	3.13E-12
12	400	400.00	0.00	0.00	0.00	0.40	160.00	890.32	0	34.85	4.31E-12
13	400	400.00	0.00	0.00	0.00	0.40	160.00	890.32	0	49.85	7.97E-12
14	400	375.75	0.00	24.25	0.00	0.40	160.00	890.32	1	21.85	1.57E-12
15	400	375.75	0.00	24.25	0.00	0.40	160.00	890.32	1	34.85	2.09E-12
16	400	375.75	0.00	24.25	0.00	0.40	160.00	890.32	1	49.85	3.89E-12
17	400	351.50	0.00	48.50	0.00	0.40	160.00	890.32	1	21.85	1.09E-12
18	400	351.50	0.00	48.50	0.00	0.40	160.00	890.32	1	34.85	1.23E-12
19	400	360.00	0.00	40.00	0.00	0.40	160.00	890.32	1	49.85	2.32E-12
20	400	348.00	0.00	52.00	0.00	0.40	160.00	890.32	1	21.85	7.80E-13
21	400	348.00	0.00	52.00	0.00	0.40	160.00	890.32	1	34.85	1.15E-12
22	400	348.00	0.00	52.00	0.00	0.40	160.00	890.32	1	49.85	1.85E-12
23	387	387.00	0.00	0.00	0.00	0.45	174.15	822.38	0	19.85	2.85E-12
24	387	328.95	58.05	0.00	0.00	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.47E-12
25	387	270.90	116.10	0.00	0.00	0.45	174.15	785.73	0	19.85	1.18E-12
26	387	193.50	193.50	0.00	0.00	0.45	174.15	785.73	0	19.85	1.69E-12
27	387	328.95	0.00	0.00	58.05	0.45	174.15	822.38	0	19.85	2.35E-12
28	387	270.90	0.00	0.00	116.10	0.45	174.15	822.38	0	19.85	2.48E-12
29	387	193.50	0.00	0.00	193.50	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.09E-12
30	387	387.00	0.00	0.00	0.00	0.45	174.15	822.38	0	19.85	3.82E-12
31	387	270.90	116.10	0.00	0.00	0.45	174.15	785.73	0	19.85	1.22E-12
32	387	270.90	0.00	0.00	116.10	0.45	174.15	822.38	0	19.85	2.10E-12
33	316	316.00	0.00	0.00	0.00	0.55	173.80	773.66	0	19.85	7.38E-12
34	497	347.90	149.10	0.00	0.00	0.35	173.95	1159.67	0	19.85	8.60E-13
35	387	387.00	0.00	0.00	0.00	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.99E-12
36	387	328.95	58.05	0.00	0.00	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.47E-12
37	387	270.90	116.10	0.00	0.00	0.45	174.15	785.73	0	19.85	8.30E-13
38	387	193.50	193.50	0.00	0.00	0.45	174.15	785.73	0	19.85	7.50E-13
39	387	328.95	0.00	0.00	58.05	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.95E-12
40	387	270.90	0.00	0.00	116.10	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.51E-12
41	387	193.50	0.00	0.00	193.50	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.10E-12
42	387	387.00	0.00	0.00	0.00	0.45	174.15	822.38	0	19.85	2.91E-12
43	387	270.90	116.10	0.00	0.00	0.45	174.15	785.73	0	19.85	1.16E-12
44	387	270.90	0.00	0.00	116.10	0.45	174.15	822.38	0	19.85	1.30E-12
45	316	316.00	0.00	0.00	0.00	0.55	173.80	773.66	0	19.85	3.66E-12
46	497	497.00	0.00	0.00	0.00	0.35	173.95	923.00	0	19.85	1.48E-12
47	497	347.90	149.10	0.00	0.00	0.35	173.95	1159.67	0	19.85	5.70E-13
48	497	347.90	0.00	0.00	149.10	0.35	173.95	923.00	0	19.85	1.42E-12
49	320	320.00	0.00	0.00	0.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.42E-11
50	320	160.00	0.00	0.00	160.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.30E-12
51	320	96.00	0.00	0.00	224.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	7.70E-13
52	320	288.00	32.00	0.00	0.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	9.14E-12
53	320	128.00	32.00	0.00	160.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.22E-12
54	320	64.00	32.00	0.00	224.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.73E-12
55	320	96.00	0.00	0.00	224.00	0.55	176.00	822.86	0	19.85	8.10E-13

Tabla 108, Diseño de Mezcla por Shafikhani, y otros, 2019 (Parte I).

Muestra	TCM	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (%)	Tipo Curado (temp °C)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
56	400	400.00	0.00	0.00	0.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	7.01E-12
57	400	200.00	0.00	0.00	200.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	8.10E-13
58	400	120.00	0.00	0.00	280.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	1.00E-12
59	400	360.00	40.00	0.00	0.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	4.15E-12
60	400	160.00	40.00	0.00	200.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	1.95E-12
61	400	80.00	40.00	0.00	280.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	8.50E-13
62	400	120.00	0.00	0.00	280.00	0.45	180.00	890.32	0	19.85	1.07E-12
63	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	5.78E-12
64	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	5.76E-12
65	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	5.28E-12
66	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	4.34E-12
67	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	4.96E-12
68	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	4.14E-12
69	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.56E-12
70	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.67E-12
71	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.45E-12
72	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	6.64E-12
73	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.40	128.00	1071.30	0	19.85	5.01E-12
74	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.55	220.00	742.86	0	19.85	6.22E-12
75	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.55	176.00	822.86	0	19.85	5.86E-12
76	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.40	160.00	979.31	0	19.85	4.31E-12
77	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.55	198.00	765.00	0	19.85	5.81E-12
78	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.47	188.00	850.00	0	19.85	4.71E-12
79	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.47	150.40	910.77	0	19.85	4.11E-12
80	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.40	144.00	1024.62	0	19.85	3.75E-12
81	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.36E-12
82	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.40	128.00	1071.30	0	19.85	1.33E-12
83	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.55	220.00	742.86	0	19.85	2.76E-12
84	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.86E-12
85	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.40	160.00	979.31	0	19.85	1.22E-12
86	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.55	198.00	765.00	0	19.85	1.56E-12
87	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.47E-12
88	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.47	188.00	850.00	0	19.85	1.23E-12
89	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.47	150.40	910.77	0	19.85	1.34E-12
90	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.40	144.00	1024.62	0	19.85	1.19E-12
91	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.14E-12
92	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.21E-12
93	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.40	128.00	1071.30	0	19.85	2.05E-12
94	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.55	220.00	742.86	0	19.85	2.96E-12
95	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.55	176.00	822.86	0	19.85	3.48E-12
96	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.40	160.00	979.31	0	19.85	2.02E-12
97	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.55	198.00	765.00	0	19.85	2.72E-12
98	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.47	188.00	850.00	0	19.85	2.19E-12
99	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.47	150.40	910.77	0	19.85	2.44E-12
100	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.40	144.00	1024.62	0	19.85	1.43E-12

Tabla 109, Diseño de Mezcla por Shafikhani, y otros, 2019 (Parte II).

Muestra	TCM	Cemento (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	HS (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Relación a/tmc	Agua (kg/m ³)	Áridos (kg/m ³)	Aditivo HRWR (%)	Tipo Curado (temp °C)	Coe. Dif. 28días (m ² /s)
101	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	2.09E-12
102	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.62E-12
103	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	5.78E-12
104	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	2.95E-12
105	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.08E-12
106	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.89E-12
107	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	2.03E-12
108	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.73E-12
109	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	2.66E-12
110	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.52E-12
111	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.45E-12
112	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.70E-12
113	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.64E-12
114	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.75E-12
115	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.66E-12
116	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.76E-12
117	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.40	128.00	1071.30	0	19.85	1.04E-12
118	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.55	220.00	742.86	0	19.85	1.79E-12
119	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.79E-12
120	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.40	160.00	979.31	0	19.85	1.76E-12
121	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.55	198.00	765.00	0	19.85	1.95E-12
122	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.47	188.00	850.00	0	19.85	1.48E-12
123	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.47	150.40	910.77	0	19.85	1.51E-12
124	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.40	144.00	1024.62	0	19.85	1.53E-12
125	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	3.70E-13
126	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.38E-12
127	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.40	128.00	1071.30	0	19.85	1.66E-12
128	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.55	220.00	742.86	0	19.85	1.75E-12
129	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.55	176.00	822.86	0	19.85	1.91E-12
130	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.40	160.00	979.31	0	19.85	1.40E-12
131	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.55	198.00	765.00	0	19.85	1.55E-12
132	400	136.00	0.00	0.00	264.00	0.47	188.00	850.00	0	19.85	1.12E-12
133	320	108.80	0.00	0.00	211.20	0.47	150.40	910.77	0	19.85	1.49E-12
134	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.40	144.00	1024.62	0	19.85	1.50E-12
135	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.54E-12
136	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.30E-12
137	360	122.40	0.00	0.00	237.60	0.45	162.00	925.71	0	19.85	1.67E-12
138	471	471.00	0.00	0.00	0.00	0.30	141.30	1048.35	0	27.85	5.20E-12
139	500	500.00	0.00	0.00	0.00	0.38	190.00	815.79	0	27.85	8.80E-12
140	414	414.00	0.00	0.00	0.00	0.45	186.30	879.75	0	27.85	1.45E-11
141	400	400.00	0.00	0.00	0.00	0.54	216.00	652.63	0	27.85	1.91E-11

Tabla 110, Diseño de Mezcla por Shafikhani y otros, 2019 (Parte III).