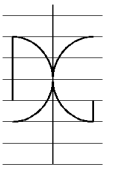




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de
Proyectos de Ingeniería Civil

MODELOS PREDICTIVOS DE LA RESISTENCIA DEL
HORMIGÓN MEDIANTE ESTADÍSTICA Y REDES
NEURONALES ARTIFICIALES.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

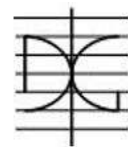
AUTOR/A: Yancha Alvarado, Andrés

Tutor/a: Navarro Ferrer, Ferrán

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DE
LA CONSTRUCCIÓN
Y DE PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO ACADÉMICO 2022/2023

MODELOS PREDICTIVOS DE LA
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN MEDIANTE
ESTADÍSTICA Y REDES NEURONALES
ARTIFICIALES.

Autor: Andrés Gonzalo Yancha Alvarado

Tutor: Ferran Navarro Ferrer

Valencia, noviembre de 2022

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



AGRADECIMIENTO

En primera Instancia quiero extender mi agradecimiento sincero a Ferran Navarro Ferrer, tutor de este Trabajo Final de Master, por la guía, apoyo incondicional y por el tiempo dedicado para la obtención de este trabajo.

A los profesores del Máster en Ingeniería del Hormigón de la Universitat Politècnica de València, por la las enseñanzas compartidas, por la pasión y entrega que emanan en cada una de sus clases, por la dedicación que tienen en el momento de ampliar nuestro conocimiento y por su profesionalidad y ayuda incondicional.

A mi madre que me mira desde el cielo, a mis hermanos, a mi familia por estar presentes desde el inicio de mi formación y en especial a la Señora Gladys Monserrate Velásquez por el apoyo incondicional que tuve para la realización de este Master.

RESUMEN

El hormigón es el material más utilizado en la construcción a nivel mundial, por la versatilidad y su bajo coste que tiene al usarlo, la resistencia a la compresión del hormigón es uno de los parámetros importantes que lo caracteriza, para ello es necesario conocer el comportamiento al momento de su fabricación. La resistencia a la compresión del hormigón depende de la dosificación de los materiales, siendo los materiales más influyentes en la obtención de la resistencia a la compresión la cantidad de cemento, el tipo de cemento y la relación que existe entre la cantidad de agua y la cantidad total de material cementante (a/TCM), existen también otros factores influyentes en el desempeño de la resistencia a la compresión, pero son de menor importancia.

Este trabajo presenta una base de datos construida con datos y resultados obtenidos de artículos científicos que están involucrados en la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón, para la elaboración del mismo se obtuvo los datos de las dosificaciones, cantidades de cemento, tipos de cemento utilizados, cantidades de adiciones cementantes, cantidades de materiales pétreos, tipo de curado y temperatura de curado, la caída de asentamiento medida por el cono de Abrams y los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón.

Para analizar el comportamiento que tienen los diferentes parámetros para la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón, se aplicaron los modelos de regresión lineal y múltiple mediante la utilización de estadística clásica, así como el uso de redes neuronales artificiales para la predicción de la resistencia a la compresión.

Para el análisis de la predicción de la resistencia a la compresión mediante la aplicación de redes neuronales se han utilizado dos softwares con diferente lenguaje de programación, evidencia el potencial que tiene cada uno en la obtención de los resultados esperados

Se pudo comprobar que los resultados obtenidos en el análisis mediante el uso de redes neuronales artificiales son mejores que los obtenidos al utilizar la estadística clásica.

Palabras Clave: modelos predictivos, resistencia a compresión, hormigón, redes neuronales artificiales, inteligencia artificial.

ABSTRACT

Concrete is the most used material in the construction of infrastructure around world, due to its versatility and its low cost when using it, the compressive strength of concrete is one of the important parameters that characterizes it, for this it is necessary to know behavior at the time of manufacture. The compressive strength of concrete depends on the dosage of the materials, the most influential materials in obtaining the compressive strength being the amount of cement, the type of cement and the relationship between the amount of water and the total amount of cementitious material (a/TCM), there are also other factors influencing the compressive strength performance, but they are less important.

This work presents a database built with data and results obtained from scientific articles that are involved in obtaining the compressive strength of concrete, for its preparation, data on dosages, amounts of cement, types of cement used, quantities of cementitious additions, quantities of stone materials, type of curing and curing temperature, the slump measured by the Abrams cone and the results of the compressive strength of the concrete.

To analyze the behavior of the different parameters to obtain the compressive strength of concrete, linear and multiple regression models were applied using classical statistics, as well as the use of artificial neural networks for the prediction of the compressive strength.

For the analysis of the prediction of the compressive strength through the application of neural networks, two software with different programming languages have been used, showing the potential that each one has in obtaining the expected results.

It was found that the results obtained in the analysis using artificial neural networks are better than those obtained using classical statistics.

Keywords: predictive models, compressive strength, concrete, artificial neural networks, artificial intelligence.

ÍNDICE

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	IX
Índice Tablas - Anexo	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	7
1.2 Metodología y Estructura de la Tesis	7
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 Materiales Constituyentes del Hormigón	9
2.1.1 Cemento	9
2.1.1.1 Breve Historia del Cemento	9
2.1.1.2 Producción comercial del cemento.	9
2.1.1.3 Producción tradicional del cemento Portland.	11
2.1.1.4 Definiciones.	19
2.1.1.5 Normativa del Cemento en España.	19
2.1.1.6 Normativa de Cemento en Ecuador.....	21
2.1.2 Adiciones Cementantes	24
2.1.2.1 Humo de sílice.	24
2.1.2.2 Metakaolin.....	26
2.1.2.3 Ceniza volante.	28
2.1.3 Agua.....	32
2.1.4 Aditivos.....	37
2.1.5 Áridos	39
2.2 Redes Neuronales Artificiales	44
2.2.1 Historia	44
2.2.2 Introducción	44
2.2.3 Funcionamiento.....	46
2.2.4 Tipos de Redes Neuronales Artificiales	47
2.2.5 Número de Neuronas de la Capa Oculta	48
2.2.6 Aprendizaje de la Red Neuronal Artificial	49
2.2.7 Entrenamiento, Validación y Test	49
2.2.8 Evaluación de Desempeño.....	50
3. BASES DE DATOS	51
3.1 Hormigón.....	53

3.2	Cemento y adiciones cementicias	54
3.3	Áridos	55
3.4	Propiedades del Hormigón	55
4.	ESTUDIO DEL MODELO ESTADÍSTICO CLÁSICO	57
4.1	Introducción	57
4.2	Resistencia a la compresión en función del contenido de agua y materiales cementantes	57
4.3	Resistencia a la compresión del hormigón en función de la temperatura de agua de curado y slump.....	62
4.4	Resistencia a la compresión del hormigón en función de varias variables.	64
4.5	Análisis descriptivo de la resistencia a la compresión del hormigón	66
5.	APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES	68
5.1	Red Neuronal Artificial en Matlab	68
5.2	Red Neuronal Artificial en SPSS	72
5.3	Redes Neuronales artificiales con diferentes combinaciones de variables.....	75
6.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	94
6.1	Conclusiones Generales.....	94
6.2	Conclusiones Especificas	94
6.3	Futuras líneas de investigación.....	96
7.	BIBLIOGRAFIA.....	97
	ANEXO A: TABLAS DE DOSIFICACIÓN CORRESPONDIENTES A LAS BASES DE DATOS	101

Índice de figuras

Figura 1.1 Panteón de Agripa (Roma – Italia).....	3
Figura 1.2 Basílica de Constantino. Fuente: Javier (2019)	4
Figura 2.1 Producción de cemento hidráulico por región (1930 – 2000). Fuente: Hendrik (2002).	10
Figura 2.2 Producción mundial de cemento. Fuente: Schneider (2011).	11
Figura 2.3 Fuentes de las Materias Primas Usadas para Fabricación del Cemento Portland. Fuente: (PCA 2004).	11
Figura 2.4 Materias Primas Usadas para Fabricación del Cemento Portland.	12
Figura 2.5 Fuentes de las Materias Primas Usadas para Fabricación del Cemento Portland. Fuente: (PCA 2004).	12
Figura 2.6 Trituración de la materia prima para fabricación de Cemento. Fuente: (Barbudo, 2010)	13
Figura 2.7 Molino de bolas para la molienda de la materia prima para fabricación del cemento.	13
Figura 2.8 Producción de Cemento Portland. Fuente: (Mora, 2018).	14
Figura 2.9 Proceso en vía seca para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Mora, 2018)	15
Figura 2.10 Proceso en vía seca para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Aranda, 2015).	15
Figura 2.11 Proceso en vía semi-seca y semi-húmeda para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Ficem, 2014)	16
Figura 2.12 Proceso de clinkerización de Cemento Portland. Fuente: (Herrera, 2018).....	16
Figura 2.13 Proceso de enfriamiento del clínker. Fuente: (Herrera, 2018)	17
Figura 2.14 Molino vertical para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Montalvan, 2010)	18
Figura 2.15 Fabrica ensacadora de Cemento Portland.....	18
Figura 2.16 Familia de 27 cementos comunes, dividida en las 5 familias principales. Fuente: (UNE-EN-197-1. 2011).	20
Figura 2.17 Familia de 7 cementos comunes resistentes a los sulfatos, dividida en las 3 familias principales. Fuente: (UNE-EN-197-1. 2011).....	21

Figura 2.18 Resumen de Tipos de Cemento de acuerdo a Normas NTE INEN y ASTM. Fuente: (Manual Pepe Hormigón)	24
Figura 2.19 Humo de Sílice.....	26
Figura 2.20 Metakaolin.	28
Figura 2.21 Proceso de obtención de la ceniza volante. Fuente: Adaptado de (Corona Zazueta, 1997).	29
Figura 2.22 Esquema de la producción de la ceniza volante y escorias. Fuente: (Parra, 2016). 29	
Figura 2.23 Ceniza Volante.....	30
Figura 2.24 Gráfico de una RNA. Fuente: (Pinaud & Carrillo, 2013).....	46
Figura 4.1 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de agua.....	58
Figura 4.2 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la relación agua-total material cementante.	58
Figura 4.3 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función del total material cementante.	59
Figura 4.4 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de cemento.	59
Figura 4.5 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función del tipo de cemento.	60
Figura 4.6 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de humo de sílice.	60
Figura 4.7 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de ceniza volante.	61
Figura 4.8 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de metakaolin.	61
Figura 4.9 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la temperatura de agua de curado.....	62
Figura 4.10 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función del slump.....	62
Figura 4.11 Evolución de la resistencia a la compresión del hormigón (f_{c28}) en función del tipo de curado.	63
Figura 4.12 Resumen de estadístico descriptivo para la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (f_{c28}).	66
Figura 4.13 Gráfica de normalidad de la muestra de resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (f_{c28}).....	67

Figura 5.1 Coeficientes de correlación de la RNA_1 en Matlab.	70
Figura 5.2 Entorno de la red neuronal en Matlab.	71
Figura 5.3 RNA_1: resistencia a la compresión a los 28 días con todas las variables. Red Neuronal en Matlab.	72
Figura 5.4 Análisis de Red Neuronal en SPSS.	72
Figura 5.5 Análisis de Red Neuronal en SPSS.	73
Figura 5.6 Análisis de Red Neuronal en SPSS.	73
Figura 5.7 Información de la red neuronal en SPSS.....	74
Figura 5.8 Importancias de las variables independientes en la red neuronal en SPSS.	74
Figura 5.9 RNA_2: resistencia a la compresión a los 28 días con todas las variables. Red Neuronal de SPSS.	75
Figura 5.10 Ajuste de la red neuronal artificial RNA3.....	76
Figura 5.11 Ajuste de la red neuronal artificial RNA4.....	77
Figura 5.12 Ajuste de la red neuronal artificial RNA5.....	78
Figura 5.13 Ajuste de la red neuronal artificial RNA6.....	79
Figura 5.14 Ajuste de la red neuronal artificial RNA7.....	80
Figura 5.15 Ajuste de la red neuronal artificial RNA8.....	81
Figura 5.16 Ajuste de la red neuronal artificial RN9.....	81
Figura 5.17 Ajuste de la red neuronal artificial RN10.....	82
Figura 5.18 Ajuste de la red neuronal artificial RN11.....	83
Figura 5.19 Ajuste de la red neuronal artificial RN12.....	85
Figura 5.20 Ajuste de la red neuronal artificial RN13.....	85
Figura 5.21 Ajuste de la red neuronal artificial RN14.....	86
Figura 5.22 Ajuste de la red neuronal artificial RN15.....	87
Figura 5.23 Ajuste de la red neuronal artificial RN16.....	88
Figura 5.24 Ajuste de la red neuronal artificial RN17.....	88
Figura 5.25 Ajuste de la red neuronal artificial RN18.....	90
Figura 5.26 Ajuste de la red neuronal artificial RN19.....	90
Figura 5.27 Ajuste de la red neuronal artificial RN20.....	91
Figura 5.28 Ajuste de la red neuronal artificial RN21.....	92

Índice de tablas

Tabla 1.1 Datos históricos del hormigón. Fuente: Oscar Parra (2016)	3
Tabla 2.1 Tipos de cemento de acuerdo a la norma UNE EN 197-1	20
Tabla 2.2 Tipos de cemento Portland. Fuente: (ASTM C150)	22
Tabla 2.3 tipos de cementos hidráulicos. Fuente: (ASTM C1157/C1157M-20A, 2020)	23
Tabla 2.4: Tipos de cementos Portland. Fuente: (ASOCEM, 2019)	23
Tabla 2.5 Composición química del humo de sílice. Fuente: (CEDEX, 2007)	25
Tabla 2.6 Porcentajes que tiene que cumplir el humo de sílice para ser incorporado al cemento. Fuente: (CEDEX, 2007).	25
Tabla 2.7 Propiedades físicas de las adiciones. Fuente: (Mindess, Young, & Darwin, 2003)	26
Tabla 2.8 Propiedades químicas del Metakaolin. Fuente: (Ambroise, Maximilien, & Pera, 1994)	27
Tabla 2.9 Requisitos para el metakaolin. Fuente: (ASTM C618-08, 2008)	27
Tabla 2.10 Normas ASTM. Fuente: tomadas de (Parra, 2016).	30
Tabla 2.11 Normas ACI. Fuente: tomada de (Parra, 2016)	31
Tabla 2.12 Normas UNE. Fuente: tomada de (Parra, 2016)	31
Tabla 2.13 Uso de agua no procesada (Unidad SI). Fuente: (Wang, 2011)	33
Tabla 2.14 Uso de agua no procesada (unidades habituales de EE. UU). Fuente: (Wang, 2011).	34
Tabla 2.15 Requisitos de desempeño del concreto para el agua de mezcla (Obligatorio). Fuente: (ASTM 1602)	35
Tabla 2.16. Límites químicos opcionales para agua de mezcla combinada. Fuente: (ASTM 1602)	35
Tabla 2.17 Requisitos para frecuencia de pruebas. Fuente: (ASTM 1602)	35
Tabla 2.18 Límites permitidos del agua para el uso de mezclas de hormigón. Fuente: (EHE 2008)	36
Tabla 2.19 Definición de los tipos de aditivos. Fuente: (ASTM C494-19. 2020)	38
Tabla 2.20 Clasificación de las rocas ígneas. Fuente: (Gutiérrez, 2003).	40
Tabla 2.21 Propiedades físico mecánicas de las rocas sedimentarias. Fuente: (Gutiérrez, 2003).	40

Tabla 2.22 Clasificación de las rocas sedimentarias, transporte y depósito. Fuente: (Rivera, 2009)	41
Tabla 2.23 Principales rocas y sus características como material de construcción. Fuente: (Gutiérrez, 2003) (Parte 1)	41
Tabla 2.24 Principales rocas y sus características como material de construcción. Fuente: (Gutiérrez, 2003) (Parte 2)	42
Tabla 2.25 Principales características y ensayos que debe cumplir los áridos. Fuente: (PCA, 2002)	43
Tabla 2.26 Historia de las Redes Neuronales Artificiales. Fuente: (Bruno, 2019)	44
Tabla 2.27 tipo de conexión y aprendizaje de las redes neuronales artificiales. Fuente: adaptado de (Ferrer, Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales, 2016)	47
Tabla 2.28 Número de capas ocultas y sus autores. Fuente: (Ferrer, Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales, 2012)	48
Tabla 3.1 Número de datos en la base.	51
Tabla 3.2 Artículos correspondientes a la base de datos (Parte 1)	51
Tabla 3.3 Artículos correspondientes a la base de datos (Parte 2)	52
Tabla 3.4 Variables utilizadas para la predicción de la resistencia a la compresión para el uso de redes neuronales.	53
Tabla 3.5 Tipos de Cemento utilizados en los artículos científicos para la determinación de la resistencia a la compresión.	54
Tabla 3.6 Tipos de adiciones cementantes consideradas en la base de datos	55
Tabla 3.7 Tipos de áridos utilizados en la base de datos.	55
Tabla 3.8 Tipos de curado del hormigón usados en los artículos científicos para los diseños de mezclas.	56
Tabla 4.1 Resultados del coeficiente de determinación R ² de la resistencia a la compresión a 28 días en función de las diferentes variables.	64
Tabla 4.2 Pasos sucesivos para la resistencia a la compresión del hormigón fc28.	65
Tabla 4.3 Ecuaciones de regresión para la resistencia a la compresión a 28 días (fc28) y sus respectivos R ² .	66
Tabla 5.1 Variables y softwares utilizados para las dos primeras redes neuronales artificiales.	68
Tabla 5.2 Valores de R obtenidos en fusión del número de neuronas en la capa oculta en la RNA_1.	69
Tabla 5.3 Valores de R ² obtenidos con Matlab y SPSS.	75

Tabla 5.4 Variables de entrada y salida de las diferentes RNA.....	76
Tabla 5.5 Parámetros obtenidos de la RNA_3.....	77
Tabla 5.6 Parámetros obtenidos de la RNA_4.....	78
Tabla 5.7 Parámetros obtenidos de la RNA_5.....	79
Tabla 5.8 Parámetros obtenidos de la RNA_6.....	79
Tabla 5.9 Parámetros obtenidos de la RNA_7.....	80
Tabla 5.10 Parámetros obtenidos de la RNA_9.....	81
Tabla 5.11 Parámetros obtenidos de la RNA_9.....	82
Tabla 5.12 Parámetros obtenidos de la RNA_10.....	83
Tabla 5.13 Parámetros obtenidos de la RNA_11.....	84
Tabla 5.14 Parámetros obtenidos de la RNA_12.....	85
Tabla 5.15 Parámetros obtenidos de la RNA_13.....	86
Tabla 5.16 Parámetros obtenidos de la RNA_14.....	86
Tabla 5.17 Parámetros obtenidos de la RNA_15.....	87
Tabla 5.18 Parámetros obtenidos de la RNA_16.....	88
Tabla 5.19 Parámetros obtenidos de la RNA_17.....	89
Tabla 5.20 Parámetros obtenidos de la RNA_18.....	90
Tabla 5.21 Parámetros obtenidos de la RNA_19.....	91
Tabla 5.22 Parámetros obtenidos de la RNA_20.....	91
Tabla 5.23 Parámetros obtenidos de la RNA_21.....	92
Tabla 5.24 Resumen redes neuronales ejecutadas, variables y resultados (parte1).....	93
Tabla 5.25 Resumen redes neuronales ejecutadas, variables y resultados (parte2).....	93

Índice Tablas - Anexo

Tabla A. 1 Diseño de Mezcla por Hossam S. Al-alaily, y otros, 2016	102
Tabla A. 2 Diseño de Mezcla por C.S. Poon, y otros, 2008	102
Tabla A. 3 Diseño de Mezcla por Assem A.A. Hassan, y otros, 2012	103
Tabla A. 4 Diseño de Mezcla por P. Dinakar, y otros, 2008.....	103
Tabla A. 5 Diseño de Mezcla por Y. Dhandapani y otros, 2018.	103
Tabla A. 6 Diseño de Mezcla por Ali A. Ramezani pour, y otros, 2009.	104
Tabla A. 7 Diseño de Mezcla por A. Kanellopoulos, y otros, 2012.	104
Tabla A. 8 Diseño de Mezcla por W. Wongkeo y otros, 2014.	105
Tabla A. 9 Diseño de Mezcla por P. Dinakar, y otros, 2013.....	105

Tabla A. 10 Diseño de Mezcla por Hwan Oh, y otros, 2002.	106
Tabla A. 11 Diseño de Mezcla por M. Uysal, y otros, 2012	107
Tabla A. 12 Diseño de Mezcla por S. Yehia, y otros, 2016.....	107
Tabla A. 13 Diseño de Mezcla por P. Chindaprasirt, y otros, 2007.....	107
Tabla A. 14 Diseño de Mezcla por Najimi, y otros, 2012	107
Tabla A. 15 Diseño de Mezcla por J. Sim, y otros, 2011.	108
Tabla A. 16 Diseño de Mezcla por Assié, y otros, 2007	108
Tabla A. 17 Diseño de Mezcla por Badogiannis , y otros, 2015.	109
Tabla A. 18 Diseño de Mezcla por W. Zhu, y otros, 2002.....	109
Tabla A. 19 Diseño de Mezcla por R. Siddique, 2011.	109
Tabla A. 20 Diseño de Mezcla por H.Y. Leung, y otros, 2016.	110
Tabla A. 21 Diseño de Mezcla por Z. Zhang, y otros, 2016.....	110
Tabla A. 22 Diseño de Mezcla por Valipour, y otros, 2013.....	110
Tabla A. 23 Diseño de Mezcla por Elahi, y otros, 2010.	111
Tabla A. 24 Diseño de Mezcla por M.G. Alexander, y otros, 1999.	111
Tabla A. 25 Diseño de Mezcla por E.G. Moffatt, y otros, 2017.....	112
Tabla A. 26 Diseño de Mezcla por Ganesh, y otros, 2019.	112
Tabla A. 27 Diseño de Mezcla por Kannan V, 2018.....	113
Tabla A. 28 Diseño de Mezcla por Sun, y otros, 2018.	114
Tabla A. 29 Diseño de Mezcla por Reza Bagheri, y otros, 2012.....	114
Tabla A. 30 Diseño de Mezcla por Gastaldini , y otros 2010.	115
Tabla A. 31 Diseño de Mezcla por Nehdi, y otros, 2004.....	116
Tabla A. 32 Diseño de Mezcla por Ramezaniapour, 1995.....	116
Tabla A. 33 Diseño de Mezcla por Shaker, y otros, 2018.	117
Tabla A. 34 Diseño de Mezcla por Abouhussien, y otros, 2015.....	118
Tabla A. 35 Diseño de Mezcla por Shaikh, y otros 2015.....	118
Tabla A. 36 Diseño de Mezcla por Raiess Ghasemi, y otros, 2010.	119
Tabla A. 37 Diseño de Mezcla por Dinakar y otros, 2013.....	119
Tabla A. 38 Diseño de Mezcla por Poon y otros, 2001.....	119
Tabla A. 39 Diseño de Mezcla por Ramezaniapour y otros, 2012.	120
Tabla A. 40 Diseño de Mezcla por Ramezaniapour Rukzon, y otros, 2014.....	120
Tabla A. 41 Diseño de Mezcla por Nath y otros, 2013.	121
Tabla A. 42 Diseño de Mezcla por Deboodt, y otros, 2015.	121
Tabla A. 43 Diseño de Mezcla por Youm y otros, 2016.....	121

Tabla A. 44 Diseño de Mezcla por Bouzoubaa y otros, 2001.	122
Tabla A. 45 Diseño de Mezcla por Shaikh y otros, 2015.....	122
Tabla A. 46 Diseño de Mezcla por Kumer Saha, 2018.	122
Tabla A. 47 Diseño de Mezcla por S. Inthata, y otros, 2013.	124
Tabla A. 48 Diseño de Mezcla por Kannan, y otros, 2014.	125
Tabla A. 49 Diseño de Mezcla por Ozbay y otros, 2011.	125
Tabla A. 50 Diseño de Mezcla por DING Qingjun y otros, 2009.	126
Tabla A. 51 Diseño de Mezcla por Kou, y otros, 2009.	126
Tabla A. 52 Diseño de Mezcla por Cong Lua, 2018.	127
Tabla A. 53 Diseño de Mezcla por Kim, y otros, 2007.	127
Tabla A. 54 Diseño de Mezcla por Raif Boğa, y otros, 2013.	128
Tabla A. 55 Diseño de Mezcla por Karahan y otros, 2016.	128
Tabla A. 56 Diseño de Mezcla por Sahmaran, y otros, 2011.	129
Tabla A. 57 Diseño de Mezcla por Gesoğlu, 2010.	129
Tabla A. 58 Diseño de Mezcla por Menadi, y otros, 2009.	130
Tabla A. 59 Diseño de Mezcla por Kathirvel, y otros, 2013.	130
Tabla A. 60 Diseño de Mezcla por Kathirvel, y otros, 2013.	130
Tabla A. 61 Diseño de Mezcla por Ramasamy, 2012.....	131
Tabla A. 62 Diseño de Mezcla por Ha Thanh Le, y otros, (2014).	131
Tabla A. 63 Diseño de Mezcla por Chini, y otros, (2005).....	131
Tabla A. 64 Diseño de Mezcla por Ramezaniyanpour, y otros, (2016).....	132
Tabla A. 65 Diseño de Mezcla por Gowripalan, y otros, (1998).	132
Tabla A. 66 Diseño de Mezcla por Yun Yeau, y otros, (2005).	132

1. INTRODUCCIÓN

Se tiene conocimiento que desde las primeras civilizaciones han comenzaron a construir, donde tenían como objetivo buscar materiales que sean capaces de unir piedras a una masa sólida. La fabricación de los materiales a base de cemento tiene como función ser conglomerante hidráulico y estas se encuentran entre las incontables creaciones del hombre. En la actualidad el hormigón es el material que más se utiliza para la construcción de edificaciones, ya sea por su bajo coste, por su versatilidad al momento de usarlo y también por su resistencia a la compresión (Ferrer, Ferran, 2016).

El hormigón en la construcción ha estado presente en muchas estructuras y edificios desde los albores del Imperio Romano hasta nuestros días. A lo largo del tiempo este ha ido evolucionando, de igual forma lo han hecho los elementos básicos de las obras en las que se empleó este material, además, se realizan pruebas para su determinar calidad y los aditivos utilizados en la construcción del material del propio hormigón. En la actualidad, muchos factores intervienen en los resultados de resistencia final de un material, enfocándose en la temperatura ambiente al momento del vertido del hormigón, los aditivos utilizados y las pruebas a los se tiene que someter el hormigón.

El cemento como material de construcción es de origen Romano a la cual le llamaron “Opus Caementicium” esto se debe a la obra de mampostería de piedra y a un conglomerante de cal viva calcinada. Luego cambiaron su nombre a “cementum”, “cimentum”, “caement” y por último “cement”.

El Imperio Romano fue el pionero en el uso del hormigón y a su vez marcó el aumento en el uso del mismo como elemento para la construcción. Esto fue debido a la capacidad de construcción que tenían y a la elaboración de morteros, la cual se obtenía mezclando arena volcánica con propiedades adhesivas de la piedra natural. Este tenía propiedades físicas y mecánicas casi idénticas a las del hormigón hoy en día, por eso se puede ver reflejado en la duración de las estructuras construidas en los siglos pasados.

Debido a su versatilidad, el hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo. Este es un material compuesto principalmente por tres elementos: cemento, agua y árido. En su estado fresco el hormigón debe garantizar una buena uniformidad, trabajabilidad y densificación, mientras que en estado endurecido se suele exigir que cumpla un determinado valor característico de resistencia a la compresión normalmente 28 días (Bruno, 2019).

El hormigón se ha utilizado no solamente por su capacidad de resistencia, sino que también se utiliza por su gran durabilidad. Uno de los casos más conocidos es el Panteón de Roma construido hace milenios (27 A.C) (Avendaño, 2020), en ella contenían ladrillo fragmentado y agregados gruesos de roca volcánica. **Figura 1.1**

Aunque el hormigón se venía utilizando desde muchos años atrás en la construcción, este tuvo una caída después del Imperio Romano y no fue hasta mediados del siglo XVII en Francia e Inglaterra que se volvió a emplear (Parra, 2016). En el año de 1758 John Smeaton fabricó un nuevo mortero al volver a construir el Faro de Eddyston en la costa de Cornish. John pudo descubrir que los morteros que estaban formados por la mezcla de una puzolana a una caliza, esta última formada con una alta cantidad de arcilla tenían un mejor resultado frente al agua, teniendo un resultado donde este fraguase bajo el agua y cuando endurecían, fueran insolubles. La **Tabla 1.1**, demuestra la cronología de los acontecimientos más relevantes a nivel históricos del hormigón.

Año	Acontecimiento Histórico
1756	John Smeaton. Habiendo estudiado el comportamiento de calizas impurificadas con arcillas en la fabricación de morteros descubrió que las que proporcionan los morteros de mejores características eran las que poseían una proporción importante de arcilla. Este es el primer paso en el empleo de la materia prima actual de los cementos.
1796	James Parker. Patentó en Inglaterra un método para fabricar cemento hidráulico por calcinación de nódulos de cal con alto contenido en arcilla (cemento romano)
1817	Vicat. Conocido como el padre del cemento. Se le debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad. Publicó su "Recherches experimentales" y en 1828 "Mortiers et ciments calcaires". Marco la pauta a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas de calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. Empleo un sistema de fabricación de vía húmeda y con él marcó el inicio del actual proceso de fabricación.
1824	Joseph Aspdin. Se le otorgó la primera patente para la fabricación del cemento portland.
1838	Brunel. Emplea por primera vez un cemento procedente de la fábrica de Aspdin en el que se había logrado una parcial sintetización por elección de una temperatura adecuada de cocción. Con este cemento se construyó un túnel bajo el río Támesis en Londres.
1845	Isaac Johnson. Produjo el prototipo del cemento moderno a escala industrial logrando conseguir temperaturas suficientemente altas para clínkerizar a la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.
1845	Lambot. Comienza, en el sur de Francia, a fabricar objetos en los que combinaba el hormigón y el acero surgiendo de esta forma el primer hormigón armado.
1861	Francois Coignet. Estudia por primera vez, el papel que corresponde al hormigón y al acero como partes integrantes del nuevo material en el libro que publicó ese mismo año bajo el título "Betons Agglomérés".
1875	Joseph Monier. Construyó el primer puente de hormigón armado del mundo, cerca de Chazalet en Francia.
1885	Coignet. Asociado con Monier presentó en la Exposición Universal de París, ejemplos de elementos que podían realizarse con hormigón (vigas, bóvedas, tubos, etc.)
1886	Mathias Koenen. Director técnico de la casa Wayss publicó el primer método empírico de cálculo de secciones de hormigón armado sujetas a flexión.
1889	Se construye la presa de S. Mateo en Estados Unidos a base de mampuestos unidos por mortero.
1894	Moeller construye la primera viga en vientre de pez
1897	El ingeniero de Caminos, José Eugenio Rivera construye numerosas obras con hormigón.
1903	Perret construye el primer edificio con estructura de hormigón armado en el número 25 de la calle Franklin de Paris; Rivera emplea cajones flotantes en la cimentación de 6 puentes en Valencia
1906	Matthias Koenenen. (hormigón precomprimido) Se realizó los primeros ensayos con armado, colocado y hormigonado con tensiones previas

1919	K. Westtstein. (hormigón precomprimido) Fabricó tablas delgadas utilizando cuerdas de piano fuertemente tensadas.
1928	Freyssinet. Presentó la patente definitiva del pretensado, donde el acero debe ser de alta resistencia con tensiones de 400 N/mm ² . Esta teoría se aplicó en la consolidación de las cimentaciones profundas de la terminal de Le Havre del transatlántico Normandie máximo exponente de la construcción naval francesa de la época.
1951	Se levanta un puente pretensado en los Estados Unidos
1952	Se crea la F.I.P. (Federación Internacional del Pretensado), en Cambridge, para difundir la técnica del pretensado.
1980	Aquí empieza una revolución del hormigón, con mayor resistencia y los autocompactantes, la cual se obtenían con la ayuda de fluidificantes.

Tabla 1.1 Datos históricos del hormigón. Fuente: Oscar Parra (2016)

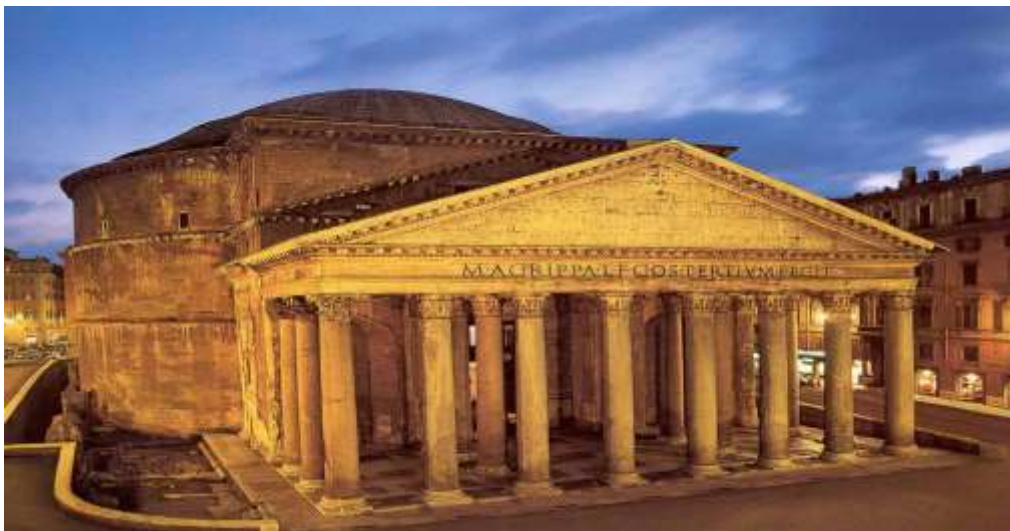


Figura 1.1 Panteón de Agripa (Roma – Italia).

Otros de las edificaciones que han realizado y a su vez se ha conservado es la Basílica de Constantino, fue construido por los Romanos en la segunda centuria DC y el acuerdo de Pont du Gard en Francia del Sur, con un domo de 43 metros de diámetro. La Basílica de Constantino es considerada uno de los más antiguos que fueron construidos por hormigón y que aún sigue intacto. **Figura 1.2**



Figura 1.2 Basílica de Constantino. Fuente: Javier (2019)

La fabricación del hormigón estructural se tiene que realizar en lugares donde se tienen instalaciones con almacenamiento, dosificación y mezclado de todos los componentes consiguiendo una mezcla uniforme. Por ello, las mezclas de las distintas materias primas se deberán realizar en las mezcladoras, tomándose el tiempo adecuado hasta que se obtenga una mezcla homogénea (Ferrer, Ferran, 2016). Las instalaciones deberán presentar las condiciones adecuadas para los distintos procesos requeridos en la producción de hormigón.

Además, la elaboración del hormigón en plantas industriales, tiene como principal objetivo el controlar cuidadosamente las distintas cantidades de los componentes utilizados; la tecnología que se implementa en cada uno de los equipos garantiza los pesos adecuados de cada elemento y sus rangos aceptables, pero no siempre los resultados son perfectos (Avendaño, 2020). Uno de los casos es la obtención certera de las descargas que se realizan o muchas de las veces la variabilidad por ejemplo la humedad que van a tener los áridos en horas distintas del día, por mucho que se obtenga valores en las distintas horas, la heterogeneidad propia de los materiales se tendrá que ciertos cálculos no tengan exactitud de laboratorio.

Los criterios de dosificación del hormigón que establece el comité estadounidense, American Concrete Institute (ACI-318) - (Requisitos de Reglamento para Hormigón Estructural) da a saber que se tienen que cumplir tres aspectos importantes y son los siguientes: a) trabajabilidad y consistencia, b) resistencia a la exposición la cual va a ser sometida la estructura, c) resistencia a compresión. Estos criterios de durabilidad y resistencia son independientes a las normas que se vayan a aplicar o el país donde se fabrique.

El pronunciamiento de la relación agua-cemento (a/c) de Abrams de 1918 ha sido descrito como el avance más útil y significativo en la historia de la tecnología del hormigón. Su formulación más importante fue la proporcionalidad inversa entre la relación a/c y la resistencia del hormigón. La regla de Abrams generalmente aceptada es una formulación de la observación de que un aumento en la relación a/c disminuye la resistencia del hormigón, mientras que una disminución en la relación a/c aumenta la resistencia. La implicación, por lo tanto, es que las resistencias de varios hormigones comparables son idénticas siempre que sus relaciones a/c sigan siendo las mismas, independientemente de los detalles de las composiciones (Shiang, 1998).

La regla de Abrams implica que solo la cantidad de la pasta de cemento controla la resistencia del cemento comparable. La cantidad de pasta no importa. El análisis de una variedad de datos experimentales muestra que esto no es del todo cierto. Varios estudios independientes han demostrado que el desarrollo de la resistencia del hormigón no solo está determinado por la relación a/c, sino que también está influenciado por el contenido de otros ingredientes. Por lo tanto, aunque los datos experimentales han demostrado la aceptabilidad práctica de esta regla dentro de amplios límites, se han informado algunas desviaciones.

Las ecuaciones experimentales actuales presentadas en los códigos y normas para estimar la resistencia a la compresión se basan en pruebas de hormigón sin materiales cementicios suplementarios. Debe investigarse la validez de estas relaciones para el hormigón con materiales cementicios suplementarios (cenizas volantes, escoria de alto horno, etc.). Cuanto más sepamos sobre la relación entre la composición y la resistencia del hormigón, mejor podremos comprender la naturaleza del hormigón y cómo optimizar la mezcla de hormigón

Al utilizar los métodos y normativas establecidas al momento de fabricar el hormigón, se tiene resultados satisfactorios, debido a esto no se toma en cuenta variables como la temperatura al que han sido fabricada y colocada, tiempos de movilización de los camiones, tiempo de descarga, entre otras variables que no están especificadas en normativas internacionales, de las cuales se debe suponer que no tiene un impacto mayor al momento de interpretar y conocer la evolución de la resistencia del hormigón a distintas edades.

Para un determinado conjunto de materias primas, la resistencia del concreto está gobernada principalmente por la relación agua—material cementante (a/c). El control de a/c es de primordial importancia para producir concreto con una resistencia constante. Debido a que se puede medir con precisión la cantidad del material cementante, mantener una relación a/c constante principalmente involucra un estricto control de la cantidad total de agua empleada (Neville 1996).

La resistencia a la compresión se ha considerado generalmente como una de las cualidades más esenciales del hormigón. El desarrollo preciso de modelos confiables de predicción de la resistencia a la compresión podría conducir a un ahorro de costos y tiempo. Por lo tanto, se han realizado muchas investigaciones para predecir la resistencia a la compresión del hormigón (Yuan, Wang, & Ji, 2013). El enfoque convencional para predecir la resistencia del hormigón es el modelo de regresión lineal y no lineal. La forma general del modelo de regresión se puede expresar de la siguiente manera:

$$y = f(a_i * x_i)$$

Dónde f representa la fuerza la resistencia del hormigón, lineal o no lineal, a_i los coeficientes constantes y x_i los factores estructurados del problema en cuestión, respectivamente. Sin embargo, estos métodos empíricos no pueden lograr un resultado de predicción preciso debido a los factores no estructurados. El consumo de materias primas son factores estructurados típicos, sin embargo, los modelos de regresión convencionales no pudieron lograr resultados de predicción ideales debido a la calidad inestable de las materias primas, la precisión limitada de la medición, la inexperiencia en la operación, etc. Para compensar los inconvenientes de los modelos de regresión lineal y no lineal tradicionales, se ha prestado más atención a las técnicas de inteligencia artificial (IA) como la red neuronal artificial, la lógica difusa, el algoritmo genético y los modelos híbridos. Se introdujo BP-ANN para predecir la resistencia a la compresión del hormigón, demostrando que el modelo ANN era más preciso que el modelo de regresión y más conveniente para revisar los efectos de las proporciones en la mezcla de hormigón.

Las redes neuronales artificiales son una familia de arquitecturas paralelas masivas que resuelven problemas difíciles a través de la cooperación de elementos informáticos simples, pero altamente interconectados (o neuronas artificiales). Básicamente, los elementos de procesamiento de una red neuronal son similares a las neuronas del cerebro, que consisten en muchos elementos computacionales simples dispuestos en capas. El interés por las redes neuronales se ha expandido rápidamente en los últimos años. Gran parte del éxito de las redes neuronales se debe a características como el procesamiento no lineal, el procesamiento en paralelo, etc.

La red neuronal artificial (ANN) no necesita una forma de ecuación tan específica. En lugar de eso, necesita suficientes datos de entrada y salida. Además, puede volver a entrenar continuamente los nuevos datos, para que pueda adaptarse convenientemente a los nuevos datos. ANN ha sido investigada para hacer frente a los problemas relacionados con información incompleta o imprecisa. Varios autores han utilizado ANN en ingeniería estructural. Además, algunos investigadores han propuesto recientemente un nuevo método para mezclar el diseño y predecir la resistencia del hormigón utilizando redes neuronales. No obstante, no se ha investigado completamente el sistema inteligente para predecir el desarrollo de la resistencia del hormigón, especialmente en una etapa temprana de los períodos de curado y para uso práctico (Sam-Dong & Nam-Gu, 2002).

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Master (TFM) es analizar y comprender la importancia de cada uno de los factores que influyen en el diseño de mezclas de hormigón, sobre la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días. Utilizando diferentes modelos de predicción que nos permita comprender la relación que existen entre ellos, mediante la aplicación de Estadística Clásica y Redes Neuronales Artificiales (RNA).

Los datos de análisis se han obtenido mediante la elaboración de una base de datos, recopilando información de artículos científicos, donde se analizaron distintos tipos de hormigón con diferentes requerimientos y materiales constituyentes. En primera instancia se realizará un análisis estadístico con la finalidad de evaluar los diferentes tipos de variables independientes que influyen en la mezcla de hormigón, mediante la aplicación de regresiones lineales simples o múltiples. Por último, para predecir la resistencia del hormigón se realizará un análisis mediante la utilización de redes neuronales.

Otro objetivo importante es el analizar cada uno de los factores que influyen en la mezcla del hormigón en estado fresco, identificando las variables más relevantes para la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón.

1.2 Metodología y Estructura de la Tesis

El trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1, *Introducción*: en este capítulo se realiza una descripción de los conceptos fundamentales de nuestro tema en estudios, seguido de los objetivos para el trabajo de fin de máster.

Capítulo 2, *Estado del Arte*: se realiza el estudio del conocimiento de los materiales que constituyen la mezcla de hormigón para la obtención de la resistencia a la compresión, complementado el capítulo con el análisis y descripción de las Redes Neuronales Artificiales.

Capítulo 3, *Base de Datos*: para la descripción de nuestra base de estudio se realizará un resumen de la base de datos utilizadas para la ejecución de este trabajo final de master.

Capítulo 4, *Estudio estadístico clásico*: se realiza modelos estadísticos de regresiones lineales o múltiples de nuestra base de datos, relacionando las variables independientes explicativas en función de la variable dependiente resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, evaluando y discutiendo los resultados mediante el coeficiente de determinación R^2 para cada modelo realizado.

Capítulo 5, *Aplicación de redes neuronales artificiales*: en este capítulo realizaremos la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón mediante la utilización de redes neuronales artificiales de nuestra base de datos, utilizando los softwares IBM SPSS Statics y Matlab, donde el parámetro de evaluación será el coeficiente de determinación R^2 .

Capítulo 6, *Conclusiones*: se describirán las conclusiones obtenidas del estudio realizado y se describirán posibles líneas de investigación que permitan una mayor profundización del tema en estudio.

Capítulo 7, *Bibliografía*: se incorporará la bibliografía utilizada en el trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Materiales Constituyentes del Hormigón

2.1.1 Cemento

2.1.1.1 Breve Historia del Cemento.

La fabricación y uso de los cementos hidráulicos es antigua y generalmente se atribuye a los romanos. El cemento hidráulico romano era una mezcla de cal (CaO), que se obtiene quemando piedra caliza y ciertas cenizas volcánicas o puzolanas similares. Por varias razones, el conocimiento de fabricación y el uso de cementos hidráulicos disminuyó drásticamente después de la caída del Imperio Romano, aunque los morteros de cal siguieron siendo populares. El interés por los cementos hidráulicos de alta calidad revivió a mediados del siglo XVIII, con varias recetas de cemento de piedra caliza, cal, arcilla y puzolanas naturales y artificiales (en particular, escoria de alto horno granulada molida), que se probaron, bajo diversas condiciones de procesamiento y con éxito variable (Hendrik, Oss, & Padovani, 2002).

El cemento natural (hecho de la quema de calizas ricas en arcilla a temperaturas relativamente bajas) y los cementos de escoria y cal se desarrollaron y utilizaron ampliamente, pero su calidad era muy variable regionalmente. Como indica el investigador Wilcox en el año de 1995, existe cierto debate sobre quién de los diversos investigadores de finales del siglo XVIII y principios del XIX en Inglaterra y Francia merece el crédito por el desarrollo del cemento hidráulico moderno. A Joseph Aspdin generalmente se le atribuye su patente de 1824 por un proceso para hacer un cemento artificial superior a partir de una mezcla de piedra caliza y arcilla quemada a alta temperatura. Aspdin nombró al material resultante "cemento portland", por su supuesta semejanza con una popular piedra de construcción local extraída en la isla de Portland a lo largo de la costa sur de Inglaterra. Debido a su alta calidad más constante en relación con los cementos naturales disponibles, la popularidad del cemento portland creció rápidamente y pronto se registró una producción significativa también en Francia y Alemania".

2.1.1.2 Producción comercial del cemento.

La producción comercial de cemento portland no comenzó en los Estados Unidos hasta principios o mediados de la década de 1870, y para 1900, la producción de cemento portland de los Estados Unidos, aunque todavía muy pequeña, alrededor de 1,5 Mt por año, finalmente superó la producción combinada de cemento natural y de escoria del país. Los datos sobre la producción mundial de cemento hidráulico para la primera parte del siglo XX son muy incompletos, pero a pesar de los aumentos constantes, la producción mundial total antes de la Primera Guerra Mundial probablemente nunca superó las 100 Mt por año. La producción mundial disminuyó significativamente durante y después de la Gran Depresión y se mantuvo en niveles bajos hasta el final de la Segunda Guerra Mundial; la producción desde entonces ha crecido constantemente como se puede observar en la **Figura 2.1**. La mayor parte de la producción mundial actual de cemento hidráulico es de cemento portland y cementos combinados o compuestos que tienen una base de cemento portland.

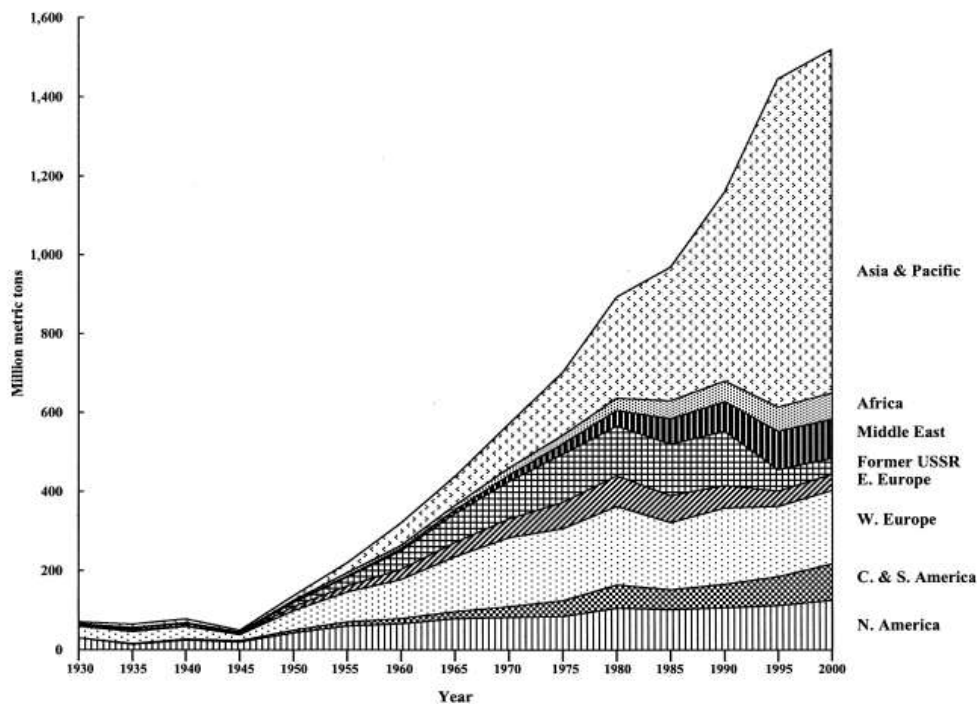


Figura 2.1 Producción de cemento hidráulico por región (1930 – 2000). Fuente: Hendrik (2002).

La producción de cemento ha experimentado un gran desarrollo desde sus inicios hace unos 200 años. Si bien el uso del cemento en el hormigón tiene una historia muy larga, la producción industrial de cementos se inició a mediados del siglo XIX, primero con hornos de cuba, que luego fueron reemplazados por hornos rotatorios como equipo estándar en todo el mundo de hoy. Si bien la producción de cemento en sus inicios solo se centró en el cemento Portland ordinario, posteriormente se produjeron cementos con varios constituyentes principales mediante la sustitución de partes del contenido de clínker por materiales cementicios complementarios.

La producción mundial anual de cemento ha alcanzado los 2.800 millones de toneladas y se espera que aumente a unos 4.000 millones de toneladas al año. Se prevé un gran crecimiento en países como China e India, así como en regiones como Oriente Medio y África del Norte como se puede observar en la **Figura 2.2**. Al mismo tiempo, la industria del cemento se enfrenta a desafíos como el aumento de los costos en el suministro de energía, los requisitos para reducir las emisiones de CO₂, y el suministro de materias primas en calidades y cantidades suficientes. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible y su Iniciativa de Sostenibilidad del Cemento, que comprende a los productores de cemento de todo el mundo, ha iniciado el proyecto "Getting the Numbers Right" para la obtención de datos sólidos y actualizados relativos al CO₂ y el rendimiento energético de la producción de clínker y cemento a escala regional y global en empresas cementeras de todo el mundo. (Schneider, Tschudin, & Bolio, 2011).

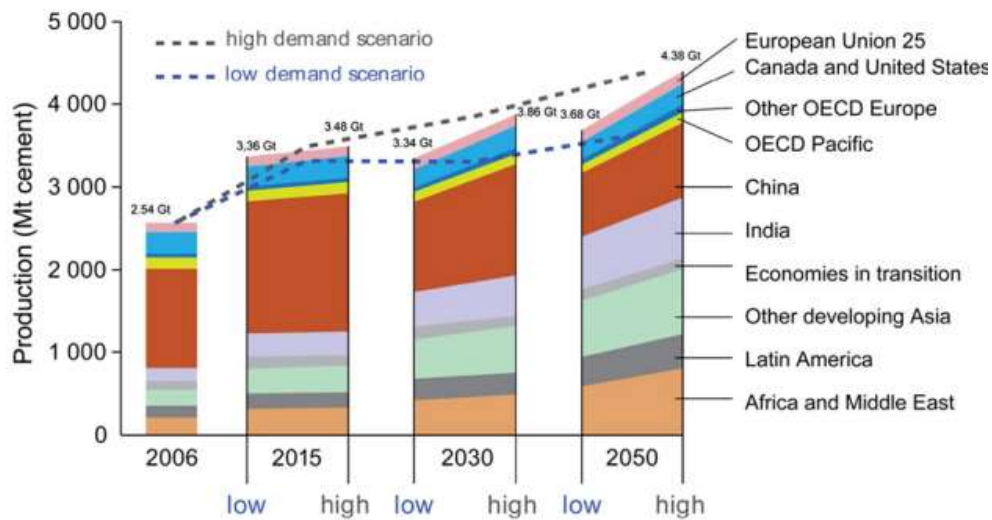


Figura 2.2 Producción mundial de cemento. Fuente: Schneider (2011).

2.1.1.3 Producción tradicional del cemento Portland.

1. El proceso de fabricación del cemento se inicia con los estudios y evaluación minera de materias primas necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínker (Osorio, 2019). Las materias primas utilizadas para la fabricación del cemento se observan en la **Figura 2.3**.

El número de materias primas requeridas en cualquier planta cementera depende de la composición química de estos materiales y de los tipos de cemento que se produzcan. Para llevar a cabo una mezcla uniforme y adecuada, se realiza un muestreo de las materias primas y se analizan en forma continua, y se hacen ajustes a las proporciones mientras se realiza el mezclado.

<u>Cal, CaO</u>	<u>Hierro Fe₂O₃</u>	<u>Silíce Si O₂</u>	<u>Alúmina Al₂ O₃</u>	<u>Yeso o Sulfato, CaSO₄.2H₂O</u>
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de	Lavaduras de mineral	
Coquilla		de arroz	Esquisto*	
Esquisto*		Arena*	Escoria	
Escoria		Arenisca	Estauroлита	
		Esquisto*		
		Escoria		
		Basalto		

Figura 2.3 Fuentes de las Materias Primas Usadas para Fabricación del Cemento Portland. Fuente: (PCA 2004).



Figura 2.4 Materias Primas Usadas para Fabricación del Cemento Portland.

El proceso industrial comienza con la extracción de las materias primas necesarias para la producción de cemento, como la caliza, el yeso, el óxido de hierro y la puzolana. La explotación se realiza en canteras a cielo abierto mediante perforación y voladura controlada, y luego se transporta mediante pala y volquete hasta la trituradora.

2. Figura 2.5



Figura 2.5 Fuentes de las Materias Primas Usadas para Fabricación del Cemento Portland. Fuente: (PCA 2004).

- Después de la excavación y el transporte de materiales, el primer proceso de procesamiento es la trituración. Esto se realiza en dos etapas, el primer proceso es pasar la roca cruda por el chancador primario, donde los fragmentos se reducen de tamaño de 1,5 m a 15 cm, luego el producto triturado se traslada al chancador secundario, y se reduce a un tamaño de aproximadamente 1,5 cm hasta alcanzar el tamaño de grano requerido (Barbudo, 2010). **Figura 2.6**



Figura 2.6 Trituración de la materia prima para fabricación de Cemento. Fuente: (Barbudo, 2010)

- Luego, las materias primas se trituran y prensan mediante un molino de bolas, mediante presión cilíndrica o mediante alta presión, lo que da como resultado un material de alta densidad maravillosamente impecable (Mora, 2018).

Con la molienda se consigue reducir el tamaño de las partículas del material para que las reacciones químicas de horneado se produzcan correctamente. El molino muele y muele materiales con un tamaño promedio de 0,05 mm. **Figura 2.7**

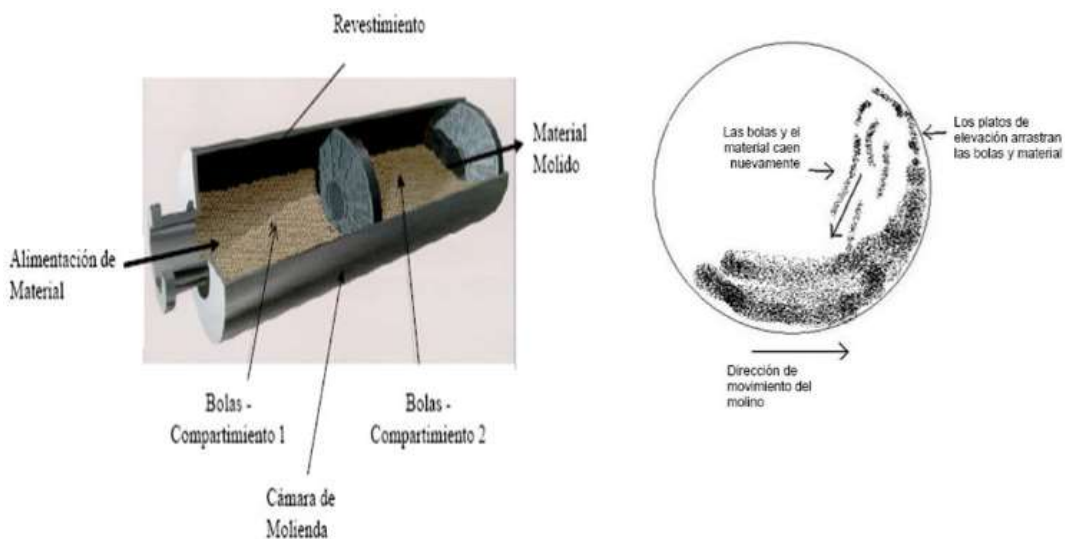


Figura 2.7 Molino de bolas para la molienda de la materia prima para fabricación del cemento.

El material molido debe ser nuevamente almacenado en silos para luego ser homogenizado y garantizar el proceso de clinkerización mediante una calidad constante.

El horno debe recibir una alimentación químicamente homogénea. Esto se consigue mediante el control de la correcta dosificación de los materiales que forman la alimentación al molino crudo (Mora, 2018).

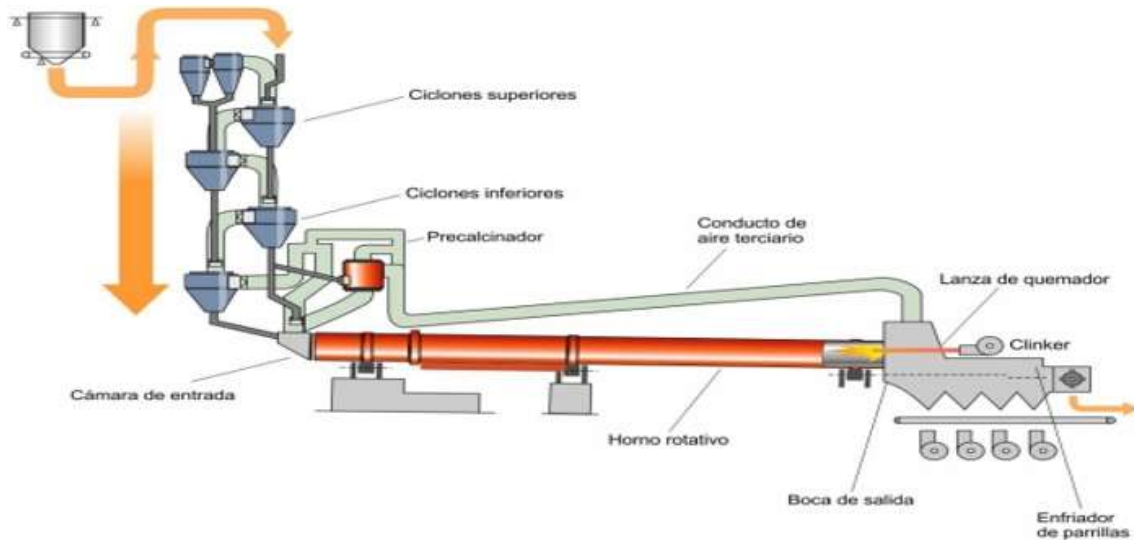


Figura 2.8 Producción de Cemento Portland. Fuente: (Mora, 2018).

5. En función de cómo se procesa el material antes de su entrada en el horno de Clinker, se distinguen cuatro tipos de proceso de fabricación: vía seca, vía semi-seca, vía semi-húmeda y vía húmeda (Mora, 2018).

La tecnología que se va a aplicar depende fundamentalmente del origen de las materias primas. Los factores decisivos para el proceso, depende del tipo de caliza y de arcilla y del contenido en agua.

Proceso de Vía seca. – Este proceso es el más económico, en cuanto a términos de consumo energético, y es el más común, la materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta (Delgado, 2019). Este proceso es el más económico, en términos de consumo de energía, y es el más común, ya que las materias primas se alimentan al horno en forma seca y en polvo. El sistema del horno consta de un intercambiador de calor de torre de vórtice en el que los materiales en contacto con el gas se calientan desde el horno. **Figura 2.9.**

La calcinación de la piedra caliza puede estar casi completa antes de que el material ingrese al horno si se instala una cámara de combustión a la que se le agrega combustible.

El proceso seco también puede emplear hornos rotatorios simples. Sin embargo, la eficiencia térmica se puede mejorar mediante el uso de uno o más recipientes precalentadores de tipo ciclón que se colocan verticalmente, en serie, delante del horno

rotatorio en la ruta de flujo del material. Se puede mejorar aún más desviando hasta el 60 % de la energía térmica (es decir, combustible) requerida por el sistema de piroprocesamiento a un recipiente calcinador especial ubicado entre los recipientes del precalentador y el horno rotatorio (Campos, 2016).

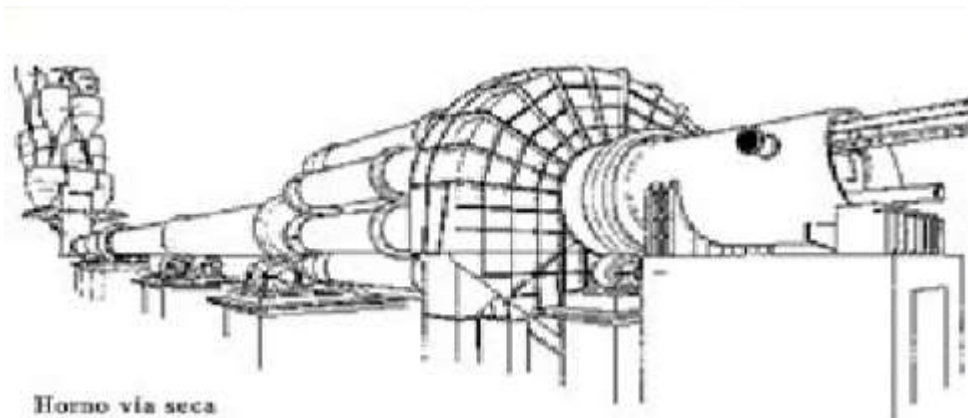


Figura 2.9 Proceso en vía seca para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Mora, 2018)

Proceso de Vía Húmeda. – Este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido de humedad, las materias primas molidas se suspenden en suficiente agua para formar una suspensión bombeable, el material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con contenido de agua de 30-40% que es alimentada en el extremo más elevado del horno de Clinker (Aranda, 2015). **Figura 2.10.**

Si la arcilla está suficientemente húmeda y tiene la propiedad de disolverse en agua, entonces se somete a la acción de la mezcladora para formar una lechada; Esto se hace en una cámara de lavado, un pozo circular con agitadores radiales que ayudan a romper los sólidos.



Figura 2.10 Proceso en vía húmeda para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Aranda, 2015).

Proceso de vía semi-seca y semi-húmeda. - Las materias primas se obtienen añadiendo o sustrayendo agua, respectivamente, de las materias primas obtenidas durante el craqueo del petróleo crudo (Ficem, 2014). Se obtienen partículas con un contenido de humedad del 15-20%, que se depositan sobre placas de malla móvil, por las que circula el aire caliente del horno. Cuando los materiales llegan a la entrada del horno, el agua se evapora y comienza el proceso de cocción. **Figura 2.11.**

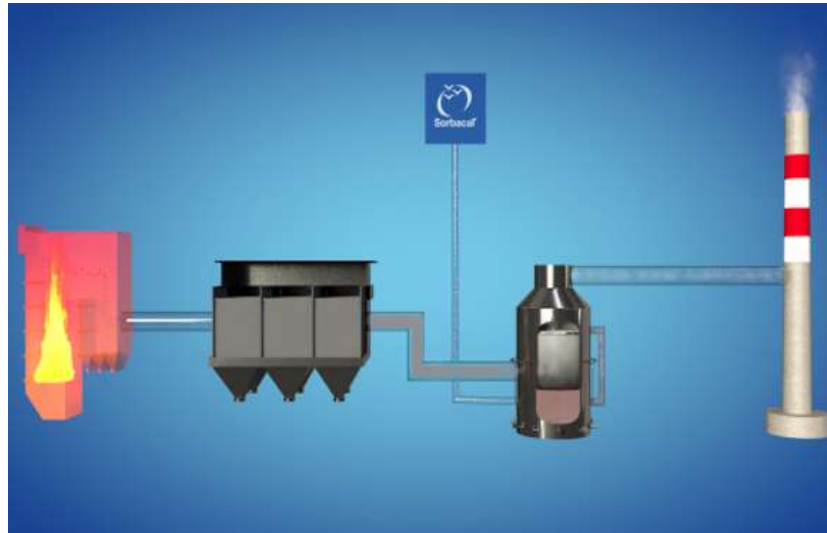


Figura 2.11 Proceso en vía semi-seca y semi-húmeda para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Ficem, 2014)

6. Posteriormente se realiza el proceso de clinkerización el cual consiste en llevar la mezcla homogenizada a hornos rotatorios a grandes temperaturas aproximadamente a 1450°C, en la parte final del horno se produce la fusión de varios de los componentes y se forman gránulos de 1 a 3 cm de diámetro, conocido con el nombre de clínker (**Figura 2.12.** Herrera, 2018).



Figura 2.12 Proceso de clinkerización de Cemento Portland. Fuente: (Herrera, 2018)

7. Después que ocurre el proceso de clinkerización a altas temperaturas, viene el proceso de enfriamiento el cual consiste en una disminución de la temperatura para poder trabajar con el material, este enfriamiento se acelera con equipos especializados. **Figura 2.13.**

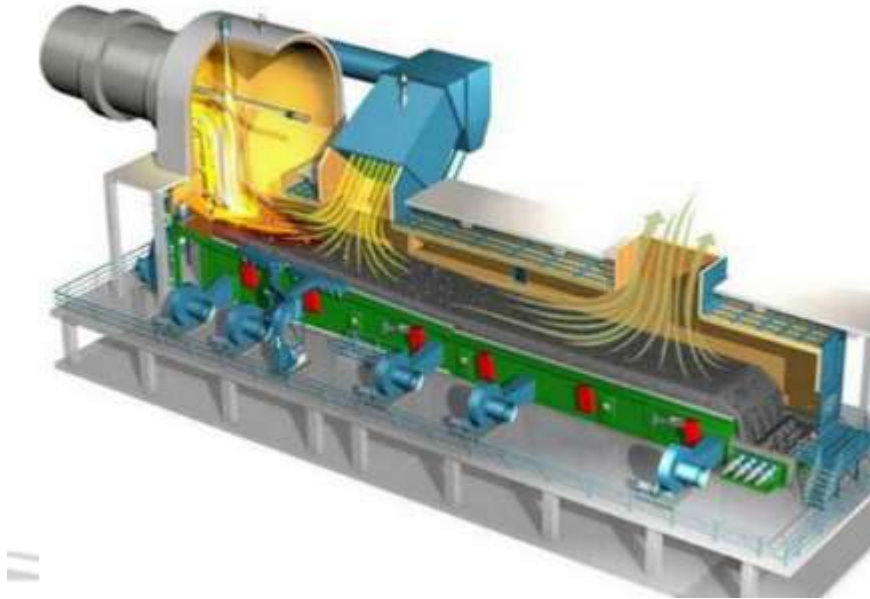


Figura 2.13 Proceso de enfriamiento del clinker. Fuente: (Herrera, 2018)

8. Una vez que el clinker se haya enfriado, se obtiene una finura del cemento, lo que implica moler cuidadosamente el clinker y luego agregar yeso para ralentizar el tiempo de fraguado (Montalvan, 2010).

Dependiendo de la composición, resistencia y otras propiedades adicionales, el cemento se clasifica en diferentes calidades. La molienda del cemento se la realiza por medio de equipos mecánicos donde la mezcla de los materiales se somete al contacto de cuerpos de metal o a su vez a una alta resistencia a la presión.

Para moler cemento, se utilizan los siguientes dispositivos:

- Prensa de rodillos
- Molinos verticales de rodillos
- Molinos de bolas
- Molinos horizontales de rodillos

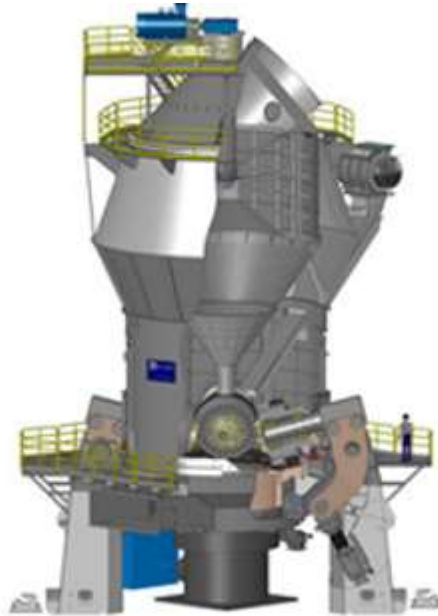


Figura 2.14 Molino vertical para la producción de Cemento Portland. Fuente: (Montalvan, 2010)

Una vez obtenido el cemento, este se almacena en silos para luego ser ensacados y distribuidos, los cementos Portland se envían desde la empacadora o el departamento de envíos a granel o en bolsas de papel por camión, tren, barcaza o barco. **Figura 2.15.**



Figura 2.15 Fabrica ensacadora de Cemento Portland.

2.1.1.4 Definiciones.

(ASTM C-125, 2021) **“Terminología de árido y hormigón”**. Cemento hidráulico (Hydraulic cement). El cemento se endurece por reacción química con el agua y es capaz de realizar este trabajo bajo el agua.

(ASTM C219, 2020) **“Término referente al Cemento Hidráulico”** un cemento hidráulico es producido por pulverización de Clínter, que consiste esencialmente en silicatos de calcio hidráulicos cristalinos y generalmente contiene uno o más de los siguientes: agua, sulfato de calcio, hasta 5% de piedra caliza y adiciones de procesamiento.

(ACI 116, 2015) **“Término del Cemento y Hormigón”** Cemento hidráulico – cemento que fragua y endurece por interacción química con el agua y es capaz de hacerlo bajo el agua.

(UNE-EN 197-1, 2011) **“Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y estándares de idoneidad para el cemento común”** El cemento es un aglutinante hidráulico, es decir, una sustancia inorgánica finamente molida que se forma cuando se mezcla con agua y se convierte en una pasta y se endurece por reacciones e hidratación, que después del endurecimiento retiene su fuerza y estabilidad incluso bajo el agua.

2.1.1.5 Normativa del Cemento en España.

La fabricación del cemento en España está regularizada bajo la norma UNE EN 197-1, la cual define y presenta las especificaciones de 27 tipos de cemento comunes y sus componentes. La definición de cada cemento incluye la proporción en que deben combinarse sus componentes para producir diferentes tipos de cemento en un rango de seis resistencias diferentes.

La definición también incluye los requisitos que deben cumplir los componentes y requisitos mecánicos, físicos y químicos para 27 tipos y clases de resistencia. Asimismo, esta parte de la Norma Europea establece las normas de conformidad y las normas aplicables. Por otro lado, también se incluyen los requisitos de durabilidad necesarios.

Las exigencias y especificaciones de los componentes principales que tiene la norma UNE EN 197-1, se ve detallado en el capítulo 5.2 de la norma, y se describen a continuación:

- Clinker de cemento portland (K).
- Escoria granulada de horno alto (S).
- Materiales puzolánicos (P, Q); (**P** Puzolana Natural, **Q** Puzolana Natural Calcinada).
- Cenizas volantes (V, W); (**V** sílicea, **W** calcárea).
- Esquisto calcinado (T).
- Caliza (L, LL).
- Humo de sílice (D).

La **Tabla 2.1** muestra los tipos de Cemento de acuerdo a la Norma UNE EN 197-1:

Tipos de cemento	Denominaciones	Designaciones
I	Cemento Portland	CEM I
II	Cemento Portland con adiciones	CEM II
III	Cemento Portland con escorias de horno alto	CEM III
IV	Cemento Puzolánico	CEM IV
V	Cemento compuesto	CEM V

Tabla 2.1 Tipos de cemento de acuerdo a la norma UNE EN 197-1

La **Figura 2.16** se presentan los 27 productos de la familia de cementos comunes, afectados por esta parte de la norma europea, y su designación.

Tipos principales	Designación y denominación de los 17 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa ^a)										Componentes minoritarios adicionales		
			Componentes principales												
			Clinker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado	Caliza				
natural	natural calcinada	silíceas				calcáreas	L	LL							
			K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL			
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
CEM II	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
		CEM II/B-P	65-79	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5
		CEM II/A-Q	80-94	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	0.5
		CEM II/B-Q	65-79	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	—	—	0.5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	—	0.5
		CEM II/B-V	65-79	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	—	0.5
		CEM II/A-W	80-94	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	—	0.5
		CEM II/B-W	65-79	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	—	0.5
	Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/A-T	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0.5
		CEM II/B-T	65-79	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	—	0.5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	0.5
		CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0.5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0.5
Cemento Portland compuesto ^c	CEM II/A-M	80-88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0.5	
	CEM II/B-M	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
CEM IV	Cemento puzolánico ^c	CEM IV/A	65-89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
		CEM IV/B	45-64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
CEM V	Cemento compuesto ^c	CEM V/A	40-64	18-30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	
		CEM V/B	20-38	31-49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	

^a Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.
^b La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.
^c En los cementos Portland compuestos: CEM II/A-M y CEM II/B-M, en los cementos puzolánicos: CEM IV/A y CEM IV/B y en los cementos compuestos: CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del clinker se deben declarar en la designación del cemento (véanse los ejemplos en el capítulo 8).

Figura 2.16 Familia de 27 cementos comunes, dividida en las 5 familias principales. Fuente: (UNE-EN-197-1. 2011).

Tipos principales	Designación y denominación de los siete productos (tipos de cementos comunes resistentes a los sulfatos)		Composición (porcentaje en masa ^b)				
			Componentes principales				Componentes minoritarios adicionales
			Clínker K	Escoria de horno alto S	Puzolana natural P	Ceniza volante sílicea V	
CEM I	Cemento Portland resistente a los sulfatos	CEM I-SR 0 CEM I-SR 3 CEM I-SR 5	95-100	–	–	–	0-5
CEM III	Cemento de horno alto resistente a los sulfatos	CEM III/B-SR	20-34	66-80	–	–	0-5
		CEM III/C-SR	5-19	81-95	–	–	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico resistente a los sulfatos ^b	CEM IV/A-SR	65-79	–	← 21-35 →		0-5
		CEM IV/B-SR	45-64	–	← 36-55 →		0-5

^a Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.

^b En los cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos, los tipos CEM IV/A-SR y CEM IV/B-SR, los componentes principales diferentes del clínker se deben declarar en la designación del cemento (véanse los ejemplos del capítulo 8).

Figura 2.17 Familia de 7 cementos comunes resistentes a los sulfatos, dividida en las 3 familias principales. Fuente: (UNE-EN-197-1. 2011).

La nomenclatura para todos estos cementos CEM, vienen acompañados de los valores de resistencia a compresión a los 28 días comerciales de 32,5, 42,5 y 52,5 N/mm², además existen tres indicativos para informar la resistencia inicial, la resistencia inicial ordinaria se indicará con la letra N, una elevada resistencia inicial vendrá dado por la letra R y una baja resistencia inicial con la letra L (solo es aplicable para cementos CEM III. Ejemplo: un cemento que tenga una etiqueta CEM I 32,5 R, se deberá leer como un cemento Portland de resistencia 32,5 MPa con elevada resistencia inicial. (Carrasco, 2020)

2.1.1.6 Normativa de Cemento en Ecuador.

En Ecuador el cemento viene especificado por la norma técnica ecuatoriana *INEN “Instituto Ecuatoriano de Normalización”*, las cuales están basadas en las normas ASTM “*American Society for Testing and Materials*”, las cuales se mencionan a continuación:

- ASTM C150/C150M-22 (NTE INEN 152:2012) Especificación normalizada para cemento Portland.
- ASTM C1157/1157M-20a (NTE INEN 2380:2011) Especificación normalizada de desempeño para cemento hidráulico.
- ASTM C595/595M-21 (NTE INEN 490:2011) Especificación normalizada para cementos hidráulicos mezclados.

Dado que las normas INEN están basadas en las normas ASTM, se utilizará las normas norteamericanas actualizadas.

(ASTM C150)/C150M-22 Especificación normalizada para cemento Portland.

Esta Especificación cubre 10 tipos de cemento de portland, de la siguiente manera:

Tipo I	Para usar cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
Tipo IA	Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I, donde se desea incorporación de aire.
Tipo II	Para uso general, más especialmente cuando se desea resistencia moderada a los sulfatos.
Tipo IIA	Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, donde se desea incorporación de aire.
Tipo II (MH)	Para uso general, más especialmente cuando se desean moderado calor de hidratación y resistencia moderada a los sulfatos.
Tipo II (MH) A	Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH), donde se desea incorporación de aire.
Tipo III	Para usar cuando se desea alta resistencia inicial.
Tipo IIIA	Cemento incorporador de aire para el mismo uso como Tipo III, donde se desea incorporación de aire.
Tipo IV	Para usar cuando se desea un bajo calor de hidratación.
Tipo V	Para usar cuando se desea alta resistencia a los sulfatos.

Tabla 2.2 Tipos de cemento Portland. Fuente: (ASTM C150)

Nota 1. Algunos cementos se designan bajo una clasificación de tipo de combinación, como tipo I/II, lo que indica que el cemento cumple con los requisitos de los grados enumerados y se suministra como apto para el uso cuando se desea cualquier tipo.

NOTA 2. En algunas áreas no se almacena cemento que cumpla con los requisitos para todos los grados. Antes de decidir si usar cemento que no sea tipo I, determine si el cemento propuesto está disponible o puede suministrarse.

ASTM C1157/1157M-20a (NTE INEN 2380:2011) Especificación normalizada de desempeño para cemento hidráulico.

Esta normativa es aplicada en cementos hidráulicos ya sean generales o a su vez especiales. Estas son especificaciones que definen los requisitos de rendimiento. No hay restricciones sobre la composición del cemento o sus componentes.

Los cementos conformes a la presente memoria descriptiva serán designados de acuerdo con la nomenclatura con características especiales indicadas por tipo de acuerdo con los tipos. Cuando el tipo no es especificado, se aplicará el requisito del tipo GU.

Los tipos de cemento hidráulico cubiertos por esta especificación se describen a continuación y son clasificados de conformidad con propiedades específicas.

Tipo GU	Cemento hidráulico para construcción general. Se debe utilizar siempre y cuando uno o más de los tipos de cementos especiales no se requieran.
Tipo HE	Alta Resistencia Inicial.
Tipo MS	Moderada Resistencia a los Sulfatos.
Tipo HS	Alta Resistencia a los Sulfatos.
Tipo MH	Moderado Calor de Hidratación.
Tipo LH	Bajo Calor de Hidratación.

Tabla 2.3 tipos de cementos hidráulicos. Fuente: (ASTM C1157/C1157M-20A, 2020)

ASTM C595/595M-21 (NTE INEN 490:2011) Especificación normalizada para cementos hidráulicos mezclados.

Esta especificación corresponde a los cementos hidráulicos mezclados para aplicaciones generales y especiales y que utilicen escoria, puzolana, caliza, o alguna combinación de estos materiales, con cemento Portland o Clinker de cemento Portland o escoria con caliza.

Esta especificación aplica a los siguientes tipos de cemento mezclado que generalmente están destinados a usos como los indicados.

Los tipos de cementos hidráulicos mezclados son los siguientes:

Tipo IS	Cemento Portland con escoria de alto horno.
Tipo IP	Cemento Portland con puzolana.
Tipo IL	Cemento Portland con caliza.
Tipo IT	Cemento ternario mezclado.

Tabla 2.4: Tipos de cementos Portland. Fuente: (ASOCEM, 2019)

Resumen de los tipos de Cemento de Acuerdo a las Normas NTE INEN y ASTM

En la **Figura 2.18** se indican los tipos de cemento existentes de acuerdo a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN, las mismas que son derivadas de las normas ASTM.

TIPO	DESCRIPCIÓN	NORMA		
		INEN	ASTM	
Puros	I	Uso común	152	C 150
	II	Moderada resistencia a sulfatos Moderado calor de hidratación	152	C 150
	III	Elevada resistencia inicial	152	C 150
	IV	Bajo calor de hidratación	152	C 150
	V	Alta resistencia a la acción de los sulfatos	152	C 150
Los tipos IA, IIA y IIIA incluyen incorporador de aire				
Compuestos	IS	Pórtland con escoria de altos hornos	490	C 595
	IP	Pórtland Puzolanico	490	C 595
	P	Pórtland Puzolanico (Cuando no se requiere resistencias iniciales altas)	490	C 595
	I(PM)	Pórtland puzolánico modificado	490	C 595
	I(SM)	Pórtland con escoria modificado	490	C 595
	S	Cemento de escoria	490	C 595
Por desempeño	GU	Uso en construcción en general	2.380	C 1157
	HE	Elevada resistencia inicial	2.380	C 1157
	MS	Moderada resistencia a los sulfatos	2.380	C 1157
	HS	Alta resistencia a los sulfatos	2.380	C 1157
	MH	Moderado calor de hidratación	2.380	C 1157
	LH	Bajo calor de hidratación	2.380	C 1157
Si adicionalmente tiene R, indica baja reactividad con áridos alcali-reativos				

Figura 2.18 Resumen de Tipos de Cemento de acuerdo a Normas NTE INEN y ASTM. Fuente: (Manual Pepe Hormigón)

2.1.2 Adiciones Cementantes

2.1.2.1 Humo de sílice.

El humo de sílice se obtiene como un subproducto de la obtención del ferro-silicio y silicio. Esta se reduce en un horno eléctrico cuarzo de pureza alta y carbón, tomándose del humo generado, por medio de un filtro electrostático, las partículas con diámetros muy pequeña, que han sido formadas principalmente de sílice de alta reactividad.

Las propiedades físicas del humo de sílice son las siguientes: su color puede variar de gris claro a gris oscuro, y al mezclarse con agua su color se torna negro; su peso específico es de 2.2; tiene una densidad que puede variar entre los 130 y 430 Kg/m³; tiene un tamaño de partícula menor a 1 µm y un diámetro de 0,1 µm.

Por otra parte, sus propiedades químicas dependen directamente de tipo de producto que uno quiere tener, de las cuales existen tres tipos, siendo estos los siguientes: procedentes de la fabricación del silicio; procedentes de la fabricación del ferro-silicio y procedentes de la fabricación de aleaciones de calcio-silicio (CEDEX, 2007). En la **Tabla 2.5** se puede visualizar la composición química del humo de silicio con cada una de las distintas fabricaciones.

Composición	Silicio	Ferro-silicio	Otras aleaciones
SiO₂	92	85-92	87
C libre	2,6	2,5	1,7
SiO	1,8	0,2	0,5
MgO	0,6	0,06	1
Si libre	0,3	0,01	0,1
Fe₂O₃	0,1	0,5-3	1
Al₂O₃	0,2	1-2,5	0,3
CaO	0,5	0,3	6
Na₂O	0,1	1	0,2
K₂O	0,6	1	1,6
S Total	0,2	0,4	0,6
Humedad	0,3	0,3	0,5
Pérdida al fuego (1.000°C)	2,8	3	4

Tabla 2.5 Composición química del humo de sílice. Fuente: (CEDEX, 2007)

Según la Norma (UNE-EN 197-1, 2000), las especificaciones que el humo de sílice debe cumplir para ser utilizado en el cemento son los que indica la

Tabla 2.6, la cual especifica los porcentajes y cantidades adecuadas para su incorporación.

Norma	UNE-EN 197-1
Dióxido de silicio amorfo (SiO₂)	≥85%
Perdida por calcinación	≤ 4%
Superficie específica (BET)	≥15000 m²/kg
Porcentaje máximo admisible	10%

Tabla 2.6 Porcentajes que tiene que cumplir el humo de sílice para ser incorporado al cemento. Fuente: (CEDEX, 2007).

El humo de sílice en el hormigón tiene varios usos, como son los mencionados a continuación:

- Para dar una alta resistencia en los hormigos,
- Para brindar mayor durabilidad de los hormigones,
- Como corrector de finura,
- Coadyuvante de bombeo,
- Alta impermeabilidad y,
- Hormigón proyectado.

Cabe recalcar que, el humo de sílice puede ser incorporado al hormigón como sustituto momentáneo del cemento o a su vez como adición.



Figura 2.19 Humo de Sílice.

2.1.2.2 Metakaolin.

El metakaolin ha sido estudiado como materiales puzolánicos en los últimos años por científicos alrededor del mundo, esto se debe a su composición química ($Al_2Si_2O_7$), también a su estructura que es cristalina amorfa. Este es un material cementoso de forma adicional, ya que es un aluminio-silicato termo-activado, producido al calentar el caolín a temperaturas entre 500 °C y 600°C; en este grado, su estructura cristalina sufre una transformación por la ruptura de los enlaces Van Der Waals (OH-) (Restrepo, Tabón, & Restrepo, 2006). Por otra parte, otros autores como (Gutierrez, Torres, & Guerrero, 2004), han aumentado la temperatura a un rango de 700°C y 900°C, dando a conocer que únicamente no solo es la temperatura la que deber ser importante, sino que también, se debe tener en cuenta el tiempo que este se encuentre en el horno, tamaño y la pureza del caolín.

Con respecto a las propiedades físicas las partículas de metakaolin tienen un diámetro entre los 0.50 μm a 5 μm , siendo más pequeños que los granos del cemento y más grandes que las partículas del humo de sílice, se puede ver en la **Tabla 2.7**.

Material	Tamaño medio (μm)	Área superficial (m^2/g)	Forma de la partícula	Gravedad específica
Cemento portland	10-15	<1	Angular, irregular	3,20
Ceniza volante	10-15	1-2	Principamente esférica	2,2-2,4
Humo de sílice	0,1-0,3	15-25	Esférica	2,2
Metakaolin	1-2	15	Laminar	2,4

Tabla 2.7 Propiedades físicas de las adiciones. Fuente: (Mindess, Young, & Darwin, 2003)

Las propiedades químicas del metakaolin está compuesta principalmente por SiO_2 y Al_2O_3 (Zamudio & Quiroga, 2018). En la **Tabla 2.8** se puede ver la composición química; Además, se debe tener en cuenta la normativa ASTM C618-08, clase N, reflejada en la **Tabla 2.9**.

Elemento y/o composición	Porcentaje por peso
SiO₂	51.52%
Al₂O₃	40.18%
Fe₂O₃	1.23%
CaO	2.00%
MgO	0.12%
K₂O	0.53%
SO₃	0.00%
TiO₂	2.27%
Na₂O	0.08%
L.O.I	2.01%

Tabla 2.8 Propiedades químicas del Metakaolin. Fuente: (Ambroise, Maximilien, & Pera, 1994)

Ítem	Límite
SiO₂ +Al₂O₃ + Fe₂O₃	Mín. 85%
Álcalis disponibles	Máx. 1.0%
Perdida por ignición	Máx. 3.0%
Finura: Cantidad retenida cuando se lava sobre tamiz 45 μm	Máx. 1.0%
Índice de actividad de la resistencia a los 7 días (% de control)	85%
Incremento de la retracción de fraguado en barras de mortero a 28 días	Máx. 0.03%

Tabla 2.9 Requisitos para el metakaolin. Fuente: (ASTM C618-08, 2008)

El Metakaolin presenta una serie de ventajas en los cementos portland sin adiciones, como son los siguientes:

- Aumento de las propiedades mecánicas especialmente a edades tempranas,
- Aumento de la resistencia en la reacción álcali sílice,
- Incremento del refinamiento de poros,
- Decrecimiento de la permeabilidad,
- Decrecimiento de la corrosión del refuerzo y,
- Disminuye en la evolución del calor de hidratación.

Según autores como (Caldarone, Gruber, & Burg, 1994) reconocen y afirman que el metakaolin puede reemplazar el humo de sílice, debido a que tiene grandes ventajas, las cuales destacan sus propiedades mecánicas y su durabilidad que es aún mayor al del humo de sílice, también le da mejor manejabilidad a la mezcla y el color blanco lo hace especial a diferencia del color negro que presenta el humo de sílice, con respecto a estructuras arquitectónicas.



Figura 2.20 Metakaolin.

2.1.2.3 Ceniza volante.

Según Rosales (2015) menciona que, la ceniza volante se obtiene por medio de la precipitación electrostática o a su vez mecánica por medio de partículas polvorientas arrasadas por flujos gaseosos de los hornos que son alimentados con carbón pulverizado. Estas cenizas volantes podrían ser de naturaleza calcárea o silíceas. Las silíceas presentan propiedades puzolánicas, mientras que las calcáreas tienen propiedades hidráulicas.

Los residuos inorgánicos de la combustión del carbón pulverizado se denominan subproductos de la combustión. Estos subproductos se acumulan rápidamente y pueden causar problemas significativos de desperdicio a menos que se encuentre una manera de usarlos a través de programas de devolución. Los estudios de este producto han encontrado una fuerza puzolánica similar a la de los materiales naturales de origen volcánico, que se han agregado al cemento, que puede reaccionar con los productos de hidratación, creando nuevas propiedades para el producto final (Parra, 2016).

Las cenizas volantes son residuos de la combustión de carbón pulverizado, estas partículas son muy finas y son llevadas por el gas que sale del horno (Zazueta, 1997). Estas cenizas se eliminan por una serie de precipitadores mecánicos y electrostáticos mucho antes de que el gas se libere a la atmósfera, su proceso se puede ver reflejado en la Figura 2.21.



Figura 2.21 Proceso de obtención de la ceniza volante. Fuente: Adaptado de (Corona Zazueta, 1997).

Dado que las cenizas volantes provienen de la combustión del carbón, las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las cenizas volantes dependen directamente del tipo de carbón producido a partir de ellas y de la calidad de su combustión. Antes de la combustión, el carbón es triturado con un molino y luego alimentado al horno por una corriente de gas caliente a alta velocidad, ya en suspensión, se quema a una temperatura superior a 1500 °C, en el proceso, partículas inorgánicas no se someten a una combustión completa, lo que da como resultado partículas de ceniza. Las centrales térmicas que utilizan carbón (combustible) y como generadores generan dos tipos de residuos: cenizas volantes y escorias, cuya diferencia radica en el tamaño de las partículas. Las partículas más finas (cenizas volantes) se obtienen por medios mecánicos o por precipitación electrostática del polvo en suspensión, y las partículas gruesas (escorias) que caen al fondo por gravedad. Las cenizas volantes representan alrededor del 80% de las cenizas totales. En la **Figura 2.22** podemos visualizar el proceso.

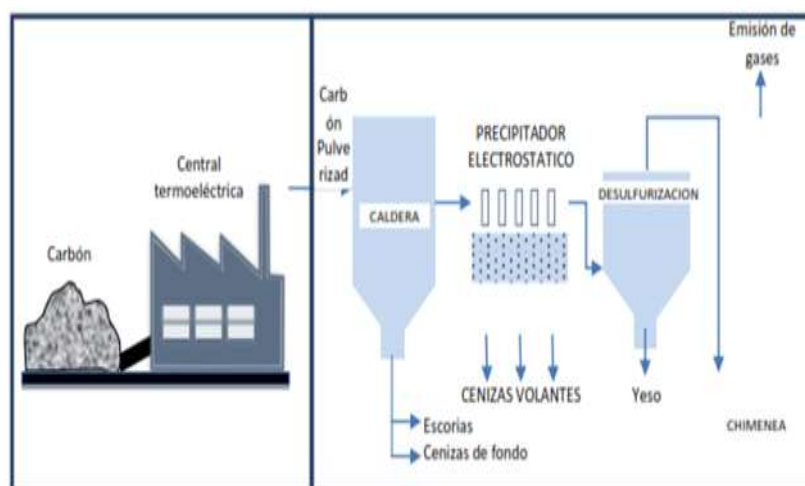


Figura 2.22 Esquema de la producción de la ceniza volante y escorias. Fuente: (Parra, 2016).

Velásquez (2021), hace referencia a la norma ASTM C618 – 12 a (2014) sobre las cenizas volcánicas y su clasificación:

- **Clase N:** puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase que se indica en este documento, como algunas tierras de diatomeas; sílex y lutitas opalinas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o sin calcinar; y varios materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y esquistos.
- **Clase F:** Cenizas volantes que cumplen con los requisitos aplicables para esta clase como se indica aquí. Tienen propiedades puzolánicas.
- **Clase C:** Cenizas volantes que cumplen con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en este documento. Esta clase de cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementosas.

Además, las cenizas volantes de clase F generalmente se producen al quemar antracita o carbón bituminoso, pero también se pueden producir a partir de carbón sub-bituminoso y de lignito. Las cenizas volantes de clase C generalmente se producen al quemar lignito o carbón subbituminoso, y también se pueden producir a partir del carbón orbituminoso de antracita. Las cenizas volantes de clase C suelen tener contenidos de calcio total, expresados como óxido de calcio (CaO), que son más altos que las cenizas volantes de clase F.



Figura 2.23 Ceniza Volante.

Con respecto a las normas que se toman en cuenta tenemos las siguientes:

Normas de Estados Unidos

Número de la Norma	Nombre
ASTM C 593	Las Cenizas Volantes y otras puzolanas para el uso con la cal
ASTM C 618	Especificación estándar para las cenizas volantes del carbón y Puzolana natural crudo o calcinado para el uso como adición mineral en concreto

Tabla 2.10 Normas ASTM. Fuente: tomadas de (Parra, 2016).

Número de la Norma	Nombre
ACI 211.4R	Guía para seleccionar las proporciones en el concreto de alta resistencia con el cemento Pórtland y las cenizas volantes.
ACI 232.2R	Uso de las cenizas volantes en el concreto

Tabla 2.11 Normas ACI. Fuente: tomada de (Parra, 2016)

Normas Españolas

Número de la Norma	Nombre
UNE-EN 450:1995	Cenizas volantes como adición al hormigón. Definiciones, especificaciones y control de calidad.
UNE-EN 451-1:1995	Métodos de ensayo de cenizas volantes. Parte 1: Determinación del óxido de calcio libre. (Versión oficial EN 451-1:1994).
UNE-EN 451-2:1995	Métodos de ensayo de cenizas volantes. Parte 2: Determinación de la finura por tamizado en húmedo.
UNE 80225:1993	Métodos de ensayo de cementos. Análisis químico. Determinación del dióxido de silicio (SiO ₂)
UNE 83414:1990	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes. Recomendaciones generales para la adición de cenizas volantes a los hormigones fabricados con cemento Tipo I.
UNE 83421:1987	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Toma, preparación, conservación y transporte de las muestras.
UNE 83431:1992	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Determinación de la humedad.
UNE 83432:1986	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Determinación de sulfatos expresados en SO ₃ por método gravimétrico.
UNE 83433:1986	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Determinación de la pérdida por calcinación.
UNE 83450:1986	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Determinación de la finura.
UNE 83451:1986	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Determinación del índice de actividad resistente con cemento Portland.
UNE 83452:1988	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes Demanda de agua relativa de una ceniza volante mezclada con cemento Portland en forma de mortero.
UNE 83453:1988	Adiciones al hormigón. Cenizas volantes: Determinación de la estabilidad de volumen por el método de Le Chatelier.

Tabla 2.12 Normas UNE. Fuente: tomada de (Parra, 2016)

2.1.3 Agua

El agua es un ingrediente esencial de cualquier material fabricado con cemento porque sin ella no sería posible el proceso de hidratación (Ferrer, Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales, 2016). Es la reacción química entre el agua y el cemento lo que promueve el fraguado y endurecimiento del cemento. El papel del agua en la trabajabilidad del hormigón en estado fresco también es importante, ya que permite que la masa fluya, dándole una consistencia adecuada a la aplicación deseada. Es decir, el agua actúa como lubricante para la hidratación del cemento

El agua tiene una influencia poderosa y generalizada en el desempeño del concreto de cemento Portland. El agua es expulsada en el proceso de fabricación de cemento, seguido de cambios químicos que hacen que el polvo final sea reactivo en presencia de agua. El agua activa el cemento y otros materiales cementosos, y el mismo término "hidratación" se deriva del hecho de que las moléculas de agua se combinan química y físicamente con los minerales del cemento Portland, liberando calor a medida que los productos de la reacción química se disuelven y luego precipitan en un espacio acuoso. El componente "agua" es el requisito principal para que se puedan dar la reacción química del cemento y por ende que se efectúe las características de resistencia y durabilidad en el hormigón, pero a pesar del gran poder químico del agua (se la conoce como el "disolvente universal"), quizás su mayor problema en el hormigón sea su baja densidad. En comparación con otros materiales de fabricación de hormigón, un pequeño peso (o masa) de agua se convierte en un gran volumen (Ingala, 2006).

El agua representa el 10% o menos del peso del hormigón, pero ocupa casi el 20% del volumen del hormigón. Cuando se trata de la pasta, es el aglutinante fundamental que mantiene unido el hormigón, el agua representa mucho menos de la mitad de la masa, pero más de la mitad del volumen. El "hormigón macizo" no es especialmente sólido gracias a la porosidad originada en el volumen inicial ocupado por el agua de amasado (Flotar, 2011). La resistencia y la durabilidad del concreto no solo dependen de la cantidad de agua en la mezcla fresca (y el espacio poroso subsiguiente en la masa endurecida), sino que la contracción también es proporcional al contenido de agua. y la trabajabilidad depende exponencialmente del agua. Intencionadamente aumentamos aún más la porosidad del concreto con burbujas de aire para proteger el producto final contra la expansión del agua cuando se congela (y esa agua congelable ocupa el espacio previamente vacante por el agua de mezcla) (Lopez, 2003).

La resistencia y la durabilidad del concreto están influenciadas en gran medida por la porosidad de la pasta de cemento endurecida, y la porosidad de la pasta está influenciada en gran medida por el grado en que los espacios vacíos entre los granos de cemento han sido llenados por los productos de hidratación. Por supuesto, esto depende del volumen de los productos de hidratación (que depende de la cantidad de cemento que se haya convertido en gel hidratado y saturado, es decir, el "grado de hidratación") y del volumen del espacio poroso que se va a llenar. Cuanto más separados estén los granos de cemento, más hidratación se requiere para tapar los huecos. Pero aquí es donde uno se enfrenta a la naturaleza dual del agua cuando se trata de hidratación. No solo se requiere agua para mantener el crecimiento de los productos de hidratación que unen los espacios y cierran los poros entre las partículas de los materiales cementosos, sino que los mismos espacios entre partículas tienen su origen en el volumen inicial de agua para pastas compuestas únicamente de cemento y agua.

El enigma agua-cemento es que cuanto mayor sea la proporción de agua a cemento, más agua estará disponible para mantener la hidratación, pero mayor será el espacio poroso entre partículas, lo que a su vez requerirá un mayor grado de hidratación para cualquier grado de hidratación. El concreto de alto desempeño es posible al reducir la relación agua-cemento a

valores en el rango de 0.35 (o en algunos casos menos) para aprovechar el volumen de agua reducido entre las partículas de los materiales cementosos.

El uso del agua se divide en agua de proceso y agua no procesada. El agua de proceso se utiliza para hacer lechada de harina cruda en el proceso húmedo y en el proceso semiseco. Sin embargo, pocas plantas emplean el proceso semiseco. El agua que no es de proceso consiste en agua que se usa para enfriamiento por contacto (como agua rociada directamente en los gases de escape y agua añadida a los molinos), enfriamiento sin contacto (como enfriamiento de motores o equipos), lodos de vertederos de polvo de hornos de cemento y supresión de polvo. El agua se utiliza para suprimir el polvo en las carreteras, los almacenes de materias primas, los depósitos de combustible y las pilas de polvo de los hornos de cemento (Wang, 2011). **Tabla 2.13** y **Tabla 2.14**.

	Mojado	Secado largo	Precalentador	Precalcinador	Promedio
Agua	Kg/tonelada métrica de cemento				
Agua de refrigeración de contacto	4	111	82	73	68
Agua de refrigeración sin contacto	480	791	859	405	544
Supresión de polvo de carretera	18	25	75	19	28
Supresión de polvo fuera de carretera	6	7	7	4	5
Otros laboratorios y otros terrenos	1	0	5	13	8
Lodo de vertedero CKD	10	0	0	0	2
Otro	2	94	<1	24	27
Total	521	1,028	1,028	537	682

Tabla 2.13 Uso de agua no procesada (Unidad SI). Fuente: (Wang, 2011).

	Mojado	Secado largo	Precalentador	Precalcinador	Promedio
Agua	Lb/tonelada de cemento				
Agua de refrigeración de contacto	8	244	180	161	151
Agua de refrigeración sin contacto	1,059	1,743	1,894	892	1200
Supresión de polvo de carretera	40	55	166	41	62
Supresión de polvo fuera de carretera	13	16	15	8	11
Otros laboratorios y otros terrenos	2	0	12	29	18
Lodo de vertedero CKD	22	0	0	0	4
Otro	4	208	<1	52	59
Total	1,148	2,266	2,267	1,183	1,505

Tabla 2.14 Uso de agua no procesada (unidades habituales de EE. UU). Fuente: (Wang, 2011).

Norma ASTM C 1602

Es una especificación basada en el desempeño que permite a un productor de concreto calificar una fuente de agua para uso en concreto (ASTM 1602). La norma define las siguientes fuentes:

- Agua potable: lo que es apto para el consumo humano
- Agua no potable: otras fuentes que no son potables, que pueden tener sabor u olor objetables pero que no están relacionadas con el agua generada en las plantas de concreto. Se puede decir que son, agua proveniente de pozos, lagos y arroyos.
- Agua de las operaciones de producción de hormigón: agua de proceso (lavado) o agua de lluvia recolectada en plantas de concreto.
- Agua combinada: una combinación de una o más de las fuentes definidas anteriormente, reconociendo que las fuentes de agua pueden mezclarse al producir concreto. Todos los requisitos de la norma se aplican al agua combinada como dosificada en concreto y no a las fuentes individuales cuando se combinan las fuentes de agua.

El agua potable se puede utilizar sin pruebas ni calificación. Cuando se utilizan otras fuentes en su totalidad o cuando se mezclan dos o más fuentes, el agua debe calificarse mediante pruebas. Los requisitos principales para esta calificación son la fuerza y el tiempo establecido en los límites de la **Tabla 2.15**.

	Límites	Métodos de prueba
Resistencia a la compresión, control de % mínimo a los 7 días.	90	C 31/ C 31M
Tiempo de fraguado, desviación de control, h: min.	Desde la 1:00 temprano hasta 1:30 más tarde	C 403/ C 403M

Tabla 2.15 Requisitos de desempeño del concreto para el agua de mezcla (Obligatorio). Fuente: (ASTM 1602).

Las comparaciones se deben basar en proporciones fijas para un diseño de mezcla de concreto representativo de un suministro de agua cuestionable y una mezcla de control que utilice 100 % de agua potable o agua destilada.

Estos requisitos son los mismos que en versiones anteriores de la norma ASTM C 94. El cambio es que, si bien anteriormente la resistencia y el tiempo de fraguado se probaban en morteros y pastas, la norma actual requiere que se prueben en concreto utilizando cilindros estándar (ASTM C 39) y la medición del tiempo de fraguado por resistencia a la penetración de morteros extraídos de muestras de concreto, ASTM C 403.

El otro requisito es que el productor pruebe y mantenga la documentación sobre la química y el contenido de sólidos del agua de mezcla. Esto se considera un requisito "opcional" que el productor debe cumplir solo si el comprador invoca específicamente uno o más de estos requisitos cuando se realiza el pedido como se puede visualizar en la **Tabla 2.16**.

Concentración máxima de agua combinada	Limites, ppm	Métodos de prueba
Cloruro como Cl.		114
Pretensado	500	
Otro hormigón armado	1000	
Sulfato como SO ₄	3000	114
Alcalinos como (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	600	114
Sólidos totales por masa	50,000	1603

Tabla 2.16. Límites químicos opcionales para agua de mezcla combinada. Fuente: (ASTM 1602)

Estas disposiciones se aplican al agua de mezcla combinada. Entonces, por ejemplo, si el productor prueba una fuente de agua, pero solo propone usarla al 50 % del agua de mezcla y el resto es agua de la ciudad, el factor de dilución se aplicará a las concentraciones probadas al informar esta información.

En la **Tabla 2.17** se puede observar la frecuencia de prueba con la que un productor debe probar las fuentes de agua son las siguientes.

Fuente de agua	Densidad	Tabla 1	Tabla 2
Potable	Sin pruebas		
No potable	N/A	3 meses/ (4)/ anual	6 meses
Agua de lavado (basado en la densidad)			
<1.01		6 mese/2/ anual	
1.01 – 1.03	Diariamente	Mensual/4/3 meses	6 meses
>1.03		Semanal / 8/ mensual	

Tabla 2.17 Requisitos para frecuencia de pruebas. Fuente: (ASTM 1602)

Las fuentes de agua no potable y las provenientes de la producción de concreto deben probarse antes de usarse por primera vez y posteriormente con las frecuencias enumeradas para las pruebas en las **Tabla 2.15** y **Tabla 2.16**. Las frecuencias de prueba de resistencia y tiempo de fraguado pueden reducirse cuando el número de pruebas consecutivas cumple con los

requisitos de la **Tabla 2.15**. Las frecuencias de las pruebas para el agua de lavado dependen de la densidad del agua combinada (no del agua de lavado) propuesta para su uso. Una densidad inferior a 1,01 representa la situación de usar agua de lavado clarificada de un pozo de sedimentación. La densidad de 1,03 representa un contenido de sólidos de 50.000 ppm. La frecuencia de las pruebas para calificar las fuentes de agua aumenta cuando el productor planea usar agua con un contenido de sólidos más alto. Si la intención es usar agua a más de 1.03 (50,000 ppm), Cuando se usa agua de lavado, la densidad debe probarse diariamente. La química de las fuentes de agua no potable y de lavado para cumplir con la **Tabla 2.17** debe probarse una vez cada 6 meses.

Norma EHE 08 y UNE 83951

En lo que respecta la norma EHE 08 en el art 27 nos indica que el agua que es utilizada ya sea para los procesos de amasado y curado del hormigón en obra, no tiene que presentar ningún ingrediente que sea perjudicial en las cantidades que puedan afectar las propiedades de dicho hormigón o a su vez a las armaduras que se encuentran frente a la corrosión (Moya, López, & Bañón, 2013). Cabe recalcar que, las muestras tomadas se regirán en base a la norma UNE 83951, que da a conocer que está permitido el uso de agua reciclada únicamente que sea de cubas de la propia central de hormigonado pero que cumplan los siguientes requisitos como se puede observar en la **Tabla 2.18**. Cabe recalcar que debe cumplir los requisitos donde la densidad no exceda los 1,9 g/cm, mientras tanto que la densidad del agua total sea menor que 1,1 g/cm.

La EHE en su informe permite la utilización del agua proveniente del mar, pero en hormigones que no cuenten con armadura, se debe tener en consideración que al utilizar esta agua de mar se tiene una reducción de un 15% en la resistencia a compresión, además, se recomienda el uso de un cemento que cuente con características MR o a su vez con SR.

Exponente de hidrógeno pH (UNE 83952)	>5
Sustancias disueltas (UNE83957)	<15 gramos por litro (15.000 ppm)
Sulfatos, expresados en SO ₄ (UNE 83956), excepto para el cemento SR en que se eleva este limite a 5 gramos por litro (5.000 ppm)	< 1 gramo por litro
Ión cloruro (UNE7178):	
a) Para hormigón prensado	< 1gramo por litro (1.000 ppm)
b) Para hormigón armado u hormigón para masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	< 3 gramos por litro (3.000 ppm)
Hidratos de carbono (UNE 7132)	0
Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235)	<15 gramos por litro (15.000 ppm)

Tabla 2.18 Límites permitidos del agua para el uso de mezclas de hormigón. Fuente: (EHE 2008)

2.1.4 Aditivos

Los aditivos son productos o sustancias que al momento de mezclarlos con el hormigón (puede ser antes del amasado o durante este proceso) en cierta cantidad que no sea superior al 5% del peso del cemento, se produce una modificación que se desea, esta sea en estado fresco o a su vez endurecido de ciertas características, propiedades o su comportamiento (Tebar, 1994). La gran variedad de aditivos y, lo que es más importante, la gran cantidad de productos inorgánicos y orgánicos que interfieren en su composición se debe a que las diferentes propiedades del hormigón y mortero, estos se ven afectadas por una variedad de compuestos, dando como resultado lo siguiente cambios:

- La reología (aumentando la trabajabilidad en relación de agua/cemento o a su vez reduciendo el porcentaje de agua de amasado para tener una mejor consistencia),
- Tiempos de fraguado y endurecimiento,
- Las resistencias mecánicas,
- La durabilidad química, física o mecánica,
- Otras propiedades.

Por tanto, la conveniencia de utilizar aditivos sólo cuando se conoce su efecto, especialmente en hormigones o morteros según se definen, es necesario realizar los estudios correspondientes y, si es posible, otros estudios utilizando materiales similares a los que se utilizará en la obra, y las condiciones de uso dadas, ya que el uso de aditivos apropiados puede afectar una o más propiedades del concreto, y en algunos casos ciertas propiedades o de manera desfavorable. Además, cabe resaltar que la dosificación de los aditivos, condiciones de empleo, naturaleza, características del cemento y áridos, tienden a influir en la acción de un aditivo, de tal manera que puede actuar de manera positiva como negativa, por lo que se recomienda realizar controles pertinentes a la dosificación de aditivos, para tener una buena relación calidad/precio en lo que respecta a la formulación de hormigones.

En lo que respecta a hormigones armado y pretensados, está prohibido el uso de aditivos que contengan cloruros, sulfuros u otros componentes químicos capaces de causar corrosión o endurecimiento del refuerzo. Por tanto, el cloruro cálcico sólo puede utilizarse en hormigón a granel, en proporciones adecuadas (del 1,5 al 2% en peso de cemento). En elementos de refuerzo pretensados fijados individualmente con adhesivos, no se deben utilizar aditivos con propiedades de absorción de aire (Parra, 2016). Los aditivos deben ser transportados y almacenados de forma que estén libres de contaminación y sus propiedades no se vean afectadas por factores físicos o químicos (heladas, altas temperaturas, etc.).

El uso de aditivos está incluido en el primer recurso y suele ser una medida opcional, cuando otras medidas no producen los efectos deseados, dependiendo de las condiciones externas actuales o futuras. En otras palabras, la práctica recomendada de usar aditivos en el concreto es tratarlos como un complemento y no como un sustituto de otras medidas básicas, como el uso de cemento apropiado, una mezcla de concreto bien diseñada u operaciones de construcción. Los aditivos se utilizan a menudo en la preparación de mezclas de hormigón, mortero o mezclas de inyección, no solo para cambiar sus propiedades en estado fresco y sólido, sino también por economía y ahorro de energía y estos casos de uso adicionales pueden ser la única forma posible de lograr los resultados deseados.

Las normas norteamericanas establecen los siguientes requisitos a cumplir por parte de los aditivos:

ASTM C494 (Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Hormigón), dicha normativa da a conocer sobre los materiales que deben ser utilizados como aditivos químicos en el hormigón de cemento hidráulico.

- Tipo A: Aditivos reductores de agua
- Tipo B: Aditivos retardadores,
- Tipo C: Aditivos aceleradores,
- Tipo D: Aditivos reductores de agua y retardadores,
- Tipo E: Aditivos reductores de agua y aceleradores,
- Tipo F: Aditivos reductores de agua y de alto rango,
- Tipo G: Aditivos reductores de agua, de alto rango y retardadores,
- Tipo S: Aditivos de comportamiento específico.

con respecto a los ensayos establecidos, existe una excepción para los aditivos de comportamiento específico (Tipo S), donde da a conocer que, todo hormigón tiene que ser dosificado utilizando la Norma ACI 211.1-91 para que pueda cumplir con los requisitos exigidos. Un aditivo Tipo S debe ser ensayado con la dosificación dentro del rango recomendado por el fabricante para su uso en la obra.

La norma ASTM C494-19 define a los aditivos de la siguiente manera:

Tipo de aditivo	Definición
Acelerador	Acelera el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial o temprana del hormigón.
Retardador	Disminuye la velocidad de reacción de los materiales cementosos aumentando así el tiempo de fraguado del hormigón.
Reductor de agua	Aumenta el asentamiento del hormigón recién mezclado sin aumentar el contenido de agua o que mantiene el asentamiento con una cantidad reducida de agua debido a factores distintos al arrastre de aire.
Reductor de agua, de alto rango	Reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para reducir un hormigón de una consistencia dada en un 12% o más.
Reductor de agua y acelerador	Reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un hormigón de una consistencia dada y acelera el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial o temprana del hormigón.
Reductor de agua y retardador	Reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un hormigón de una consistencia dada y retarda el fraguado del hormigón.
Reductor de agua, de alto rango y retardador	Reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un hormigón de una consistencia dada en un 12% o más y retarda el fraguado del hormigón.
Comportamiento específico	Brinda una característica deseada de comportamiento distinta a la reducción del contenido de agua, o al cambio del tiempo de fraguado del hormigón, o ambos, sin ningún efecto adverso sobre las propiedades del hormigón fresco, endurecido y de durabilidad como se especifican en la norma, excluyendo aditivos que son utilizados principalmente en la fabricación de productos de hormigón colocado en seco.

Tabla 2.19 Definición de los tipos de aditivos. Fuente: (ASTM C494-19. 2020)

Entre los aditivos que modifican las características físicas y el contenido en el aire tenemos los siguientes:

Los reductores de agua o fluidificantes, estos nos permiten aprovechar volúmenes imposibles de colocar o reducir a su favor el agua de amasado del hormigón. Su resistencia o dosificación del cemento trabajan a través de procesos físicos y químicos, son productos orgánicos de moléculas muy complejas, con un extremo hidrofóbico y otro hidrofílico. Además, actúa como lubricante pastoso, creando un efecto de fregado sobre las partículas, facilitando el deslizamiento y evitando la formación de grumos que separan las partículas de cemento. El efecto general es reducir la tensión superficial del agua y, por lo tanto, la relación agua/cemento para la misma ductilidad. Sus principales productos son el jabón plástico y el sulfato de sodio o calcio (un subproducto del proceso de fabricación de la pulpa). En general son similares a los inclusores de aire, pero con pocas excepciones (Aranda A. R., 2007).

Las principales características que le da al hormigón son:

- Aumenta la plasticidad de la mezcla,
- Al igualar la docilidad, la relación agua/cemento la reducen entre el 5 a 15%,
- Al tener una igualdad en la relación agua/cemento tiene una mejoría en su docilidad,
- Aumenta la durabilidad y resistencia a la abrasión del hormigón,
- Tiene una mejor resistencia al disminuir la cantidad de agua y forzar la hidratación a fondo del cemento,
- Mejoran la adherencia del hormigón en armaduras y,
- Disminuye la tendencia a la segregación durante el transporte.

Los fluidificantes muchas de las veces hacen retrasar de manera ligera el fraguado del hormigón, y más si estas son empleadas en dosis elevadas, debido a esto deben tener precauciones y esperar un poco más el desencofrado cuando sean utilizados en tiempo de frío. Este no debe utilizarse con hormigones que sean suaves o fluidos, sino que solo con los secos, debido a que su eficacia mejor cuando la relación agua/cemento es menor. Su uso es únicamente para hormigones pre-amasado y bombeados, también para piezas que estén densamente armadas, para obras donde se necesite el hormigón de excelente calidad. El empleo de los fluidificantes suele tener efectos secundarios en el hormigón, pero hoy en día se están utilizando los llamados "superfluidificantes" ya que este no genera un efecto secundario en el hormigón y sumado a ello, le permite reducir agua en una cantidad del 30%.

Este aditivo tiene más propiedades de las cuales destacan: a) Aumenta la docilidad de la masa del hormigón fresco sin tener un cambio en la relación agua/cemento, b) Aumenta la resistencia del hormigón sin cambiar la docilidad. Estas características antes mencionadas son perfectas para los hormigones de pieza de geometría complicada, al igual para bombear hormigón. se debe tener en cuenta que estos pierden eficacia de manera rápida, la cual las masas deben colocarlas en un tiempo de 30 a 60 minutos después de colocar el aditivo.

2.1.5 Áridos

Los áridos son materiales inertes, granulares, naturales o artificiales, que se unen mediante cemento Portland en presencia de agua, formando una masa sólida (piedra artificial), denominada mortero u hormigón (Rivera, 2009). No se puede subestimar la importancia de utilizar el tipo y la calidad adecuados de agregado (áridos). Los agregados finos y gruesos constituyen entre el 60 y el 75 % del volumen de concreto (70% a 85% de la masa) e influyen severamente en la frescura, dureza, relación de mezcla y economía del concreto (Carrasco, 2020).

Se tiene tres tipos de áridos que se usan comúnmente en los hormigones: naturales, artificiales y reciclados. Los áridos denominados naturales son procedentes de arrastres fluviales como arenas y gravas de ríos, también llamadas áridos finos (0,08 a 2 mm); Mientras que, de canteras o glaciares, son denominadas áridos gruesos (2 a 5 mm). Su tamaño se lo conoce como granulometría y estas dependen del tipo de hormigón que se vaya a necesitar, de la cual se seleccionara su tamaño.

Las rocas ígneas son las que se encuentran en su mayoría en la corteza terrestre, también llamadas rocas originales o magmáticas debido a que se dan por el magma. Además, estas rocas dependen directamente de la velocidad de enfriado del magma, la cual se puede obtener una textura y tamaño diferente. Si se da a una velocidad de enfriamiento lenta, los cristales son de tamaño pequeño, mientras que a una velocidad de enfriado más rápida se puede tener partículas porosas como puede ser la piedra pómez. En la **Tabla 2.20** se tiene la clasificación de las rocas ígneas.

Nombre	Velocidad de solidificación	Localización	Características de la textura
Intrusivas Plutónicas Abisales	Lenta	Cristalización a gran profundidad	Fanerítica: grano uniforme y visible de 1 a 5 mm
Filonianas hipoabisales	Media	Consolidación a profundidad media	Porfirítica: granos grandes en matriz fina
Extrusivas Efusivas o Volcánicas	Rápida	Cristalización cerca o sobre la superficie por erupción volcánica	Afanítica: no se aprecian los granos matriz fina, o no. Afanítica: bombas

Tabla 2.20 Clasificación de las rocas ígneas. Fuente: (Gutiérrez, 2003).

Las rocas sedimentarias se las puede encontrar en la superficie terrestre en un total del 75% siendo las más abundantes, su formación está compuesta por pequeñas cantidades de los tres tipos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas). En la **Tabla 2.21** se tiene las propiedades físico mecánicas de las rocas sedimentarias. Tiene origen por medio de dos procesos: el primero por descomposición y la segunda por medio de la desintegración de las rocas antes mencionadas, siendo los procesos de la erosión, de transporte, deposición y a su vez de consolidación. En la **Tabla 2.22** se puede observar el agente geológico, transporte y su depósito.

Roca	Grano	Forma de grano mas general	Tamaño del grano en mm
Conglomerado	Cantos y gravas	Redondeado	256 - 64
Brecha	Fragmentos líticos	Angulares	64 - 5
Arenisca	Arena	Redondeados o angular	5 - 0.074
Limolita	Limo	Redondeado	0.074 - 0.002
Arcillolita	Arcilla	Laminar	< 0.002

Tabla 2.21 Propiedades físico mecánicas de las rocas sedimentarias. Fuente: (Gutiérrez, 2003).

Agente	Transporte	Depósito
Agua	Río	Depósitos aluviales de canto rodado, grava, arcilla, limo, etc.
	Lago	Depósitos lacustres de estratos horizontales.
	Mar	Depósitos marinos que dependen de vientos y mareas
Hielo	Glaciar	Mezcla de toda clase de materias y tamaños por su sistema de formación.
Aire	Viento	Dunas o barbajanes (Arena), Loess (Limo).

Tabla 2.22 Clasificación de las rocas sedimentarias, transporte y depósito. Fuente: (Rivera, 2009)

Las rocas metamórficas son las que están formadas por rocas sedimentarias e ígneas, la cual tienen modificaciones por las altas presiones, altas temperaturas y las emanaciones de gases provenientes del magma. En la **Tabla 2.23** y la **Tabla 2.24** se tiene los tipos de rocas y características para la construcción

Roca	Método de excavación requerido	Fragmentación	Susceptibilidad a la meteorización
Granito Diorita	Explosivos	Fragmentos irregulares que dependen del uso de los explosivos	Probablemente resistente
Basalto	Explosivos	Fragmentos irregulares que dependen de las juntas o grietas	Probablemente resistente
Toba	Equipos o explosivos	Fragmentos irregulares muchas veces con finos en exceso	Algunas variedades se deterioran rápidamente
Arenisca	Equipos o explosivos	En lajas, dependiendo de la estratificación	Según la naturaleza del cementante
Conglomerado	Equipos o explosivos	Exceso de finos dependiendo del cementante	Algunas se alteran para formar arenas limosas
Limonita Lutita	Equipos	Desde pequeños bloques de lajas	Muchas se desintegran rápidamente para formar arcilla

Tabla 2.23 Principales rocas y sus características como material de construcción. Fuente: (Gutiérrez, 2003) (Parte 1)

Roca	Método de excavación requerido	Fragmentación	Susceptibilidad a la meteorización
Caliza masiva	Explosivos	Fragmentos irregulares muchas veces lajas	Las vetas pizarronas se deterioran, pero las otras son resistentes
Cuarcita	Explosivos	Fragmentos irregulares muy angulosos	Probablemente resistente

Pizarras	Explosivos Esquistos	Fragmentos irregulares o ajeados, según la foliación	Algunas se deterioran con procesos de humedecimiento y secado
Gnesis	Explosivos	Fragmentos irregulares muchas veces alargados	Probablemente resistente
Desechos industrial o de mina	Equipo	Depende del material pero en la mayoría de los casos es irregular	La mayoría de las variedades (excepto las ígneas de mina) deben considerarse deteriorables

Tabla 2.24 Principales rocas y sus características como material de construcción. Fuente: (Gutiérrez, 2003) (Parte 2)

Para el hormigón los áridos que se emplean son los de tamaño menor a los 100 mm, de origen inorgánico y su procedencia puede ser natural como artificial, contribuyendo con la resistencia, estabilidad del volumen y a su vez con la economía (Valiente, 2012).

La PCA sugiere que no se use materiales ya sean porosos, deleznable, ciertos tipos de rocas sedimentarias debido a que mostraron una baja efectividad a la intemperie, produciéndose erupciones en las superficies. De acuerdo a las normas, ASTM C33 (Especificación estándar para agregados de hormigón), ASTM C330 (Especificación estándar para agregados livianos para hormigón estructural), y ASTM C637 (Especificación estándar para agregados de hormigón de blindaje contra la radiación). Deberán cumplir con las siguientes características fijadas en la **Tabla 2.25**.

Características	Significado	Designación del Test	Requerimiento o punto reportado
Definición de constituyentes	clara compresión y comunicación	ASTM C125 ASTM C294	-
Resistencia a la abrasión y degradación	índice del agregado: resistencia de desgaste de pisos y pavimentos	ASTM C131 ASTM C535 ASTM C779	Porcentaje máximo de pérdidas de masa. Profundidad de desgaste y tiempo
Resistencia a la congelación-deshielo	Descascaramiento superficial, aspereza, pérdida de sección y estética	ASTM C666 ASTM C672	Número máximo de ciclos o periodo de inmunidad a congelación; Factor de durabilidad
Resistencia a la desintegración de sulfatos	solidez frente a la acción de la intemperie	ASTM C88	Pérdida de masa, partículas que muestre fallas
Forma y textura superficial de las partículas	Trabajabilidad del hormigón del hormigón	ASTM C295 ASTM D3398 ASTM D4791	Porcentaje máximo de partículas planas y alargadas

Granulometria	trabajabilidad del hormigón fresco, economía	ASTM C117 ASTM C136	Porcentaje mínimo y máximo que pasan por los tamices estandar
Degradación del agregado fino	Índice de calidad del agregado: resistencia a la degradación durante el mezclado	ASTM C1137	Cambio de granulometría
Contenido de vacios no compactado del agregado fino	trabajabilidad de la mezcla	ASTM C1252	Contenido de vacios no compactado del agregado fino y gravedad especifica
Densidad aparente	Cálculo del diseño de la mezcla, clasificación	ASTM C29	Peso compactado y peso suelto
Densidad relativa (gravedad específica)	Cálculos de diseño de mezcla	ASTM C127 Ag. fino ASTM C128 Ag. Grueso	-
Absorción y humedad superficial	Control de calidad del hormigón (relación A/C)	ASTM C70 ASTM C127 ASTM C128 ASTM C566	-
Resistencia a compresión y a la flexión	Aceptabilidad del agregado fino que falla en otras pruebas	ASTM C39 ASTM C78	la resistencia que exceda 95% de la resistencia lograda con arena purificada
Constituyentes de los agregados	Determinar la cantidad de materiales nocivos y orgánicos.	ASTM C40 ASTM C87 ASTM C117 ASTM C123 ASTM C142 ASTM C295	porcentaje maximo permitido de los constiruyentes individuales
Resistencia a la reactividad con la álcalis y cambio de volumen	Trabajabilidad del hormigón fresco	ASTM C295 ASTM C586 ASTM C1105 ASTM C1260 ASTM C1293 ASTM C1778	Máximo porcentaje de partículas planas y alargadas

Tabla 2.25 Principales características y ensayos que debe cumplir los áridos. Fuente: (PCA, 2002)

2.2 Redes Neuronales Artificiales

2.2.1 Historia

En el siguiente cuadro se resume la historia sobre las redes neuronales artificiales a lo largo del tiempo entre los años de 1943 hasta 1986:

Año	Historia
1943	Warren McCullochy 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.
1949	Donald Hebb por primera vez explicó el proceso de cómo ocurría el aprendizaje cuando ciertos cambios en una neurona eran activados
1956	Minsky, McCarthy, Rochester, Shanon, desarrollaron una conferencia de Inteligencia Artificial donde se hace la primera toma de contacto con las redes neuronales artificiales.
Finales de los 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.
1959	Frank Rosenblatt, construye una maquina neuronal simple a la cual llamó Perceptrón. Esta máquina permitía reconocer patrones e incluso llego a reconocer todo el alfabeto.
1969	Se produce una especie de "muerte abrupta" de las redes neuronales. Marvin Minsky y Seymour Papert probaron matemáticamente que el perceptrón 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.
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 <i>Ponce Cruz</i> , este libro se convirtió en un clásico de las redes neuronales, además de un impulsor de nuevas investigaciones.

Tabla 2.26 Historia de las Redes Neuronales Artificiales. Fuente: (Bruno, 2019).

2.2.2 Introducción

De las muchas técnicas basadas en la inteligencia artificial la que más se ha implementado son las redes neuronales artificiales. A lo largo del tiempo este método se ha utilizado mucho en la rama de la ingeniería civil, teniendo resultados favorables y exitosos en su uso. Este método se ha aplicado en distintos proyectos como: optimizar la estructura y su control, monitoreos para aguas subterráneas, proporcionamiento de las mezclas de hormigón, etc. (Grahama, Forbes, & Smith, 2006).

La inteligencia artificial clásica se ha enfocado en esta clase de problemas al intentar capturar la esencia de la cognición humana al más alto nivel, aunque el progreso ha sido frustrantemente lento. Esta decepción ayudó a revivir el interés en los dispositivos computacionales que emulan el funcionamiento del cerebro a nivel neuronal (aunque de una forma muy abstracta) con la

intención de lograr habilidades cognitivas de nivel superior como una propiedad emergente (Clark, 2007).

La resistencia a la compresión del hormigón en la ingeniería estructural, es el parámetro donde se ve el rendimiento más importante con respecto al diseño de las estructuras del hormigón convencional o de alto rendimiento (Kaloop, Kumar, Samui, Hu, & Kim, 2020) . Los métodos automatizados para realizar tales tareas ayudarían a reducir los costos de diseño y construcción, y mejorarían o validarían la eficacia de la toma de decisiones de diseño y construcción.

La resistencia a la compresión en el hormigón se ve influenciada además de las cantidades de la mezcla, la relación existente entre agua/cemento, la calidad de cada uno de los ingredientes, condiciones del curado, métodos de transporte, mezclado, colocación y vibración. El predecir la resistencia del diseño del concreto antes de los 28 días es de gran importancia y es reconocido actualmente en las construcciones y los juicios de la ingeniería moderna. Por este motivo, se han desarrollado métodos tradicionales basados en el desarrollo estadístico, utilizando ecuaciones de regresión lineales y no lineales, para modelar un problema de predicción, en el que muchas veces no se tiene en cuenta una fuerte dependencia no lineal entre factores o sus variables que afectan a las propiedades mecánicas (Salcedo, Zúñiga, Arjona, & Will, 2012).

Dado que el concreto es un material compuesto, el diseño de la mezcla puede afectar en gran medida sus propiedades. Para diseñar una mezcla de concreto, es necesario realizar varios niveles de mezcla de prueba; Sin embargo, dado que este método consume mucho tiempo, desperdicia materias primas y requiere mano de obra altamente calificada, es una estrategia insostenible. Además, puede que no sea posible obtener un diseño de mezcla óptimo a partir de las mezclas de prueba completadas. Recientemente, para llenar estos vacíos, se utilizan métodos de aprendizaje automático y técnicas computacionales para predecir propiedades importantes del concreto. Por ejemplo, estos métodos se han utilizado para estimar la resistencia a la compresión del hormigón, que es una de las propiedades mecánicas requeridas para probar la calidad del hormigón (Mirzahosseini, Jiao, Barri, Riding, & Alavi, 2019).

La red neuronal artificial (ANN) es uno de los métodos más utilizados para predecir la resistencia a la compresión de los tipos de concreto. ANN se usa para estimar la resistencia a la compresión del concreto convencional y se asumió que este modelo está calificado para evaluar la resistencia a la compresión del concreto, antes de preparar la muestra aplicaron ANN y el método de superficie de respuesta (RSM) para estimar la resistencia a la compresión del hormigón. Luego se comparan los resultados de estos modelos y se demuestra que la precisión de ANN es mayor que la superficie de respuesta RSM (Hammoudi, Moussace, Belebchouche, & Dahmoune, 2019).

Las redes neuronales presentan ventajas en su uso, pero no siempre son perfectas, debido a que estas también presentan desventajas como son las siguientes:

Ventajas

- Compilación de algoritmos a través del proceso de aprendizaje,
- Para utilizarlo no es necesario conocer sus detalles matemáticos, sino los datos que nosotros trabajaremos,
- Permite trabajar con problemas no lineales, que es el punto clave, y

- Son muy fuertes y pueden fallar en este proceso, pero eso no los detiene para continuar el proceso.

Desventajas

- Las redes deben capacitarse porque se debe lograr una estructura fuerte y se realiza con una variedad de pruebas, que pueden llevar varias horas de trabajo.
- Necesita una gran cantidad de datos, lo que nos permite entrenar redes neuronales artificiales.
- Para un operador novato, realizar cambios en el sistema de aprendizaje puede ser complicado.
- No pueden extrapolar resultados fuera de rango.

2.2.3 Funcionamiento

Las redes neuronales artificiales son estructuras matemáticas que intentan imitar el funcionamiento de los cerebros biológicos. Consiste en una serie de ganglios o neuronas, interconectadas, organizadas en una serie de capas (Acuña & Torre, 2014). La base matemática para estructurar ANN se basa en el teorema de Kolmogorov, introducido por Korkova (1992) y Haykin (1999), de manera que cualquier función continua de 3 clases (entrada, oculta y salida) puede aproximarse al nivel deseado, la cual genera trabajos de espectro de red multicapa. Kolmogorov demostró que una función continua de varias variables se puede representar superponiendo funciones continuas unidireccionales de las variables de entrada originales. Por lo tanto, cualquier función continua asignada desde una entrada n -dimensional, $n \geq 2$, a una salida m -dimensional puede implementarse mediante una red con capas ocultas. También se ha demostrado que una red con más de una capa oculta puede aproximar relaciones que involucran funciones desconectadas.

Para (Pinaud & Carrillo, 2013) en su informe expresa que, la capa de entrada recibe señales del exterior y se encarga de distribuir estas señales a la capa interna. La capa interna es la que hace los cálculos necesarios para obtener la salida. Finalmente, la capa de salida es la capa que muestra los resultados de la red, como se puede ver en la **Figura 2.24**. Estas estructuras pueden extraer conocimiento de una serie de muestras de datos y luego aplicarlo a los datos desconocidos. Se pueden acomodar en muchos modelos de regresión donde se desconoce el algoritmo o la expresión que hace posible llegar a una solución, o estos modelos son demasiado complejos para ser utilizados.

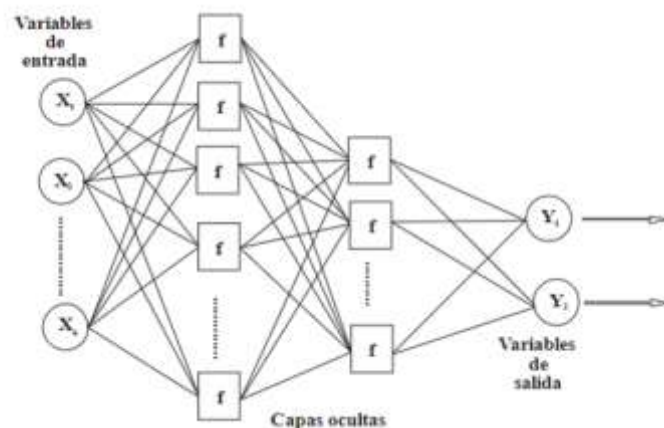


Figura 2.24 Gráfico de una RNA. Fuente: (Pinaud & Carrillo, 2013)

El número de neuronas en la capa de entrada corresponde al tamaño del vector de datos de entrada, mientras que el número de neuronas en la capa de salida corresponde a la dimensión del vector de salida. Por el contrario, no existe una regla específica que nos diga cuántas neuronas debe tener una capa oculta y si debe constar de una o más subcapas, solo una serie de recomendaciones sobre el número de neuronas en función de la disponibilidad, por lo que la única forma de obtener su estructura es prueba y error (Viñuela & León, 2004).

Este método de análisis ha sido ampliamente utilizado en muchas áreas que van desde: sistemas automatizados de navegación aérea para vehículos, sistemas de control de armas o tendencias del mercado de valores. En el campo de la resistencia de los materiales, se ha aplicado a diversas propiedades y materiales. Por lo tanto, se utilizó para modelar la resistencia de diversas aleaciones, basalto, madera y sus derivados y, por supuesto en el hormigón.

2.2.4 Tipos de Redes Neuronales Artificiales

Hay diferentes tipos de redes neuronales en la literatura, incluidas las redes neuronales Spiking, las redes Feedforward, las redes neuronales periódicas o recurrentes, las redes funcionales de base radial y las redes de Kohonen autoorganizadas. Entre estas redes neuronales artificiales, la red Feedforward neural network (FNN) es la más utilizada y la más simple. Además, las redes neuronales artificiales se pueden clasificar según el tipo de conexión y el tipo de aprendizaje que se muestra en la **Tabla 2.27**.

Tipo de conexión	Descripción	Tipo de aprendizaje	Descripción
Feedforward	Conexiones van en un sentido, desde la capa de entrada hacia la capa de salida.	Aprendizaje supervisado	Los datos o entradas tienen una respuesta conocida o salida, con la cual se ajusta o entrena la red neuronal.
Redes recurrentes	Las redes pueden realizar ciclos.	Aprendizaje no supervisado	Los datos son solamente entradas. Son redes empleadas fundamentalmente para clasificación y reconocimiento de patrones.

Tabla 2.27 tipo de conexión y aprendizaje de las redes neuronales artificiales. Fuente: adaptado de (Ferrer, Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales, 2016)

Las redes neuronales aplicadas en este estudio de TFM son redes neuronales de transmisión directa, con aprendizaje supervisado, utilizadas en aproximaciones de funciones. El tipo de conexión identificado por (Rumelhart, Hinton, & Williams, 1986), corresponde al tipo de cómputo paralelo en el que muchas pequeñas unidades de cómputo llamadas neuronas están altamente conectadas a la capa anterior donde reciben información ya la siguiente capa donde transmiten. Sus capas ocultas tienen la función de ejecutar el límite de salida a corta distancia y desde allí la capa de salida puede generar todos los valores que se han adivinado. La salida de cada capa está representada por:

$$Y_{NX1} = f(W_{NX1} X_{M,1} + b_{n,1})$$

Donde:

Y= vector que contiene la salida de cada una de las neuronas.

N= Neuronas de una capa dada.

W= Matriz que contiene los pesos sinápticos por cada una de las (M).

M= salidas para todas las neuronas (N).

X= Vector que contiene las entradas.

b= vector que contiene los sesgos (biases).

f= Función de activación.

2.2.5 Número de Neuronas de la Capa Oculta

El número de neuronas en la capa oculta generalmente se determina por la forma de prueba y error. Algunos autores han propuesto un método experimental en sus investigaciones para aproximar el número de neuronas en la capa oculta (k) en función del número de neuronas en la capa de entrada (n) y el número de neuronas en la capa de salida (m). En la **Tabla 2.28** se muestra los números de neuronas de las capas y los autores que la implementan.

Número de neuronas de la capa oculta (k)	Autores
Redondeo $\sqrt{n \cdot m}$	Tabares (2006) y Shibata (2009)
2n+1	Hecht- Nielsen (1987)
2n	Gallant (1993)
n+m	Nagendra (2013)
0,75n	Ozturam (2008)
N	Lai & Serra (1997); Días & Pooliyadda (2001)
(n+m)/2	Popovics (1990)

Tabla 2.28 Número de capas ocultas y sus autores. Fuente: (Ferrer, *Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales*, 2012)

2.2.6 Aprendizaje de la Red Neuronal Artificial

El aprendizaje a gran escala tiene como objetivo desarrollar algoritmos eficientes y escalables que incluyan requerimientos de computación, memoria, temporización y conectividad. Por lo general, aumentar el tamaño del conjunto de entrenamiento aumenta la precisión, pero si la complejidad computacional del algoritmo excede la memoria principal, el algoritmo no escalará correctamente o no funcionará. Por lo tanto, al escalar algoritmos de aprendizaje, el problema no está en acelerar un algoritmo lento sino en convertir un algoritmo poco práctico en uno real.

Para evitar la sobreasignación, se puede optar por tener más datos (no siempre es posible) o reducir el tamaño de la red (menos parámetros). Si reducimos el tamaño de la red, será menos flexible y más robusta frente a las interferencias, aunque si es demasiado pequeña puede que no aprenda. Alimentar la red neuronal con suficientes parámetros para poder aprender y evitar la sobreasignación es un aspecto clave a considerar al determinar el tamaño de la red neuronal. Otra forma de evitar el sobreaprendizaje es usar validaciones, es decir, entrenar y validar la red simultáneamente para descubrir la puntuación de aprendizaje óptima.

2.2.7 Entrenamiento, Validación y Test

El entrenamiento de la red neuronal se utiliza para combinar una muestra de entrada con una muestra de salida para que esta pueda aprender a predecir de la manera más aproximadamente posible la resistencia a la compresión del hormigón en función de mapeos precisos y conocimientos almacenados. Durante la etapa de entrenamiento, se usa de forma indirecta los datos de validación que no es nada más que la capacidad de la red para dar respuestas precisas a muestras no utilizadas durante su aprendizaje; Mientras que el test, es utilizado cuando el entrenamiento es culminado (Tello, 2017).

Para evitar el sobre aprendizaje de la red neuronal se pueden emplear técnicas como la de early-stopping y el principio de parsimonia o navaja.

- **Early-stopping:** Permite comparar los errores obtenidos con datos de entrenamiento y validación durante un proceso iterativo de optimización de parámetros de red. Si, durante iteraciones sucesivas, el error de datos de validación aumenta mientras que el error de datos de entrenamiento disminuye, el proceso de ajuste se detiene como un criterio de parada adicional.
- **Principio de parsimonia o navaja:** En igualdad de condiciones, la explicación más simple es correcta. La técnica consiste en agregar una suma ponderada de los pesos de la red a la función de costo, de modo que, para errores similares de dos redes neuronales, la red neuronal con el valor de peso más bajo es mejor (Ferrer, 2012).

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

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

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

Donde:

γ = factor de ponderación.

N = número de datos.

e_i = error de cada dato calculado como el valor objetivo.

t_i = target.

y_i = valor calculado para la red neuronal.

n = número de parámetros de la red.

W_j = valores de los pesos y bias de la red neuronal.

2.2.8 Evaluación de Desempeño

Una red neuronal puede evaluar su rendimiento utilizando varias técnicas, como el error cuadrático medio RMSE (error cuadrático medio), el error cuadrático total SSE (suma de errores cuadráticos), el error relativo a la media MER (proporción de error medio), el error cuadrático medio MSE (error cuadrático medio), o factor de correlación cuadrático R2 (R2 factor de correlación) (Ferrer, 2012).

Las técnicas para evaluación del desempeño de la red neuronal se la calculan de la siguiente manera:

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

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

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

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

Donde:

t_i : valor objetivo o deseado.

y_i : valor calculado por la red neuronal.

\bar{y}_i : promedio de los valores calculados.

N : número de datos o registro por cada fase.

3. BASES DE DATOS

Con la finalidad de generar una base de datos para nuestro estudio, se ha realizado una búsqueda en artículos científicos relacionados con ensayos de resistencia a la compresión del hormigón para diferentes casos de estudio. Los artículos seleccionados nos permiten tener información sobre el diseño de mezclas, características del hormigón en estado fresco, datos que nos han permitido elaborar la base de datos para el estudio y análisis de nuestro trabajo.

En la **Tabla 3.1** podemos observar el número de ensayos recopilados para la creación de la base de datos, relacionados con la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (*fc28*).

Ensayo	N° de Datos
Resistencia a la compresión del hormigón <i>fc28</i>	978

Tabla 3.1 Número de datos en la base.

En la **Tabla 3.2** y la **Tabla 3.3** se muestra la descripción de los autores de los artículos científicos utilizados, así como el tipo de cemento y las adiciones usados en el diseño de mezclas realizadas en cada artículo. La base consta de 978 datos en 64 artículos utilizados, cada artículo tiene diferentes características en el diseño de mezclas y en los requerimientos de resistencia a la compresión del hormigón. También se ha considerado la información correspondiente al asentamiento del hormigón medido en el cono de abrams (slump), tipos de curado del hormigón, temperatura del agua de curado del hormigón y ciertos factores que influyen en los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón para el tema en estudio.

Autores	Tipo de Cemento	HS	MK	CV	<i>fc28</i>
Hossam S. 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. Ramezaniyanpour y otros	OPC				x
A. Kanellopoulos y otros	CEMII	x			x
W. Wongkeo y otros	OPC	x		x	x
P. Dinakar y otros	PPC			x	x
M. Uysal, y otros	CEM I /CEM V			x	x
S. Yehia, y otros	OPC	x			x
P. Chindaprasirt y otros	OPC			x	x
M. Najimi y otros	Tipo II ASTM				x
J. Sim y otros	OPC			x	x
S. Assié y otros	CEM II/A-LL / CEM I				x
E. G. Badogiannis y otros	CEM II/B-M		x		x
W. Zhu y otros	OPC			x	x
R. Siddique	OPC			x	x
H.Y. Leung y otros	OPC	x		x	x
Z. Zhang y otros	CEM I			x	x
M. Valipour y otros	CEM II	x	x		x

Tabla 3.3 Artículos correspondientes a la base de datos (Parte 1)

Autores	Tipo de Cemento	HS	MK	CV	fc28
A. Elahi y otros	CEM I	x		x	x
M.G. Alexander y otros	CEMI	x			x
E.G. Moffatt y otros	OPC	x			x
Kannan V	OPC		x		x
J. Sun y otros	Tipo I				x
A. Bagheri y otros	Tipo II ASTM	x			x
A.L.G. Gastaldini y otros	OPC			x	x
M. Nehdi y otros	Tipo I	x		x	x
A. A. Ramezaniapour y otros	Tipo I	x		x	x
F. Shaker y otros	CEMII /A-L CEM II/B-L CEM I				x
A. A. Abouhussien y otros	OPC				x
F.U.A. Shaikh y otros	Tipo I			x	x
A.M. Raieess Ghasemi y otros	Tipo II ASTM	x			x
P. Dinakar y otros	OPC		x		x
Chi-Sun Poon y otros	OPC	x		x	x
A.A. Ramezaniapour y otros	Tipo I		x		x
S. Rukzon y otros	Tipo I			x	x
P. Nath y otros	OPC			x	x
Tyler Deboodt y otros	Tipo I/II			x	x
Kwang-Soo Youm y otros	OPC				x
N. Bouzoubaa y otros	OPC/BCG/Tipo III			x	x
Faiz U.A. Shaikh y otros	Tipo I			x	x
A. Kumer Saha y otros	OPC			x	x
S. Inthata y otros	OPC			x	x
V. Kannan y otros	OPC		x		x
E. Ozbay y otros	CEM I	x			x
D. Qingjun y otros	OPC			x	x
S.C. Kou y otros	Tipo I			x	x
S. Cong Lua y otros	Tipo I			x	x
Kim y otros	OPC	x	x	x	x
A. Raif Boğa y otros	CEM I				x
Karahan y otros	OPC		x	x	x
M. Sahmaran y otros	Tipo I			x	x
M. Gesoğlu	CEM I		x		x
B. Menadi y otros	OPC/PLC				x
Kathirvel, y otros	OPC				x
V. Ramasamy	OPC				x
Ha Thanh Le y otros	CEM I	x		x	x
A. R Chini y otros	Tipo II ASTM		x		x
A. A. Ramezaniapour y otros	Tipo I				x
N. Gowripalan y otros	Tipo I			x	x
Kyong Yun Yeau y otros	Tipo I/V				x

Tabla 3.4 Artículos correspondientes a la base de datos (Parte 2)

3.1 Hormigón

Dentro de la base datos recopilada, se ha desglosado los diferentes tipos de variables para nuestro análisis, las cuales se detallan a continuación:

1. Código de descripción de la muestra – *CM*
2. Cantidad Total de material cementante – *TCM* (Kg/m³)
3. Tipo de Cemento – Tipo Cem
4. Cantidad de cemento – Cem (Kg/m³)
5. Cantidad de Humo de Sílice – *HS* (Kg/m³)
6. Cantidad de Ceniza Volante – *CV* (Kg/m³)
7. Cantidad de Metakaolin – *MK* (Kg/m³)
8. Relación agua-cantidad total de material cementante – *a/TCM*
9. Cantidad de agua – Agua (Kg/m³)
10. Cantidad de Áridos Finos - Arid Fin (Kg/m³)
11. Cantidad de Áridos Gruesos - Arid Gru (Kg/m³)
12. Tipo de Curado – TipoCur
13. Temperatura de agua de curado – Temp (°C)
14. Medición de asentamiento en cono de abrams – slump (mm)
15. Resistencia a la compresión del hormigón a 28 días – *fc28* (MPa)

Los datos obtenidos en los diferentes artículos científicos nos brindan resultados de resistencias obtenidos en cada una de sus investigaciones, proporcionándonos la información de las variables que se desea aplicar al análisis de regresión lineal y múltiple, así como a la red neuronal.

En la **Tabla 3.5** se presenta la información de las variables que se utilizará en la red neuronal, con la finalidad de predecir la resistencia del hormigón a los 28 días de edad (*fc28*). Los datos utilizados cuentan con 14 variables incluidas las de salida.

Variable	Descripción	Unidad de medida
<i>TCM</i>	Cantidad Total de material cementante	(Kg/m ³)
Tipo Cem	Tipo de Cemento	Var
Cem	Cantidad de cemento	(Kg/m ³)
<i>HS</i>	Cantidad de Humo de Sílice	(Kg/m ³)
<i>CV</i>	Cantidad de Ceniza Volante	(Kg/m ³)
<i>MK</i>	Cantidad de Metakaolin	(Kg/m ³)
<i>a/TCM</i>	Relación agua-cantidad total de material cementante	<i>a/TCM</i>
Agua	Cantidad de agua	(Kg/m ³)
Arid Fin	Cantidad de Áridos Finos	(Kg/m ³)
Arid Gru	Cantidad de Áridos Gruesos	(Kg/m ³)
TipoCur	Tipo de Curado	Var
Temp	Temperatura de agua de curado	(°C)
slump	Medición de asentamiento en cono de abrams	(mm)
<i>fc28</i>	Resistencia a la compresión del hormigón a 28 días	(MPa)

* Variable de Salida *fc28*

Tabla 3.5 Variables utilizadas para la predicción de la resistencia a la compresión para el uso de redes neuronales.

3.2 Cemento y adiciones cementicias

El cemento es uno de los factores más importantes para la fabricación del hormigón, que conjuntamente con la cantidad de agua necesaria para hidratar cada una de sus partículas generan la pasta que determinará la resistencia a la compresión del hormigón.

En los artículos considerados para el análisis de estudio, se han utilizado diferentes cantidades y tipos de cemento para una determinada resistencia a la compresión, en la **Tabla 3.6** se muestran los tipos de cementos empleados en los diferentes artículos científicos.

El Cemento Cem I es el que mayor cantidad de datos tiene en nuestra base, y existen diferentes tipos de cemento con diferentes características y usos para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón.

Denominación	Tipo de Cemento	NORMA
Cemento Portland Ordinario	OPC	
Cemento Portland Puzolánico	PPC	
Cemento de arcilla calcinada	LC3	
Cemento Portland con Adiciones	CEMII	UNE EN 197-1
Cemento Portland	CEM I	UNE EN 197-1
Cemento Compuesto	CEM V	UNE EN 197-1
Cemento de moderada resistencia a los sulfatos	Tipo II	ATM C150
Cemento Portland con Caliza	CEM II/A-LL	UNE EN 197-1
Cemento Portland Mixto	CEM II/B-M	UNE EN 197-1
Cemento Normal	Tipo I	ATM C150
Cemento de alta resistencia inicial	Tipo III	ATM C150
Cemento de alta resistencia a los sulfatos	Tipo V	ATM C150

Tabla 3.6 Tipos de Cemento utilizados en los artículos científicos para la determinación de la resistencia a la compresión.

En cuanto a las adiciones Cementicias se ha considerado las más influyentes en cuanto cantidad de datos existentes en los artículos científicos, así como en influencia en la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón, las adiciones que se ha considerado son: el humo de sílice, la ceniza volante y el metakaolin tal cual se muestra en la **Tabla 3.7**.

Para el estudio se ha considerado la cantidad total de material cementante, que no es más que la suma de la cantidad de cemento más la cantidad de adiciones, en ciertos casos la cantidad total de material cementante es igual a la cantidad de cemento y en otros esta la influencia de uno o dos adiciones cementicias lo cual nos permitirá analizar la influencia que tienen en la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón a la edad especificada.

Denominación	Codificación Variable
Humo de Sílice	HS
Ceniza Volante	CV
Metakaolin	MK

Tabla 3.7 Tipos de adiciones cementantes consideradas en la base de datos

3.3 Áridos

Existen diferentes tipos de áridos utilizados en cada artículo científico, para el análisis de estudio se los ha clasificado en áridos finos y áridos gruesos como se muestra en la **Tabla 3.8** los mismos que tendrán influencia en los resultados de resistencia a la compresión del hormigón, prediciendo la resistencia mediante el uso de redes neuronales artificiales.

Denominación	Codificación Variable
Áridos Finos	Arid Fin
Áridos gruesos	Arid Gru

Tabla 3.8 Tipos de áridos utilizados en la base de datos.

Debido a que cada diseño de mezclas tiene sus propias características, las proporciones entre el árido fino y el árido grueso varían en diferentes porcentajes, la influencia que tienen estos porcentajes nos permitirá interpretar la importancia de la granulometría de los áridos en el diseño de mezclas del hormigón.

3.4 Propiedades del Hormigón

Las propiedades del hormigón en estado fresco hasta llegar al estado endurecido son de gran importancia en la evolución de los resultados en la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, para lo cual se ha tomado en consideración la medición del asentamiento del hormigón con el cono de abrams, la temperatura del agua de curado del hormigón y el tipo de curado.

El valor del asentamiento del hormigón medido en el cono de abrams es un valor significativo en el diseño de mezclas, ya que este valor nos permite evaluar la trabajabilidad del hormigón, pues mientras mayor sea la trabajabilidad posiblemente mayor será el contenido de agua, de esta manera esta propiedad física es un dato influyente en la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón.

Como sabemos el curado es el proceso en que el hormigón madura y se endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua en presencia de suficiente cantidad de agua, para ello la temperatura del agua del hormigón y el tipo de curado es de gran importancia en el análisis predictivo que se está desarrollando. En la **Tabla 3.9** veremos los diferentes tipos de curados que se han utilizado en los diferentes artículos científicos para los diferentes tipos de mezclas, identificando la influencia que tiene en la evolución de los resultados de la resistencia a la compresión.

Existen diferentes tipos de curados en la base de datos tales como: cuando las probetas de hormigón se curan sumergidas bajo el agua, curado a la intemperie o al ambiente, curado

sometido a vapor cuando se requiere acelerar el proceso de fraguado del hormigón y curado en cámaras húmedas sometidas a diferentes porcentajes de saturación; a cada tipo de curado se le ha designado una codificación de variable para el uso y aplicación de las redes neuronales artificiales.

Denominación	Codificación Variable
Bajo Agua	1
Ambiente	2
7 días Vapor, Posterior bajo agua	3
7 días Vapor, Posterior al aire	4
Cámara húmeda	5
Cámara húmeda 90%	6
Cámara húmeda 95%	7
Cámara húmeda 100%	8
Vapor	9

Tabla 3.9 Tipos de curado del hormigón usados en los artículos científicos para los diseños de mezclas.

4. ESTUDIO DEL MODELO ESTADÍSTICO CLÁSICO

4.1 Introducción

Mediante el análisis estadístico clásico de la base de datos de los 978 ensayos disponibles, se busca obtener la influencia que tienen cada una de las variables relacionadas con la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en el diseño de mezclas, tales como la cantidad total de material cementante, relación agua-cantidad total de material cementante, contenido de cemento, tipo de cemento, contenido de agua, contenido de agregado fino, contenido de agregado grueso, contenido de humo de sílice, contenido de Metakaolin, contenido de Ceniza Volante, contenido de Caliza, la temperatura de curado del hormigón, el asentamiento en un determinado momento medido en el cono de abrams y tipo de curado.

En el tratamiento y análisis estadístico de los resultados se han utilizado dos aplicaciones informáticas, los softwares utilizados son:

- Minitab® 20.3.0 – 2021, Minitab Inc.
- IBM SPSS Statistics 22, IBM Corp®

El análisis de las variables se realizará mediante inferencias de modelos de regresión lineales simples o modelos múltiples, para lo cual el parámetro de evaluación será el coeficiente de correlación de Karl Pearson R^2 , denominado también coeficiente de determinación. Partimos intentando explicar cada una de las variables de respuesta en función de aquella variable independiente con la que se encuentra más correlacionada. Sin embargo, es posible explicar un mayor porcentaje de variabilidad aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva. (Navarro Ferrer, 2016).

La variable de respuesta para nuestro estudio será la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, y como está influenciada por cada una de las variables, evaluándolas mediante el coeficiente de determinación R^2 .

4.2 Resistencia a la compresión en función del contenido de agua y materiales cementantes

Uno de las mejores explicaciones de la variable dependiente de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc_{28}) es la correlación que existe con la variable independiente contenido de agua, en la **Tabla 4.1** podemos observar una línea de tendencia decreciente, la misma que nos explica que a medida que aumenta la cantidad de agua, la resistencia a la compresión del hormigón va decreciendo. Para nuestro modelo podemos ver que la variable independiente no es significativa en el análisis teniendo un coeficiente de determinación R^2 de 5.1%.

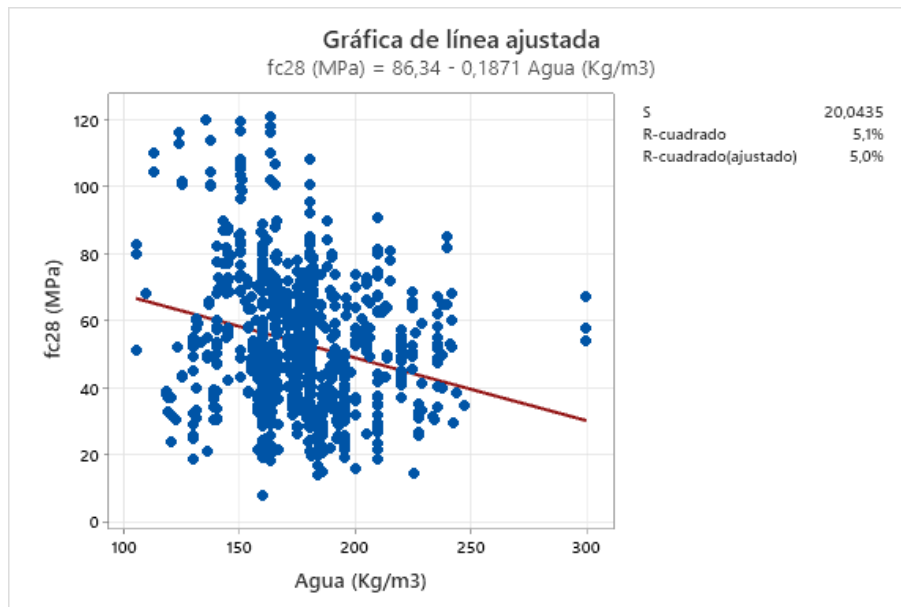


Figura 4.1 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de agua.

Cada variable de respuesta estará en función de aquella variable independiente con la que se encuentra más correlacionada, por lo tanto, primero tomaremos como variable dependiente la resistencia al hormigón a 28 días (fc_{28}) y como independiente la relación agua-total material cementante (a/TMC), donde los resultados nos muestran que a menores relaciones a/TMC mayores son las resistencias a la compresión obtenidas (fc_{28}), con un coeficiente de determinación R^2 45.3% como se muestra en la **Tabla 4.2**.

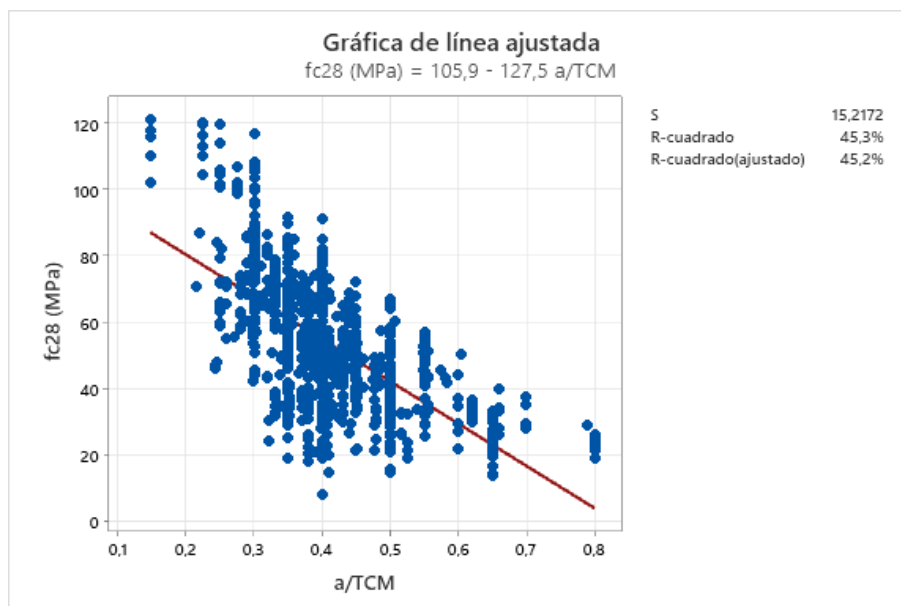


Figura 4.2 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la relación agua-total material cementante.

Otra de las variables influyentes en la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc_{28}) es el total de materiales cementantes, que engloba diferentes materiales, como cemento y adiciones. En la base de estudio se tiene diferentes tipos de cementos y en cuanto a las adiciones, se encuentran principalmente la ceniza volante, el humo de sílice y metakaolin.

En el modelo podemos observar que mientras mayor es la cantidad total de material cementante, la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días va aumentando, como se muestra en la **Tabla 4.3**. La correlación que se tiene en el modelo es dispersa teniendo como valor de determinación R^2 del 44.1%.

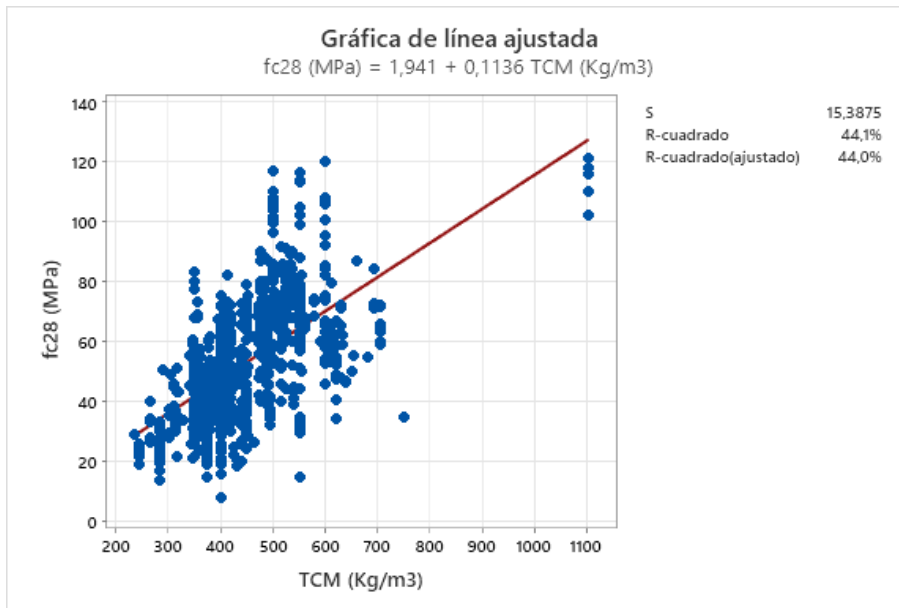


Figura 4.3 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función del total material cementante.

Para el análisis de los siguientes modelos se ha considera la cantidad de cemento y el tipo de cemento que se tienen en la mezcla para la obtención de la resistencia a la compresión a 28 días. En la **Figura 4.4** y la **Figura 4.5**, se puede apreciar los modelos de regresión de las variables independientes, la variable cantidad de cemento tiene un mejor coeficiente de determinación R^2 de 30.4%, mientras que para el modelo de la variable tipo de cemento se tiene un valor de R^2 de 3.2% el mismo que indica que no es significativo para el análisis de la variable dependiente.

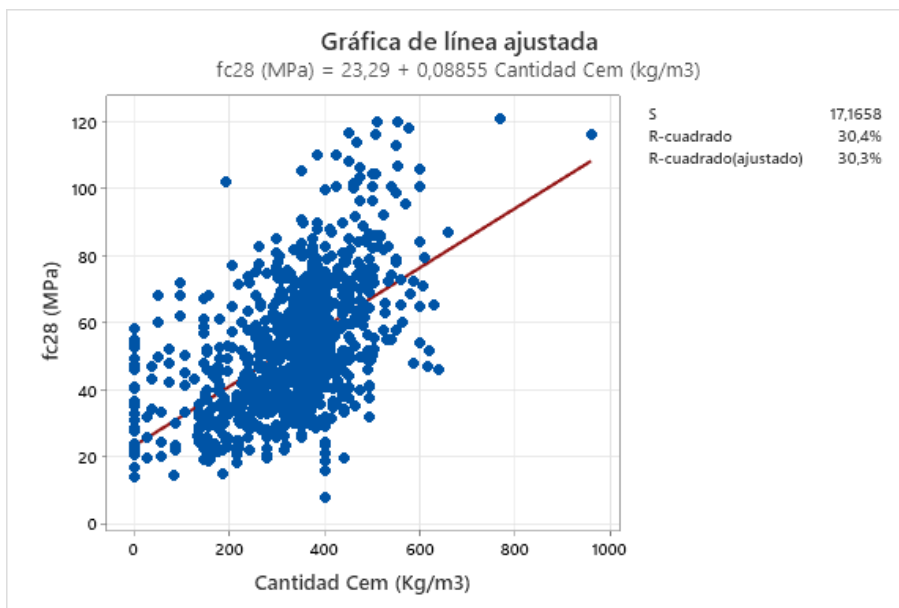


Figura 4.4 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de cemento.

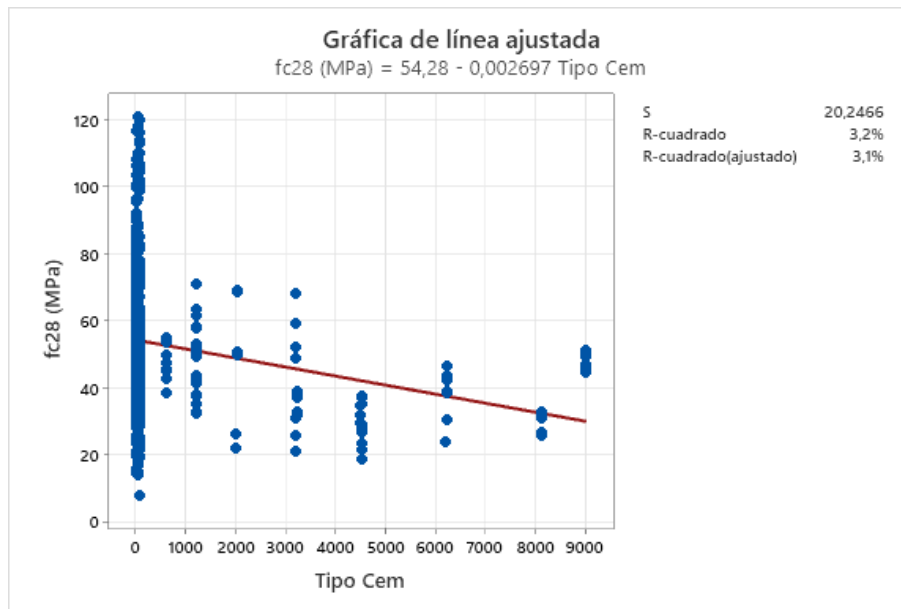


Figura 4.5 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función del tipo de cemento.

A diferencia de la cantidad de cemento, en los siguientes modelos realizados con las adiciones cementantes, la cantidad de humo de sílice presenta un mejor coeficiente de determinación R^2 de 16.3%, en la cual se puede observar una tendencia más clara como se muestra en la **Figura 4.6**, mientras que para la cantidad de ceniza volante y la cantidad de metakaolin ninguno de los dos modelos explica una relación entre la variable dependiente y las variables independientes, los coeficientes de determinación R^2 son 0.8% y 4.6% respectivamente tal como se muestran en las **Figura 4.7** y la **Figura 4.8**

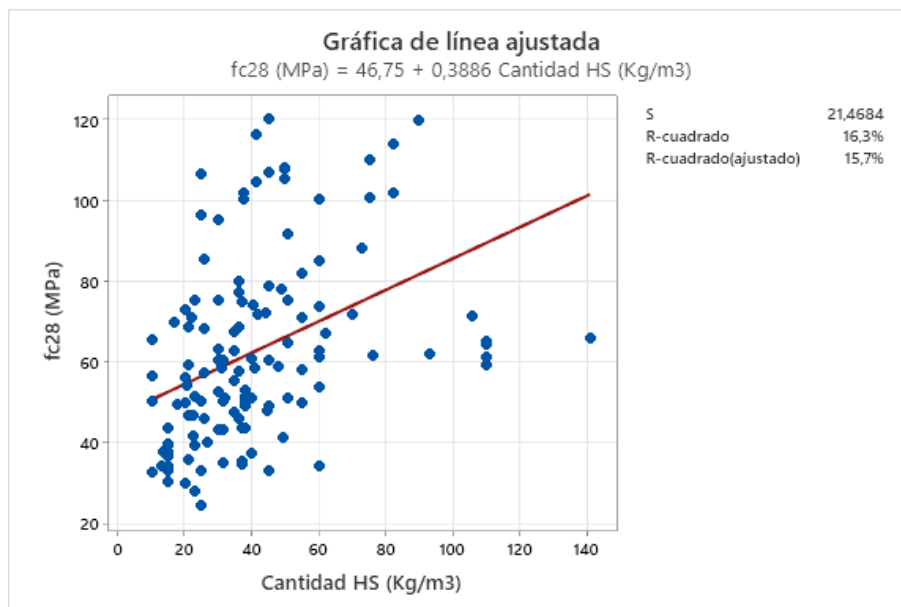


Figura 4.6 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de humo de sílice.

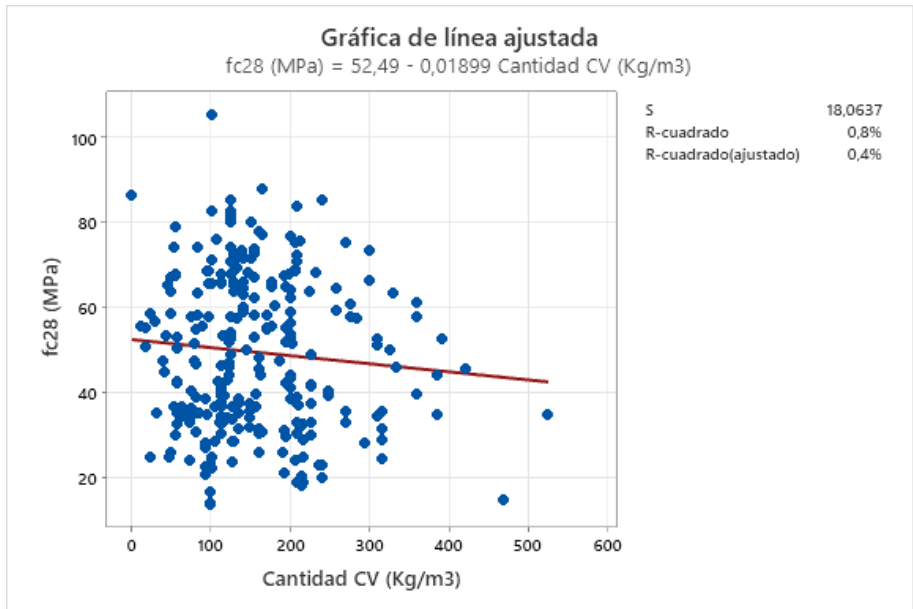


Figura 4.7 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de ceniza volante.

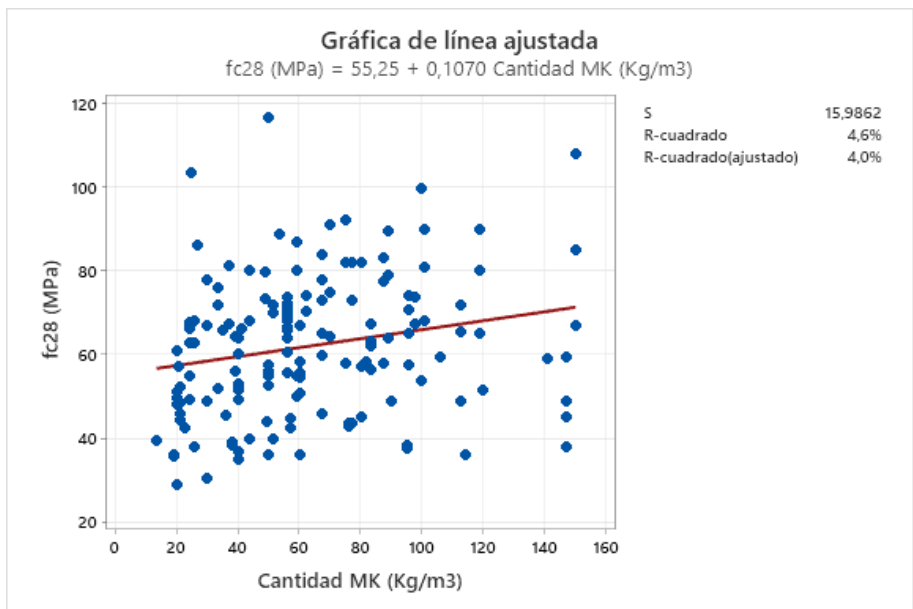


Figura 4.8 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la cantidad de metakaolin.

4.3 Resistencia a la compresión del hormigón en función de la temperatura de agua de curado y slump.

En lo que se refiera a la variable independiente temperatura de agua de curado, el modelo nos explica que no existe ninguna correlación con la variable dependiente resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (f_{c28}), tal como se muestra en la **Figura 4.9**.

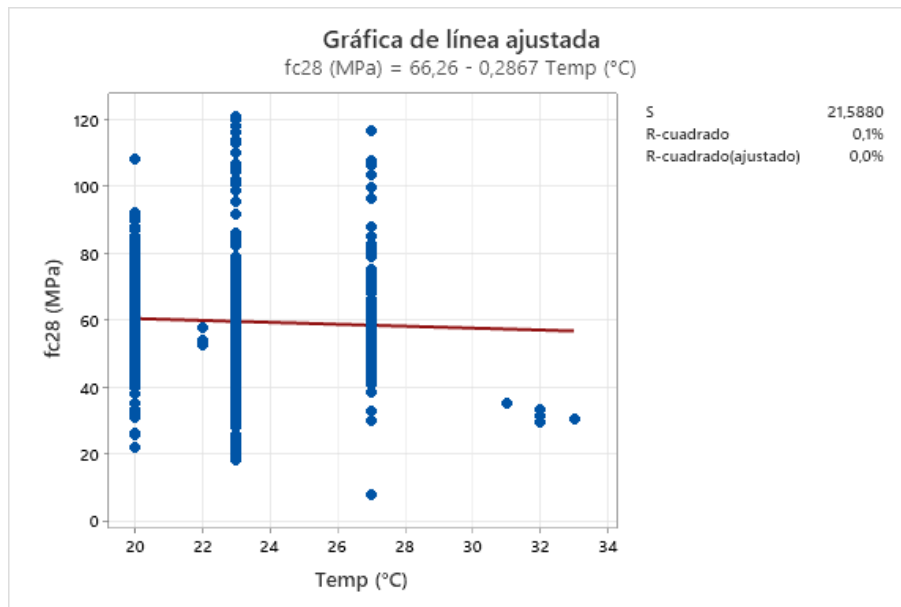


Figura 4.9 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función de la temperatura de agua de curado.

En el siguiente modelo mostrado en la **Figura 4.10**, se realiza una correlación entre la variable dependiente resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (f_{c28}) y la variable independiente medición de asentamiento en el cono de abrams (slump), la cual nos muestra que no existe ninguna correlación entre las variables en análisis.

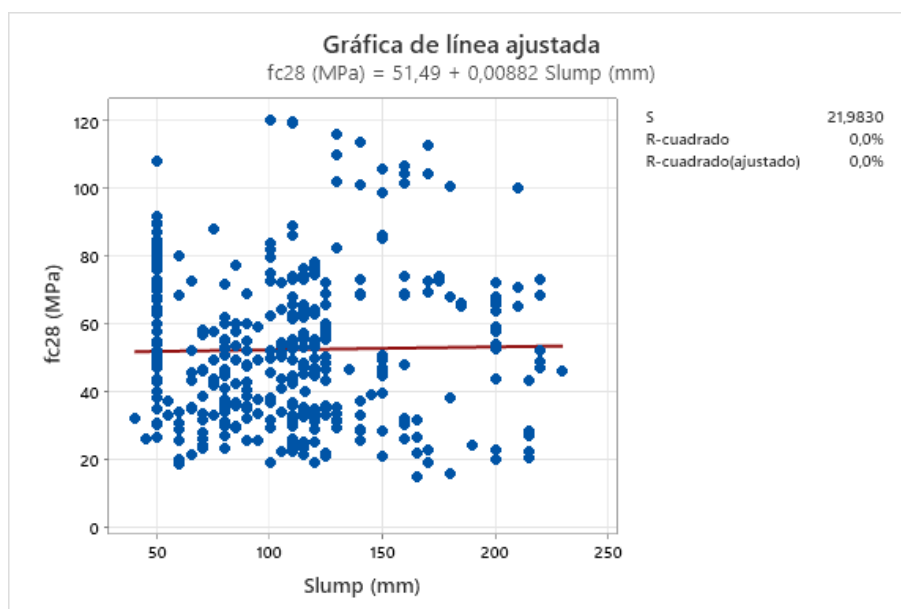


Figura 4.10 Resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días en función del slump.

En la **Figura 4.11** se indica la resistencia a la compresión del hormigón (f_{c28}) relacionada con diferentes tipos de curado, y como es de esperarse la resistencia es baja cuando el tipo de curado es al aire o al ambiente, ya que el hormigón necesita de curado para la evolución de la resistencia a la compresión, mientras que cuando el curado se hace bajo el agua o en cámaras de humedad los resultados de la resistencia a la compresión son mejores.

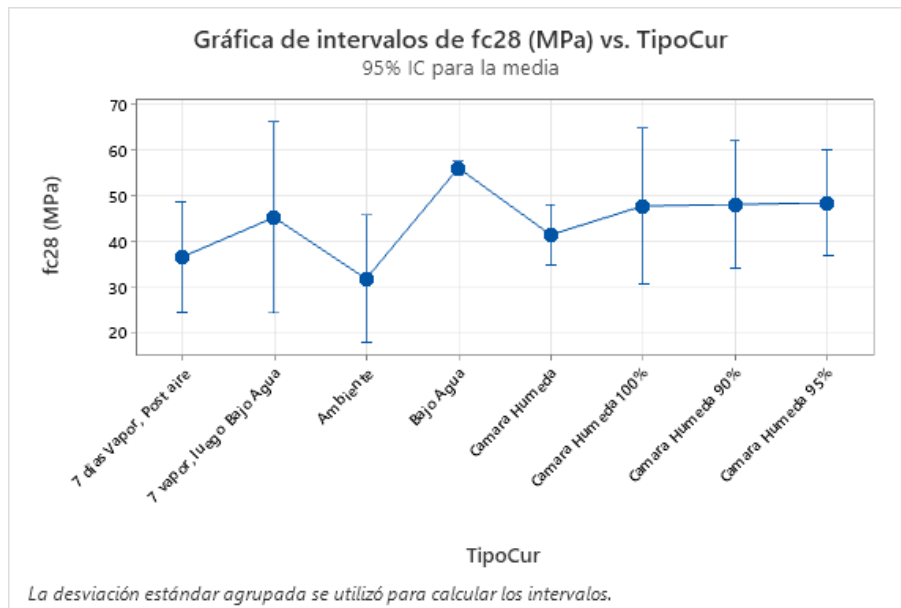


Figura 4.11 Evolución de la resistencia a la compresión del hormigón (f_{c28}) en función del tipo de curado.

En la **Tabla 4.1** se muestran resumido los resultados de los diferentes coeficientes de determinación R^2 obtenidos de analizar la variable dependiente resistencia a la compresión del hormigón (f_{c28}) en función de diferentes variables independientes, la variable que mejor se ajusta al modelo de regresión lineal simple es la relación agua-total material cementante (a/TCM), la cantidad total de material cementante (TCM) y la cantidad de cemento (cem), estos valores de correlación nos dicen que las variables no explican por sí solas el fenómeno que estamos analizando, los resultados nos explican una tendencia de lo que ocurre en los diferentes modelos. Para el resto de valores de correlación R^2 no se observa ninguna correlación con la resistencia a la compresión del hormigón (f_{c28}).

Variable			R ²
Descripción	Codificación		
Agua	Agua		5,1%
Relación gua- cantidad total material cementante	a/TCM		45,3%
Cantidad Total de material Cementante	TCM		44,1%
Cantidad de Cemento	Cem		30,4%
Tipo de Cemento	Tipo Cem		3,5%
Cantidad de Humo de Sílice	HS		16,3%
Cantidad de Ceniza Volante	CV		0,8%
Cantidad de Metakaolin	MK		4,6%
Temperatura de agua de curado	Temp		0,1%
Medición de asentamiento en cono de abrams	Slump		0,0%

*Correlación Cuadrática

Tabla 4.1 Resultados del coeficiente de determinación R² de la resistencia a la compresión a 28 días en función de las diferentes variables.

4.4 Resistencia a la compresión del hormigón en función de varias variables.

De acuerdo con los resultados de la **Tabla 4.1** se pudo identificar que la regresión lineal simple no explica de manera concisa la variable dependiente resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc28), para lo cual se intentara aumentar el porcentaje de variabilidad explicada tratando de incrementar el coeficiente de determinación R² mediante la aplicación de un modelo de regresión múltiple aditiva. Para ello utilizaremos el programa Spss utilizando el método de pasos sucesivos o stepwise, el cual consiste en introducir variables una por una y comprobar si la variable permanece o sale del modelo (Yepes, otros, 2009).

Tomamos como criterio de entrada en el modelo un incremento de la varianza explicada significativo al 5% (F=0,05) mientras que para la salida se considera un decremento del 10% (F=0,1). La primera variable que se introduce es la que tiene un coeficiente de correlación 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 variable con mayor valor de R, consiguiéndose de esta forma que las variables que entren en el modelo no sean dependientes de las que ya figuraban (Navarro, Ferrer, 2016).

Para la ejecución del método de pasos sucesivos para la variable de respuesta resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc28) se utilizarán 10 variables, las variables son las siguientes: relación agua-cantidad total de material cementante (a/TCM), cantidad de cemento (Cem), Cantidad de humo de sílice (HS), Cantidad de Ceniza Volante (CV), Cantidad de Metakaolin (MK), Cantidad de Árido Fino (Arid Fin), Cantidad Total de Material Cementante (TCM), Tipo de Cemento (Tipo Cem), Cantidad de agua (Agua),

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,673 ^a	,453	,452	15,21719762
2	,729 ^b	,532	,531	14,08703085
3	,753 ^c	,567	,566	13,55392039
4	,776 ^d	,603	,601	12,98840992
5	,786 ^e	,618	,616	12,74067488
6	,792 ^f	,627	,625	12,59119653
7	,798 ^g	,637	,635	12,42825316
8	,804 ^h	,647	,644	12,26867570
9	,808 ⁱ	,652	,649	12,18202652
10	,809 ^j	,654	,651	12,15446006

Tabla 4.2 Pasos sucesivos para la resistencia a la compresión del hormigón fc28.

- a. Variables predictoras: (Constante), a/TCM
- b. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3)
- c. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3)
- d. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3)
- e. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3), CV (Kg/m3)
- f. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3), CV (Kg/m3), AridFin (Kg/m3)
- g. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3), CV (Kg/m3), AridFin (Kg/m3), TCM (Kg/m3)
- h. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3), CV (Kg/m3), AridFin (Kg/m3), TCM (Kg/m3), ÁriGru (Kg/m3)
- i. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3), CV (Kg/m3), AridFin (Kg/m3), TCM (Kg/m3), ÁriGru (Kg/m3), TipoCem
- j. Variables predictoras: (Constante), a/TCM, Cem (Kg/m3), HS (Kg/m3), MK (Kg/m3), CV (Kg/m3), AridFin (Kg/m3), TCM (Kg/m3), ÁriGru (Kg/m3), TipoCem, Agua (Kg/m3)

Un modelo lineal múltiple con 4 factores es capaz de explicar el 60.27% de la variabilidad de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, siendo las más influyentes la relación agua-cantidad total de material cementante (a/TCM), la cantidad de cemento (Cem), la cantidad de humo sílice (HS), y la cantidad de Metakaolin (MK), si a estas 4 variables le agregamos 7 variables más, el valor de R² tan solo incrementa a 65.42% como se muestra en la **Tabla 4.3**.

En la **Tabla 4.3** se observan las ecuaciones de regresión para las variables explicativas, evidenciando que las variables independientes relación agua-cantidad total de material cementante y la cantidad total de material cementante son muy influyentes en el comportamiento de la resistencia a la compresión del hormigón.

Ecuación de Regresión	R² (%)
$fc28 = 105,91 - 127,50 a/TCM$	45,29
$fc28 = 77,93 - 101,02 a/TCM + 0,05035 Cem$	53,17
$fc28 = 72,63 - 88,84 a/TCM + 0,04719 Cem + 0,1749 HS$	56,69
$fc28 = 72,29 - 88,61 a/TCM + 0,04280 Cem + 0,2017 HS + 0,1477 MK$	60,27
$fc28 = 82,52 - 100,70 a/TCM + 0,03259 Cem + 0,1916 HS + 0,1318 MK - 0,03546 CV$	61,81
$fc28 = 74,27 - 101,63 a/TCM + 0,03357 Cem + 0,1791 HS + 0,1192 MK - 0,03583 CV + 0,01141 Arid Fin$	62,74
$fc28 = 55,96 - 85,60 a/TCM + 0,02470 Cem + 0,1117 HS + 0,1038 MK - 0,04495 CV + 0,01214 Arid Fin + 0,03367 TCM$	63,73
$fc28 = 40,44 - 81,17 a/TCM + 0,02553 Cem + 0,1386 HS + 0,1161 MK - 0,04433 CV + 0,01146 Arid Fin + 0,04308 TCM + 0,01020 Arid Gru$	64,70
$fc28 = 40,65 - 80,38 a/TCM + 0,02607 Cem + 0,1416 HS + 0,1118 MK - 0,04433 CV + 0,01115 Arid Fin + 0,04174 TCM + 0,01083 Arid Gru - 0,001131 Tipo Cem$	65,23
$fc28 = 38,45 - 61,92 a/TCM + 0,02821 Cem + 0,1189 HS + 0,1188 MK - 0,04133 CV + 0,01092 Arid Fin + 0,05523 TCM + 0,01045 Arid Gru - 0,001139 Tipo Cem - 0,0665 Agua$	65,42

Tabla 4.3 Ecuaciones de regresión para la resistencia a la compresión a 28 días (fc28) y sus respectivos R2.

4.5 Análisis descriptivo de la resistencia a la compresión del hormigón

En este apartado se realiza un análisis descriptivo estadístico de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, la **Figura 4.12** nos muestra que la distribución de los valores de resistencia del hormigón cumple con la prueba de normalidad ($p < 0.005$), con una resistencia a la compresión media de 53.265 MPa, la desviación estándar es de 20.563 MPa, el intervalo de confianza para la media esta entre 51.975 MPa y 54.555 MPa, el número de datos analizados es de 978.

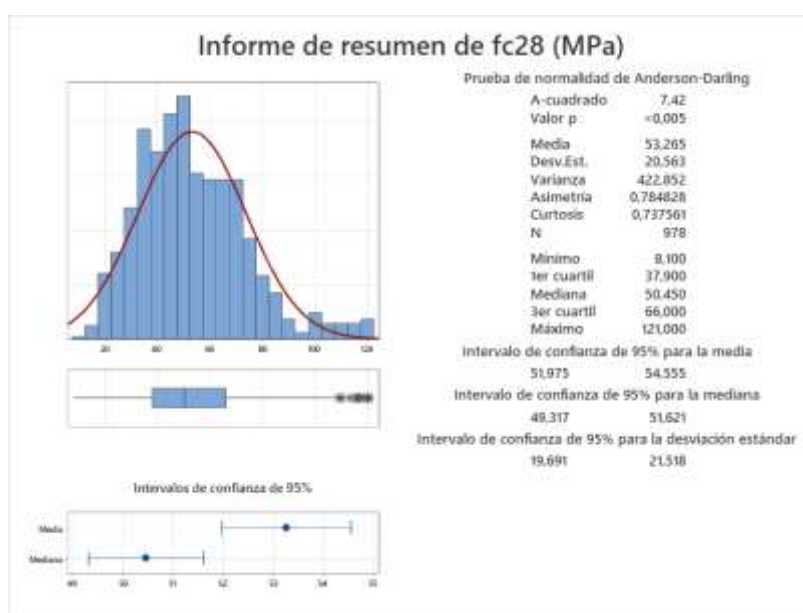


Figura 4.12 Resumen de estadístico descriptivo para la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc28).

La **Figura 4.13** se observa la gráfica de probabilidad de la resistencia a la compresión del hormigón (fc28), donde el valor p es menor que 0.005 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos no siguen una distribución normal.

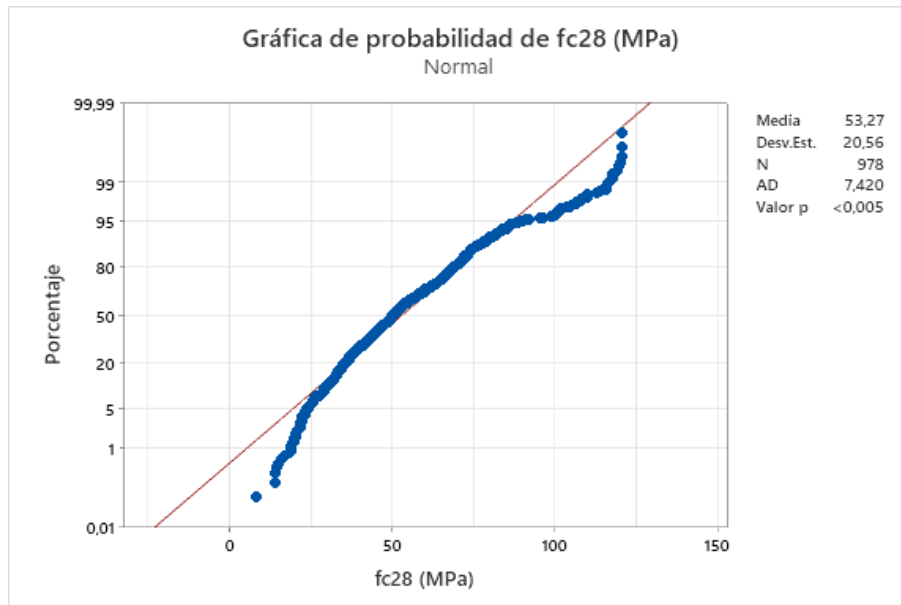


Figura 4.13 Gráfica de normalidad de la muestra de resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc28).

5. APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Las dos primeras redes neuronales nos permitirán evaluar la capacidad de predecir la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días de edad (f_{c28}), la RNA_1 se ejecutó con MATLAB y la RNA_2 con el software SPSS como se muestra en la **Tabla 5.1**.

Variables utilizadas en las redes neuronales artificiales		
Variable de Entrada	RNA	
	1	2
TCM	X	X
Tipo Cem	X	X
Cem	X	X
HS	X	X
CV	X	X
MK	X	X
a/TCM	X	X
Agua	X	X
Arid Fin	X	X
Arid Gru	X	X
TipoCur	X	X
Temp	X	X
slump	X	X
Numero de Variables	13	13
Variable de predicción	f_{c28}	f_{c28}
Software utilizado	Matlab	SPSS

Tabla 5.1 Variables y softwares utilizados para las dos primeras redes neuronales artificiales.

5.1 Red Neuronal Artificial en Matlab

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 sobre aprendizaje 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 (Ortiz, 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 salida 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_1 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 5.2** y como es el caso de algunos autores consultados (Navarro, Ferrer, 2016).

No. de neurona en las capas ocultas	Valor de R	No. de neurona en las capas ocultas	Valor de R
1	0,864	17	0,963
2	0,882	18	0,966
3	0,896	19	0,968
5	0,922	20	0,956
10	0,942	25	0,970
11	0,950	30	0,965
12	0,955	35	0,968
13	0,959	40	0,967
14	0,958	45	0,973
15	0,963	50	0,978
16	0,962	55	0,973

Tabla 5.2 Valores de R obtenidos en fusión del número de neuronas en la capa oculta en la RNA_1.

Como se ha indicado con anterioridad el método utilizado es el de validación cruzada, y en todas las redes neuronales artificiales elaboradas los porcentajes de participación se lo ha dividido de la siguiente manera.

- 80% de los datos en aprendizaje o entrenamiento.
- 10% de los datos de validación.
- 10% de los datos en el test.

En la figura **Figura 5.1** se pueden apreciar los gráficos obtenidos de la interfaz del software Matlab, el cual nos muestra los resultados de los valores de correlación R para aprendizaje, validación y test, como también el valor el valor de correlación R total.

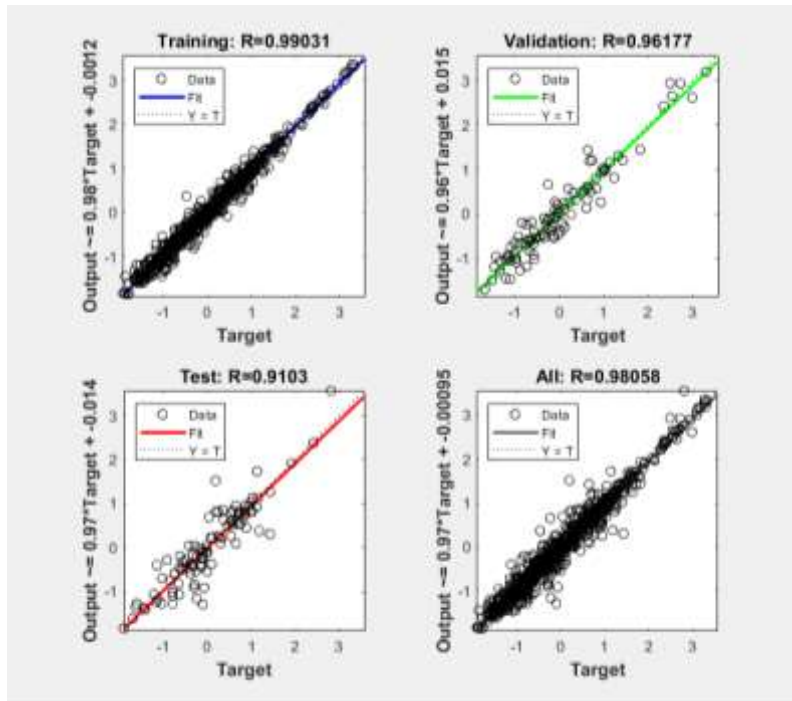


Figura 5.1 Coeficientes de correlación de la RNA_1 en Matlab.

Con la finalidad de cuantificar la calidad de la solución y el potencial del algoritmo, en el código desarrollado se ha tenido en cuenta los criterios de parada, como evitar el sobre aprendizaje, el entrenamiento de la red del algoritmo y el cálculo de los siguientes valores:

- Error cuadrático medio (MSE).
- Error cuadrático medio relativo a la varianza (RMSE).
- Prueba del error cuadrático previsto (PSE).

El MSE (*mean squared error*) error cuadrático medio se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$MSE = mean [(astd - tstd)^2] \quad (5.1)$$

El RMSE (*root mean squared error*) error cuadrático medio relativo a la varianza es:

$$RMSE = MSE/var(tstd) \quad (5.2)$$

El PSE (*predicted squared error*) prueba del error cuadrático previsto es:

$$PSE = MSE * (1 + 2 * NPar / (N - Npar)) \quad (5.3)$$

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 (Ferran, 2016).

En la Figura 5.2 se muestra el entorno de la red neuronal artificial en Matlab 2020 y la información de los resultados de los valores de correlación R (para aprendizaje, validación, test y total), así como los valores correspondientes a MSE, RMSE y PSE. En el entorno de la red neuronal en Matlab podemos observar el número de iteraciones realizadas y el tiempo que se demora en ejecutar el cálculo. En el entorno de la red neuronal de Matlab también se puede observar el número de variables de entrada, el número de capas ocultas en la red neuronal y la

variable de salida, en la sección *Plots* se puede imprimir los resultados presentados en la gráfica 5.1 en la opción (*Regression*).

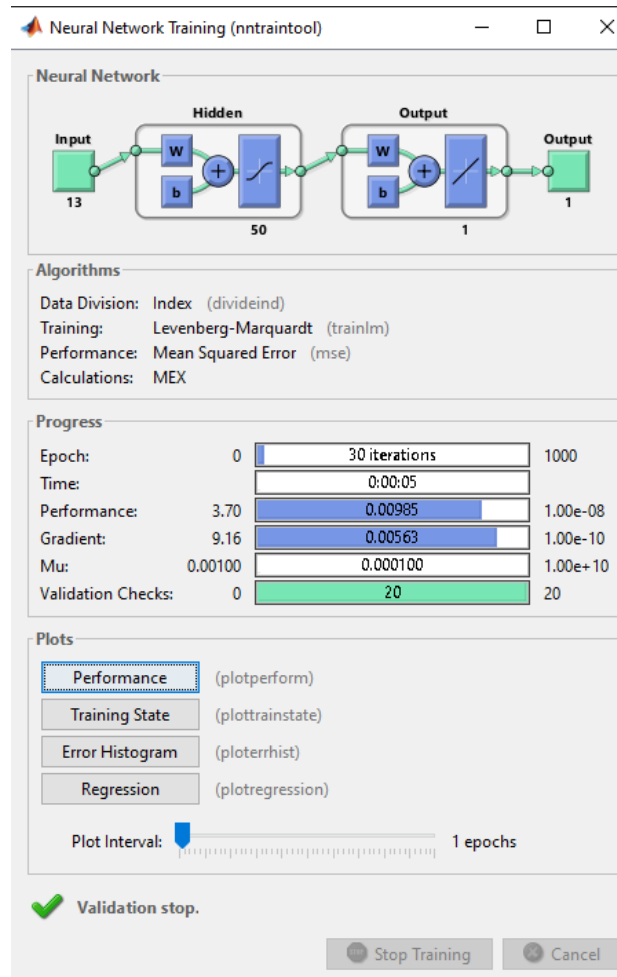


Figura 5.2 Entorno de la red neuronal en Matlab.

Como se explicó anteriormente las redes neuronales artificiales en nuestro análisis predice la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, en la gráfica 5.3 podemos observar los resultados obtenidos por la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días ($fc28_{RNA_1}$) en función de la resistencia a la compresión experimental a 28 días ($fc28$), el coeficiente de determinación R^2 del análisis es de 96.2%.

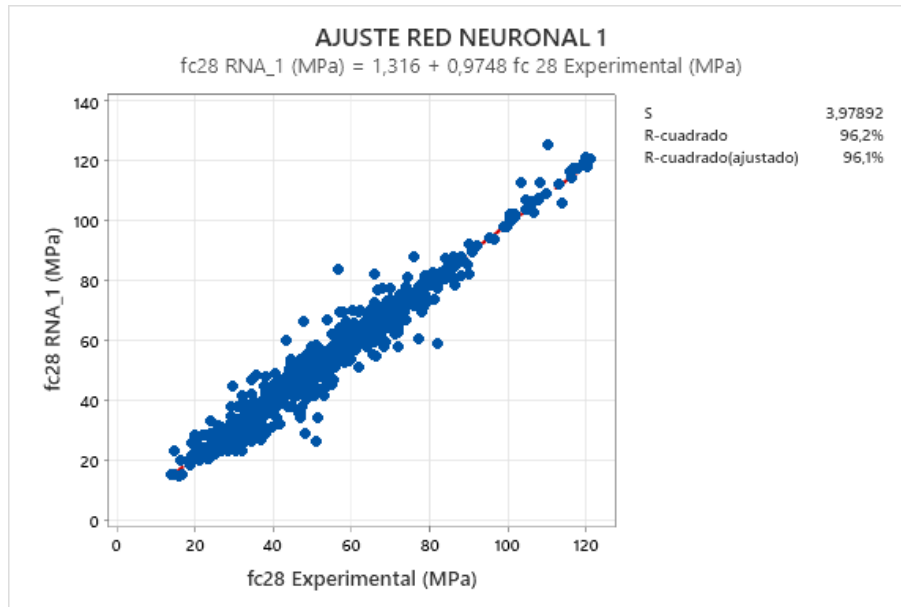


Figura 5.3 RNA_1: resistencia a la compresión a los 28 días con todas las variables. Red Neuronal en Matlab.

5.2 Red Neuronal Artificial en SPSS

Con la finalidad de verificar el comportamiento y el potencial que tiene la Red Neuronal en Matlab, se ejecutó una red neuronal en el Software SPSS, para el proceso de validación de los datos de nuestro análisis se usó la misma distribución usada en Matlab para el aprendizaje, entrenamiento y test (80%, 10%, 10%) como se muestra en la **Figura 5.4**. La **Tabla 5.1** nos muestra las variables de entrada y salida que usaremos en el análisis, el número de capas ocultas que usaremos es 1 con 50 neuronas y la función con la que trabajaremos nuestra variable de salida es la función tangente hiperbólica como se muestra en la **Figura 5.5**. En la **Figura 5.6** nos muestra los resultados que se obtendrá en el análisis, así como las opciones que rige el software para su ejecución.

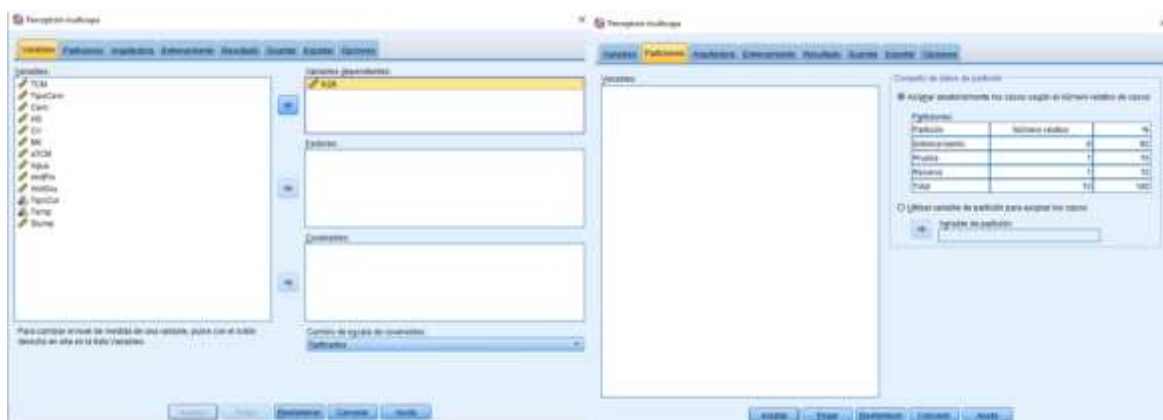


Figura 5.4 Análisis de Red Neuronal en SPSS.

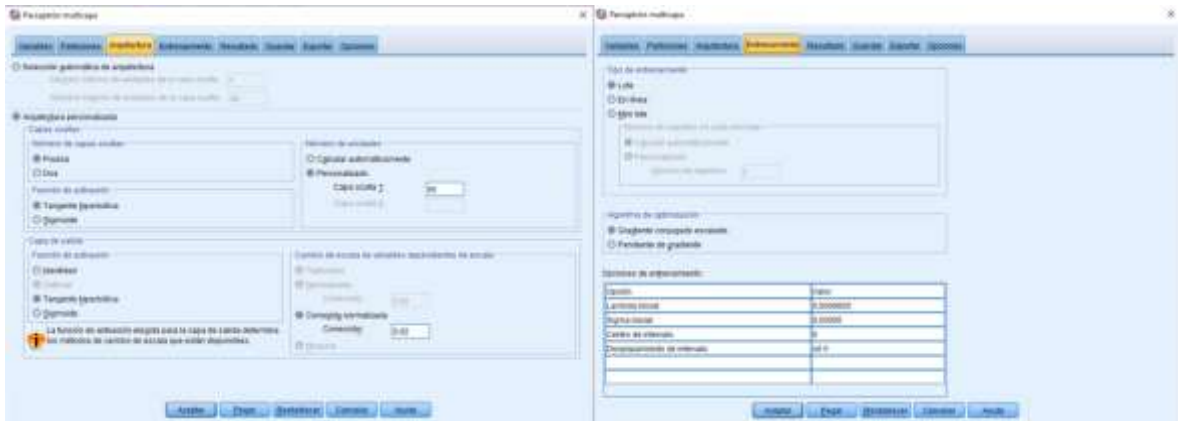


Figura 5.5 Análisis de Red Neuronal en SPSS.



Figura 5.6 Análisis de Red Neuronal en SPSS.

El algoritmo de IBM SPSS nos muestra entre sus resultados la importancia de cada una de las variables al momento de predecir la variable salida, prediciendo la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días (fc28), en la **Figura 5.7** se muestra la información de la red neuronal en ejecución, mientras que en la **Figura 5.8** se puede observar las 4 variables más influyentes al momento de ejecutar el algoritmo las cuales son: la relación agua-material total cementante (a/TCM, 19.6%), la cantidad total de material cementante (TCM, 12.8%), la cantidad de humo de sílice (HS, 12.5%) y la cantidad de cemento (Cem, 10.5%), las cuales explican el 55.4% del fenómeno de nuestro análisis.

Considerando que las variables independientes del análisis son 13 y 4 son las variables influyentes que expresan el 55.4% del análisis, se puede identificar claramente la influencia que tiene cada una de las variables para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días.

Información sobre la red

Capa de entrada	Covariables	1	aTCM
		2	TCM
		3	Cem
		4	TipoCem
		5	HS
		6	CV
		7	MK
		8	Agua
		9	AridFin
		10	AridGru
		11	Slump
		12	TipoCur
		13	Temp
	Número de unidades ^a		13
	Método de cambio de escala para las covariables		Corregida normalizada
Capas ocultas	Número de capas ocultas		1
	Número de unidades de la capa oculta 1 ^a		50
	Función de activación		Tangente hiperbólica
Capa de salida	Variables dependientes	1	fc28
	Número de unidades		1
	Método de cambio de escala para las dependientes de escala		Corregida normalizada
	Función de activación		Tangente hiperbólica
	Función de error		Suma de cuadrados

a. Sin incluir la unidad de sesgo

Figura 5.7 Información de la red neuronal en SPSS.

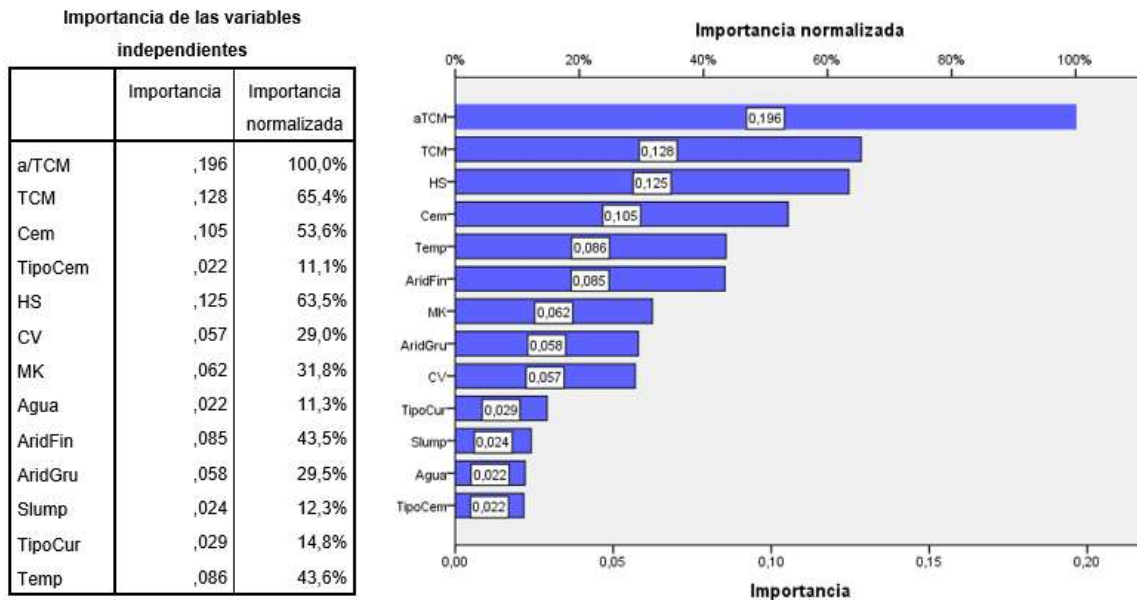


Figura 5.8 Importancias de las variables independientes en la red neuronal en SPSS.

Los resultados de la red neuronal RNA_2 que corresponden a la predicción del valor de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, con el mismo criterio descrito anteriormente se ejecutó 9 veces y se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 75.9% como se muestra en la **Figura 5.9**.

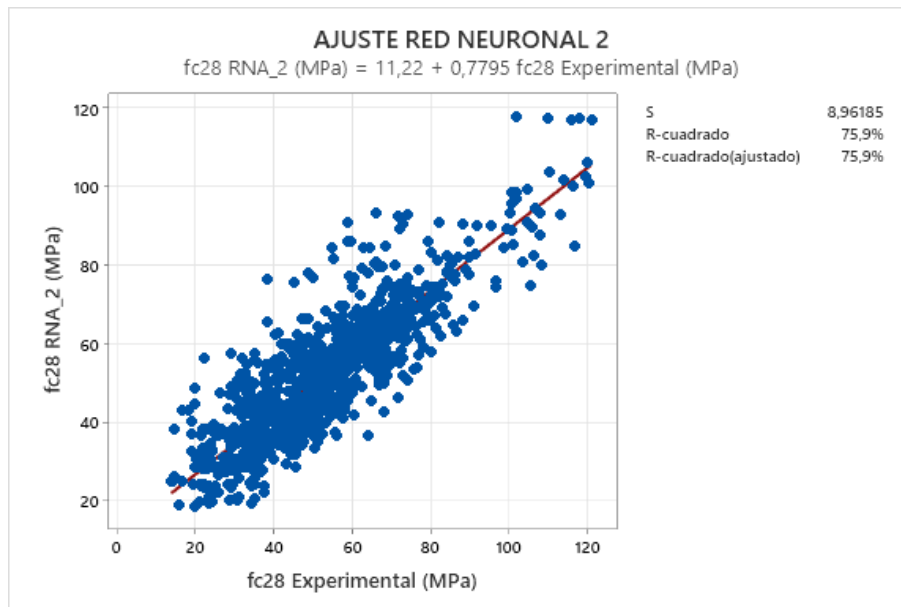


Figura 5.9 RNA_2: resistencia a la compresión a los 28 días con todas las variables. Red Neuronal de SPSS.

Los resultados del coeficiente de determinación R^2 obtenidos con el algoritmo en Matlab nos muestran un mejor coeficiente de determinación en comparación con el calculado con el algoritmo en SPSS como se muestra en la **Tabla 5.3**.

Los resultados de redes neuronales ejecutadas en Matlab nos muestran un aumento aproximado en 20 puntos porcentuales de R^2 para la predicción de resultados de resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, evidenciando el potencial que tiene el uso del algoritmo en Matlab.

R² obtenidos con Matlab y SPSS

Ensayo	Matlab	SPSS
fc28	96,2%	75,9%

Tabla 5.3 Valores de R2 obtenidos con Matlab y SPSS.

5.3 Redes Neuronales artificiales con diferentes combinaciones de variables

Con el resultado obtenido en la comparación entre el uso del algoritmo para redes neuronales artificiales realizados con Matlab y SPSS, en adelante todos los resultados de análisis de redes neuronales serán ejecutados con Matlab. A continuación, se plantean varias redes neuronales alternando las variables de entrada las mismas que serán marcadas con una x, para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, tal como se muestra en la **Tabla 5.4**. La finalidad de la variación de las variables de entrada es analizar la influencia que tiene cada una de ellas en la mezcla de hormigón para la obtención de la resistencia a la compresión, interpretando cada una de las variables hasta obtener resultados óptimos que nos permita evaluar los resultados.

Variables utilizadas en las redes neuronales artificiales

Variable de Entrada	RNA																			
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
TCM	X	X	x	X	x	x	x	x	x	x	X	x	X	x	x	x	x	x		
Tipo Cem	X	X	x		x	x	x		x	x	X	x		x	x	x	x		x	
Cem	X	X	x	X	x	x	x	x	x	x	X	x		x	x	x	x		x	
HS	X	X	x	X		x	x	x			X	x	X	x		x	x		x	
CV	X	X	x	X	x		x	x		x		x	X	x		x	x		x	
MK	X	X	x	X	x	x		x		x	X		X	x		x	x		x	
a/TCM	X	X	x	X	x	x	x	x	x	x	X	x	X	x	x		x	x	x	
Agua	X	X	x	X	x	x	x	x	x	x	X	x	X	x	x	x		x	x	
Arid Fin	X	X	x	X	x	x	x	x	x	x	X	x	X			X	x	x	x	
Arid Gru	X	X	x	X	x	x	x	x	x	x	X	x	X			X	x	x	x	
TipoCur										x	X	x	X	x	x	X	x	x	x	
Temp	X									x	X	x	X	x	x	X	x	x	x	
slump	X	X						x		x	X	x	X	x	x	X	x	x	x	
Número de Variables	12	11	10	9	9	9	9	10	7	12	12	12	11	11	8	12	12	8	12	
Variable de predicción	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	f_{C28}	

Tabla 5.4 Variables de entrada y salida de las diferentes RNA.

La red RNA_3 considera 12 variables de entrada en el análisis de la red neuronal, descartando el tipo de curado de las probetas de hormigón, la base de datos cuenta con 978 datos y la variable de salida es la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días f_{C28} (**Tabla 5.5**). El coeficiente de determinación obtenido en el ajuste de regresión entre los valores de la resistencia f_{C28} calculada en la simulación neuronal y los resultados experimentales toma un valor de $R^2 = 95.4\%$ como se observa en la **Figura 5.10**.

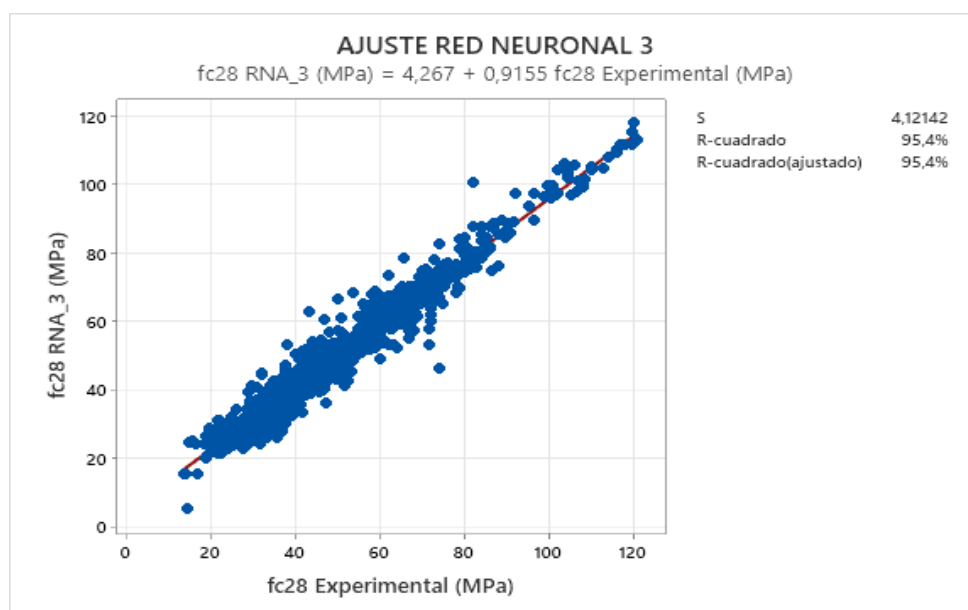


Figura 5.10 Ajuste de la red neuronal artificial RNA3.

Datos:	978									Variables:	12								
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,92256	0,96675	0,96142	0,95042	0,95651	0,96888	0,92292	0,94646	0,97143										
MSE	0,1491	0,0672	0,0796	0,0977	0,0854	0,0633	0,1508	0,1047	0,0572										
RMSE	0,1491	0,0672	0,0796	0,0977	0,0854	0,0633	0,1508	0,1047	0,0572										
PSE	0,9036	0,4072	0,0482	0,5921	0,5174	0,3835	0,9140	0,6344	0,3469										
Iteraciones	24	32	25	25	26	27	24	25	29										

Tabla 5.5 Parámetros obtenidos de la RNA_3.

La RNA_4 se la realiza al igual que en el caso anterior, descartando esta vez la medición de la temperatura de agua de curado del hormigón, se realiza el aprendizaje de cada red neuronal artificial con la base de datos general y las variables de entrada descrita en la **Tabla 5.4**. Se realiza 9 ejecuciones del análisis neuronal con los valores de R recogidos y descritos en la **Tabla 5.6**, dando como resultado final para la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días el valor promedio de las 9 ejecuciones.

La red neuronal artificial nos dará unos valores de la variable de salida en función de las variables que hemos decidido variar, obteniéndose un valor promedio de la resistencia a compresión fc_{28} calculada y los datos experimentales de los diferentes artículos científicos, dando un valor del coeficiente de determinación de $R^2 = 94.8\%$ como se muestra en la **Figura 5.11**. Se observa que hubo leve decrecimiento en comparación con la RNA_3.

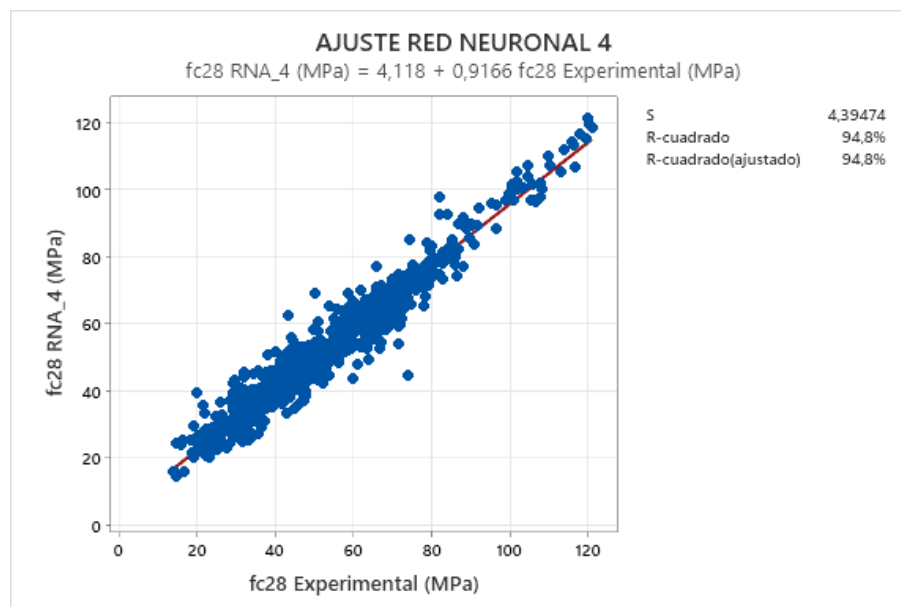


Figura 5.11 Ajuste de la red neuronal artificial RNA4.

Datos:	978									Variables:	11								
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
Valor de R	0,91258	0,96609	0,95937	0,95378	0,96985	0,94687	0,96674	0,96386	0,93909										
MSE	0,1740	0,0679	0,0795	0,0735	0,0601	0,1034	0,0653	0,0720	0,1201										
RMSE	0,1740	0,0679	0,0795	0,0735	0,0601	0,1034	0,0653	0,0720	0,1201										
PSE	0,8669	0,3380	0,3962	0,3583	0,2994	0,5150	0,3255	0,3587	0,5984										
Iteraciones	24	29	28	25	28	24	26	26	25										

Tabla 5.6 Parámetros obtenidos de la RNA_4.

En la RNA_5 se toma en cuenta las 10 variables más influyentes en la ecuación de regresión múltiple que se obtuvo en la estadística clásica mediante el método de stepwise resumido en la **Tabla 4.3**, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en el análisis neuronal realizado en Matlab y el modelo de regresión aditiva realizado en SPSS.

En la RNA_5 se ha excluido en el análisis las variables correspondientes al tipo de curado de las probetas de hormigón, la temperatura del agua de curado del hormigón y la medición del descenso del cono de abrams, manteniendo las variables de entrada que conforman los materiales de la mezcla de hormigón. En la **Tabla 5.7** se muestra los resultados de las 9 ejecuciones del análisis neuronal, obteniendo un valor promedio del coeficiente de determinación $R^2 = 94.39\%$ como se muestra en la **Figura 5.12**.

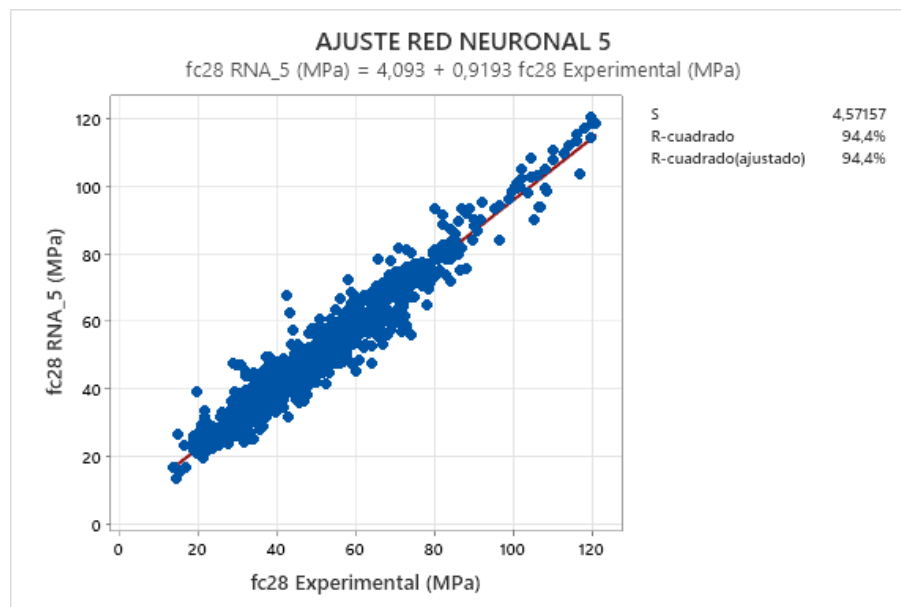


Figura 5.12 Ajuste de la red neuronal artificial RNA5.

Datos:	978									Variables:	10								
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Valor de R	0,96212	0,95566	0,96853	0,95904	0,95953	0,96717	0,95328	0,9356	0,93705										
MSE	0,0745	0,0868	0,0626	0,0809	0,0793	0,0650	0,0913	0,1246	0,1271										
RMSE	0,0745	0,0868	0,0626	0,0809	0,0793	0,0650	0,0913	0,1246	0,1271										
PSE	0,3119	0,3636	0,2622	0,3390	0,3321	0,2724	0,3823	0,5220	0,5325										
Iteraciones	42	32	33	34	30	31	32	24	27										

Tabla 5.7 Parámetros obtenidos de la RNA_5.

La RNA_6 pretende analizar la influencia que tiene la red neuronal al excluir las variables tipo de cemento, tipo de curado, temperatura de curado y descenso de la medición del cono de abrams, en la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, al igual que en el caso anterior se realiza las 9 ejecuciones del ajuste neuronal, se desea analizar la influencia que tiene el ajuste neuronal al suprimir el tipo de cemento en el análisis.

El resultado del coeficiente de determinación R^2 para la red neuronal en estudio es $R^2 = 93.2\%$ como se muestra en la **Figura 5.13**, y los resultados de las 9 ejecuciones de la red neuronal se describe en la **Tabla 5.8**.

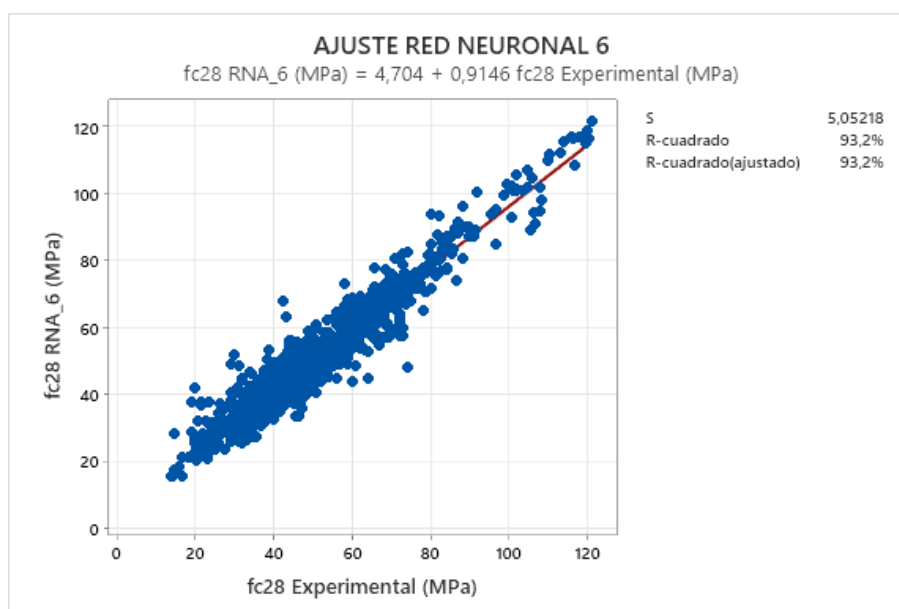


Figura 5.13 Ajuste de la red neuronal artificial RNA6.

Datos:	978									Variables:	9								
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Valor de R	0,94733	0,95492	0,93888	0,95717	0,95514	0,94011	0,95345	0,9529	0,91966										
MSE	0,1026	0,0885	0,1186	0,0845	0,0883	0,1174	0,0911	0,0919	0,1553										
RMSE	0,1026	0,0885	0,1186	0,0845	0,0883	0,1174	0,0911	0,0919	0,1553										
PSE	0,3673	0,3169	0,4246	0,3027	0,3163	0,4204	0,3262	0,3292	0,5562										
Iteraciones	38	31	27	34	31	27	35	39	34										

Tabla 5.8 Parámetros obtenidos de la RNA_6.

En varios artículos de los cuales se obtuvo la base de datos, se investiga la influencia tanto del tipo de curado y la temperatura de curado de las probetas de hormigón, sumando también la influencia que tiene la medición del descenso del cono de abrams y las adiciones de materiales cementicios en los resultados de resistencia a la compresión del hormigón f_{c28} , para lo cual se ha creado las redes neuronales RNA_7, RNA_8 y RNA_9, la finalidad de este análisis es de mantener suprimidas las variables de tipo de curado, temperatura de curado y descenso de cono de abrams e ir excluyendo cada una de las adiciones cementicias (humo de sílice, ceniza volante y metakaolin) para cada red neuronal como se muestra en la **Tabla 5.4**.

El resultado del coeficiente de determinación para la RNA_7 donde se excluye la cantidad de Humo de Sílice es de $R^2 = 92.4\%$ como se muestra en la **Figura 5.14**, el valor del coeficiente R^2 de la RNA_8 donde se excluye la cantidad de Ceniza Volante es $R^2 = 92.2\%$ y el valor de $R^2 = 92.5\%$ correspondiente a la RNA_9 cuando se excluye la cantidad de metakaolin, como se muestran en las **Figura 5.15** y **Figura 5.16** respectivamente para las dos últimas redes neuronales.

Como se puede observar no existe una variación significativa entre los valores del coeficiente de determinación de las redes neuronales, para la predicción de la variable de salida resistencia a la compresión del hormigón f_{c28} .

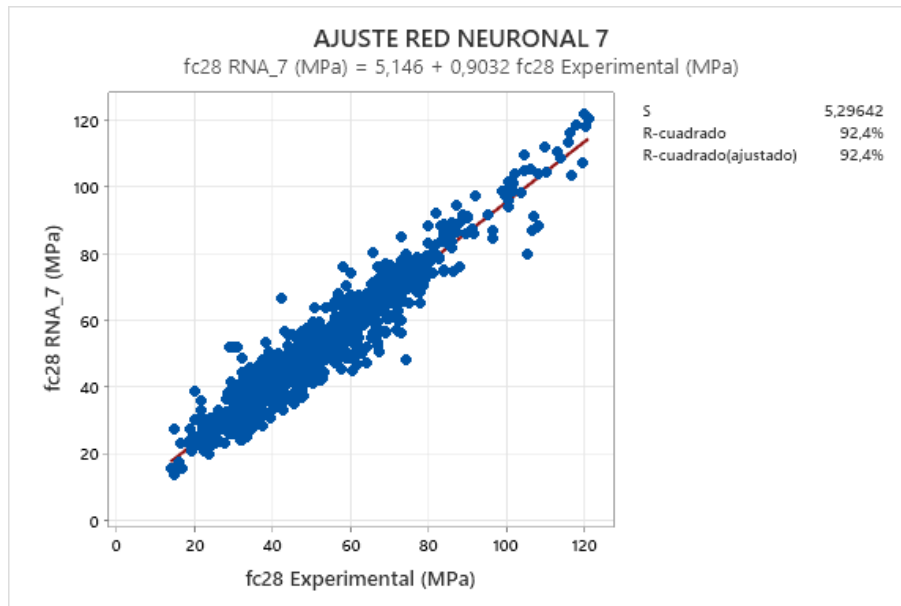


Figura 5.14 Ajuste de la red neuronal artificial RNA7.

Datos:	Variables:								
	978								
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,94217	0,95267	0,95683	0,95423	0,94838	0,94398	0,96108	0,93295	0,9327
MSE	0,1123	0,0924	0,0845	0,0924	0,1047	0,1114	0,0767	0,1299	0,1338
RMSE	0,1123	0,0924	0,0845	0,0924	0,1047	0,1114	0,0767	0,1299	0,1338
PSE	0,4021	0,3309	0,3027	0,3307	0,3748	0,3987	0,2745	0,4652	0,4792
Iteraciones	25	27	40	27	28	28	29	24	25

Tabla 5.9 Parámetros obtenidos de la RNA_7.

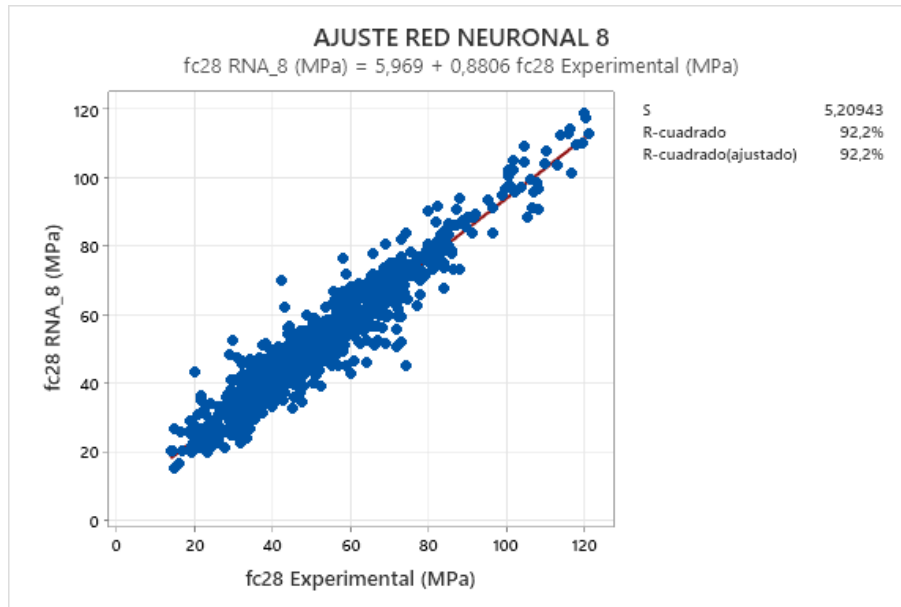


Figura 5.15 Ajuste de la red neuronal artificial RNA8.

Datos:	978									Variables:	9
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,95546	0,94973	0,93519	0,95768	0,9137	0,94462	0,94659	0,95334	0,87597		
MSE	0,0873	0,0985	0,1254	0,0828	0,1742	0,1077	0,1048	0,0945	0,2326		
RMSE	0,0873	0,0985	0,1250	0,0828	0,1742	0,1077	0,1048	0,0945	0,2326		
PSE	0,3527	0,3527	0,4490	0,2964	0,6238	0,3855	0,3754	0,3384	0,8330		
Iteraciones	30	32	25	40	24	33	28	27	24		

Tabla 5.10 Parámetros obtenidos de la RNA_9.

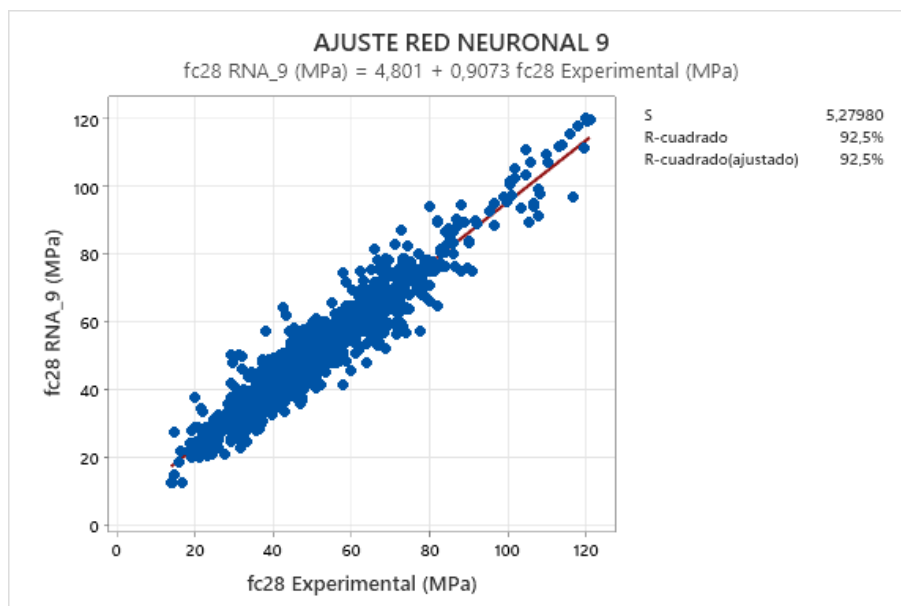


Figura 5.16 Ajuste de la red neuronal artificial RN9.

Datos:	978								Variables:	9
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Valor de R	0,95745	0,95838	0,94996	0,94379	0,93465	0,93703	0,93096	0,95933	0,95013	
MSE	0,0832	0,0822	0,0975	0,1093	0,1268	0,1283	0,1334	0,0798	0,0975	
RMSE	0,0832	0,0822	0,0975	0,1093	0,1268	0,1283	0,1334	0,0798	0,0975	
PSE	0,2979	0,2944	0,3491	0,3913	0,4539	0,4596	0,4778	0,2857	0,3491	
Iteraciones	29	31	36	30	27	27	26	40	32	

Tabla 5.11 Parámetros obtenidos de la RNA_9.

En el análisis de la RNA_10 para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón, omitiremos el tipo de curado, la temperatura de curado, ya que estos factores son temas de investigación en los resultados de la resistencia a compresión como lo mencionamos anteriormente, también se omitirá el tipo de cemento con la finalidad de analizar la influencia que tienen las tres variables en el ajuste de la red neuronal. El resultado del coeficiente de determinación para la red neuronal en análisis es $R^2 = 95.30\%$ como se observa en la **Figura 5.17** y los resultados de las ejecuciones están descritas en la **Tabla 5.12**.

De los resultados observados podemos indicar que no existe mucha influencia en el ajuste neuronal para las variables omitidas en el análisis.

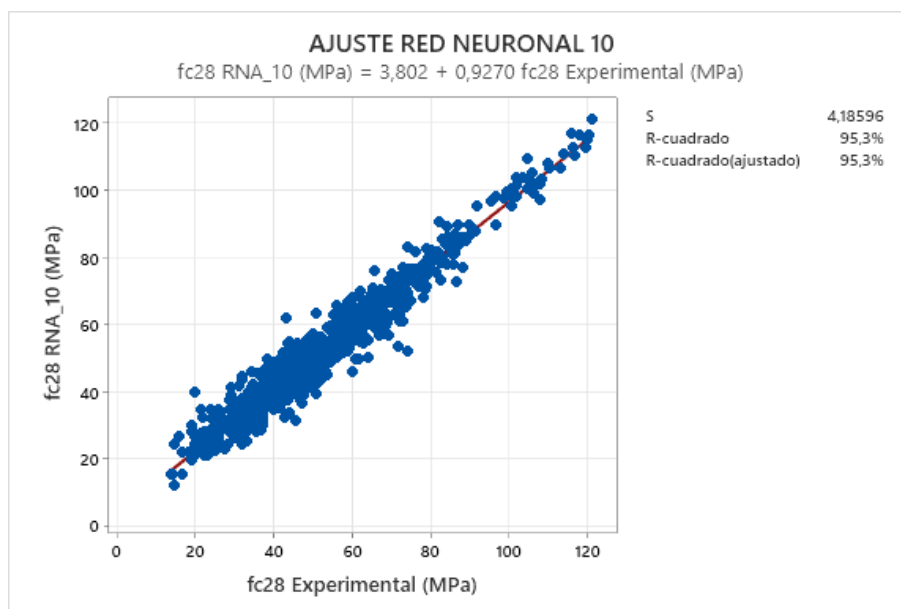


Figura 5.17 Ajuste de la red neuronal artificial RN10.

Datos:	978									Variables:	10
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,96927	0,96604	0,95968	0,96621	0,91707	0,96258	0,96173	0,95751	0,96156		
MSE	0,0611	0,0670	0,0799	0,0664	0,1605	0,0735	0,0769	0,0834	0,0760		
RMSE	0,0611	0,0670	0,0799	0,0664	0,1605	0,0735	0,0769	0,0834	0,0760		
PSE	0,2560	0,2807	0,3347	0,2782	0,6723	0,3078	0,3220	0,3492	0,3182		
Iteraciones	32	30	28	30	24	28	29	29	28		

Tabla 5.12 Parámetros obtenidos de la RNA_10.

En la RNA_11 se pretende analizar la predicción de la resistencia a compresión del hormigón al suprimir en las variables las adiciones cementicias de la base de datos general (humo de sílice, ceniza volante, metakaolin), el tipo de curado, la temperatura de curado y la medición del descenso en el cono de abrams.

Los resultados del modelo se lo pueden observar en la **Figura 5.18**, donde nos explica un valor promedio del coeficiente de determinación de $R^2 = 91.9\%$, este valor nos explica una reducción el valor del coeficiente de determinación en comparación con la RNA_1 $R^2 = 96.2\%$, donde el ajuste de la red neuronal esta realizado con las 13 variables de entrada descritas en la base de datos generales.

Para llegar al valor promedio del coeficiente de determinación la **Tabla 5.13** indica los resultados de las ejecuciones en análisis neuronal.

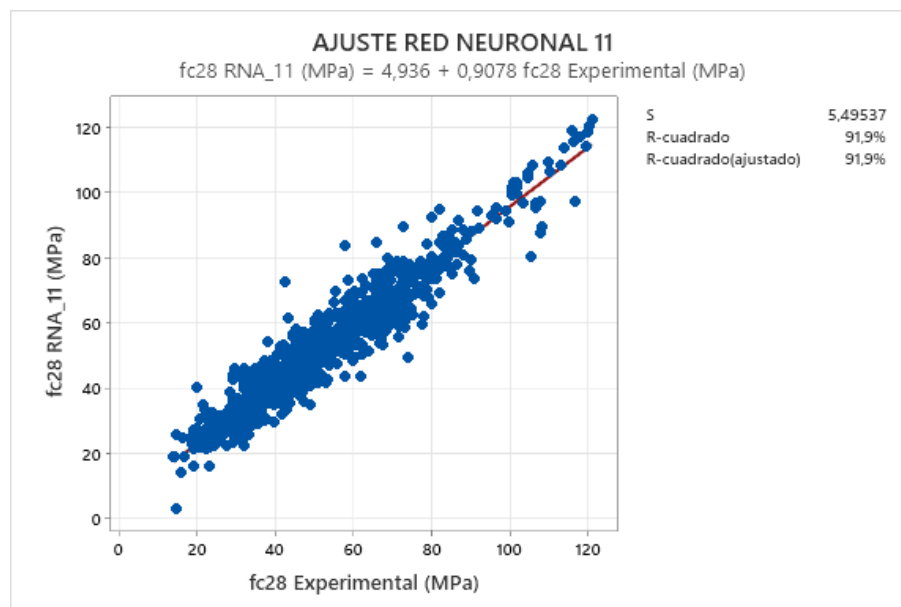


Figura 5.18 Ajuste de la red neuronal artificial RN11.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,93422	0,94662	0,94426	0,93935	0,95572	0,94616	0,93749	0,93238	0,94771
MSE	0,1272	0,1042	0,1133	0,1177	0,0886	0,1047	0,1213	0,1321	0,1019
RMSE	0,1272	0,1042	0,1130	0,1177	0,0886	0,1047	0,1213	0,1321	0,1019
PSE	0,3448	0,2826	0,3072	0,3193	0,2402	0,2840	0,3289	0,3581	0,2764
Iteraciones	26	29	31	41	62	30	28	27	36

Tabla 5.13 Parámetros obtenidos de la RNA_11.

A continuación, se procede a elaborar 4 nuevas redes neuronales artificiales RNA_12, RNA_13, RNA_14 y RNA_15, con la finalidad de tener modelos de comportamiento de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, variando los materiales cementicios y analizando el comportamiento de cada uno de ellos en el análisis. Para el análisis de las redes de las redes neuronales artificiales RNA_12, RNA_13, RNA_14 se consideran 12 variables de entrada, y para la y RNA_15 se realiza el análisis con 11 variables, en comparación con la base de datos general que considera 13 variables como se observa en la **Tabla 5.1**.

En la RNA_12 se omite la cantidad de Humo de sílice, para la predicción de la resistencia a la compresión teniendo un valor del coeficiente de determinación de $R^2 = 95.4\%$, en la RNA_13 se descarta la variable cantidad de Ceniza Volante teniendo como resultado el valor de $R^2 = 97.0\%$, para la RNA_14 se suprime la cantidad de Metakaolin y del análisis nos da como resultado $R^2 = 96.4\%$, y para la RNA_15 se eliminan dos variables que son la cantidad de cemento y el tipo de cemento dando como resultado de coeficiente de determinación $R^2 = 95.2\%$, como se muestran en las **Figura 5.19, Figura 5.20, Figura 5.21 y Figura 5.22** respectivamente.

Se puede observar que no existe mucha variación en el ajuste de regresión comparado con los resultados de los valores de resistencia a la compresión del hormigón experimentales a 28 días obtenidos de los artículos científicos, y los valores obtenidos mediante el cálculo de redes neuronales artificiales. Las redes neuronales RNA_13 y RNA_14 nos muestra un mejor resultado en el ajuste de regresión lineal compara con el resultado de la RNA_1 donde se consideran todas las variables de la base de datos.

Los resultados de las 9 ejecuciones realizadas para cada una de las redes neuronales se las describen en las **Tabla 5.14, Tabla 5.15, Tabla 5.16 y Tabla 5.17** respectivamente.

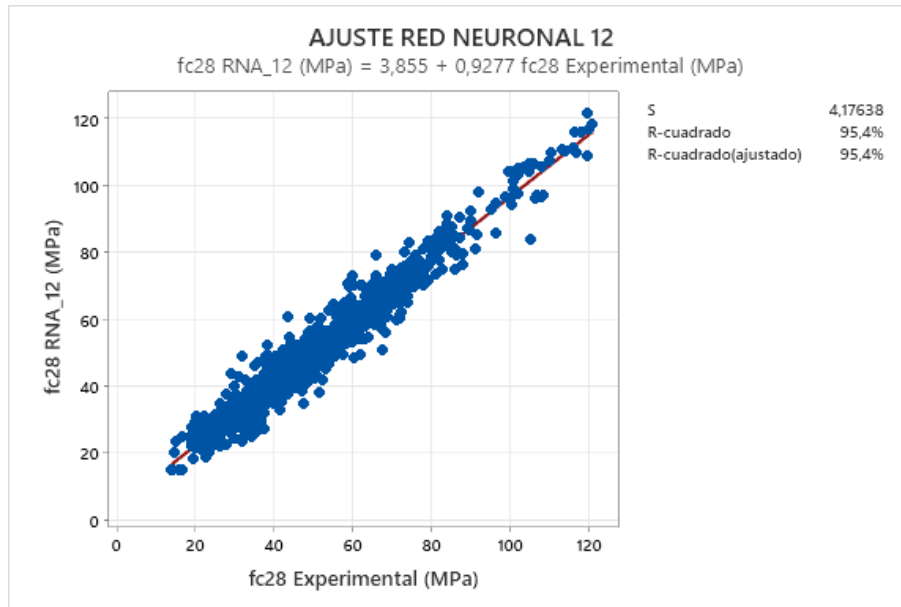


Figura 5.19 Ajuste de la red neuronal artificial RN12.

Datos:	978									Variables:	12
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,96038	0,9679	0,97338	0,94009	0,90757	0,97028	0,97568	0,91426	0,96417		
MSE	0,0849	0,0635	0,0525	0,1169	0,1783	0,0593	0,0480	0,1695	0,0703		
RMSE	0,0849	0,0635	0,0525	0,1169	0,1783	0,0593	0,0480	0,1695	0,0703		
PSE	0,5144	0,3847	0,3181	0,7085	10,8090	0,5940	0,2912	10,2720	0,4262		
Iteraciones	26	27	27	25	23	28	35	24	26		

Tabla 5.14 Parámetros obtenidos de la RNA_12.

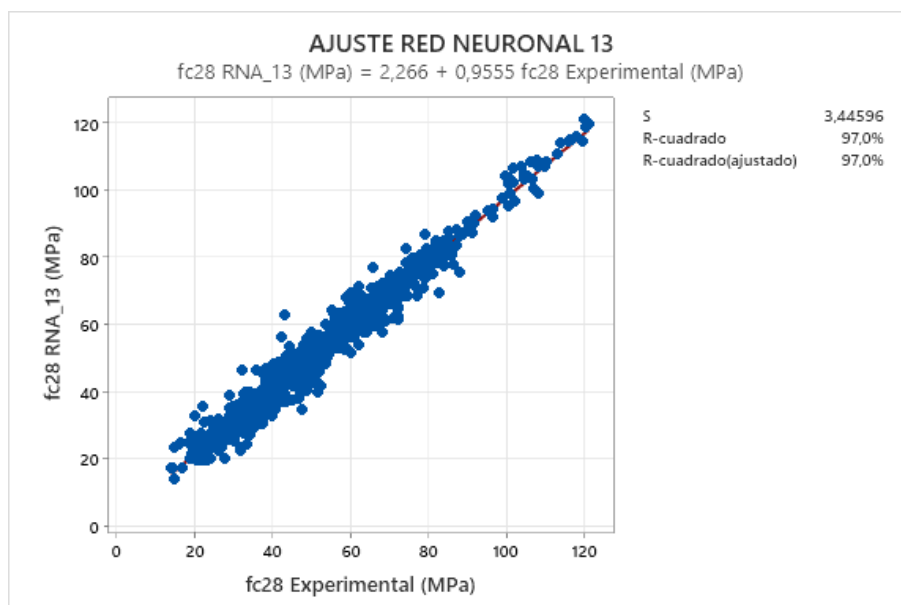


Figura 5.20 Ajuste de la red neuronal artificial RN13.

Datos:	978									Variables:	12
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,96908	0,97202	0,97202	0,96908	0,97764	0,97883	0,9694	0,95651	0,97763		
MSE	0,0622	0,0554	0,0557	0,0611	0,0444	0,0424	0,0616	0,0857	0,0443		
RMSE	0,0622	0,0554	0,0557	0,0611	0,0444	0,0424	0,0616	0,0857	0,0443		
PSE	0,3769	0,3360	0,3373	0,3705	0,2688	0,2570	0,3732	0,5193	0,2687		
Iteraciones	27	29	35	26	27	37	28	25	29		

Tabla 5.15 Parámetros obtenidos de la RNA_13.

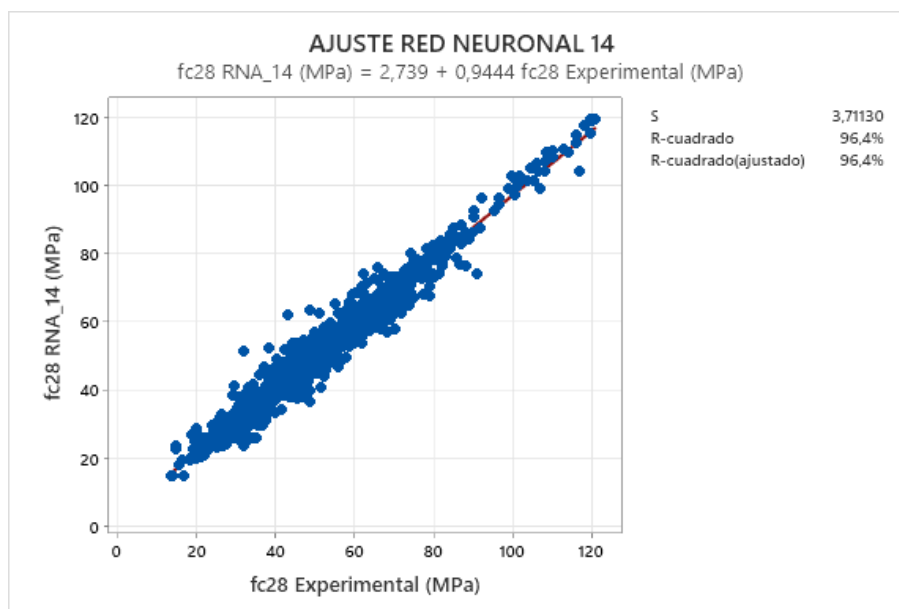


Figura 5.21 Ajuste de la red neuronal artificial RN14.

Datos:	978									Variables:	12
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,97148	0,97745	0,963	0,97211	0,97146	0,97584	0,95952	0,96716	0,96442		
MSE	0,0568	0,0447	0,0743	0,0554	0,0569	0,0479	0,0797	0,0653	0,0699		
RMSE	0,0568	0,0447	0,0743	0,0554	0,0569	0,0479	0,0797	0,0653	0,0699		
PSE	0,3340	0,2711	0,4506	0,3359	0,3451	0,2904	0,4830	0,3958	0,4236		
Iteraciones	27	35	27	29	29	31	26	27	26		

Tabla 5.16 Parámetros obtenidos de la RNA_14.

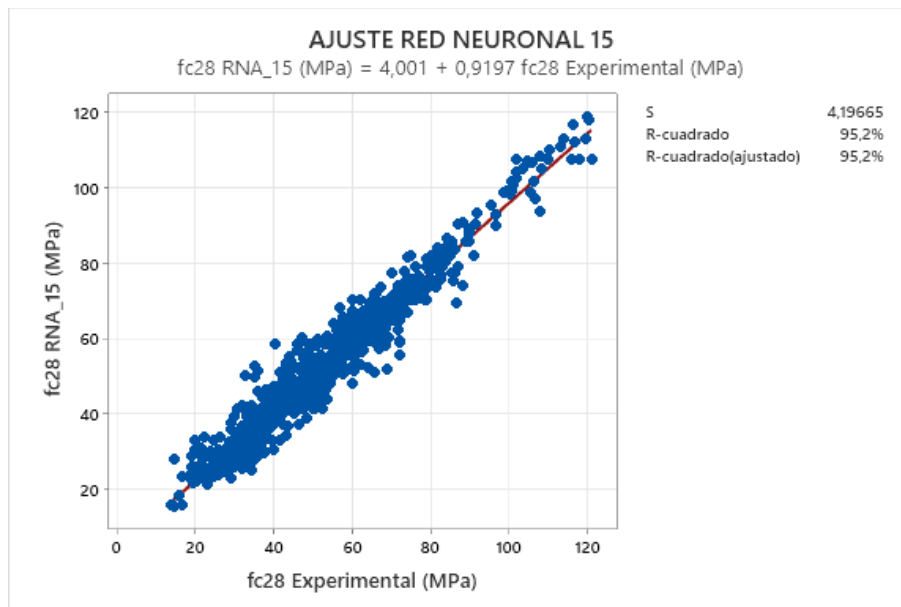


Figura 5.22 Ajuste de la red neuronal artificial RN15.

Datos:	978									Variables:	11									
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Valor de R	0,93559	0,96947	0,95255	0,97586	0,9629	0,95752	0,96511	0,96853	0,95018											
MSE	0,1256	0,0601	0,0927	0,0477	0,0731	0,0851	0,0686	0,0625	0,1007											
RMSE	0,1256	0,0601	0,0927	0,0477	0,0731	0,0851	0,0686	0,0625	0,1070											
PSE	0,6258	0,2993	0,4618	0,2376	0,3642	0,4239	0,3419	0,3116	0,5015											
Iteraciones	25	27	24	28	27	25	27	27	26											

Tabla 5.17 Parámetros obtenidos de la RNA_15.

Con la finalidad de determinar si la cantidad de áridos es influyente en la predicción de la resistencia del hormigón, se ha creado la RNA_16 que cuenta con 11 variables de entrada, y la RNA_17 que pretende analizar la influencia de los agregados y las adiciones cementicias para la variable de salida en análisis, esta red neuronal cuenta con 8 variables de entrada como se muestra en la **Tabla 5.4**.

Los valores del coeficiente de determinación para la RNA_16 es $R^2 = 94.4\%$ y para la RNA_17 es $R^2 = 89.50\%$, se puede identificar que existe un decrecimiento leve en el coeficiente de determinación de la RNA_16 en comparación con la RNA_1, pero en la RNA_17 se identifica un notable decrecimiento en el coeficiente de determinación en comparación con la red neuronal cuando tenemos las 13 variables de la base de datos general, lo cual indica que si existe influencia en el análisis de la red neuronal cuando se omite las variables de la cantidad de agregados finos y grueso y las cantidades de adiciones cementicias. Los resultados del coeficiente de determinación para las redes neuronales RNA_17 y RNA_18 se pueden observar en las **Figura 5.24** y **Figura 5.25**.

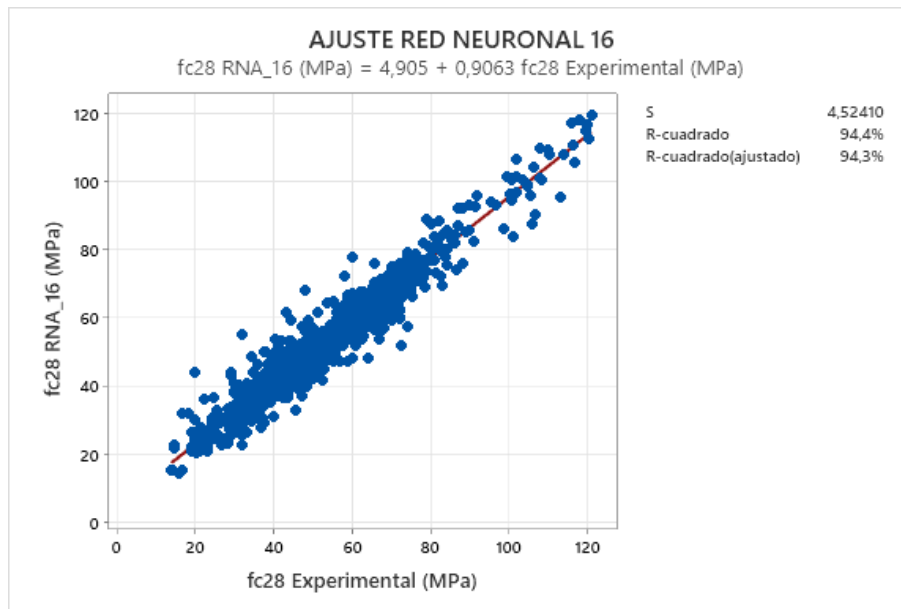


Figura 5.23 Ajuste de la red neuronal artificial RN16.

Datos:	978									Variables:	11
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,92884	0,96531	0,96098	0,96755	0,94597	0,97023	0,94651	0,90231	0,96195		
MSE	0,1377	0,0686	0,0783	0,0639	0,1051	0,0586	0,1133	0,1958	0,0748		
RMSE	0,1377	0,0686	0,0783	0,0639	0,1051	0,0586	0,1133	0,1958	0,0748		
PSE	0,6860	0,3415	0,3899	0,3181	0,5234	0,2920	0,5643	0,9752	0,3727		
Iteraciones	23	29	28	29	26	46	27	24	30		

Tabla 5.18 Parámetros obtenidos de la RNA_16.

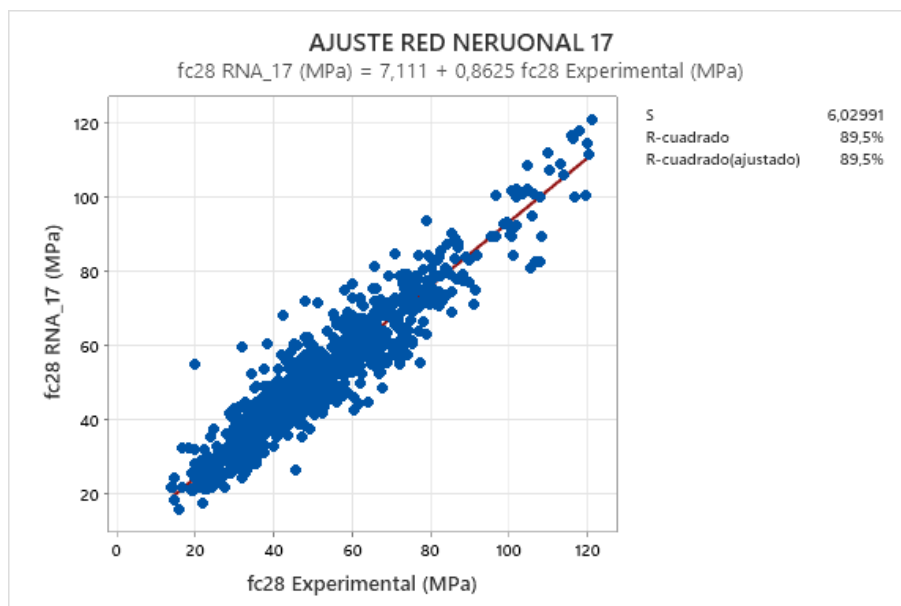


Figura 5.24 Ajuste de la red neuronal artificial RN17.

Datos:	978								Variables:	8
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Valor de R	0,92826	0,94126	0,91989	0,92581	0,91998	0,9292	0,9417	0,91005	0,94537	
MSE	0,1384	0,1126	0,1561	0,1429	0,1535	0,1372	0,1141	0,1718	0,1066	
RMSE	0,1384	0,1126	0,1561	0,1429	0,1535	0,1372	0,1141	0,1718	0,1066	
PSE	0,4293	0,3492	0,4839	0,4432	0,4759	0,4253	0,3537	0,5328	0,3306	
Iteraciones	27	42	26	27	25	26	31	25	31	

Tabla 5.19 Parámetros obtenidos de la RNA_17.

Desde el punto de vista del diseño de mezclas de hormigón, la cantidad de agua y materiales cementantes son muy importantes en los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón, para ello en las siguientes redes neuronales artificiales pretenderemos analizar la influencia que tiene la relación agua/material total cementante y sus componentes en la predicción de la variable de salida resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, para ello se ha creado las RNA_18, RNA_19, RNA_20 y RNA_21. Cada una de las redes neuronales se caracteriza por las variables de entrada que se omiten en el aprendizaje de cada red neuronal.

La importancia que tiene cada una de las variables de entrada en nuestro análisis es de gran significancia, para ello describiremos las variables que se omiten en cada análisis de la red neuronal, para la RNA_18 la variable omitida será la relación agua-total material cementante, la RNA_19 tendrá como variable descartada la cantidad de agua, la RNA_20 se omitirán las variables cementantes y el tipo de cemento y en la RNA_21 omitiremos la cantidad total de material cementante, los resultados obtenidos del análisis neuronal y el reajuste de regresión lineal que se tiene entre la resistencia a la compresión del hormigón obtenida de las investigaciones realizadas en los artículos científicos y la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón calculada por medio del uso de redes neuronales se observan en las **Figura 5.25, Figura 5.26, Figura 5.27 y Figura 5.28.**

Los valores del coeficiente de determinación para los modelos de análisis neuronal son los siguientes: RNA_18 $R^2 = 96.1\%$, RNA_19 $R^2 = 96.1\%$, RNA_20 $R^2 = 90.8\%$ y RNA_21 $R^2 = 97.1\%$, donde se puede identificar que la RNA_20 tienen un decrecimiento en el valor del coeficiente de determinación en comparación a los otros modelos en análisis, mientras que la RNA_21 tiene un mejor reajuste que todos los modelos analizados en este estudio.

Los valores obtenidos en el cálculo de la red neuronal se describen en las **Tabla 5.20, Tabla 5.21, Tabla 5.22 y la Tabla 5.23**, donde se describen los resultados de las 9 ejecuciones del cálculo para cada red neuronal, así como los resultados del número de iteraciones que ejecuta el algoritmo de las redes neuronales y sus respectivos valores del MSE, RMSE y PSE.

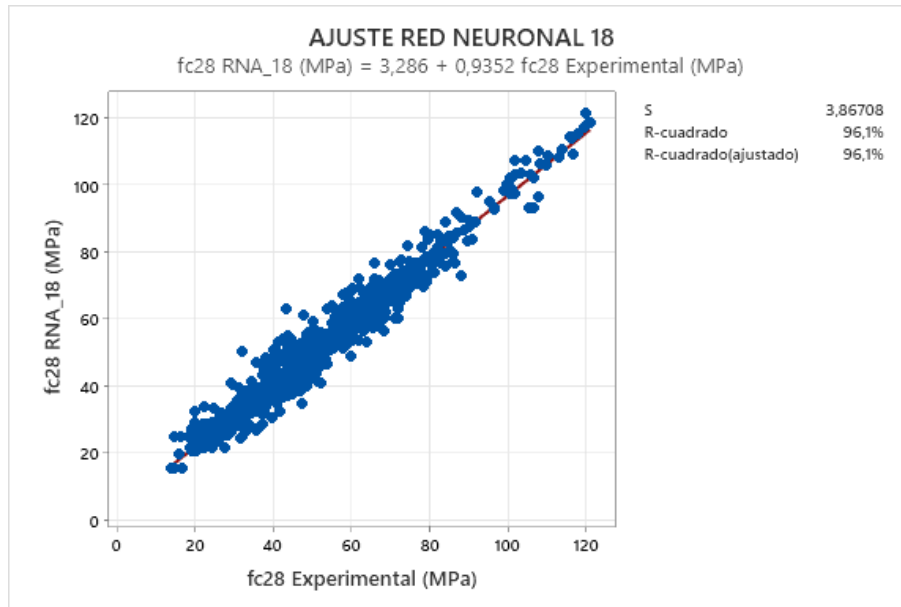


Figura 5.25 Ajuste de la red neuronal artificial RN18.

Datos:	978									Variables:	12
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,97055	0,95854	0,96756	0,97382	0,968	0,96418	0,0794	0,97283	0,96939		
MSE	0,0580	0,0811	0,0638	0,0524	0,0630	0,0711	0,0794	0,0537	0,0603		
RMSE	0,0580	0,0811	0,0638	0,0524	0,0630	0,0711	0,0794	0,0537	0,0603		
PSE	0,3515	0,4918	0,3866	0,3175	0,3818	0,4312	0,4812	0,3253	0,3656		
Iteraciones	27	24	25	26	26	26	25	26	26		

Tabla 5.20 Parámetros obtenidos de la RNA_18.

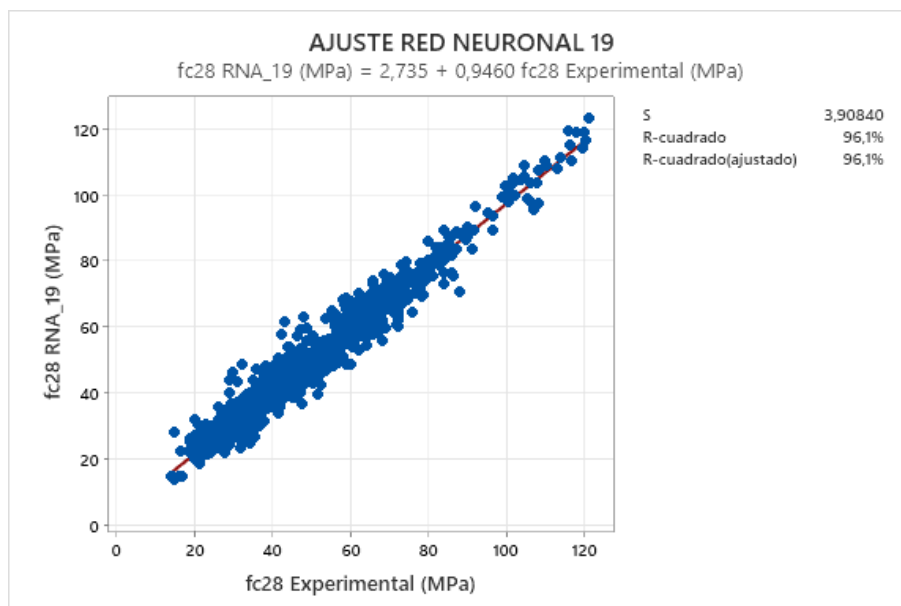


Figura 5.26 Ajuste de la red neuronal artificial RN19.

Datos:	978									Variables:	12
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,97489	0,96177	0,97569	0,97377	0,94289	0,97027	0,96816	0,96263	0,9569		
MSE	0,0495	0,0761	0,0480	0,0540	0,1118	0,0595	0,0644	0,0756	0,0843		
RMSE	0,0495	0,0761	0,0480	0,0540	0,1180	0,0950	0,0644	0,0756	0,0843		
PSE	0,2468	0,3790	0,2391	0,2690	0,5569	0,2962	0,3207	0,3767	0,4199		
Iteraciones	29	28	32	30	26	29	30	28	26		

Tabla 5.21 Parámetros obtenidos de la RNA_19.

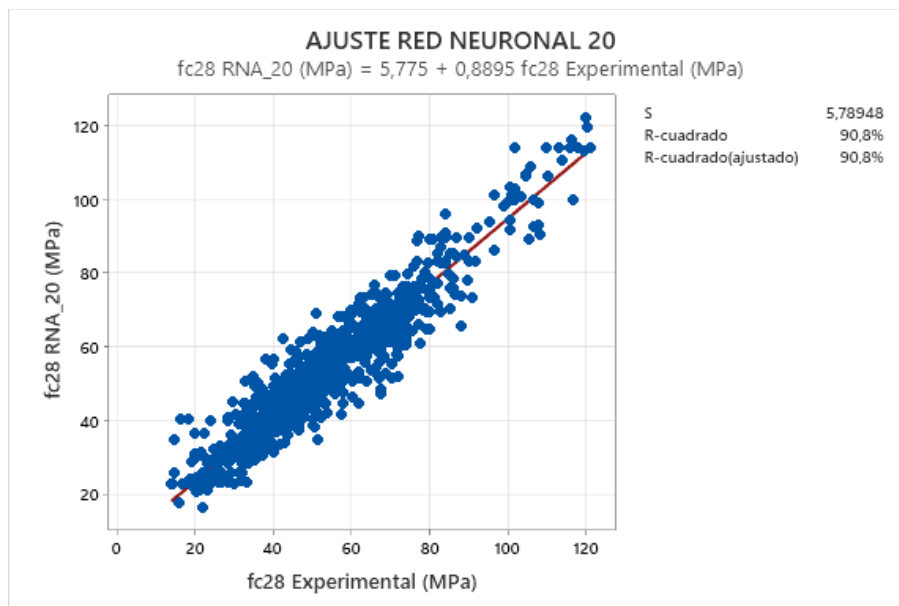


Figura 5.27 Ajuste de la red neuronal artificial RN20.

Datos:	978									Variables:	8
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Valor de R	0,93378	0,94666	0,92843	0,93904	0,93732	0,9361	0,94718	0,94072	0,9364		
MSE	0,1280	0,1040	0,1381	0,1181	0,1239	0,1236	0,1032	0,1155	0,1232		
RMSE	0,1280	0,1040	0,1381	0,1181	0,1239	0,1236	0,1032	0,1150	0,1232		
PSE	0,3969	0,3224	0,4282	0,3663	0,3841	0,3832	0,3199	0,3566	0,3822		
Iteraciones	27	31	25	29	30	27	35	35	51		

Tabla 5.22 Parámetros obtenidos de la RNA_20.

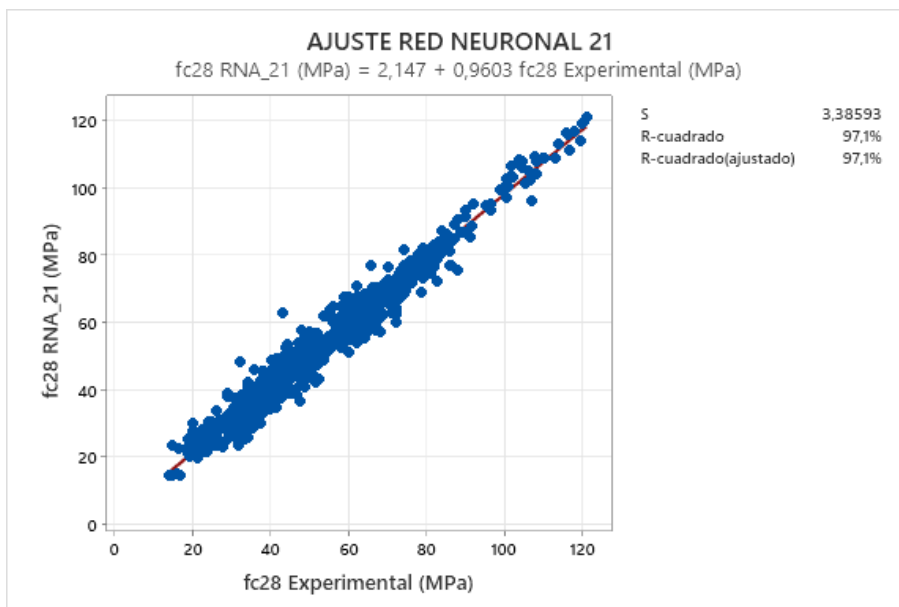


Figura 5.28 Ajuste de la red neuronal artificial RN21.

Datos:	978									Variables:	12								
Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
Valor de R	0,97924	0,97741	0,9725	0,97113	0,97268	0,97912	0,96837	0,97702	0,9753										
MSE	0,0414	0,0448	0,0545	0,0573	0,0539	0,0417	0,0622	0,0454	0,0494										
RMSE	0,0414	0,0448	0,0545	0,0573	0,0539	0,0417	0,0622	0,0454	0,0494										
PSE	0,2508	0,2715	0,3302	0,3470	0,3269	0,2530	0,3772	0,2751	0,2995										
Iteraciones	29	29	26	26	28	34	30	26	27										

Tabla 5.23 Parámetros obtenidos de la RNA_21.

Resumen de las RNA

Variable de Entrada	RNA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TCM	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tipo Cem	x	x	x	x	x		x	x	x	
Cem	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
HS	x	x	x	x	x	x		x	x	x
CV	x	x	x	x	x	x	X		x	x
MK	x	x	x	x	x	x	X	x		x
a/TCM	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Agua	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Arid Fin	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Arid Gru	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TipoCur	x	x								
Temp	x	x	x							
slump	x	x	x	x						x
Número de Variables	12	11	12	11	10	9	9	9	9	10
Software Ejecutado	M	S	M	M	M	M	M	M	M	M
R	0,98	0,87	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,98
R ²	0,96	0,76	0,95	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,93	0,95

Tabla 5.24 Resumen redes neuronales ejecutadas, variables y resultados (parte1).

Resumen de las RNA

Variable de Entrada	RNA										
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
TCM	X	x	x	x	x	X	x	X	x	X	
Tipo Cem	X	x	x	x		X	x	X	x		x
Cem	X	x	x	x		X	x	X	x		x
HS			x	x	x	X		X	x		x
CV		x		x	x	X		X	x		x
MK		x	x		x	X		X	x		x
a/TCM	X	x	x	x	x	X	x		x	X	x
Agua	X	x	x	x	x	X	x	X		X	x
Arid Fin	X	x	x	x	x			X	x	X	x
Arid Gru	X	x	x	x	x			X	x	X	x
TipoCur		x	x	x	x	X	x	X	x	X	x
Temp		x	x	x	x	X	x	X	x	X	x
slump		x	x	x	x	X	x	X	x	X	x
Número de Variables	7	12	12	12	11	11	8	12	12	8	12
Software Ejecutado	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
R	0,96	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,95	0,98	0,98	0,95	0,99
R ²	0,92	0,95	0,97	0,96	0,95	0,94	0,895	0,96	0,96	0,91	0,97

Tabla 5.25 Resumen redes neuronales ejecutadas, variables y resultados (parte2).

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo tiene como objeto el estudio de la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón a 28 días, para lo cual se ha elaborado una base de datos para el análisis, utilizando artículos científicos que investigan la utilización de diferentes materiales y procesos para la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón. El análisis lo realiza mediante modelos de estadística clásica y el uso de redes neuronales.

La base de datos cuenta con 13 variables, perteneciente a las características de los materiales, diseño y dosificación de la mezcla de hormigón, propiedades del hormigón en estado fresco, y condiciones de curado para la obtención de la variable de respuesta que es la resistencia a la compresión del hormigón, para diferentes tipos de resistencias especificadas.

En este capítulo se resumen las conclusiones generales y específicas del presente trabajo, así como futuras líneas de investigación que se estiman son de gran interés y complemento para esta área de conocimiento.

6.1 Conclusiones Generales

Los modelos realizados aplicando la estadística clásica para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón no han sido capaces de explicar las relaciones existentes, evaluados mediante el resultado del coeficiente de determinación R^2 . En cambio, la aplicación de redes neuronales artificiales ha sido capaz de dar resultados eficientes, permitiéndonos predecir la variable de respuesta de manera óptima. Por tanto, mediante el uso de redes neuronales artificiales y una base de datos adecuada, se podrá diseñar hormigones prediciendo la resistencia a la compresión del hormigón sin necesidad de una larga campaña experimental.

De los resultados obtenidos, se concluye que los materiales que conforman la mezcla de hormigón desempeñan un papel importante para la obtención de la resistencia mecánica a la compresión, siendo las variables más influyentes las que conforman la mezcla y dosificación del hormigón.

6.2 Conclusiones Específicas

Es importante indicar que en Ecuador no se fabrican Cementos Portland establecidos bajo la Norma ASTM 150 (NTE INEN 152), la mayor producción de cemento a nivel nacional es la establecida por la Norma ASTM C1157 (NTE INEN 2380) para Cementos por Desempeño Especifico, y el cemento de mayor consumo es el TIPO HE de alta resistencia inicial. También existe la producción de Cemento establecido por la Norma ASTM 595 (NTE INEN 490) para Cementos Hidráulicos Compuestos.

De la base de datos obtenida se puede concluir lo siguiente:

- Los materiales constituyentes de la mezcla de hormigón obtenidos de los artículos científicos nos permiten identificar la influencia que tiene cada uno de ellos, en especial la cantidad de cemento, las adiciones cementicias, así como las características del cementante establecidas por el tipo de cemento y la relación a/TMC.

- Del estudio de la base de datos las propiedades del hormigón en estado fresco como el slump, el tipo de curado y la temperatura de curado tienen influencia tanto para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón mediante el análisis de redes neuronales como para la resistencia a la compresión del hormigón realizada de manera experimental.
- Las variables que se consideraron en la base de datos son recurrentes en la mayor parte de artículos científicos analizados. Existen diversas variables en cada investigación, para lo cual se ha utilizado las variables de mayor importancia en la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón.
- Para la obtención de la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón también existen otras variables fundamentales para el estudio, pero al no tener la información recurrente en las bases de datos analizadas no se pudo considerarlas para el presente estudio.

Del análisis estadístico clásico se puede concluir:

- De los resultados obtenidos se establece que los modelos de regresión lineal simple y múltiple no otorgan resultados confiables, donde la mayoría de las variables afecta la explicación de la variable de respuesta, muchas de las variables analizadas explicaron que no existe relación con la variable de respuesta al utilizar este modelo, siendo las más significativas la relación a/TMC y la cantidad de total material cementante.
- Los resultados obtenidos de la estadística clásica para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón no brindan resultados que generen confianza y puedan ser aplicables. En el análisis de los modelos de regresión lineal el resultado más alto fue de $R^2 = 45.3\%$, obtenido de la relación agua – total material cementante (a/TMC) y la resistencia a compresión a 28 días f_{c28} .
- Al utilizar el modelo de regresión múltiple los resultados del coeficiente de determinación fueron mayor en comparación con el de regresión simple, el proceso de pasos sucesivos recoge 10 variables explicativas dando como resultado el valor de $R^2 = 65.42\%$.

Del análisis y aplicación de redes neuronales artificiales se tienen las siguientes conclusiones:

- En cuanto a la aplicación de los Softwares para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón, el que mejor respondió para la obtención de los resultados óptimos es el realizado con el software Matlab con algoritmo de aprendizaje Levenberg-Marquart en comparación con el análisis de las redes neuronales tipo perceptrón aplicado en el software IBM SPSS Statics. Los resultados de la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón aplicando el algoritmo en Matlab dieron un valor de coeficiente de determinación $R^2 = 96.2\%$, en función de la resistencia a la compresión experimental del hormigón, mientras que el obtenido mediante el uso del software SPSS dio un valor $R^2 = 75.9\%$.

- De la aplicación del algoritmo para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón se pudo determinar que el número de capas ocultas para la aplicación de las redes neuronales artificiales es 50.
- Se han realizado varias redes neuronales en nuestro estudio, tratando de identificar la influencia que tiene cada una de las variables de entrada en la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón, donde la RNA_1 que tiene las 13 variables establecida en la base de datos general nos da un resultado del coeficiente de determinación $R^2 = 96.2\%$, lo cual nos indica que las variables seleccionadas para el análisis tienen correlación para la aplicación de redes neuronales artificiales.
- La red neuronal artificial que mejora la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón, consiste en 12 de las 13 variables analizadas, donde al suprimir la cantidad total de material cementante del análisis nos dio un valor del coeficiente de determinación $R^2 = 97.1\%$, es decir que existe mucha influencia en el tipo de variable para la obtención de resultados óptimos para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón, mientras que al retirar las variables de cantidad de agregados y cantidades de adiciones cementantes se obtuvo el resultado del coeficiente de determinación más bajo $R^2 = 89.50\%$, lo cual explica la importancia que tienen estas variables en objetivo del estudio.
- La predicción de la resistencia a la compresión del hormigón no solo depende del número de variables analizadas, sino también del tipo de variable y la importancia que tiene en la mezcla, dosificación o en las características o propiedades que influyen en la resistencia a la compresión de manera experimental.
- Las adiciones cementantes no solo juegan un papel importante en el desempeño de la durabilidad y obtención de la resistencia a la compresión del hormigón, sino también dentro de las variables de entrada para el cálculo de redes neuronales para la variable de salida de nuestro estudio.

6.3 Futuras líneas de investigación

- Investigar otras variables que no fueron contempladas en este estudio, como es los tipos de aditivos y dosificaciones de aditivos, las características mecánicas de los agregados, los módulos de finura de los agregados, la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón al momento de la obtención de las probetas para ensayo. También sería importante considerar el tamaño máximo nominal del agregado grueso y la naturaleza de los agregados.
- Analizar cuáles son las variables más determinantes para la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón, en comparación con las variables que se tiene al realizar el hormigón de manera experimental.
- Investigar cual sería la base de datos para la predicción de la resistencia a la compresión para hormigones autocompactantes o para hormigones de ultra alta resistencia.

7. BIBLIOGRAFIA

- ACI 116. (2015).** *Terminología del Cemento y el Hormigón.*
- Acuña, L., & Torre, A. (2014).** Uso de las Redes Neuronales Artificiales en el Modelado del Ensayo de Resistencia a Compresión de Concreto de Construcción según la Norma ASTM C39/C 39M. *Scielo.*
- Ambroise, J., Maximilien, S., & Pera, J. (1994).** *Properties of Metakaolin.*
- Aranda. (2015).** *Elaboracion de cemento via seca y humeda.*
- Aranda, A. R. (2007).** *Los aditivos del mundo del hormigón.*
- ASOCEM. (2019).** *Cementos adicionados.*
- ASTM 1602. (s.f.).** *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.*
- ASTM C1157/C1157M-20A. (2020).** *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.*
- ASTM C-125. (2021).** *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.*
- ASTM C150. (2019).** *Estándar especificación de cemento Portland 1.*
- ASTM C1602/C1602M-04. (2017).** *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.*
- ASTM C219. (2020).** *Standard Terminology Relating to Hydraulic and Other Inorganic Cements.*
- ASTM C595/595M. (2021).** *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.*
- ASTM C618 12a. (2014).** *Especificación estándar para cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto.*
- ASTM C618-08. (2008).** *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.*
- Avendaño, J. C. (2020).** *Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador.* Valencia.
- Barbudo, M. Á. (2010).** *Introducción a la fabricación y normalizacion del cemento Portland.*
- Bruno, M. V. (2019).** *Modelos predictivos de resistencia y durabilidad en hormigones.* Valencia.
- Caldarone, M. A., Gruber, K. A., & Burg, R. G. (1994).** *High Reactivity Metakaolin (HRM): A New Generation Mineral Admixture for High Performance Concrete.*
- Campos, J. (2016).** *Ahorro de energía en la industria del cemento.*
- Carrasco, J. (2020).** *Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador.* Valencia.
- CEDEX. (2007).** *Humo de sílice.*
- Clark, I. (2007).** *Hacia la próxima generación de redes neuronales artificiales para ingeniería civil.* Elsevier.

- Delgado, T. (2019).** *Fabricación cemento vía seca*. Arequipa.
- Dias, W., & Pooliyadda, S. (2001).** Neural Networks for Predicting Properties of Concrete. *Elsevier*.
- Ferrer. (2012).** Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales. *Dialnet*.
- Ferrer. (2016).** *Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales*. Valencia.
- Ferrer, Ferran. (2016).** *Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales*. Valencia.
- Ficem. (2014).** *Proceso productivo del cemento*.
- Flotar, K. (2011).** La influencia del agua en el comportamiento del hormigón. *Elsevier*.
- Gallant, S. I. (1993).** *Neural network learning*. London.
- Grahama, D., Forbes, D., & Smith, S. (2006).** Modeling the ready mixed concrete delivery system with neural networks. *Elsevier*.
- Gutiérrez, L. (2003).** *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales.
- Gutierrez, R. M., Torres, J., & Guerrero, E. (2004).** Análisis del proceso térmico de producción de una puzolana. *ResearchGate*.
- Hammoudi, A., Moussace, K., Belebchouche, C., & Dahmoune, F. (2019).** Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Elsevier*.
- Haykin, S. S. (1999).** *Neural networks : a comprehensive foundation*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.
- Hecht-Nielsen, R. (1987).** Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem. 11.
- Hendrik, Oss, V., & Padovani, A. (2002).** Fabricación de cemento y medio ambiente. *Researchgate*.
- Herrera, S. (2018).** *Proceso de fabricación del cemento Portland*.
- Ingala, W. P. (2006).** *Material de apoyo didactico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura materiales de construcción*. Cochabamba.
- Kaloop, M. R., Kumar, D., Samui, P., Hu, J. W., & Kima, D. (2020).** Predicción de la resistencia a la compresión del hormigón de alto rendimiento utilizando una máquina elevadora de árboles de gradiente. *Elsevier*.
- Korkova, V. (1992).** *Kolmogorov's Theorem and Multilayer Neural Networks*.
- Kosmatka, B. K. (2004).** *Diseño y control de mezclas de cemento*.
- Lai, S., & Serra, M. (1997).** Concrete Strength Prediction by Means of Neural Network. *Elsevier*.
- Lopez, L. G. (2003).** *El concreto y otros materiales de construcción*. Manizales.

- Medgar, M. M. (2010).** Inventario de ciclo de vida de Portland Fabricación de cemento. *Research.*
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003).** *Concrete.* New Jersey: Upper Saddle River.
- Mirzahosseini, M., Jiao, P., Barri, K., Riding, K., & Alavi, A. (2019).** New machine learning prediction models for compressive strength of concrete modified with glass cullet. *Research.*
- Montalvan, R. (2010).** *Estudio y aplicación normativa en la fabricación del cemento.*
- Mora, A. (2018).** *Fabricación del cemento.*
- Moya, F. d., López, J., & Bañón, L. (2013).** *Apuntes de hormigón armado.* San vicente de Raspeig.
- Nagendra, S. (2013).** Neural Networks and Statistical Learning. *ResearchGate.*
- NTE INEN 152. (2012).** *Cemento Portland. Requisitos.*
- NTE INEN 2380. (2011).** *Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos .*
- NTE INEN 490. (2011).** *Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos.*
- Osorio, P. (2019).** *Tecnología del cemento en el mundo, Perú y la región Ancash.* Nuevo Chimbote.
- Özturan, M. (2008).** Comparison of concrete strength prediction techniques with artificial neural network approach. *Research.*
- Parra, O. A. (2016).** *Las mezclas de concreto hidráulico con aditivos inclusores de aire "Ceniza volantes".* Bogota.
- PCA. (2002).** *Design and Control of Concrete Mixtures.*
- Pinaud, L. L., & Carrillo, A. V. (2013).** Modelización de la resistencia a la compresión del concreto mediante redes neuronales artificiales. *Scielo.*
- Popovics, S. (1990).** Analysis of Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship. *American Concrete Institute (ACI).*
- Restrepo, J., Tabón, J., & Restrepo, O. (2006).** Efectos de la adición del metakaolin en el cemento portland. *Scielo.*
- Rivera, G. (2009).** *Concreto simple.*
- Rosales, D. H. (2015).** *Cementos.*
- Rumelhart, D., Hinton, G., & Williams, R. (1986).** *Learning internal representations by error propagation.*
- Salcedo, L. O., Zúñiga, A. P., Arjona, S. D., & Will, A. L. (2012).** exploracion con redes neuronales artificiales para estimar la resistencia a la compresión, en concretos fibroreforzados con acero. *Scielo.*

- Sam-Dong, & Nam-Gu, G. (2002).** Predicción de la resistencia del hormigón mediante redes neuronales artificiales. *Elsevier*.
- Schneider, Tschudin, R., & Bolio. (2011).** Producción sostenible de cemento: presente y futuro. *Elsevier*, 642-649.
- Shiang, H. C. (1998).** Modelización de la resistencia del hormigón de altas prestaciones utilizando redes neuronales artificiales. *Elsevier*.
- Shibata, K. (2009).** Effect of number of hidden neurons on learning in large-scale layered neural networks. *Research*, 5008.
- Tabares, H. (2006).** Generación dinámica de la topología de una red neuronal artificial del tipo perceptron multicapa. *Scielo*, 148-155.
- Tebar, D. G. (1994).** *Aditivos para el hormigón. Calidad y Normativa* . Madrid.
- Tello, M. H. (2017).** *Uso de las redes neuronales artificiales en el modelado del ensayo de resistencia a compresión de concreto de construcción según la norma ASTM C39 / C39M*. Cajamarca.
- UNE-EN 197-1. (2000).** *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*.
- UNE-EN 197-1. (2011).** *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*.
- Valiente, J. C. (2012).** *Evolución de la resistencia del hormigón de obra. Métodos de predicción a partir de los ensayos de control de la conformidad del hormigón*. Valencia.
- Velasquez, R. A. (2021).** *Astm C618 1*.
- Viñuela, P. I., & León, I. G. (2004).** *Redes de neuronas atificiales: un enfoque práctico* . Madrid: Pearson Education.
- Wang, L. (2011).** Modelado a mesoescala de la penetración de agua en el hormigón por absorción capilar . *Elsevier*.
- YEPES, M. A. (s.f.).** *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. España: ESPAÑA: Universidad de Alicante.
- Yuan, Z., Wang, L.-N., & Ji, X. (2013).** Predicción de la resistencia a compresión del hormigón: Investigación en modelos híbridos, algoritmos basados en genética y ANFIS. *Elsevier*.
- Zamudio, P., & Quiroga, J. (2018).** *Evaluación del material cementante basado en metakaolin con activación alcalina*. Bogotá.
- Zazueta, C. (1997).** *Concretos dosificados con cemento portland y ceniza volante*. Sonora, Mexico.

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

Muestra	TCM	Tipo	Cem	HS	CV	MK	a/TCM	Agua	Arid	Arid	Tipo	Temp	Slump	fc28
	Kg/m ³	Cem	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³		Kg/m ³	Fin	Gru		Cur	°C	mm
1	600,00	1	450,00	0,00	0,00	150,00	0,30	180,00	731,00	877,20	1	20	50	108,00
2	600,00	1	525,00	0,00	0,00	75,00	0,30	180,00	737,50	885,00	1	20	50	92,00
3	537,50	1	436,72	0,00	0,00	100,78	0,35	188,13	749,10	898,90	1	20	50	90,00
4	600,00	1	450,00	0,00	0,00	150,00	0,40	240,00	660,10	792,10	1	20	50	85,00
5	475,00	1	356,25	0,00	0,00	118,75	0,30	142,50	824,90	989,90	1	20	50	90,00
6	600,00	1	600,00	0,00	0,00	0,00	0,30	180,00	744,00	892,80	1	20	50	84,00
7	537,50	1	436,72	0,00	0,00	100,78	0,40	215,00	717,40	860,80	1	20	50	81,00
8	537,50	1	470,31	0,00	0,00	67,19	0,35	188,13	752,00	902,40	1	20	50	84,00
9	475,00	1	385,94	0,00	0,00	89,06	0,35	166,25	799,40	959,30	1	20	50	89,70
10	350,00	1	262,50	0,00	0,00	87,50	0,30	105,00	918,80	1102,60	1	20	50	83,00
11	475,00	1	415,63	0,00	0,00	59,38	0,30	142,50	830,10	996,10	1	20	50	87,00
12	600,00	1	525,00	0,00	0,00	75,00	0,40	240,00	666,60	799,90	1	20	50	82,00
13	600,00	1	450,00	0,00	0,00	150,00	0,50	300,00	589,20	707,00	1	20	50	67,00
14	537,50	1	436,72	0,00	0,00	100,78	0,45	241,88	685,60	822,70	1	20	50	68,00
15	475,00	1	356,25	0,00	0,00	118,75	0,40	190,00	768,80	922,60	1	20	50	80,00
16	412,50	1	335,16	0,00	0,00	77,34	0,35	144,38	849,70	1019,70	1	20	50	82,00
17	350,00	1	262,50	0,00	0,00	87,50	0,40	140,00	877,50	1053,00	1	20	50	77,50
18	475,00	1	475,00	0,00	0,00	0,00	0,30	142,50	835,20	1002,20	1	20	50	77,00
19	537,50	1	470,31	0,00	0,00	67,19	0,40	215,00	720,30	864,30	1	20	50	78,00
20	537,50	1	503,91	0,00	0,00	33,59	0,35	188,13	754,90	905,90	1	20	50	76,00
21	475,00	1	415,63	0,00	0,00	59,38	0,35	166,25	802,00	962,40	1	20	50	80,00
22	475,00	1	385,94	0,00	0,00	89,06	0,40	190,00	771,40	925,60	1	20	50	79,00
23	475,00	1	445,31	0,00	0,00	29,69	0,40	190,00	776,50	931,80	1	20	50	67,00
24	475,00	1	385,94	0,00	0,00	89,06	0,45	213,75	743,30	892,00	1	20	50	64,00
25	350,00	1	306,25	0,00	0,00	43,75	0,30	105,00	922,60	1107,20	1	20	50	80,00
26	412,50	1	360,94	0,00	0,00	51,56	0,35	144,38	852,00	1022,40	1	20	50	70,00
27	412,50	1	386,72	0,00	0,00	25,78	0,35	144,38	854,20	1025,00	1	20	50	68,00
28	350,00	1	262,50	0,00	0,00	87,50	0,50	175,00	836,10	1003,30	1	20	50	58,00
29	475,00	1	475,00	0,00	0,00	0,00	0,40	190,00	779,10	934,90	1	20	50	50,00
30	537,50	1	470,31	0,00	0,00	67,19	0,45	241,88	688,50	826,20	1	20	50	60,00
31	475,00	1	445,31	0,00	0,00	29,69	0,35	166,25	804,60	965,50	1	20	50	78,00
32	350,00	1	350,00	0,00	0,00	0,00	0,30	105,00	926,40	1111,70	1	20	50	51,00
33	475,00	1	415,63	0,00	0,00	59,38	0,45	213,75	745,90	895,00	1	20	50	50,00
34	475,00	1	356,25	0,00	0,00	118,75	0,50	237,50	712,70	855,20	1	20	50	65,00
35	412,50	1	335,16	0,00	0,00	77,34	0,40	165,00	825,40	990,40	1	20	50	73,00
36	350,00	1	306,25	0,00	0,00	43,75	0,40	140,00	881,30	1057,50	1	20	50	68,00
37	600,00	1	525,00	0,00	0,00	75,00	0,50	300,00	595,70	714,80	1	20	50	58,00
38	537,50	1	503,91	0,00	0,00	33,59	0,40	215,00	723,20	867,80	1	20	50	72,00
39	600,00	1	600,00	0,00	0,00	0,00	0,40	240,00	673,10	807,70	1	20	50	65,00
40	412,50	1	335,16	0,00	0,00	77,34	0,45	185,63	801,00	961,20	1	20	50	43,80
41	475,00	1	415,63	0,00	0,00	59,38	0,40	190,00	773,90	928,70	1	20	50	55,00
42	412,50	1	360,94	0,00	0,00	51,56	0,40	165,00	827,60	993,10	1	20	50	72,00

43	537,50	1	503,91	0,00	0,00	33,59	0,45	241,88	691,40	829,70	1	20	50	52,00
44	412,50	1	386,72	0,00	0,00	25,78	0,40	165,00	829,80	995,80	1	20	50	63,00
45	475,00	1	445,31	0,00	0,00	29,69	0,45	213,75	748,40	898,10	1	20	50	49,00
46	412,50	1	360,94	0,00	0,00	51,56	0,45	185,63	803,20	963,90	1	20	50	40,00
47	600,00	1	600,00	0,00	0,00	0,00	0,50	300,00	602,20	722,60	1	20	50	54,00
48	475,00	1	415,63	0,00	0,00	59,38	0,50	237,50	717,80	861,40	1	20	50	50,00
49	475,00	1	475,00	0,00	0,00	0,00	0,50	237,50	722,90	867,50	1	20	50	40,00
50	350,00	1	350,00	0,00	0,00	0,00	0,40	140,00	885,10	1062,10	1	20	50	47,00
51	412,50	1	386,72	0,00	0,00	25,78	0,45	185,63	805,50	966,50	1	20	50	38,00
52	350,00	1	306,25	0,00	0,00	43,75	0,50	175,00	839,90	1007,90	1	20	50	40,00
53	350,00	1	350,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	843,70	1012,40	1	20	50	35,00

Tabla A. 1 Diseño de Mezcla por Hossam S. Al-alaily, y otros, 2016

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
60	500,00	3	500,00	0,00	0,00	0,00	0,30	150,00	725,00	1087,00	1	27	0	96,50
61	500,00	3	475,00	0,00	0,00	25,00	0,30	150,00	721,00	1087,00	1	27	0	103,60
62	500,00	3	450,00	0,00	0,00	50,00	0,30	150,00	717,00	1087,00	1	27	0	116,80
63	500,00	3	400,00	0,00	0,00	100,00	0,30	150,00	708,00	1087,00	1	27	0	99,60
64	500,00	3	475,00	25,00	0,00	0,00	0,30	150,00	716,00	1087,00	1	27	0	106,50
65	500,00	3	450,00	50,00	0,00	0,00	0,30	150,00	707,00	1087,00	1	27	0	107,90
66	410,00	3	410,00	0,00	0,00	0,00	0,50	205,00	662,00	1081,00	1	27	0	52,10
67	410,50	3	390,00	0,00	0,00	20,50	0,50	205,00	659,00	1081,00	1	27	0	57,10
68	410,00	3	369,00	0,00	0,00	41,00	0,50	205,00	656,00	1081,00	1	27	0	66,20
69	410,00	3	328,00	0,00	0,00	82,00	0,50	205,00	653,00	1081,00	1	27	0	58,40
70	410,50	3	390,00	20,50	0,00	0,00	0,50	205,00	655,00	1081,00	1	27	0	54,30
71	410,00	3	369,00	41,00	0,00	0,00	0,50	205,00	648,00	1081,00	1	27	0	58,40

Tabla A. 2 Diseño de Mezcla por C.S. Poon, y otros, 2008

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
72	450,00	4	400,50	49,50	0,00	0,00	0,40	180,00	921,00	891,00	1	0	0	41,30
73	450,00	4	414,00	36,00	0,00	0,00	0,40	180,00	923,00	893,00	1	0	0	45,90
74	450,00	4	427,50	22,50	0,00	0,00	0,40	180,00	926,00	896,00	1	0	0	41,90
75	450,00	4	436,50	13,50	0,00	0,00	0,40	180,00	927,00	898,00	1	0	0	37,90
76	450,00	4	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	930,00	900,00	1	0	0	40,20
77	450,00	4	436,50	0,00	0,00	13,50	0,40	180,00	929,00	899,00	1	0	0	39,40
78	450,00	4	427,50	0,00	0,00	22,50	0,40	180,00	928,00	898,00	1	0	0	42,60
79	450,00	4	414,00	0,00	0,00	36,00	0,40	180,00	926,00	897,00	1	0	0	45,60

80	450,00	4	400,50	0,00	0,00	49,50	0,40	180,00	925,00	895,00	1	0	0	43,90
81	450,00	4	382,50	0,00	0,00	67,50	0,40	180,00	23,00	893,00	1	0	0	45,90
82	450,00	4	360,00	0,00	0,00	90,00	0,40	180,00	21,00	891,00	1	0	0	48,90
83	450,00	4	337,50	0,00	0,00	112,50	0,40	180,00	919,00	889,00	1	0	0	48,80

Tabla A. 3 Diseño de Mezcla por Assem A.A. Hassan, y otros, 2012

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
84	234,00	5	234,00	0,00	0,00	0,00	0,79	184,86	749,60	1124,40	1	0	0	29,00
85	550,50	5	83,00	0,00	467,50	0,00	0,41	225,50	567,20	850,80	1	0	0	14,64
86	319,00	5	319,00	0,00	0,00	0,00	0,58	185,02	672,40	1008,60	1	0	0	43,00
87	550,00	5	165,00	0,00	385,00	0,00	0,34	187,00	596,40	894,60	1	0	0	34,90
88	750,00	5	225,00	0,00	525,00	0,00	0,33	247,50	442,80	664,20	1	0	0	34,83
89	500,00	5	500,00	0,00	0,00	0,00	0,37	185,00	584,80	877,20	1	0	0	74,00
90	550,00	5	275,00	0,00	275,00	0,00	0,34	187,00	628,40	942,60	1	0	0	57,90
91	650,00	5	325,00	0,00	325,00	0,00	0,34	221,00	555,20	832,80	1	0	0	50,07
92	552,00	5	552,00	0,00	0,00	0,00	0,29	160,08	586,00	879,00	1	0	0	78,00
93	550,00	5	385,00	0,00	165,00	0,00	0,31	170,50	665,20	997,80	1	0	0	77,08
94	500,00	5	350,00	0,00	150,00	0,00	0,36	180,00	643,20	964,80	1	0	0	71,62
95	659,00	5	659,00	0,00	0,00	0,00	0,22	144,98	533,60	800,40	1	0	0	87,00
96	495,10	5	495,00	0,00	0,10	0,00	0,32	159,50	687,20	1030,80	1	0	0	86,41

Tabla A. 4 Diseño de Mezcla por P. Dinakar, y otros, 2008

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
97	310,00	601	310,00	0,00	0,00	0,00	0,50	155,00	695,00	1240,00	6	0	100	45,60
98	310,00	602	217,00	0,00	93,00	0,00	0,45	139,50	723,00	1228,00	6	0	100	38,40
99	310,00	603	310,00	0,00	0,00	0,00	0,50	155,00	708,00	1227,00	6	0	80	44,90
100	360,00	601	360,00	0,00	0,00	0,00	0,40	144,00	703,00	1193,00	6	0	90	54,90
101	380,00	602	266,00	0,00	114,00	0,00	0,35	133,00	699,00	1188,00	6	0	120	53,50
102	340,00	603	340,00	0,00	0,00	0,00	0,40	136,00	704,00	1220,00	6	0	120	55,10
103	360,00	601	360,00	0,00	0,00	0,00	0,45	162,00	721,00	1157,00	6	0	90	47,40
104	360,00	602	252,00	0,00	108,00	0,00	0,45	162,00	721,00	1157,00	6	0	90	42,80
105	360,00	603	360,00	0,00	0,00	0,00	0,45	162,00	687,00	1191,00	6	0	120	49,90

Tabla A. 5 Diseño de Mezcla por Y. Dhandapani y otros, 2018.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
106	350,00	7	350,00	0,00	0,00	0,00	0,37	129,50	960,00	973,90	1	23	80	55,00
107	350,00	7	332,50	0,00	0,00	0,00	0,37	129,50	960,00	971,60	1	23	85	53,50
108	350,00	7	315,00	0,00	0,00	0,00	0,37	129,50	960,00	969,60	1	23	90	52,30
109	350,00	7	297,50	0,00	0,00	0,00	0,37	129,50	960,00	967,40	1	23	85	49,30
110	350,00	7	280,00	0,00	0,00	0,00	0,37	129,50	960,00	965,30	1	23	80	45,20
111	350,00	7	350,00	0,00	0,00	0,00	0,45	157,50	950,00	912,30	1	23	75	42,90
112	350,00	7	332,50	0,00	0,00	0,00	0,45	157,50	950,00	910,20	1	23	80	45,10
113	350,00	7	315,00	0,00	0,00	0,00	0,45	157,50	950,00	908,10	1	23	80	37,90
114	350,00	7	297,50	0,00	0,00	0,00	0,45	157,50	950,00	906,00	1	23	80	36,40
115	350,00	7	280,00	0,00	0,00	0,00	0,45	157,50	950,00	903,90	1	23	75	33,00
116	350,00	7	350,00	0,00	0,00	0,00	0,55	192,50	1050,00	740,80	1	23	95	33,60
117	350,00	7	332,50	0,00	0,00	0,00	0,55	192,50	1050,00	738,70	1	23	100	31,70
118	350,00	7	315,00	0,00	0,00	0,00	0,55	192,50	1050,00	736,60	1	23	100	29,20
119	350,00	7	297,50	0,00	0,00	0,00	0,55	192,50	1050,00	734,50	1	23	95	25,60
120	350,00	7	280,00	0,00	0,00	0,00	0,55	192,50	1050,00	732,40	1	23	90	25,60

Tabla A. 6 Diseño de Mezcla por Ali A. Ramezaniapour, y otros, 2009.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
121	525,00	9	350,00	0,00	0,00	0,00	0,60	210,00	771,00	800,00	1	0	0	44,00
122	525,00	9	350,00	0,00	0,00	0,00	0,33	175,00	771,00	800,00	1	0	0	63,00
123	525,00	9	350,00	0,00	0,00	0,00	0,30	157,00	771,00	800,00	1	0	0	60,00
124	525,00	9	333,00	17,00	0,00	0,00	0,33	175,00	771,00	800,00	1	0	0	70,00
125	525,00	9	313,00	37,00	0,00	0,00	0,33	175,00	771,00	800,00	1	0	0	75,00
126	525,00	9	301,00	49,00	0,00	0,00	0,33	175,00	771,00	800,00	1	0	0	78,00
127	400,00	9	400,00	0,00	0,00	0,00	0,50	200,00	670,00	955,00	1	0	0	56,00
128	400,00	9	400,00	0,00	0,00	0,00	0,50	200,00	670,00	955,00	1	0	0	64,00

Tabla A. 7 Diseño de Mezcla por A. Kanellopoulos, y otros, 2012.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
129	600,00	10	600,00	0,00	0,00	0,00	0,30	180,00	1084,00	595,00	1	23	0	84,00
130	600,00	10	300,00	0,00	300,00	0,00	0,30	180,00	958,00	595,00	1	23	0	66,40
131	600,00	10	240,00	0,00	360,00	0,00	0,30	180,00	933,00	595,00	1	23	0	58,00
132	600,00	10	180,00	0,00	420,00	0,00	0,30	180,00	908,00	595,00	1	23	0	45,60
133	600,00	10	570,00	30,00	0,00	0,00	0,30	180,00	1072,00	595,00	1	23	0	95,30

134	600,00	10	540,00	60,00	0,00	0,00	0,30	180,00	1059,00	595,00	1	23	0	100,50
135	600,00	10	300,00	30,00	270,00	0,00	0,30	180,00	958,00	595,00	1	23	0	75,20
136	600,00	10	240,00	30,00	330,00	0,00	0,30	180,00	933,00	595,00	1	23	0	63,40
137	600,00	10	180,00	30,00	390,00	0,00	0,30	180,00	908,00	595,00	1	23	0	52,70
138	600,00	10	300,00	60,00	240,00	0,00	0,30	180,00	958,00	595,00	1	23	0	85,20
139	600,00	10	240,00	60,00	300,00	0,00	0,30	180,00	933,00	595,00	1	23	0	73,60
140	600,00	10	180,00	60,00	360,00	0,00	0,30	180,00	908,00	595,00	1	23	0	61,20
141	514,00	10	514,00	0,00	0,00	0,00	0,35	180,00	1131,00	621,00	1	23	0	83,00
142	514,00	10	257,00	0,00	257,00	0,00	0,35	180,00	1023,00	621,00	1	23	0	59,20
143	515,00	10	206,00	0,00	309,00	0,00	0,35	180,00	1001,00	621,00	1	23	0	52,60
144	514,00	10	154,00	0,00	360,00	0,00	0,35	180,00	980,00	621,00	1	23	0	39,80
145	515,00	10	489,00	26,00	0,00	0,00	0,35	180,00	1120,00	621,00	1	23	0	85,30
146	514,00	10	463,00	51,00	0,00	0,00	0,35	180,00	1110,00	621,00	1	23	0	91,60
147	514,00	10	257,00	26,00	231,00	0,00	0,35	180,00	1023,00	621,00	1	23	0	68,40
148	515,00	10	206,00	26,00	283,00	0,00	0,35	180,00	1001,00	621,00	1	23	0	57,40
149	514,00	10	154,00	26,00	334,00	0,00	0,35	180,00	980,00	621,00	1	23	0	45,90
150	514,00	10	257,00	51,00	206,00	0,00	0,35	180,00	1023,00	621,00	1	23	0	75,40
151	514,00	10	206,00	51,00	257,00	0,00	0,35	180,00	1001,00	621,00	1	23	0	64,70
152	514,00	10	154,00	51,00	309,00	0,00	0,35	180,00	908,00	621,00	1	23	0	51,10
153	450,00	10	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	1166,00	640,00	1	23	0	72,40
154	450,00	10	225,00	0,00	225,00	0,00	0,40	180,00	1072,00	640,00	1	23	0	41,90
155	450,00	10	180,00	0,00	270,00	0,00	0,40	180,00	1053,00	640,00	1	23	0	35,70
156	450,00	10	135,00	0,00	315,00	0,00	0,40	180,00	1034,00	640,00	1	23	0	31,70
157	451,00	10	428,00	23,00	0,00	0,00	0,40	180,00	1157,00	640,00	1	23	0	75,30
158	450,00	10	405,00	45,00	0,00	0,00	0,40	180,00	1147,00	640,00	1	23	0	79,00
159	451,00	10	225,00	23,00	203,00	0,00	0,40	180,00	1072,00	640,00	1	23	0	51,50
160	451,00	10	180,00	23,00	248,00	0,00	0,40	180,00	1053,00	640,00	1	23	0	39,20
161	451,00	10	135,00	23,00	293,00	0,00	0,40	180,00	1034,00	640,00	1	23	0	28,20
162	450,00	10	225,00	45,00	180,00	0,00	0,40	180,00	1072,00	640,00	1	23	0	60,30
163	450,00	10	180,00	45,00	225,00	0,00	0,40	180,00	1053,00	640,00	1	23	0	49,10
164	450,00	10	135,00	45,00	270,00	0,00	0,40	180,00	1034,00	640,00	1	23	0	33,10

Tabla A. 8 Diseño de Mezcla por W. Wongkeo y otros, 2014.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
165	550,00	11	495,00	0,00	55,00	0,00	0,30	165,00	836,00	907,00	1	27	0	78,97
166	550,00	11	385,00	0,00	165,00	0,00	0,30	165,00	818,00	888,00	1	27	0	88,06
167	550,00	11	275,00	0,00	275,00	0,00	0,30	165,00	800,00	869,00	1	27	0	60,83
168	550,00	11	165,00	0,00	385,00	0,00	0,30	165,00	783,00	848,00	1	27	0	44,21

Tabla A. 9 Diseño de Mezcla por P. Dinakar, y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
169	380,00	1210	380,00	0,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	42,30
170	380,00	1210	323,00	0,00	57,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	42,50
171	380,00	1210	266,00	0,00	114,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	32,90
172	380,00	1210	323,00	0,00	57,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	42,20
173	380,00	1210	342,00	38,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	51,50
174	380,00	1210	304,00	76,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	61,80
175	380,00	1210	342,00	38,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	50,10
176	380,00	1210	332,50	0,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	42,10
177	380,00	1210	285,00	0,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	41,80
178	380,00	1210	285,00	38,00	57,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	52,90
179	380,00	1210	380,00	0,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	41,20
180	380,00	1210	323,00	0,00	57,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	35,30
181	380,00	1210	342,00	38,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	49,30
182	380,00	1210	285,00	38,00	57,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	50,50
183	550,00	1210	550,00	0,00	0,00	0,00	0,28	154,00	609,00	763,00	1	0	0	57,90
184	550,00	1210	467,50	0,00	82,50	0,00	0,28	154,00	609,00	763,00	1	0	0	63,30
185	550,00	1210	495,00	55,00	0,00	0,00	0,28	154,00	609,00	763,00	1	0	0	71,00
186	550,00	1210	412,50	55,00	82,50	0,00	0,28	154,00	609,00	763,00	1	0	0	58,20
187	380,00	1220	380,00	0,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	38,20
188	380,00	1220	323,00	0,00	57,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	32,50
189	380,00	1200	342,00	38,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	43,50
190	380,00	1220	332,50	0,00	0,00	0,00	0,43	164,00	850,00	1014,00	1	0	0	37,60

Tabla A. 10 Diseño de Mezcla por Hwan Oh, y otros, 2002.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
191	550,00	13	550,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	869,00	778,00	1	20	0	78,89
192	550,00	13	467,00	0,00	83,00	0,00	0,33	182,00	865,00	762,00	1	20	0	74,21
193	550,00	13	412,00	0,00	138,00	0,00	0,33	182,00	887,00	752,00	1	20	0	73,36
194	550,00	13	357,00	0,00	193,00	0,00	0,33	182,00	878,00	742,00	1	20	0	67,47
195	550,00	13	440,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	866,00	775,00	1	20	0	78,48
196	550,00	13	330,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	863,00	739,00	1	20	0	74,77
197	550,00	13	220,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	861,00	769,00	1	20	0	71,59
198	550,00	13	495,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	866,00	775,00	1	20	0	69,30
199	550,00	13	440,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	863,00	771,00	1	20	0	65,17
200	550,00	13	385,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	860,00	768,00	1	20	0	60,21
201	550,00	13	495,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	866,00	775,00	1	20	0	72,09
202	550,00	13	440,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	963,00	772,00	1	20	0	65,91
203	550,00	13	385,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	861,00	769,00	1	20	0	62,20

204	550,00	13	495,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	867,00	777,00	1	20	0	76,28
205	550,00	13	440,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	865,00	774,00	1	20	0	73,47
206	550,00	13	385,00	0,00	0,00	0,00	0,33	182,00	863,00	775,00	1	20	0	70,80

Tabla A. 11 Diseño de Mezcla por M. Uysal, y otros, 2012

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
207	519,50	15	409,50	110,00	0,00	0,00	0,36	185,00	464,40	374,10	1	0	0	59,40
208	519,50	15	409,50	110,00	0,00	0,00	0,36	185,00	464,40	361,20	1	0	0	61,30
209	519,50	15	409,50	110,00	0,00	0,00	0,36	185,00	464,40	361,20	1	0	0	65,00
210	519,50	15	409,50	110,00	0,00	0,00	0,36	185,00	464,40	361,20	1	0	0	64,30

Tabla A. 12 Diseño de Mezcla por S. Yehia, y otros, 2016.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
211	328,00	16	328,00	0,00	0,00	0,00	0,54	177,00	830,00	1000,00	1	20	70	33,50
212	373,00	16	261,00	0,00	112,00	0,00	0,49	180,00	810,00	975,00	1	20	80	41,00
213	373,00	16	261,00	0,00	112,00	0,00	0,46	172,00	815,00	980,00	1	20	90	40,50
214	373,00	16	261,00	0,00	112,00	0,00	0,44	163,00	820,00	980,00	1	20	70	46,50
215	362,00	16	362,00	0,00	0,00	0,00	0,48	175,00	800,00	970,00	1	20	50	48,50
216	411,00	16	288,00	0,00	123,00	0,00	0,41	169,00	780,00	940,00	1	20	70	46,00
217	411,00	16	288,00	0,00	123,00	0,00	0,42	172,00	785,00	945,00	1	20	75	44,00
218	411,00	16	288,00	0,00	123,00	0,00	0,42	172,00	790,00	950,00	1	20	65	52,00
219	611,00	16	611,00	0,00	0,00	0,00	0,25	146,00	600,00	970,00	1	20	100	79,50
220	694,00	16	486,00	0,00	208,00	0,00	0,25	162,00	555,00	895,00	1	20	100	84,00
221	694,00	16	486,00	0,00	208,00	0,00	0,30	153,00	565,00	905,00	1	20	100	72,50
222	694,00	16	486,00	0,00	208,00	0,00	0,22	142,00	570,00	915,00	1	20	50	71,00

Tabla A. 13 Diseño de Mezcla por P. Chindapasirt, y otros, 2007.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
223	350,00	17	350,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	870,00	870,00	1	0	0	38,00
224	350,00	17	297,50	0,00	52,50	0,00	0,50	175,00	870,00	870,00	1	0	0	36,60
225	350,00	17	245,00	0,00	105,00	0,00	0,50	175,00	870,00	870,00	1	0	0	28,70

Tabla A. 14 Diseño de Mezcla por Najimi, y otros, 2012

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
226	493,00	18	493,00	0,00	0,00	0,00	0,35	173,00	659,00	925,00	4	0	0	41,50
227	493,00	18	419,00	0,00	74,00	0,00	0,35	173,00	648,00	910,00	4	0	0	40,50
228	493,00	18	345,00	0,00	148,00	0,00	0,35	173,00	638,00	895,00	4	0	0	37,50
229	493,00	18	493,00	0,00	0,00	0,00	0,35	173,00	637,00	925,00	4	0	0	41,00
230	493,00	18	419,00	0,00	74,00	0,00	0,35	173,00	627,00	910,00	4	0	0	36,50
231	493,00	18	345,00	0,00	148,00	0,00	0,35	173,00	617,00	895,00	4	0	0	34,00
232	493,00	18	493,00	0,00	0,00	0,00	0,35	173,00	616,00	925,00	4	0	0	37,50
233	493,00	18	419,00	0,00	74,00	0,00	0,35	173,00	606,00	910,00	4	0	0	35,50
234	493,00	18	345,00	0,00	148,00	0,00	0,35	173,00	596,00	895,00	4	0	0	35,50
235	493,00	18	493,00	0,00	0,00	0,00	0,35	173,00	587,00	925,00	4	0	0	32,00
236	493,00	18	419,00	0,00	74,00	0,00	0,35	173,00	577,00	910,00	4	0	0	34,50
237	493,00	18	345,00	0,00	148,00	0,00	0,35	173,00	568,00	895,00	4	0	0	32,00

Tabla A. 15 Diseño de Mezcla por J. Sim, y otros, 2011.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
238	315,00	2010	315,00	0,00	0,00	0,00	0,60	189,00	981,00	981,00	8	20	125	21,80
239	465,00	2010	315,00	0,00	0,00	0,00	0,44	205,00	900,00	900,00	8	20	0	26,40
240	350,00	2020	350,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	962,00	962,00	8	20	50	50,80
241	490,00	2020	350,00	0,00	0,00	0,00	0,39	191,00	888,00	888,00	8	20	0	49,60
242	450,00	2020	450,00	0,00	0,00	0,00	0,36	164,00	751,00	751,00	8	20	140	68,60
243	520,00	2020	450,00	0,00	0,00	0,00	0,36	189,00	884,00	884,00	8	20	0	69,20

Tabla A. 16 Diseño de Mezcla por Assié, y otros, 2007

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
244	525,00	23	350,00	0,00	0,00	0,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	62,30
245	525,00	23	326,00	0,00	0,00	24,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	62,90
246	525,00	23	313,00	0,00	0,00	37,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	67,20
247	525,00	23	301,00	0,00	0,00	49,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	73,40
248	525,00	23	280,00	0,00	0,00	70,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	74,90
249	525,00	23	350,00	0,00	0,00	24,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	67,60
250	525,00	23	350,00	0,00	0,00	37,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	81,20
251	525,00	23	350,00	0,00	0,00	49,00	0,40	210,00	1050,00	500,00	1	20	0	79,80

252 525,00 23 350,00 0,00 0,00 70,00 0,40 210,00 1050,00 500,00 1 20 0 91,00

Tabla A. 17 Diseño de Mezcla por Badogiannis , y otros, 2015.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
253	340,00	24	340,00	0,00	0,00	0,00	0,57	195,00	715,00	1105,00	5	20	65	45,50
254	465,00	24	465,00	0,00	0,00	0,00	0,42	196,00	620,00	1085,00	5	20	80	61,80
255	400,00	24	280,00	0,00	120,00	0,00	0,48	190,00	695,00	1045,00	5	20	50	42,90
256	470,00	24	375,00	0,00	95,00	0,00	0,36	169,00	625,00	1110,00	5	20	60	68,50
257	550,00	24	285,00	0,00	0,00	0,00	0,33	180,00	875,00	770,00	5	20	0	50,90
258	550,00	24	320,00	0,00	0,00	0,00	0,30	167,00	915,00	750,00	5	20	0	56,90
259	480,00	24	335,00	0,00	145,00	0,00	0,41	195,00	875,00	770,00	5	20	0	49,90
260	510,00	24	410,00	0,00	100,00	0,00	0,35	177,00	915,00	750,00	5	20	0	71,30
261	360,00	24	360,00	0,00	0,00	0,00	0,58	210,00	990,00	770,00	5	20	0	41,60
262	475,00	24	475,00	0,00	0,00	0,00	0,41	196,00	930,00	750,00	5	20	0	66,80

Tabla A. 18 Diseño de Mezcla por W. Zhu, y otros, 2002.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
263	550,00	25	465,00	0,00	85,00	0,00	0,41	227,70	910,00	590,00	1	31	0	35,19
264	550,00	25	440,00	0,00	110,00	0,00	0,42	228,60	910,00	590,00	1	32	0	33,15
265	550,00	25	415,00	0,00	135,00	0,00	0,42	233,30	910,00	590,00	1	32	0	31,47
266	550,00	25	385,00	0,00	165,00	0,00	0,43	234,40	910,00	590,00	1	33	0	30,66
267	550,00	25	355,00	0,00	195,00	0,00	0,44	242,60	910,00	590,00	1	32	0	29,62

Tabla A. 19 Diseño de Mezcla por R. Siddique, 2011.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
268	620,00	26	620,00	0,00	0,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	51,91
269	620,00	26	540,00	0,00	80,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	54,90
270	620,00	26	496,00	0,00	124,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	48,94
271	620,00	26	434,00	0,00	186,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	47,34
272	620,00	26	372,00	0,00	248,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	40,28
273	620,00	26	310,00	0,00	310,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	34,31
274	620,00	26	465,00	0,00	155,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	53,08
275	620,00	26	434,00	31,00	155,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	58,36

276	620,00	26	403,00	62,00	155,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	67,10
277	620,00	26	372,00	93,00	155,00	0,00	0,38	235,60	780,00	720,00	1	0	0	62,17

Tabla A. 20 Diseño de Mezcla por H.Y. Leung, y otros, 2016.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
278	400,00	27	240,00	0,00	160,00	0,00	0,40	160,00	736,00	1104,00	1	20	0	45,45
279	400,00	27	240,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	736,00	1104,00	1	20	0	41,40
280	400,00	27	240,00	0,00	0,00	0,00	0,34	136,00	746,00	1118,00	1	20	0	49,95
281	400,00	27	240,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	746,00	1104,00	1	20	0	42,75
282	400,00	27	240,00	0,00	160,00	0,00	0,40	160,00	736,00	1104,00	3	0	0	48,15
283	400,00	27	240,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	736,00	1104,00	3	0	0	40,05
284	400,00	27	240,00	0,00	0,00	0,00	0,34	136,00	746,00	1118,00	3	0	0	49,05
285	400,00	27	240,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	746,00	1104,00	3	0	0	43,65

Tabla A. 21 Diseño de Mezcla por Z. Zhang, y otros, 2016.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
286	400,00	28	400,00	0,00	0,00	0,00	0,35	140,00	38,00	68,00	5	0	80	31,05
287	400,00	28	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	70	24,30
288	400,00	28	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	38,00	68,00	5	0	150	21,15
289	400,00	28	400,00	0,00	0,00	0,00	0,50	200,00	38,00	68,00	5	0	180	15,75
290	400,00	28	360,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	60	34,20
291	400,00	28	320,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	80	23,40
292	400,00	28	280,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	60	19,80
293	400,00	28	380,00	0,00	0,00	20,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	60	28,80
294	400,00	28	370,00	0,00	0,00	30,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	50	30,60
295	400,00	28	360,00	0,00	0,00	40,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	80	35,10
296	400,00	28	380,00	20,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	50	30,15
297	400,00	28	360,00	40,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	55	37,35
298	400,00	28	340,00	60,00	0,00	0,00	0,40	160,00	38,00	68,00	5	0	80	34,20

Tabla A. 22 Diseño de Mezcla por Valipour, y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
299	485,00	29	485,00	0,00	0,00	0,00	0,30	145,00	689,00	1148,33	1	20	65	72,90
300	485,00	29	449,00	36,00	0,00	0,00	0,30	145,00	673,00	1140,68	1	20	60	79,97
301	485,00	29	412,00	73,00	0,00	0,00	0,30	145,00	652,00	1143,86	1	20	75	88,06
302	486,00	29	243,00	0,00	0,00	0,00	0,30	145,00	676,00	1165,52	1	20	80	71,88
303	486,00	29	146,00	0,00	0,00	0,00	0,30	145,00	665,00	1166,67	1	20	70	56,79
304	485,00	29	206,00	36,00	0,00	0,00	0,30	145,00	657,00	1113,56	1	20	85	77,13
305	485,00	29	388,00	0,00	97,00	0,00	0,30	145,00	668,00	1151,72	1	20	85	57,96
306	485,00	29	291,00	0,00	194,00	0,00	0,30	145,00	646,00	1153,57	1	20	85	42,28
307	485,00	29	352,00	36,00	97,00	0,00	0,30	145,00	652,00	1143,86	1	20	90	68,74
308	484,00	29	255,00	35,00	194,00	0,00	0,30	145,00	633,00	1150,91	1	20	80	55,40

Tabla A. 23 Diseño de Mezcla por Elahi, y otros, 2010.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
309	265,00	30	265,00	0,00	0,00	0,00	0,66	175,00	923,00	1040,00	1	0	0	27,90
310	315,00	30	315,00	0,00	0,00	0,00	0,56	175,00	880,00	1040,00	1	0	0	35,10
311	360,00	30	360,00	0,00	0,00	0,00	0,49	175,00	842,00	1040,00	1	0	0	45,90
312	265,00	30	132,50	0,00	0,00	0,00	0,66	175,00	913,00	1040,00	1	0	0	26,10
313	315,00	30	157,50	0,00	0,00	0,00	0,56	175,00	869,00	1040,00	1	0	0	33,30
314	360,00	30	180,00	0,00	0,00	0,00	0,49	175,00	829,00	1040,00	1	0	0	41,40
315	265,00	30	252,00	13,00	0,00	0,00	0,66	175,00	917,00	1040,00	1	0	0	34,20
316	315,00	30	300,00	15,00	0,00	0,00	0,56	175,00	874,00	1040,00	1	0	0	43,65
317	360,00	30	342,00	18,00	0,00	0,00	0,49	175,00	835,00	1040,00	1	0	0	49,50
318	265,00	30	238,00	27,00	0,00	0,00	0,66	175,00	911,00	1040,00	1	0	0	40,05
319	315,00	30	283,00	32,00	0,00	0,00	0,56	175,00	867,00	1040,00	1	0	0	51,30
320	360,00	30	324,00	36,00	0,00	0,00	0,49	175,00	827,00	1040,00	1	0	0	57,60
321	290,00	30	265,00	25,00	0,00	0,00	0,60	175,00	891,00	1040,00	1	0	0	50,40
322	345,00	30	315,00	30,00	0,00	0,00	0,51	175,00	843,00	1040,00	1	0	0	60,30
323	395,00	30	360,00	35,00	0,00	0,00	0,44	175,00	798,00	1040,00	1	0	0	67,50
324	265,00	30	105,00	25,00	0,00	0,00	0,66	175,00	902,00	1040,00	1	0	0	33,30
325	315,00	30	125,00	30,00	0,00	0,00	0,56	175,00	856,00	1040,00	1	0	0	43,20
326	360,00	30	145,00	35,00	0,00	0,00	0,49	175,00	815,00	1040,00	1	0	0	47,70

Tabla A. 24 Diseño de Mezcla por M.G. Alexander, y otros, 1999.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
327	347,00	3210	347,00	0,00	0,00	0,00	0,38	132,00	864,00	1039,00	1	0	200	59,00
328	356,00	3210	157,00	0,00	199,00	0,00	0,31	109,00	827,00	1152,00	1	0	180	68,00
329	304,00	3210	304,00	0,00	0,00	0,00	0,46	139,00	830,00	1068,00	1	0	220	49,00
330	349,00	3210	154,00	0,00	195,00	0,00	0,35	123,00	768,00	1129,00	1	0	220	52,00
331	343,00	3210	152,00	0,00	191,00	0,00	0,38	130,00	772,00	698,00	1	0	160	26,00
332	345,00	3210	153,00	0,00	192,00	0,00	0,39	136,00	755,00	609,00	1	0	125	21,00
333	345,00	3210	153,00	0,00	192,00	0,00	0,38	131,00	757,00	726,00	1	0	130	31,00
334	367,00	3220	154,00	0,00	213,00	0,00	0,33	120,00	645,00	1198,00	1	0	160	32,00
335	356,00	3230	149,00	0,00	207,00	0,00	0,33	118,00	631,00	1173,00	1	0	180	38,00
336	363,00	3230	152,00	0,00	211,00	0,00	0,33	119,00	645,00	1203,00	1	0	85	37,00
337	366,00	3230	154,00	0,00	212,00	0,00	0,33	120,00	650,00	1209,00	1	0	100	37,00
338	361,00	3230	152,00	0,00	209,00	0,00	0,33	119,00	638,00	1187,00	1	0	110	33,00
339	360,00	3230	151,00	0,00	209,00	0,00	0,33	118,00	639,00	1188,00	1	0	145	39,00

Tabla A. 25 Diseño de Mezcla por E.G. Moffatt, y otros, 2017.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
340	1104,00	33	960,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	116,00
341	1104,00	33	960,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	116,00
342	1104,00	33	960,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	116,00
343	1104,00	33	768,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	121,00
344	1104,00	33	768,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	121,00
345	1104,00	33	768,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	121,00
346	1104,00	33	576,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	118,00
347	1104,00	33	576,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	118,00
348	1104,00	33	576,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	118,00
349	1104,00	33	384,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	110,00
350	1104,00	33	384,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	110,00
351	1104,00	33	384,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	110,00
352	1104,00	33	192,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	102,00
353	1104,00	33	192,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	102,00
354	1104,00	33	192,00	144,00	0,00	0,00	0,15	163,00	902,00	0,00	1	23	0	102,00

Tabla A. 26 Diseño de Mezcla por Ganesh, y otros, 2019.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
355	380,00	36	380,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	38,80
356	380,00	36	361,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	34,50
357	380,00	36	342,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	37,00
358	380,00	36	323,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	39,15
359	380,00	36	304,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	37,20
360	380,00	36	285,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	35,50
361	380,00	36	266,00	0,00	0,00	0,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	33,90
362	380,00	36	361,00	0,00	0,00	19,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	36,10
363	380,00	36	342,00	0,00	0,00	38,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	39,10
364	380,00	36	323,00	0,00	0,00	57,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	44,80
365	380,00	36	304,00	0,00	0,00	76,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	43,70
366	380,00	36	285,00	0,00	0,00	95,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	38,20
367	380,00	36	266,00	0,00	0,00	114,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	36,20
368	380,00	36	342,00	0,00	0,00	19,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	35,60
369	380,00	36	304,00	0,00	0,00	38,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	38,45
370	380,00	36	266,00	0,00	0,00	57,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	42,60
371	380,00	36	228,00	0,00	0,00	76,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	43,00
372	380,00	36	190,00	0,00	0,00	95,00	0,50	190,00	755,00	685,00	1	0	0	37,70

Tabla A. 27 Diseño de Mezcla por Kannan V, 2018.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
373	400,00	38	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	53,00
374	400,00	38	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	51,50
375	400,00	38	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	50,25
376	400,00	38	368,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	50,50
377	400,00	38	368,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	51,00
378	400,00	38	368,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	48,00
379	400,00	38	336,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	47,00
380	400,00	38	336,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	45,50
381	400,00	38	336,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	43,75
382	400,00	38	304,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	43,25
383	400,00	38	304,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	40,50
384	400,00	38	304,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	788,00	1044,00	1	0	0	37,75
385	400,00	38	368,00	0,00	0,00	0,00	0,43	172,00	792,00	1051,00	1	0	0	52,50
386	400,00	38	368,00	0,00	0,00	0,00	0,43	172,00	792,00	1051,00	1	0	0	50,50
387	400,00	38	368,00	0,00	0,00	0,00	0,43	172,00	792,00	1051,00	1	0	0	50,75
388	400,00	38	336,00	0,00	0,00	0,00	0,39	156,00	799,00	1060,00	1	0	0	54,25
389	400,00	38	336,00	0,00	0,00	0,00	0,39	156,00	799,00	1060,00	1	0	0	52,75

390	400,00	38	336,00	0,00	0,00	0,00	0,39	156,00	799,00	1060,00	1	0	0	51,25
391	400,00	38	304,00	0,00	0,00	0,00	0,35	140,00	806,00	1069,00	1	0	0	52,25
392	400,00	38	304,00	0,00	0,00	0,00	0,35	140,00	806,00	1069,00	1	0	0	53,50
393	400,00	38	304,00	0,00	0,00	0,00	0,35	140,00	806,00	1069,00	1	0	0	50,25

Tabla A. 28 Diseño de Mezcla por Sun, y otros, 2018.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
394	420,00	39	420,00	0,00	0,00	0,00	0,38	159,60	876,00	876,00	1	0	125	57,60
395	420,00	39	409,50	10,50	0,00	0,00	0,38	159,60	874,00	874,00	1	0	125	65,70
396	420,00	39	399,00	21,00	0,00	0,00	0,38	159,60	872,00	872,00	1	0	125	68,85
397	420,00	39	388,50	31,50	0,00	0,00	0,38	159,60	870,00	870,00	1	0	125	43,20
398	420,00	39	378,00	42,00	0,00	0,00	0,38	159,60	869,00	869,00	1	0	125	72,00
399	420,00	39	357,00	0,00	0,00	0,00	0,38	159,60	873,00	873,00	1	0	125	55,35
400	420,00	39	294,00	0,00	0,00	0,00	0,38	159,60	870,00	870,00	1	0	125	48,60
401	420,00	39	210,00	0,00	0,00	0,00	0,38	159,60	866,00	866,00	1	0	125	35,10
402	420,00	39	346,50	10,50	0,00	0,00	0,38	159,60	872,00	872,00	1	0	125	56,70
403	420,00	39	336,00	21,00	0,00	0,00	0,38	159,60	870,00	870,00	1	0	125	59,40
404	420,00	39	325,50	31,50	0,00	0,00	0,38	159,60	868,00	868,00	1	0	125	60,30
405	420,00	39	283,50	10,50	0,00	0,00	0,38	159,60	869,00	869,00	1	0	125	50,40
406	420,00	39	273,00	21,00	0,00	0,00	0,38	159,60	867,00	867,00	1	0	125	46,80
407	420,00	39	262,50	31,50	0,00	0,00	0,38	159,60	865,00	865,00	1	0	125	50,40
408	420,00	39	199,50	10,50	0,00	0,00	0,38	159,60	865,00	865,00	1	0	125	32,85
409	420,00	39	189,00	21,00	0,00	0,00	0,38	159,60	863,00	863,00	1	0	125	36,00
410	420,00	39	178,50	31,50	0,00	0,00	0,38	159,60	861,00	861,00	1	0	125	35,10

Tabla A. 29 Diseño de Mezcla por Reza Bagheri, y otros, 2012.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
411	488,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	632,00	1076,00	1	0	0	40,20
412	359,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	739,00	1055,00	1	0	0	32,80
413	284,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	802,00	1043,00	1	0	0	20,40
414	488,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	632,00	1076,00	1	0	0	45,80
415	359,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	739,00	1055,00	1	0	0	40,70
416	284,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	802,00	1043,00	1	0	0	24,10
417	488,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	632,00	1076,00	1	0	0	53,70
418	359,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	739,00	1055,00	1	0	0	47,30
419	284,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	802,00	1043,00	1	0	0	27,60
420	488,00	41	49,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	614,00	1076,00	1	0	0	49,90

421	359,00	41	36,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	726,00	1055,00	1	0	0	34,20
422	283,00	41	28,00	0,00	0,00	0,00	0,65	183,95	791,00	1043,00	1	0	0	19,60
423	488,00	41	49,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	614,00	1076,00	1	0	0	60,10
424	359,00	41	36,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	726,00	1055,00	1	0	0	43,20
425	283,00	41	28,00	0,00	0,00	0,00	0,65	183,95	791,00	1043,00	1	0	0	26,00
426	488,00	41	49,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	614,00	1076,00	1	0	0	68,10
427	359,00	41	36,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	726,00	1055,00	1	0	0	46,90
428	283,00	41	28,00	0,00	0,00	0,00	0,65	183,95	791,00	1043,00	1	0	0	31,70
429	488,00	41	98,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	596,00	1076,00	1	0	0	62,00
430	359,00	41	72,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	713,00	1055,00	1	0	0	42,30
431	284,00	41	57,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	781,00	1043,00	1	0	0	20,10
432	488,00	41	98,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	596,00	1076,00	1	0	0	68,20
433	359,00	41	72,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	713,00	1055,00	1	0	0	47,70
434	284,00	41	57,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	781,00	1043,00	1	0	0	24,50
435	488,00	41	98,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	596,00	1076,00	1	0	0	72,00
436	359,00	41	72,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	713,00	1055,00	1	0	0	52,30
437	284,00	41	57,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	781,00	1043,00	1	0	0	33,20
438	488,00	41	146,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	579,00	1076,00	1	0	0	58,70
439	359,00	41	108,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	700,00	1055,00	1	0	0	41,20
440	284,00	41	85,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	771,00	1043,00	1	0	0	21,90
441	488,00	41	146,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	579,00	1076,00	1	0	0	61,30
442	359,00	41	108,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	700,00	1055,00	1	0	0	44,90
443	284,00	41	85,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	771,00	1043,00	1	0	0	23,20
444	488,00	41	146,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	579,00	1076,00	1	0	0	67,40
445	359,00	41	108,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,50	700,00	1055,00	1	0	0	50,10
446	284,00	41	85,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	771,00	1043,00	1	0	0	29,90
447	488,00	41	0,00	0,00	171,00	0,00	0,35	170,80	572,00	1076,00	1	0	0	54,90
448	359,00	41	0,00	0,00	126,00	0,00	0,50	179,50	695,00	1055,00	1	0	0	23,80
449	283,00	41	0,00	0,00	99,00	0,00	0,65	183,95	767,00	1043,00	1	0	0	13,80
450	488,00	41	0,00	0,00	171,00	0,00	0,35	170,80	572,00	1076,00	1	0	0	55,10
451	359,00	41	0,00	0,00	126,00	0,00	0,50	179,50	695,00	1055,00	1	0	0	28,50
452	283,00	41	0,00	0,00	99,00	0,00	0,65	183,95	767,00	1043,00	1	0	0	14,20
453	488,00	41	0,00	0,00	171,00	0,00	0,35	170,80	572,00	1076,00	1	0	0	58,20
454	359,00	41	0,00	0,00	126,00	0,00	0,50	179,50	695,00	1055,00	1	0	0	36,60
455	283,00	41	0,00	0,00	99,00	0,00	0,65	183,95	767,00	1043,00	1	0	0	16,70
456	488,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	616,00	1076,00	1	0	0	46,30
457	358,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,00	728,00	1055,00	1	0	0	30,80
458	284,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	793,00	1043,00	1	0	0	20,20
459	488,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	616,00	1076,00	1	0	0	49,30
460	358,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,00	728,00	1055,00	1	0	0	32,80
461	284,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	793,00	1043,00	1	0	0	21,80
462	488,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	170,80	616,00	1076,00	1	0	0	52,80
463	358,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	179,00	728,00	1055,00	1	0	0	35,20
464	284,00	41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	184,60	793,00	1043,00	1	0	0	23,20

Tabla A. 30 Diseño de Mezcla por Gastaldini , y otros 2010.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
465	425,00	42	425,00	0,00	0,00	0,00	0,38	161,50	930,00	900,00	1	23	0	31,95
466	430,00	42	215,00	0,00	215,00	0,00	0,38	163,40	925,00	905,00	1	23	0	18,36
467	430,00	42	215,00	0,00	215,00	0,00	0,38	163,40	925,00	905,00	1	23	0	16,38
468	425,00	42	215,00	0,00	105,00	0,00	0,38	161,50	920,00	905,00	1	23	0	33,21
469	425,00	42	215,00	0,00	105,00	0,00	0,38	161,50	920,00	905,00	1	23	0	33,21
470	425,00	42	215,00	25,00	100,00	0,00	0,38	161,50	915,00	915,00	1	23	0	22,23
471	425,00	42	215,00	0,00	100,00	0,00	0,38	161,50	915,00	915,00	1	23	0	19,98

Tabla A. 31 Diseño de Mezcla por Nehdi, y otros, 2004.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
472	372,00	43	372,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	130	35,37
473	372,00	43	280,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	140	37,26
474	372,00	43	186,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	165	31,77
475	372,00	43	280,00	0,00	92,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	215	28,35
476	372,00	43	156,00	0,00	216,00	0,00	0,35	130,00	681,00	1209,00	1	0	120	28,89
477	372,20	43	335,00	37,20	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	65	43,56
478	372,00	43	372,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	130	29,34
479	372,00	43	280,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	140	25,83
480	372,00	43	186,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	165	14,76
481	372,00	43	280,00	0,00	92,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	215	20,70
482	372,00	43	156,00	0,00	216,00	0,00	0,35	130,00	681,00	1209,00	1	0	120	18,90
483	372,20	43	335,00	37,20	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	65	34,83
484	372,00	43	372,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	130	33,57
485	372,00	43	280,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	140	32,85
486	372,00	43	186,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	165	26,73
487	372,00	43	280,00	0,00	92,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	215	26,91
488	372,00	43	156,00	0,00	216,00	0,00	0,35	130,00	681,00	1209,00	1	0	120	24,93
489	372,20	43	335,00	37,20	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	65	35,64
490	372,00	43	372,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	130	31,68
491	372,00	43	280,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	140	28,62
492	372,00	43	186,00	0,00	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	165	21,96
493	372,00	43	280,00	0,00	92,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	215	22,59
494	372,00	43	156,00	0,00	216,00	0,00	0,35	130,00	681,00	1209,00	1	0	120	32,49
495	372,20	43	335,00	37,20	0,00	0,00	0,50	186,00	655,00	1165,00	1	0	65	34,74

Tabla A. 32 Diseño de Mezcla por Ramezianpour, 1995.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
496	300,00	4510	300,00	0,00	0,00	0,00	0,70	210,00	760,00	1020,00	1	0	85	29,60
497	300,00	4520	300,00	0,00	0,00	0,00	0,70	210,00	760,00	1020,00	1	0	90	35,10
498	300,00	4530	300,00	0,00	0,00	0,00	0,70	210,00	760,00	1020,00	1	0	95	37,60
499	300,00	4540	300,00	0,00	0,00	0,00	0,70	210,00	760,00	1020,00	1	0	70	28,10
500	350,00	4510	350,00	0,00	0,00	0,00	0,60	210,00	710,00	1030,00	1	0	80	34,50
501	350,00	4520	350,00	0,00	0,00	0,00	0,60	210,00	710,00	1030,00	1	0	80	36,90
502	350,00	4530	350,00	0,00	0,00	0,00	0,60	210,00	710,00	1030,00	1	0	80	26,90
503	350,00	4540	350,00	0,00	0,00	0,00	0,60	210,00	710,00	1030,00	1	0	85	29,30
504	400,00	4510	400,00	0,00	0,00	0,00	0,53	210,00	640,00	1060,00	1	0	90	32,10
505	400,00	4520	400,00	0,00	0,00	0,00	0,53	210,00	640,00	1060,00	1	0	60	18,83
506	400,00	4530	400,00	0,00	0,00	0,00	0,53	210,00	640,00	1060,00	1	0	65	21,50
507	400,00	4540	400,00	0,00	0,00	0,00	0,53	210,00	640,00	1060,00	1	0	70	23,50

Tabla A. 33 Diseño de Mezcla por Shaker, y otros, 2018.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
508	420,00	46	336,42	0,00	0,00	83,58	0,37	155,40	964,94	868,45	1	23	0	67,32
509	480,00	46	455,52	0,00	0,00	24,48	0,37	177,60	914,42	822,98	1	23	0	66,60
510	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	1	23	0	68,85
511	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	1	23	0	70,02
512	480,00	46	384,48	0,00	0,00	95,52	0,43	206,40	867,89	781,10	1	23	0	65,25
513	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,45	202,50	890,19	801,18	1	23	0	60,57
514	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,35	157,50	951,77	856,59	1	23	0	70,47
515	400,00	46	350,00	0,00	0,00	50,00	0,40	160,00	970,70	873,63	1	23	0	55,89
516	420,00	46	398,58	0,00	0,00	21,42	0,37	155,40	971,17	874,05	1	23	0	48,69
517	450,00	46	337,50	0,00	0,00	112,50	0,40	180,00	915,35	823,82	1	23	0	71,91
518	420,00	46	336,42	0,00	0,00	83,58	0,43	180,60	930,46	837,41	1	23	0	62,01
519	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	1	23	0	71,19
520	480,00	46	455,52	0,00	0,00	24,48	0,43	206,40	875,00	787,50	1	23	0	54,99
521	420,00	46	398,58	0,00	0,00	21,42	0,43	180,60	936,68	843,02	1	23	0	52,29
522	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	1	23	0	70,02
523	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	1	23	0	72,18
524	480,00	46	384,48	0,00	0,00	95,52	0,37	177,60	907,30	816,57	1	23	0	74,07
525	500,00	46	437,50	0,00	0,00	62,50	0,40	200,00	871,27	784,14	1	23	0	73,98
526	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	1	23	0	73,71
527	450,00	46	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	926,62	833,95	1	23	0	51,30
528	489,96	46	392,30	0,00	0,00	97,66	0,39	191,08	884,27	795,85	1	23	0	73,89
529	450,00	46	382,50	0,00	0,00	67,50	0,40	180,00	919,86	827,87	1	23	0	73,08
530	490,00	46	343,00	0,00	0,00	147,00	0,39	191,10	888,31	799,47	1	23	0	48,87

531	490,00	46	343,00	0,00	0,00	147,00	0,39	191,10	868,90	782,01	1	23	0	59,40
532	490,00	46	450,80	0,00	0,00	39,20	0,39	191,10	887,45	798,70	1	23	0	64,26
533	490,00	46	490,00	0,00	0,00	0,00	0,39	191,10	894,05	804,65	1	23	0	56,43
534	490,00	46	490,00	0,00	0,00	0,00	0,39	191,10	894,05	804,65	1	23	0	51,75
535	420,00	46	336,42	0,00	0,00	83,58	0,37	155,40	964,94	868,45	2	23	0	63,27
536	480,00	46	455,52	0,00	0,00	24,48	0,37	177,60	914,42	822,98	2	23	0	66,15
537	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	2	23	0	66,69
538	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	2	23	0	68,22
539	480,00	46	384,48	0,00	0,00	95,52	0,43	206,40	867,89	781,10	2	23	0	57,69
540	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,45	202,50	890,19	801,18	2	23	0	55,80
541	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,35	157,50	951,77	856,59	2	23	0	69,93
542	400,00	46	350,00	0,00	0,00	50,00	0,40	160,00	970,70	873,63	2	23	0	54,81
543	420,00	46	398,58	0,00	0,00	21,42	0,37	155,40	971,17	874,05	2	23	0	45,99
544	450,00	46	337,50	0,00	0,00	112,50	0,40	180,00	915,35	823,82	2	23	0	65,52
545	420,00	46	336,42	0,00	0,00	83,58	0,43	180,60	930,46	837,41	2	23	0	56,34
546	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	2	23	0	66,24
547	480,00	46	455,52	0,00	0,00	24,48	0,43	206,40	875,00	787,50	2	23	0	49,23
548	420,00	46	398,58	0,00	0,00	21,42	0,43	180,60	936,68	843,02	2	23	0	44,37
549	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	2	23	0	63,81
550	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	2	23	0	65,79
551	480,00	46	384,48	0,00	0,00	95,52	0,37	177,60	907,30	816,57	2	23	0	70,74
552	500,00	46	437,50	0,00	0,00	62,50	0,40	200,00	871,27	784,14	2	23	0	70,29
553	450,00	46	393,75	0,00	0,00	56,25	0,40	180,00	920,98	828,88	2	23	0	68,31
554	450,00	46	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	926,62	833,95	2	23	0	49,77
555	489,96	46	392,30	0,00	0,00	97,66	0,39	191,08	884,27	795,85	2	23	0	67,23
556	450,00	46	382,50	0,00	0,00	67,50	0,40	180,00	919,86	827,87	2	23	0	64,98
557	490,00	46	343,00	0,00	0,00	147,00	0,39	191,10	888,31	799,47	2	23	0	38,16
558	490,00	46	343,00	0,00	0,00	147,00	0,39	191,10	868,90	782,01	2	23	0	45,09
559	490,00	46	450,80	0,00	0,00	39,20	0,39	191,10	887,45	798,70	2	23	0	55,89
560	490,00	46	490,00	0,00	0,00	0,00	0,39	191,10	894,05	804,65	2	23	0	48,69
561	490,00	46	490,00	0,00	0,00	0,00	0,39	191,10	894,05	804,65	2	23	0	45,99

Tabla A. 34 Diseño de Mezcla por Abouhussien, y otros, 2015.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
562	400,00	47	400,00	0,00	0,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	140	29,00
563	400,00	47	240,00	0,00	160,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	160	26,00
564	400,00	47	160,00	0,00	240,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	200	20,10
565	400,00	47	396,00	0,00	0,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	135	46,50
566	400,00	47	392,00	0,00	0,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	120	31,00
567	400,00	47	240,00	0,00	156,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	150	39,80
568	400,00	47	160,00	0,00	236,00	0,00	0,41	163,00	674,00	1235,00	1	0	170	23,00

Tabla A. 35 Diseño de Mezcla por Shaikh, y otros 2015.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
569	400,00	48	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	48,50
570	400,00	48	382,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	51,90
571	400,00	48	382,00	0,00	12,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	55,50
572	400,00	48	382,00	0,00	18,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	50,90
573	400,00	48	370,00	0,00	18,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	55,10
574	400,00	48	370,00	0,00	24,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	58,70
575	400,00	48	370,00	0,00	30,00	0,00	0,45	180,00	674,00	1235,00	1	0	0	56,90

Tabla A. 36 Diseño de Mezcla por Raïess Ghasemi, y otros, 2010.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
576	533,33	49	533,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	677,00	1201,00	1	0	130	82,68
577	533,34	49	506,67	0,00	0,00	26,67	0,30	160,00	666,00	1182,00	1	0	110	86,04
578	533,33	49	480,00	0,00	0,00	53,33	0,30	160,00	655,00	1163,00	1	0	110	88,93
579	533,33	49	453,33	0,00	0,00	80,00	0,30	160,00	645,00	1144,00	1	0	100	81,94

Tabla A. 37 Diseño de Mezcla por Dinakar y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
580	500,00	54	500,00	0,00	0,00	0,00	0,30	150,00	758,00	927,00	1	0	0	85,90
581	500,00	54	475,00	25,00	0,00	0,00	0,30	150,00	710,00	1066,00	1	0	0	96,50
582	500,00	54	450,00	50,00	0,00	0,00	0,30	150,00	620,00	1151,00	1	0	0	108,30
583	500,00	54	400,00	0,00	100,00	0,00	0,30	150,00	618,00	1147,00	1	0	0	82,70
584	500,00	54	350,00	0,00	150,00	0,00	0,30	150,00	615,00	1143,00	1	0	0	80,20
585	500,00	54	300,00	0,00	200,00	0,00	0,30	150,00	613,00	1139,00	1	0	0	76,70
586	500,00	54	350,00	50,00	100,00	0,00	0,30	150,00	615,00	1142,00	1	0	0	105,30
587	500,00	54	350,00	0,00	0,00	0,00	0,30	150,00	616,00	1145,00	1	0	0	83,90
588	500,00	54	300,00	0,00	0,00	0,00	0,30	150,00	615,00	1142,00	1	0	0	80,90
589	390,00	54	390,00	0,00	0,00	0,00	0,50	195,00	768,00	917,00	1	0	0	35,80
590	390,00	54	273,00	0,00	117,00	0,00	0,50	195,00	626,00	1133,00	1	0	0	39,30
591	390,00	54	234,00	0,00	156,00	0,00	0,50	195,00	625,00	1129,00	1	0	0	36,90
592	390,00	54	273,00	0,00	0,00	0,00	0,50	195,00	626,00	1135,00	1	0	0	46,40
593	390,00	54	234,00	0,00	0,00	0,00	0,50	195,00	625,00	1132,00	1	0	0	39,80

Tabla A. 38 Diseño de Mezcla por Poon y otros, 2001.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
594	400,00	55	400,00	0,00	0,00	0,00	0,50	200,00	935,00	765,00	1	0	90	31,95
595	400,00	55	360,00	0,00	0,00	40,00	0,50	200,00	935,00	765,00	1	0	85	36,90
596	400,00	55	350,00	0,00	0,00	50,00	0,50	200,00	935,00	765,00	1	0	90	36,00
597	400,00	55	340,00	0,00	0,00	60,00	0,50	200,00	935,00	765,00	1	0	85	36,00
598	400,00	55	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	990,00	810,00	1	0	80	29,70
599	400,00	55	360,00	0,00	0,00	40,00	0,40	160,00	990,00	810,00	1	0	75	49,32
600	400,00	55	350,00	0,00	0,00	50,00	0,40	160,00	990,00	810,00	1	0	80	52,65
601	400,00	55	340,00	0,00	0,00	60,00	0,40	160,00	990,00	810,00	1	0	80	50,85
602	400,00	55	400,00	0,00	0,00	0,00	0,35	140,00	1017,50	832,50	1	0	80	53,10
603	400,00	55	360,00	0,00	0,00	40,00	0,35	140,00	1017,50	832,50	1	0	80	60,30
604	400,00	55	350,00	0,00	0,00	50,00	0,35	140,00	1017,50	832,50	1	0	75	57,60
605	400,00	55	340,00	0,00	0,00	60,00	0,35	140,00	1017,50	832,50	1	0	70	58,14

Tabla A. 39 Diseño de Mezcla por Ramezaniapour y otros, 2012.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
606	560,00	56	560,00	0,00	0,00	0,00	0,30	168,00	710,00	924,00	1	23	200	65,50
607	560,00	56	448,00	0,00	112,00	0,00	0,30	168,00	713,00	902,00	1	23	200	68,00
608	560,00	56	336,00	0,00	224,00	0,00	0,30	168,00	720,00	922,00	1	23	200	64,00
609	560,00	56	448,00	0,00	0,00	0,00	0,30	168,00	711,00	888,00	1	23	200	67,50
610	560,00	56	336,00	0,00	0,00	0,00	0,30	168,00	707,00	883,00	1	23	200	64,00
611	560,00	56	448,00	0,00	0,00	0,00	0,30	168,00	706,00	920,00	1	23	200	66,50
612	560,00	56	336,00	0,00	0,00	0,00	0,30	168,00	703,00	900,00	1	23	200	64,00
613	560,00	56	448,00	0,00	56,00	0,00	0,30	168,00	709,00	899,00	1	23	200	68,00
614	560,00	56	336,00	0,00	112,00	0,00	0,30	168,00	714,00	903,00	1	23	200	65,50
615	560,00	56	448,00	0,00	56,00	0,00	0,30	168,00	710,00	910,00	1	23	200	67,50
616	560,00	56	336,00	0,00	112,00	0,00	0,30	168,00	713,00	912,00	1	23	200	66,00

Tabla A. 40 Diseño de Mezcla por Ramezaniapour Rukzon, y otros, 2014.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
617	355,00	57	355,00	0,00	0,00	0,00	0,41	145,50	740,00	1185,00	1	23	140	73,00
618	440,00	57	308,00	0,00	132,00	0,00	0,32	141,00	661,00	1185,00	1	23	170	69,50
619	440,00	57	264,00	0,00	176,00	0,00	0,31	136,50	665,00	1185,00	1	23	185	66,00
620	517,00	57	517,00	0,00	0,00	0,00	0,29	150,00	594,00	1185,00	1	23	150	86,00

621	517,00	57	362,00	0,00	155,00	0,00	0,29	150,00	570,00	1185,00	1	23	175	74,00
622	518,00	57	311,00	0,00	207,00	0,00	0,29	150,00	561,00	1185,00	1	23	160	69,00

Tabla A. 41 Diseño de Mezcla por Nath y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
623	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,37	139,00	659,00	1074,00	1	0	0	36,80
624	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,35	131,00	659,00	1074,00	1	0	0	33,20
625	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,37	139,00	517,00	1135,70	1	0	0	30,40
626	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,37	139,00	482,00	1151,10	1	0	0	38,00
627	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,37	139,00	451,00	1206,00	1	0	0	34,40
628	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,37	139,00	400,00	1238,00	1	0	0	39,20
629	374,80	59	248,00	14,80	112,00	0,00	0,35	131,00	400,00	1238,00	1	0	0	39,70

Tabla A. 42 Diseño de Mezcla por Deboodt, y otros, 2015.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
630	580,00	60	580,00	0,00	0,00	0,00	0,28	163,00	702,60	950,10	1	20	220	68,60
631	580,00	60	559,70	20,30	0,00	0,00	0,28	163,00	700,00	946,50	1	20	220	73,00
632	580,00	60	539,40	40,60	0,00	0,00	0,28	163,00	697,30	943,00	1	20	160	74,20
633	630,00	60	630,00	0,00	0,00	0,00	0,26	163,00	0,00	520,00	1	20	210	65,40
634	630,00	60	608,00	22,00	0,00	0,00	0,26	163,00	0,00	518,00	1	20	210	71,00
635	630,00	60	586,00	44,00	0,00	0,00	0,26	163,00	0,00	515,00	1	20	200	72,30
636	640,00	60	640,00	0,00	0,00	0,00	0,24	155,00	0,00	530,70	1	20	230	46,10
637	640,00	60	617,60	22,40	0,00	0,00	0,24	155,00	0,00	528,50	1	20	220	47,00
638	630,00	60	585,20	44,80	0,00	0,00	0,25	155,00	0,00	526,20	1	20	160	47,90

Tabla A. 43 Diseño de Mezcla por Youm y otros, 2016.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
639	374,00	6210	168,00	0,00	206,00	0,00	0,32	120,00	701,00	1052,00	5	23	190	24,00
640	379,00	6220	170,00	0,00	209,00	0,00	0,32	122,00	710,00	1066,00	5	23	160	30,50
641	391,00	6220	391,00	0,00	0,00	0,00	0,32	125,00	740,00	1111,00	5	23	200	43,80
642	391,00	6220	391,00	0,00	0,00	0,00	0,32	125,00	740,00	1111,00	5	23	215	43,30
643	385,00	6230	385,00	0,00	0,00	0,00	0,40	154,00	729,00	1094,00	5	23	70	38,60

644	385,00	6230	385,00	0,00	0,00	0,00	0,40	154,00	729,00	1094,00	5	23	90	38,80
645	389,00	6240	389,00	0,00	0,00	0,00	0,42	164,00	729,00	1093,00	5	23	70	46,30
646	384,00	6240	384,00	0,00	0,00	0,00	0,42	162,00	720,00	1081,00	5	23	75	42,10

Tabla A. 44 Diseño de Mezcla por Bouzoubaa y otros, 2001.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
647	400,00	63	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	1100,00	1184,00	1	0	140	29,00
648	400,00	63	240,00	0,00	160,00	0,00	0,40	160,00	1100,00	1184,00	1	0	160	31,50
649	400,00	63	160,00	0,00	240,00	0,00	0,40	160,00	1100,00	1184,00	1	0	200	23,00
650	400,00	63	368,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	1100,00	1184,00	1	0	120	45,00
651	400,00	63	240,00	0,00	128,00	0,00	0,40	160,00	1100,00	1184,00	1	0	150	28,50
652	400,00	63	160,00	0,00	208,00	0,00	0,40	160,00	1100,00	1184,00	1	0	170	19,00

Tabla A. 45 Diseño de Mezcla por Shaikh y otros, 2015.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
653	400,00	64	400,00	0,00	0,00	0,00	0,35	140,00	700,00	1200,00	5	23	0	57,50
654	400,00	64	360,00	0,00	40,00	0,00	0,35	140,00	700,00	1200,00	5	23	0	47,50
655	400,00	64	320,00	0,00	80,00	0,00	0,35	140,00	700,00	1200,00	5	23	0	39,00
656	400,00	64	280,00	0,00	120,00	0,00	0,35	140,00	700,00	1200,00	5	23	0	34,00
657	400,00	64	240,00	0,00	160,00	0,00	0,35	140,00	700,00	1200,00	5	23	0	30,50

Tabla A. 46 Diseño de Mezcla por Kumer Saha, 2018.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
658	243,75	68	243,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	728,33	1092,49	1	23	110	22,20
659	243,75	68	219,75	0,00	24,00	0,00	0,80	195,00	726,05	1089,08	1	23	110	24,80
660	243,75	68	194,75	0,00	49,00	0,00	0,80	195,00	724,47	1086,71	1	23	110	26,00
661	243,75	68	170,75	0,00	73,00	0,00	0,80	195,00	722,61	1083,92	1	23	115	24,10
662	243,75	68	145,75	0,00	98,00	0,00	0,80	195,00	721,17	1081,76	1	23	110	23,50
663	314,52	68	314,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	704,52	1056,77	1	23	110	32,40
664	314,52	68	282,52	0,00	32,00	0,00	0,62	195,00	699,51	1049,26	1	23	115	35,20
665	314,52	68	251,52	0,00	63,00	0,00	0,62	195,00	700,22	1050,33	1	23	110	36,70
666	314,52	68	219,52	0,00	95,00	0,00	0,62	195,00	694,55	1041,82	1	23	120	34,90
667	314,52	68	188,52	0,00	126,00	0,00	0,62	195,00	696,00	1044,00	1	23	120	33,80

668	406,25	68	406,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	677,63	1016,44	1	23	105	41,00
669	406,25	68	365,25	0,00	41,00	0,00	0,48	195,00	673,52	1010,28	1	23	110	44,90
670	406,25	68	325,25	0,00	81,00	0,00	0,48	195,00	670,02	1005,02	1	23	120	46,60
671	406,25	68	284,25	0,00	122,00	0,00	0,48	195,00	668,56	1002,83	1	23	115	47,20
672	406,25	68	244,25	0,00	162,00	0,00	0,48	195,00	666,31	999,47	1	23	110	44,20
673	439,02	68	439,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	677,85	1016,78	1	23	105	51,60
674	439,02	68	395,02	0,00	44,00	0,00	0,41	180,00	674,70	1012,05	1	23	105	53,50
675	439,02	68	351,02	0,00	88,00	0,00	0,41	180,00	671,16	1006,74	1	23	115	55,60
676	439,02	68	307,02	0,00	132,00	0,00	0,41	180,00	668,09	1002,13	1	23	115	57,50
677	439,02	68	263,02	0,00	176,00	0,00	0,41	180,00	664,93	997,39	1	23	120	55,50
678	485,71	68	485,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	674,17	1011,26	1	23	110	61,70
679	485,71	68	436,71	0,00	49,00	0,00	0,35	170,00	670,79	1006,19	1	23	115	63,80
680	485,71	68	388,71	0,00	97,00	0,00	0,35	170,00	667,03	1000,55	1	23	110	65,70
681	485,71	68	339,71	0,00	146,00	0,00	0,35	170,00	664,48	996,72	1	23	110	68,10
682	485,71	68	291,71	0,00	194,00	0,00	0,35	170,00	661,61	992,41	1	23	115	65,00
683	533,33	68	533,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	667,73	1001,60	1	23	105	72,30
684	533,33	68	480,33	0,00	53,00	0,00	0,30	160,00	664,78	997,17	1	23	110	74,20
685	533,33	68	426,33	0,00	107,00	0,00	0,30	160,00	659,96	989,95	1	23	115	76,20
686	533,33	68	373,33	0,00	160,00	0,00	0,30	160,00	657,07	985,60	1	23	120	78,10
687	533,33	68	320,33	0,00	213,00	0,00	0,30	160,00	654,76	982,14	1	23	120	75,80
688	243,75	68	243,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	728,33	1092,49	1	23	110	22,20
689	243,75	68	219,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	726,05	1089,08	1	23	105	22,30
690	243,75	68	194,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	724,47	1086,71	1	23	110	23,10
691	243,75	68	170,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	722,61	1083,92	1	23	115	21,50
692	243,75	68	145,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	721,17	1081,76	1	23	100	19,20
693	314,52	68	314,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	704,52	1056,77	1	23	110	32,40
694	314,52	68	282,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	699,51	1049,26	1	23	105	34,10
695	314,52	68	251,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	700,22	1050,33	1	23	115	33,90
696	314,52	68	219,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	694,55	1041,82	1	23	110	31,00
697	314,52	68	188,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	696,00	1044,00	1	23	110	29,90
698	406,25	68	406,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	677,63	1016,44	1	23	105	41,00
699	406,25	68	365,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	673,52	1010,28	1	23	110	43,70
700	406,25	68	325,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	670,02	1005,02	1	23	105	44,00
701	406,25	68	284,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	668,56	1002,83	1	23	110	43,20
702	406,25	68	244,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	666,31	999,47	1	23	116	40,20
703	439,02	68	439,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	677,85	1016,78	1	23	105	51,60
704	439,02	68	395,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	674,70	1012,05	1	23	100	52,30
705	439,02	68	351,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	671,16	1006,74	1	23	115	53,20
706	439,02	68	307,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	668,09	1002,13	1	23	105	54,70
707	439,02	68	263,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	664,93	997,39	1	23	110	52,50
708	485,71	68	485,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	674,17	1011,26	1	23	110	61,70
709	485,71	68	436,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	670,79	1006,19	1	23	115	62,40
710	485,71	68	388,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	667,03	1000,55	1	23	120	63,50
711	485,71	68	339,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	664,48	996,72	1	23	120	64,50
712	485,71	68	291,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	661,61	992,41	1	23	115	62,20
713	533,33	68	533,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	667,73	1001,60	1	23	105	72,30

714	533,33	68	480,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	664,78	997,17	1	23	110	73,10
715	533,33	68	426,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	659,96	989,95	1	23	115	74,60
716	533,33	68	373,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	657,07	985,60	1	23	115	76,30
717	533,33	68	320,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	654,76	982,14	1	23	115	73,20
718	243,75	68	243,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	728,33	1092,49	1	23	110	22,20
719	243,75	68	219,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	726,05	1089,08	1	23	115	23,40
720	243,75	68	194,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	724,47	1086,71	1	23	115	25,10
721	243,75	68	170,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	722,61	1083,92	1	23	110	23,50
722	243,75	68	145,75	0,00	0,00	0,00	0,80	195,00	721,17	1081,76	1	23	105	22,40
723	314,52	68	314,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	704,52	1056,77	1	23	110	32,40
724	314,52	68	282,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	699,51	1049,26	1	23	115	34,70
725	314,52	68	251,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	700,22	1050,33	1	23	110	35,80
726	314,52	68	219,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	694,55	1041,82	1	23	110	33,20
727	314,52	68	188,52	0,00	0,00	0,00	0,62	195,00	696,00	1044,00	1	23	115	32,70
728	406,25	68	406,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	677,63	1016,44	1	23	105	41,00
729	406,25	68	365,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	673,52	1010,28	1	23	105	43,70
730	406,25	68	325,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	670,02	1005,02	1	23	110	44,60
731	406,25	68	284,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	668,56	1002,83	1	23	115	45,40
732	406,25	68	244,25	0,00	0,00	0,00	0,48	195,00	666,31	999,47	1	23	110	42,50
733	439,02	68	439,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	677,85	1016,78	1	23	105	51,60
734	439,02	68	395,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	674,70	1012,05	1	23	110	53,00
735	439,02	68	351,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	671,16	1006,74	1	23	110	54,40
736	439,02	68	307,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	668,09	1002,13	1	23	115	55,80
737	439,02	68	263,02	0,00	0,00	0,00	0,41	180,00	664,93	997,39	1	23	120	53,30
738	485,71	68	485,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	674,17	1011,26	1	23	110	61,70
739	485,71	68	436,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	670,79	1006,19	1	23	110	62,80
740	485,71	68	388,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	667,03	1000,55	1	23	105	64,30
741	485,71	68	339,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	664,48	996,72	1	23	115	65,90
742	485,71	68	291,71	0,00	0,00	0,00	0,35	170,00	661,61	992,41	1	23	120	63,00
743	533,33	68	533,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	667,73	1001,60	1	23	105	72,30
744	533,33	68	480,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	664,78	997,17	1	23	110	73,40
745	533,33	68	426,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	659,96	989,95	1	23	100	75,20
746	533,33	68	373,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	657,07	985,60	1	23	120	77,10
747	533,33	68	320,33	0,00	0,00	0,00	0,30	160,00	654,76	982,14	1	23	120	74,50

Tabla A. 47 Diseño de Mezcla por S. Inthata, y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
748	400,00	69	400,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	40,77
749	400,00	69	380,00	0,00	0,00	20,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	48,28
750	400,00	69	360,00	0,00	0,00	40,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	51,91
751	400,00	69	340,00	0,00	0,00	60,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	54,53
752	400,00	69	320,00	0,00	0,00	80,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	57,17

753	400,00	69	300,00	0,00	0,00	100,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	53,74
754	400,00	69	280,00	0,00	0,00	120,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	51,40
755	400,00	69	380,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	43,30
756	400,00	69	360,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	47,71
757	400,00	69	340,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	51,03
758	400,00	69	320,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	44,19
759	400,00	69	300,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	41,92
760	400,00	69	280,00	0,00	0,00	0,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	37,02
761	400,00	69	360,00	0,00	0,00	20,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	49,52
762	400,00	69	320,00	0,00	0,00	40,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	53,22
763	400,00	69	280,00	0,00	0,00	60,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	55,67
764	400,00	69	240,00	0,00	0,00	80,00	0,55	220,00	880,00	800,00	1	0	0	45,00

Tabla A. 48 Diseño de Mezcla por Kannan, y otros, 2014.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
765	500,00	70	500,00	0,00	0,00	0,00	0,23	112,50	805,00	950,00	1	23	160	104,60
766	550,00	70	508,75	41,25	0,00	0,00	0,23	123,75	827,00	832,00	1	23	130	116,20
767	600,00	70	510,00	90,00	0,00	0,00	0,23	135,00	840,00	720,00	1	23	110	119,80
768	500,00	70	500,00	0,00	0,00	0,00	0,25	125,00	852,00	858,00	1	23	180	100,60
769	550,00	70	508,75	41,25	0,00	0,00	0,25	137,50	868,00	744,00	1	23	170	104,60
770	600,00	70	510,00	90,00	0,00	0,00	0,25	150,00	706,00	834,00	1	23	110	119,50
771	500,00	70	462,50	37,50	0,00	0,00	0,28	137,50	761,00	900,00	1	23	210	100,40
772	550,00	70	467,50	82,50	0,00	0,00	0,28	151,25	787,00	792,00	1	23	130	101,90
773	600,00	70	600,00	0,00	0,00	0,00	0,28	165,00	817,00	700,00	1	23	140	100,90
774	500,00	70	425,00	75,00	0,00	0,00	0,23	112,50	923,00	792,00	1	23	130	110,20
775	550,00	70	550,00	0,00	0,00	0,00	0,23	123,75	764,00	904,00	1	23	170	113,00
776	600,00	70	555,00	45,00	0,00	0,00	0,23	135,00	794,00	798,00	1	23	100	120,20
777	500,00	70	462,50	37,50	0,00	0,00	0,25	125,00	916,00	786,00	1	23	160	101,80
778	550,00	70	467,50	82,50	0,00	0,00	0,25	137,50	738,00	872,00	1	23	140	113,90
779	600,00	70	600,00	0,00	0,00	0,00	0,25	150,00	774,00	778,00	1	23	150	106,00
780	500,00	70	425,00	75,00	0,00	0,00	0,28	137,50	820,00	826,00	1	23	180	100,70
781	550,00	70	550,00	0,00	0,00	0,00	0,28	151,25	863,00	740,00	1	23	150	98,80
782	600,00	70	555,00	45,00	0,00	0,00	0,28	165,00	692,00	816,00	1	23	160	106,80

Tabla A. 49 Diseño de Mezcla por Ozbay y otros, 2011.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
783	480,00	71	480,00	0,00	0,00	0,00	0,32	152,00	705,00	1057,00	1	0	0	65,80
784	500,00	71	450,00	0,00	50,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	67,00
785	500,00	71	400,00	0,00	100,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	65,70
786	500,00	71	375,00	0,00	125,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	67,80
787	500,00	71	400,00	0,00	0,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	69,50
788	500,00	71	350,00	0,00	0,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	71,70
789	500,00	71	400,00	0,00	50,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	58,80
790	500,00	71	350,00	0,00	45,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	65,20
791	500,00	71	250,00	0,00	75,00	0,00	0,33	165,00	694,00	1041,00	1	0	0	57,80

Tabla A. 50 Diseño de Mezcla por DING Qingjun y otros, 2009.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
792	540,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,34	182,00	695,00	895,00	1	27	0	44,30
793	540,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,37	198,00	674,00	895,00	1	27	0	44,50
794	540,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,39	213,00	653,00	895,00	1	27	0	43,40
795	540,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,42	229,00	632,00	895,00	1	27	0	41,30
796	540,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,45	244,00	610,00	895,00	1	27	0	38,70
797	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,30	182,00	662,00	850,00	1	27	0	53,70
798	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,32	197,00	642,00	850,00	1	27	0	64,30
799	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,35	212,00	622,00	850,00	1	27	0	62,30
800	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,37	226,00	602,00	850,00	1	27	0	56,30
801	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,40	241,00	581,00	850,00	1	27	0	53,20
802	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,40	241,00	581,00	850,00	1	27	0	53,20
803	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,38	229,00	616,00	850,00	1	27	0	59,10
804	610,00	72	340,00	0,00	200,00	0,00	0,35	213,00	662,00	850,00	1	27	0	64,20

Tabla A. 51 Diseño de Mezcla por Kou, y otros, 2009.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
805	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,55	225,00	642,00	1048,00	1	27	0	48,60
806	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,55	225,00	642,00	1044,00	1	27	0	45,30
807	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,55	225,00	642,00	1030,00	1	27	0	42,50
808	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,55	225,00	642,00	1017,00	1	27	0	38,10
809	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,44	225,00	582,00	992,00	1	27	0	52,90
810	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,44	225,00	582,00	987,00	1	27	0	50,10

811	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,44	225,00	582,00	978,00	1	27	0	48,10
812	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,44	225,00	582,00	963,00	1	27	0	45,30
813	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,50	205,00	662,00	1081,00	1	27	0	54,10
814	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,50	205,00	662,00	1075,00	1	27	0	51,70
815	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,50	205,00	662,00	1066,00	1	27	0	47,10
816	410,00	74	410,00	0,00	0,00	0,00	0,50	205,00	662,00	1049,00	1	27	0	43,40
817	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,40	205,00	618,00	1009,00	1	27	0	57,60
818	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,40	205,00	618,00	998,00	1	27	0	55,80
819	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,40	205,00	618,00	994,00	1	27	0	52,50
820	512,50	74	384,38	0,00	128,13	0,00	0,40	205,00	618,00	979,00	1	27	0	51,20
821	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	708,00	1108,00	1	27	0	66,80
822	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	708,00	1101,00	1	27	0	62,40
823	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	708,00	1092,00	1	27	0	56,80
824	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,45	180,00	708,00	1075,00	1	27	0	52,10
825	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,36	180,00	665,00	1040,00	1	27	0	70,10
826	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,36	180,00	665,00	1010,00	1	27	0	67,30
827	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,36	180,00	665,00	1024,00	1	27	0	63,40
828	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,36	180,00	665,00	1009,00	1	27	0	61,10
829	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	729,00	1140,00	1	27	0	72,30
830	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	729,00	1133,00	1	27	0	69,60
831	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	729,00	1124,00	1	27	0	65,30
832	400,00	74	400,00	0,00	0,00	0,00	0,40	160,00	729,00	1107,00	1	27	0	58,50
833	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,32	160,00	685,00	1071,00	1	27	0	76,70
834	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,32	160,00	685,00	1022,00	1	27	0	73,90
835	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,32	160,00	685,00	1056,00	1	27	0	70,10
836	500,00	74	375,00	0,00	125,00	0,00	0,32	160,00	685,00	1040,00	1	27	0	68,70

Tabla A. 52 Diseño de Mezcla por Cong Lua, 2018.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
837	704,00	75	563,00	0,00	141,00	0,00	0,25	176,00	532,00	915,00	1	0	0	60,00
838	704,00	75	528,00	0,00	141,00	35,00	0,25	176,00	529,00	909,00	1	0	0	66,00
839	704,00	75	493,00	0,00	141,00	70,00	0,25	176,00	525,00	903,00	1	0	0	64,50
840	705,00	75	458,00	0,00	141,00	106,00	0,25	176,00	522,00	897,00	1	0	0	59,50
841	704,00	75	422,00	0,00	141,00	141,00	0,25	176,00	518,00	891,00	1	0	0	59,00
842	704,00	75	528,00	35,00	141,00	0,00	0,25	176,00	530,00	911,00	1	0	0	63,00
843	704,00	75	493,00	70,00	141,00	0,00	0,25	176,00	528,00	908,00	1	0	0	72,00
844	705,00	75	458,00	106,00	141,00	0,00	0,25	176,00	526,00	904,00	1	0	0	71,50
845	704,00	75	422,00	141,00	141,00	0,00	0,25	176,00	524,00	900,00	1	0	0	66,00

Tabla A. 53 Diseño de Mezcla por Kim, y otros, 2007.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
846	350,00	76	350,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	835,00	1028,00	2	0	0	39,61
847	350,00	76	262,50	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	832,00	1025,00	2	0	0	37,63
848	350,00	76	175,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	830,00	1021,00	2	0	0	28,49
849	350,00	76	350,00	0,00	0,00	0,00	0,48	167,00	835,00	1028,00	2	0	0	36,60
850	350,00	76	350,00	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	835,00	1028,00	2	0	0	37,36
851	350,00	76	262,50	0,00	0,00	0,00	0,48	167,00	832,00	1025,00	2	0	0	29,14
852	350,00	76	262,50	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	832,00	1025,00	2	0	0	33,69
853	350,00	76	175,00	0,00	0,00	0,00	0,48	167,00	830,00	1021,00	2	0	0	21,50
854	350,00	76	175,00	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	830,00	1021,00	2	0	0	21,74
855	350,00	76	350,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	835,00	1028,00	1	20	0	46,76
856	350,00	76	262,50	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	832,00	1025,00	1	20	0	47,69
857	350,00	76	175,00	0,00	0,00	0,00	0,50	175,00	830,00	1021,00	1	20	0	46,80
858	350,00	76	350,00	0,00	0,00	0,00	0,48	167,00	835,00	1028,00	1	20	0	49,60
859	350,00	76	350,00	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	835,00	1028,00	1	20	0	53,73
860	350,00	76	262,50	0,00	0,00	0,00	0,48	167,00	832,00	1025,00	1	20	0	47,07
861	350,00	76	262,50	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	832,00	1025,00	1	20	0	47,59
862	350,00	76	175,00	0,00	0,00	0,00	0,48	167,00	830,00	1021,00	1	20	0	39,82
863	350,00	76	175,00	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	830,00	1021,00	1	20	0	42,67

Tabla A. 54 Diseño de Mezcla por Raif Boğa, y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
864	500,00	77	375,00	0,00	125,00	0,00	0,40	200,00	809,00	794,00	5	22	200	57,80
865	500,00	77	375,00	0,00	125,00	0,00	0,40	200,00	805,00	790,00	5	22	200	53,40
866	500,00	77	375,00	0,00	125,00	0,00	0,40	200,00	802,00	787,00	5	22	200	52,80
867	500,00	77	375,00	0,00	125,00	0,00	0,40	200,00	795,00	780,00	5	22	200	54,20

Tabla A. 55 Diseño de Mezcla por Karahan y otros, 2016.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
868	450,00	79	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	850,00	850,00	1	23	0	49,00
869	450,00	79	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	839,00	850,00	1	23	0	41,00
870	450,00	79	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	827,00	850,00	1	23	0	44,00
871	450,00	79	450,00	0,00	0,00	0,00	0,40	180,00	803,00	850,00	1	23	0	37,50
872	450,00	79	315,00	0,00	135,00	0,00	0,40	180,00	831,00	831,00	1	23	0	37,50
873	450,00	79	315,00	0,00	135,00	0,00	0,40	180,00	819,00	831,00	1	23	0	35,40

874	450,00	79	315,00	0,00	135,00	0,00	0,40	180,00	808,00	831,00	1	23	0	37,50
875	450,00	79	315,00	0,00	135,00	0,00	0,40	180,00	785,00	831,00	1	23	0	38,50
876	450,00	79	225,00	0,00	225,00	0,00	0,40	180,00	818,00	818,00	1	23	0	41,50
877	450,00	79	225,00	0,00	225,00	0,00	0,40	180,00	807,00	818,00	1	23	0	37,30
878	450,00	79	225,00	0,00	225,00	0,00	0,40	180,00	795,00	818,00	1	23	0	30,00
879	450,00	79	225,00	0,00	225,00	0,00	0,40	180,00	773,00	818,00	1	23	0	33,00
880	450,00	79	135,00	0,00	315,00	0,00	0,40	180,00	805,00	805,00	1	23	0	35,50
881	450,00	79	135,00	0,00	315,00	0,00	0,40	180,00	794,00	805,00	1	23	0	29,00
882	450,00	79	135,00	0,00	315,00	0,00	0,40	180,00	783,00	805,00	1	23	0	24,40
883	450,00	79	135,00	0,00	315,00	0,00	0,40	180,00	760,00	805,00	1	23	0	24,40

Tabla A. 56 Diseño de Mezcla por Sahmaran, y otros, 2011.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
884	400,00	80	400,00	0,00	0,00	0,00	0,44	176,00	962,00	857,00	1	20	0	60,00
885	400,00	80	380,00	0,00	0,00	20,00	0,44	176,00	959,00	855,00	1	20	0	61,00
886	400,00	80	360,00	0,00	0,00	40,00	0,44	176,00	956,00	852,00	1	20	0	64,00
887	400,00	80	340,00	0,00	0,00	60,00	0,44	176,00	954,00	849,00	1	20	0	67,00
888	400,00	80	380,00	20,00	0,00	0,00	0,44	176,00	958,00	853,00	1	20	0	56,00
889	400,00	80	360,00	40,00	0,00	0,00	0,44	176,00	954,00	849,00	1	20	0	61,00
890	400,00	80	340,00	60,00	0,00	0,00	0,44	176,00	949,00	845,00	1	20	0	63,00
891	400,00	80	400,00	0,00	0,00	0,00	0,44	176,00	962,00	857,00	9	0	0	46,00
892	400,00	80	380,00	0,00	0,00	20,00	0,44	176,00	959,00	855,00	9	0	0	51,00
893	400,00	80	360,00	0,00	0,00	40,00	0,44	176,00	956,00	852,00	9	0	0	51,50
894	400,00	80	340,00	0,00	0,00	60,00	0,44	176,00	954,00	849,00	9	0	0	54,50
895	400,00	80	380,00	20,00	0,00	0,00	0,44	176,00	958,00	853,00	9	0	0	50,00
896	400,00	80	360,00	40,00	0,00	0,00	0,44	176,00	954,00	849,00	9	0	0	51,00
897	400,00	80	340,00	60,00	0,00	0,00	0,44	176,00	949,00	845,00	9	0	0	54,00

Tabla A. 57 Diseño de Mezcla por Gesoğlu, 2010.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
898	350,00	8110	350,00	0,00	0,00	0,00	0,65	227,50	601,00	1150,00	1	20	70	25,90
899	440,00	8110	350,00	0,00	0,00	0,00	0,52	227,50	510,00	1150,00	1	20	50	26,60
900	350,00	8120	350,00	0,00	0,00	0,00	0,65	227,50	601,00	1150,00	1	20	60	25,80
901	440,00	8120	350,00	0,00	0,00	0,00	0,52	227,50	510,00	1150,00	1	20	45	25,90
902	350,00	8130	350,00	0,00	0,00	0,00	0,65	227,50	601,00	1150,00	1	20	70	31,70
903	440,00	8130	350,00	0,00	0,00	0,00	0,52	227,50	510,00	1150,00	1	20	55	33,00

904	350,00	8140	350,00	0,00	0,00	0,00	0,65	227,50	601,00	1150,00	1	20	60	30,90
905	440,00	8140	350,00	0,00	0,00	0,00	0,52	227,50	510,00	1150,00	1	20	40	32,25

Tabla A. 58 Diseño de Mezcla por Menadi, y otros, 2009.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
906	433,00	82	433,00	0,00	0,00	0,00	0,45	195,00	676,00	1036,00	7	20	105	50,20
907	432,00	82	432,00	0,00	0,00	0,00	0,45	195,00	574,00	1033,00	7	20	110	49,40
908	430,00	82	430,00	0,00	0,00	0,00	0,45	194,00	470,00	1029,00	7	20	115	48,50
909	427,00	82	427,00	0,00	0,00	0,00	0,45	193,00	367,00	1023,00	7	20	120	47,20
910	425,00	82	425,00	0,00	0,00	0,00	0,45	191,00	265,00	1016,00	7	20	120	44,90
911	431,00	82	431,00	0,00	0,00	0,00	0,45	194,00	674,00	1032,00	7	20	100	49,90
912	429,00	82	429,00	0,00	0,00	0,00	0,45	193,00	670,00	1027,00	7	20	95	49,30
913	425,00	82	425,00	0,00	0,00	0,00	0,45	191,00	663,00	1016,00	7	20	90	48,10
914	420,00	82	420,00	0,00	0,00	0,00	0,45	189,00	656,00	1006,00	7	20	80	46,40

Tabla A. 59 Diseño de Mezcla por Kathirvel, y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
915	400,00	83	320,00	0,00	80,00	0,00	0,48	191,60	540,00	1175,00	1	0	0	30,70
916	400,00	83	288,00	0,00	72,00	0,00	0,48	191,60	540,00	1175,00	1	0	0	33,10
917	400,00	83	256,00	0,00	64,00	0,00	0,48	191,60	540,00	1175,00	1	0	0	34,40
918	400,00	83	224,00	0,00	56,00	0,00	0,48	191,60	540,00	1175,00	1	0	0	30,00
919	400,00	83	192,00	0,00	48,00	0,00	0,48	191,60	540,00	1175,00	1	0	0	24,80

Tabla A. 60 Diseño de Mezcla por Kathirvel, y otros, 2013.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
920	420,00	84	420,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	621,00	1108,00	1	27	0	47,00
921	420,00	84	399,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	582,00	1108,00	1	27	0	49,00
922	420,00	84	378,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	542,00	1108,00	1	27	0	49,50
923	420,00	84	357,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	503,00	1108,00	1	27	0	41,00
924	420,00	84	336,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	464,00	1108,00	1	27	0	33,00
925	474,00	84	474,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	636,00	1113,00	1	27	0	70,00
926	474,00	84	447,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	585,10	1113,00	1	27	0	71,00

927	474,00	84	420,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	535,61	1113,00	1	27	0	72,00
928	472,00	84	391,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,20	483,21	1113,00	1	27	0	62,00
929	474,00	84	366,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	433,72	1113,00	1	27	0	48,00
930	420,00	84	420,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	621,00	1108,00	1	27	0	44,50
931	420,00	84	399,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	582,00	1108,00	1	27	0	46,00
932	420,00	84	378,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	542,00	1108,00	1	27	0	47,50
933	420,00	84	357,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	503,00	1108,00	1	27	0	38,50
934	420,00	84	336,00	0,00	0,00	0,00	0,43	180,60	464,00	1108,00	1	27	0	30,00
935	474,00	84	474,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	636,00	1113,00	1	27	0	62,00
936	474,00	84	447,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	585,10	1113,00	1	27	0	59,50
937	474,00	84	420,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	535,61	1113,00	1	27	0	56,00
938	472,00	84	391,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,20	483,21	1113,00	1	27	0	48,00
939	474,00	84	366,00	0,00	0,00	0,00	0,35	165,90	433,72	1113,00	1	27	0	42,00

Tabla A. 61 Diseño de Mezcla por Ramasamy, 2012.

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
940	680,00	86	530,00	0,00	0,00	0,00	0,26	175,00	448,00	1045,00	1	20	120	54,90
941	655,00	86	505,00	0,00	0,00	0,00	0,27	175,00	452,00	1055,00	1	20	110	55,40
942	632,00	86	482,00	0,00	0,00	0,00	0,28	175,00	456,00	1064,00	1	20	100	62,30
943	611,00	86	461,00	0,00	0,00	0,00	0,29	175,00	460,00	1073,00	1	20	90	60,30
944	592,00	86	442,00	0,00	0,00	0,00	0,30	175,00	463,00	1081,00	1	20	85	60,20
945	632,00	86	482,00	48,00	0,00	0,00	0,28	175,00	456,00	1064,00	1	20	95	59,00

Tabla A. 62 Diseño de Mezcla por Ha Thanh Le, y otros, (2014).

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
946	441,00	87	441,00	0,00	0,00	0,00	0,41	181,00	555,00	1036,00	1	23	0	51,50
947	441,00	87	441,00	0,00	0,00	0,00	0,41	181,00	555,00	1036,00	1	23	0	34,20
948	440,00	87	362,00	0,00	78,00	0,00	0,41	181,00	545,00	1026,00	1	23	0	19,80
949	392,00	87	196,00	0,00	0,00	0,00	0,40	158,00	632,00	59,00	1	23	0	45,70
950	441,00	87	441,00	0,00	0,00	0,00	0,41	181,00	555,00	1036,00	1	71	0	51,50
951	441,00	87	441,00	0,00	0,00	0,00	0,41	181,00	555,00	1036,00	1	93	0	53,30
952	441,00	87	441,00	0,00	0,00	0,00	0,41	181,00	555,00	1036,00	1	71	0	40,20
953	440,00	87	362,00	0,00	78,00	0,00	0,41	181,00	545,00	1026,00	1	71	0	47,30
954	392,00	87	196,00	0,00	0,00	0,00	0,40	158,00	632,00	59,00	1	71	0	49,50
955	441,00	87	441,00	0,00	0,00	0,00	0,41	181,00	555,00	1036,00	1	82	0	38,10
956	440,00	87	362,00	0,00	78,00	0,00	0,41	181,00	545,00	1026,00	1	82	0	47,30
957	392,00	87	196,00	0,00	0,00	0,00	0,40	158,00	632,00	59,00	1	82	0	45,40

Tabla A. 63 Diseño de Mezcla por Chini, y otros, (2005).

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
958	375,00	88	375,00	0,00	0,00	0,00	0,50	187,50	959,00	785,00	1	0	0	44,50
959	375,00	88	375,00	0,00	0,00	0,00	0,40	150,00	1012,00	828,00	1	0	0	51,00
960	375,00	88	375,00	0,00	0,00	0,00	0,35	131,25	1038,00	850,00	1	0	0	60,50
961	375,00	88	300,00	0,00	0,00	0,00	0,50	187,50	955,00	782,00	1	0	0	38,00
962	375,00	88	300,00	0,00	0,00	0,00	0,40	150,00	1008,00	825,00	1	0	0	43,00
963	375,00	88	300,00	0,00	0,00	0,00	0,35	131,25	1035,00	847,00	1	0	0	58,00
964	375,00	88	300,00	0,00	0,00	0,00	0,50	187,50	955,00	782,00	1	0	0	40,50
965	375,00	88	300,00	0,00	0,00	0,00	0,40	150,00	1008,00	825,00	1	0	0	49,00
966	375,00	88	300,00	0,00	0,00	0,00	0,35	131,25	1035,00	847,00	1	0	0	60,00

Tabla A. 64 Diseño de Mezcla por Ramezaniapour, y otros, (2016).

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
967	350,00	89	350,00	0,00	0,00	0,00	0,55	193,00	616,00	1251,00	7	23	0	29,10
968	350,00	89	350,00	0,00	0,00	0,00	0,45	158,00	616,00	1251,00	7	23	0	34,60
969	555,00	89	500,00	55,00	0,00	0,00	0,34	190,00	685,00	1000,00	7	23	0	50,10
970	555,00	89	500,00	55,00	0,00	0,00	0,25	140,00	640,00	1170,00	7	23	0	82,10

Tabla A. 65 Diseño de Mezcla por Gowripalan, y otros, (1998).

Muestra	TCM Kg/m ³	Tipo Cem	Cem Kg/m ³	HS Kg/m ³	CV Kg/m ³	MK Kg/m ³	a/TCM	Agua Kg/m ³	Arid Fin Kg/m ³	Arid Gru Kg/m ³	Tipo Cur	Temp °C	Slump mm	fc28 Mpa
971	385,00	9010	385,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	46,00
972	385,00	9010	289,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	47,00
973	385,00	9010	231,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	44,50
974	385,00	9010	173,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	46,50
975	385,00	9020	385,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	49,50
976	385,00	9020	289,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	51,00
977	385,00	9020	231,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	50,00
978	385,00	9020	173,00	0,00	0,00	0,00	0,42	161,00	820,00	977,00	1	0	150	46,00

Tabla A. 66 Diseño de Mezcla por Yun Yeau, y otros, (2005).