



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 2019/2020

**Modelos predictivos aplicados a la resistencia a  
compresión del hormigón de un proyecto  
hidroeléctrico en Ecuador**

Autor: Jorge Carrasco Avendaño.

Tutor: Ferrán Navarro Ferrer.

Valencia, octubre de 2020

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN  
Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA





# Agradecimiento

El documento que usted está por leer no hubiese sido posible sin la orientación y apoyo de Ferrán Navarro Ferrer, mi agradecimiento sincero por el tiempo valioso que dedicó a la dirección y revisión de este trabajo.

A los profesores del Máster en Ingeniería del Hormigón de la Universitat Politècnica de València, por la pasión, el compromiso y la entrega en cada una de sus clases, de manera especial a Víctor Yepes y José R. Martí por su dedicación y por ser fuente de motivación referente en temas de ingeniería.

A mis padres y hermanos por su incondicional apoyo en mis decisiones y a Bernarda por ser el pilar y motor de vida.

# Resumen

El hormigón es el material más utilizado en la actualidad en la construcción, además de generar desarrollo a través de estructuras que: unen orillas de mares y ríos, conectan ciudades, se elevan desde el suelo hasta alturas cada vez más elevadas, se ha convertido en un material indispensable por lo que debe ser estudiado desde todas las perspectivas debido a la importancia, utilidad y necesidad que la población demanda cada día.

En la primera parte del trabajo se recoge información y normativas actuales e históricas de los componentes que conforman el hormigón. Luego se presenta la recopilación de información tomada del laboratorio de control de calidad de una central hidroeléctrica construida en la selva de Ecuador, en el cual se realiza un estudio utilizando herramientas de estadística clásica e inteligencia artificial.

En el estudio con estadística clásica se contempla la influencia que tienen las variables en la resistencia a compresión del hormigón, utilizando herramientas de regresión lineal y múltiple.

A la base de datos elaborada se aplica redes neuronales artificiales con diferentes softwares y lenguajes de programación para medir la potencia que cada uno tiene a la hora de predecir la resistencia a compresión del hormigón a diferentes edades en función de varias variables, además se realiza una optimización metaheurística para ver cómo se comporta el algoritmo en la predicción de este mismo valor.

Finalmente se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos con los diferentes métodos y softwares utilizados en la base de datos, evidenciando una mejora notable cuando se utiliza las redes neuronales artificiales en comparación a métodos estadísticos convencionales.

**Palabras clave:** modelos predictivos, resistencia a compresión, hormigón, redes neurales artificiales, inteligencia artificial.

# Abstract

Concrete is the material most used today in construction, in addition to generating development through structures that: unite the seas and rivers shores, connect cities, rise buildings from the ground to ever higher heights, it has become an indispensable material so it must be studied from all perspectives due to the importance, usefulness and necessity that the population demands every day.

In the first part of the work, information and current and historical component regulations which make up the concrete are collected. Then, the information compilation taken from the quality control laboratory of a hydroelectric plant built in the Ecuador's jungle is presented, in which a study is carried out using classic statistical tools and artificial intelligence.

In the study with classical statistics, the influence that the variables have on the compressive strength of concrete is considered, using linear and multiple regression tools.

Artificial neural networks are applied to the tables in the database with different softwares and programming languages to measure the predicting power that each one has estimating the concrete compressive strength at different ages based on several variables, in addition, a metaheuristic optimization is performed to see how the algorithm behaves in the prediction of such value.

Finally, a detailed analysis of the results obtained with the different methods and softwares is carried out, showing a notable improvement when artificial neural networks are used compared to conventional statistical methods.

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

# ÍNDICE

Índice de figuras .....	VI
Índice de tablas.....	IX
<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	4
1.2 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	4
<b>Capítulo 2: ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....</b>	<b>6</b>
2.1 Materiales constituyentes del hormigón.....	6
2.1.1 Cemento.....	6
2.1.2 Estudio sobre de la Industria Cementera en España y Ecuador .....	17
2.1.3 Áridos .....	20
2.1.4 Agua .....	26
2.1.5 Aditivos.....	28
2.2 Dosificación .....	33
2.3. Redes Neuronales Artificiales .....	38
2.3.1 Introducción .....	38
2.3.2 Funcionamiento.....	40
2.3.3 Tipos de redes neuronales artificiales. ....	41
2.3.4 Número de neuronas de la capa oculta.....	43
2.3.4 Aprendizaje de la red neuronal .....	43
2.3.5 Entrenamiento, validación y test.....	44
2.3.6 Evaluación de desempeño de una RNA.....	45
<b>Capítulo 3: BASE DE DATOS.....</b>	<b>46</b>
3.1. Hormigón.....	46
3.2 Cemento.....	50
3.3 Aditivos.....	51
3.4 Áridos.....	52

<b>Capítulo 4: ESTUDIO ESTADÍSTICO CLÁSICO .....</b>	<b>55</b>
4.1 Resistencia del hormigón en función del contenido de agua y cemento.....	56
4.2 Resistencia del hormigón en función de la temperatura del hormigón y del clima .....	58
4.3 Resistencia del hormigón en función de varias variables. ....	67
4.4 Evolución de la resistencia a compresión del hormigón .....	70
4.5 Análisis descriptivo de la resistencia a compresión del hormigón.....	72
<b>Capítulo 5: APLICACIÓN DE REDES NEURONALES .....</b>	<b>75</b>
5.1 Red Neuronal Artificial en Matlab y SPSS.....	75
5.1.1 Red Neuronal Artificial en Matlab .....	76
5.1.2 Red Neuronal Artificial en SPSS.....	80
5.2 Redes neuronales artificiales con diferentes combinaciones de variables .....	84
5.3 Aplicación del modelo de optimización metaheurística basada en kriging.....	94
<b>Capítulo 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>96</b>
6.1 Comparación estadística clásica y redes neuronales artificiales.....	96
6.2 Comportamiento de las RNA en SPSS, Matlab y optimización metaheurística .....	98
<b>Capítulo 7: CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>101</b>
7.1 Conclusiones Generales .....	101
7.1 Conclusiones Específicas .....	102
7.3 Futuras líneas de Investigación .....	103
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>105</b>
<b>ANEJO A .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEJO B .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEJO C .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEJO D .....</b>	<b>125</b>
<b>ANEJO E.....</b>	<b>127</b>

# Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b> Estructuras de hormigón. . . . .	2
<b>Figura 2.1</b> Patente de Joseph Aspdin. “Artificial Stone”, 1824. Patente BP5022. . . . .	7
<b>Figura 2.2 a</b> Producción tradicional del cemento Portland, extracción. Portland Cement Association. 2004. . . . .	7
<b>Figura 2.2 b</b> Producción tradicional del cemento Portland, procesos. Portland Cement Association. 2004. . . . .	8
<b>Figura 2.2 c</b> Producción tradicional del cemento Portland, calcinación. Portland Cement Association. 2004. . . . .	8
<b>Figura 2.2 d</b> Producción tradicional del cemento Portland, dosificación y distribución. Portland Cement Association. 2004. . . . .	8
<b>Figura 2.3 a</b> Producción moderna del cemento Portland, proceso seco. Portland Cement Association. 2004. . . . .	9
<b>Figura 2.3 b</b> Producción moderna del cemento Portland, proceso seco. Portland Cement Association. 2004. . . . .	9
<b>Figura 2.3 c</b> Producción moderna del cemento Portland, dosificación y distribución. Portland Cement Association. 2004. . . . .	10
<b>Figura 2.4</b> Familia de 27 cementos comunes, dividida en las 5 familias principales. UNE-EN-197-1. 2011. . . . .	12
<b>Figura 2.5</b> Familia de 7 cementos comunes resistentes a los sulfatos, dividida en las 3 familias principales. UNE-EN-197-1. 2011. . . . .	12
<b>Figura 2.6</b> Consumo de cemento en España 2000-2019 (Oficemen, 2020). Consumo de Cemento en España enero-junio 2020 (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, 2020). . . . .	18
<b>Figura 2.7</b> Consumo de cemento en Ecuador 2000-2016 (Instituto ecuatoriano del cemento y del hormigón, 2017). . . . .	19
<b>Figura 2.8</b> Consumo per cápita de cemento en Ecuador y España durante los años 2000-2016 (Instituto ecuatoriano del cemento y del hormigón, Oficemen), 2017. . . . .	19
<b>Figura 2.9</b> Límites especificados en la norma ASTM C33 para el agregado fino y grueso. (Design and control of concrete mixtures ), 2016. . . . .	24
<b>Figura 2.10</b> Relación entre el módulo granulométrico y la resistencia del hormigón (Jimenez Montoya y col. 2010). . . . .	25
<b>Figura 2.11</b> Granulometría óptima para el hormigón. (Concrete Mixture Optimización, James S. M. Shilstone, ACI 1990). . . . .	26
<b>Figura 2.12</b> Límites permitidos del agua para el uso de mezclas de hormigón. EHE 2008. . . . .	27
<b>Figura 2.13</b> Sistema de reutilización de agua en el hormigón. Design and Control of Concrete Mixture 16th Edition. 2016. . . . .	28
<b>Figura 2.14</b> Tabla 29.2Tipos de aditivos. EHE. 2008. . . . .	31
<b>Figura 2.15</b> Mecanismo de arrastre de aire. Thomas and Wilson. Portland Cement Association. 2002. . . . .	32
<b>Figura 2.16</b> Mecanismo de acción dispersiva de los aditivos reductores de agua (Thomas y Wilson 2002). . . . .	32
<b>Figura 2.17</b> Mecanismo de impedimento estérico de los aditivos reductores de agua de policarboxilato (Thomas y Wilson 2002). . . . .	33

<b>Figura 2.18</b> Requisitos para el hormigón según la clase de exposición. ACI 318. 2019. . . . .	34
<b>Figura 2.19</b> Relación a/c recomendadas por la EHE de acuerdo a su exposición. 2008. . . . .	35
<b>Figura 2.20</b> Curva granulométrica de J. Faury. 1944. . . . .	36
<b>Figura 2.21</b> Enfoques de dosificación del hormigón: (a) Diseño tradicional; (b) optimización experimental; (c) optimización computacional. Computational design optimization of concrete mixtures: A review. M.A.De Rousseau y col. 2018. . . . .	39
<b>Figura 2.22</b> Funcionamiento de una red neuronal. Tomado de: <a href="https://data-flair.training/blogs/artificial-neural-networks-for-machine-learning/">data-flair.training/blogs/artificial-neural-networks-for-machine-learning/</a> . 2020. . . . .	41
<b>Figura 2.23</b> Tipología de funciones de transferencia. Navarro Ferrer, 2016. . . . .	42
<b>Figura 2.24</b> Gráfico del sobreaprendizaje de la red neuronal. Flores López y col. 2008. . . . .	44
<b>Figura 3.1</b> Histograma del tipo de cemento en las dosificaciones. . . . .	50
<b>Figura 3.2</b> Resistencia a compresión de los cementos usados en las mezclas. Fuente: fabricantes. . . . .	51
<b>Figura 3.3</b> Frecuencia de los aditivos utilizados en las mezclas. . . . .	52
<b>Figura 3.4</b> Frecuencia de combinación entre los aditivos utilizados en las mezclas. . . . .	52
<b>Figura 3.5</b> Frecuencia de combinación detallada entre los áridos utilizados en las mezclas. . . . .	53
<b>Figura 4.1</b> Resistencia a compresión de las probetas de hormigón a la edad de 28 días en función del contenido de agua. . . . .	56
<b>Figura 4.2</b> Resistencia a compresión de las probetas de hormigón a la edad de 7 días en función del contenido de agua. . . . .	56
<b>Figura 4.3</b> Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 28 días en función del contenido de cemento. . . . .	57
<b>Figura 4.4</b> Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 7 días en función del contenido de cemento. . . . .	57
<b>Figura 4.5</b> Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 28 días de edad en función de la relación a/c. . . . .	58
<b>Figura 4.6</b> Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 7 días de edad en función de la relación a/c. . . . .	58
<b>Figura 4.7</b> Resistencia de las probetas a la edad de 28 días en función de la temperatura medida en el laboratorio y en la obra. . . . .	59
<b>Figura 4.8</b> Resistencia de las probetas a la edad de 7 días en función de la temperatura medida en el laboratorio y en la obra. . . . .	59
<b>Figura 4.9</b> Temperatura máxima y mínima promedio de las ciudades de Gonzalo Pizarro y Valencia. Fuente: <a href="http://www.weatherspark.com">www.weatherspark.com</a> . . . . .	60
<b>Figura 4.10</b> Precipitación mensual promedio de las ciudades de Gonzalo Pizarro y Valencia. Fuente: <a href="http://www.weatherspark.com">www.weatherspark.com</a> . . . . .	60
<b>Figura 4.11</b> Promedio mensual de humedad presente en los áridos. . . . .	61
<b>Figura 4.12</b> Correlación cuadrática de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días en función del mes de hormigonado. . . . .	61
<b>Figura 4.13</b> Correlación cuadrática de la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días en función del mes de hormigonado. . . . .	61
<b>Figura 4.14</b> Evolución de la resistencia a compresión a los 28 días respecto al mes de fabricación. . . . .	62
<b>Figura 4.15</b> Evolución de la resistencia a compresión a los 7 días respecto al mes de fabricación. . . . .	63
<b>Figura 4.16</b> Porcentaje de los hormigones en función de su consistencia. . . . .	63
<b>Figura 4.17</b> Descenso del cono de Abrams en laboratorio y en obra del hormigón convencional de acuerdo con el mes de hormigonado. . . . .	64
<b>Figura 4.18</b> Descenso cono de Abrams en laboratorio y en obra del hormigón autonivelante de acuerdo con el mes de hormigonado. . . . .	64
<b>Figura 4.19</b> Resistencia a compresión a los 28 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón convencional en el laboratorio y en la obra. . . . .	65
<b>Figura 4.20</b> Resistencia a compresión a los 28 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón autonivelante en el laboratorio y en la obra. . . . .	65
<b>Figura 4.21</b> Resistencia a compresión a los 7 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón convencional en laboratorio y en obra. . . . .	65
<b>Figura 4.22</b> Resistencia a compresión a los 7 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón autonivelante en laboratorio y en obra. . . . .	66
<b>Figura 4.23</b> Grafica de correlación entre resistencias a compresión del hormigón a los 7 y 28 días de edad de la muestra de estudio. . . . .	70
<b>Figura 4.24</b> Resumen estadístico descriptivo para la resistencia del hormigón a la edad de 28 días. . . . .	72
<b>Figura 4.25</b> Gráfica de normalidad de la muestra de resistencia del hormigón a 28 días. . . . .	73

<b>Figura 4.26</b> Resumen estadístico descriptivo para la resistencia del hormigón a la edad de 7 días. . . . .	73
<b>Figura 4.27</b> Gráfica de normalidad de la muestra de resistencia del hormigón a 7 días. . . . .	74
<b>Figura 5.1</b> Coeficientes de correlación obtenidos en una de las ejecuciones de la RNA_1 en Matlab. . . . .	78
<b>Figura 5.2</b> Entorno de la red neuronal en Matlab R2018b. . . . .	79
<b>Figura 5.3</b> RNA_1: resistencia a compresión a los 28 días con todas las variables. . . . .	80
<b>Figura 5.4</b> RNA_2: resistencia a compresión a los 7 días con todas las variables. . . . .	80
<b>Figura 5.5a</b> Entorno de la red neuronal en SPSS. . . . .	81
<b>Figura 5.5b</b> Entorno de la red neuronal en SPSS. . . . .	81
<b>Figura 5.5c</b> Entorno de la red neuronal en SPSS. . . . .	81
<b>Figura 5.6</b> Información de la red neuronal en SPSS. . . . .	82
<b>Figura 5.7</b> Importancia de las variables independientes para la red neuronal en SPSS. . . . .	82
<b>Figura 5.8</b> RNA_3 resistencia a compresión a los 28 días con todas las variables. Red neuronal de SPSS. . . . .	83
<b>Figura 5.9</b> RNA_4 resistencia a compresión a los 7 días con todas las variables. Red neuronal de SPSS. . . . .	83
<b>Figura 5.10</b> RNA_5 resistencia a compresión a los 28 días con 17 variables. . . . .	85
<b>Figura 5.11</b> RNA_6 resistencia a compresión a los 7 días con 17 variables. . . . .	85
<b>Figura 5.12</b> RNA_7 resistencia a compresión a los 28 días con 17 variables. . . . .	86
<b>Figura 5.13</b> RNA_8 resistencia a compresión a los 7 días con 17 variables. . . . .	87
<b>Figura 5.14</b> RNA_9 resistencia a compresión a los 28 días con 12 variables. . . . .	87
<b>Figura 5.15</b> RNA_10 resistencia a compresión a los 7 días con 12 variables. . . . .	88
<b>Figura 5.16</b> RNA_11 resistencia a compresión a los 28 días con 10 variables. . . . .	89
<b>Figura 5.17</b> RNA_12 resistencia a compresión a los 7 días con 10 variables. . . . .	89
<b>Figura 5.18</b> RNA_13 resistencia a compresión a los 28 días con 9 variables tomadas del proceso de stepwise. . . . .	90
<b>Figura 5.19</b> RNA_14 resistencia a compresión a los 7 días con 7 variables tomadas del proceso de stepwise. . . . .	91
<b>Figura 5.20</b> RNA_15 resistencia a compresión a los 7 días con 15 variables. . . . .	91
<b>Figura 5.21</b> RNA_16 resistencia a compresión a los 28 días con 15 variables. . . . .	92
<b>Figura 5.22</b> Predicción de fc28 mediante el uso de la metaheurística kriging. . . . .	95
<b>Figura 5.23</b> Predicción de fc7 mediante el uso de la metaheurística kriging. . . . .	95

# Índice de tablas

<b>Tabla 2.1</b> Resumen de los cementos aplicados con la norma ASTM C150, C1157 y 595. (Adaptada de Tabla 2-3 Applications for commonly used cements), Design and control of concrete mixtures. PCA (Portland Cement Association), 2016. . . . .	17
<b>Tabla 2.2</b> Consumo en Mt de cemento en España durante los años 2019 y 2020. (Estadística del cemento, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, 2020) . . . . .	18
<b>Tabla 2.3</b> Rocas y constituyentes minerales en los agregados. Tabla 8.1: Design and control of concrete mixtures, PCA, 2016. . . . .	21
<b>Tabla 2.4</b> Principales características y ensayos que deben cumplir los áridos, Design and control of concrete mixtures, PCA, 2016. . . . .	22
<b>Tabla 2.5</b> Tamices estándar para granulometrías de los áridos de acuerdo con las normas ASTM C136 2020 y EHE 2008. . . . .	23
<b>Tabla 2.6</b> Límites permitidos del agua para el uso de mezclas de hormigón. Tabla 2 de ASTM C1602. 2019. . . . .	27
<b>Tabla 2.7</b> Definición de los tipos de aditivos. ASTM C494-19, 2020. . . . .	30
<b>Tabla 2.8</b> Clasificación de RNA, por tipo de conexión y aprendizaje. Adaptación de Navarro Ferrer. 2016. . . . .	42
<b>Tabla 2.9</b> Número de neuronas de la capa oculta según algunos autores. Navarro Ferrer. 2016. . . . .	43
<b>Tabla 3.1</b> Clasificación de las granulometrías de acuerdo con el tamaño máximo de agregado. . . . .	48
<b>Tabla 3.2</b> Variables utilizadas en la base de datos del estudio de predicción de compresión mediante uso de redes neuronales. . . . .	49
<b>Tabla 3.3</b> Información de la resistencia a compresión y tiempo de fraguado de los cementos usados en las mezclas. Fuente: fabricantes. . . . .	50
<b>Tabla 3.4</b> Características de los aditivos utilizados. Fuente: fabricantes. . . . .	51
<b>Tabla 3.5</b> Tabla con frecuencias acumuladas de los aditivos utilizados. . . . .	52
<b>Tabla 3.6</b> Frecuencias del uso combinado de los áridos en las mezclas. . . . .	53
<b>Tabla 3.7</b> Uso de las diferentes porciones granulométricas usadas en el estudio. . . . .	53
<b>Tabla 3.8</b> Promedio mensual de humedad presente en los áridos. . . . .	54
<b>Tabla 4.1</b> Frecuencias del tipo de hormigón en función de su consistencia. . . . .	63
<b>Tabla 4.2</b> Resultados del coeficiente de determinación $R^2$ de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días de edad en función de las diferentes variables. . . . .	66
<b>Tabla 4.3</b> Pasos sucesivos para la resistencia a compresión de las variables de hormigón, $fc_{28}$ . . . . .	68
<b>Tabla 4.4</b> Ecuaciones de regresión para la resistencia a compresión a 28 días, $fc_{28}$ y sus respectivos $R^2$ . . . . .	68
<b>Tabla 4.5</b> Pasos sucesivos para la resistencia a compresión de las variables de hormigón, $fc_7$ . . . . .	69
<b>Tabla 4.6</b> Ecuaciones de regresión para la resistencia a compresión a 7 días, $fc_7$ y sus respectivos $R^2$ . . . . .	70
<b>Tabla 4.7</b> Coeficientes de las constantes a y b del modelo ACI 209R-92 para condiciones de curado medio. . . . .	71
<b>Tabla 4.8</b> Relación de resistencias a compresión a 7 y 28 días de edad, según diferentes autores. . . . .	71
<b>Tabla 5.1</b> Variables y software utilizados para las cuatro primeras redes neuronales artificiales. . . . .	76

Tabla 5.2	Valores de R obtenidos del número de neuronas en la capa oculta en la RNA_1. . . . .	77
Tabla 5.3	Valores de R <sup>2</sup> obtenidos en Matlab y SPSS. . . . .	84
Tabla 5.4	Variables de entrada y salida de las diferentes RNA. . . . .	84
Tabla 5.5	Parámetros obtenidos para la RNA_5. . . . .	85
Tabla 5.6	Parámetros obtenidos para la RNA_6. . . . .	86
Tabla 5.7	Parámetros obtenidos para la RNA_7. . . . .	86
Tabla 5.8	Parámetros obtenidos para la RNA_8. . . . .	87
Tabla 5.9	Parámetros obtenidos para la RNA_9. . . . .	88
Tabla 5.10	Parámetros obtenidos para la RNA_10. . . . .	88
Tabla 5.11	Parámetros obtenidos para la RNA_11. . . . .	89
Tabla 5.12	Parámetros obtenidos para la RNA_12. . . . .	89
Tabla 5.13	Parámetros obtenidos para la RNA_13. . . . .	90
Tabla 5.14	Parámetros obtenidos para la RNA_14. . . . .	91
Tabla 5.15	Parámetros obtenidos para la RNA_15. . . . .	91
Tabla 5.16	Parámetros obtenidos para la RNA_16. . . . .	92
Tabla 5.17	Resumen redes neuronales ejecutadas: variables y resultados. . . . .	93
Tabla 6.1	Resultados de diferentes métodos para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días de edad. . . . .	97
Tabla 6.2	Resultados de diferentes métodos para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días de edad. . . . .	97
Tabla 6.3	RNA en Matlab con todas las variables a la edad de 7 y 28 días. . . . .	98
Tabla 6.4	RNA en SPSS con todas las variables a la edad de 7 y 28 días. . . . .	98
Tabla 6.5	Metaheurística kriging con todas las variables a la edad de 7 y 28 días. . . . .	98
Tabla 6.6	Coefficientes de determinación obtenidos para la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 y 28 días, con diferentes metodologías a la misma base de datos. . . . .	99
Tabla 6.7	Coefficiente de determinación de la resistencia a compresión a los 28 días de las probetas del proyecto, ejecutadas con RNA. . . . .	99
Tabla 6.8	Coefficiente de determinación de la resistencia a compresión a los 7 días de las probetas del proyecto, ejecutadas con RNA. . . . .	100
Tabla A1	Tabla 1. Requisitos de composición estándar de la norma ASTM C 150 – 20. 2020. . . . .	114
Tabla A2	Tabla 2. Requisitos de composición opcionales de la norma ASTM C 150 – 20. 2020. . . . .	114
Tabla A3	Tabla 3. Requisitos físicos estándar de la norma ASTM C 150 – 20. 2020. . . . .	115
Tabla A4	Tabla 4. Requisitos físicos opcionales de la norma ASTM C 150 – 20. 2020. . . . .	115
Tabla A5	Figura X1.1. Ejemplo de informe de prueba de la planta, ASTM C 150 – 20. 2020. . . . .	117
Tabla A6	Figura X1.2. Ejemplo de informe de datos adicionales, ASTM C 150 – 20. 2020. . . . .	117
Tabla B1	Tabla 1. Requisitos físicos estándar, ASTM C 1157 – 20. 2020. . . . .	118
Tabla C1	Tabla 1. Requisitos químicos, ASTM C 595/595M. 2019. . . . .	122
Tabla C2	Tabla 2. Requisitos físicos para cementos mezclados, ASTM C 595/595M. 2019. . . . .	123
Tabla C3	Tabla 3. Requisitos físicos para cementos mezclados con propiedades especiales, ASTM C 595/595M. 2019. . . . .	123
Tabla C4	Tabla 4. Requisitos para la puzolana para uso en cementos mezclados y para escoria para uso en cemento de escoria de alto horno Portland tipo IS (<25) y cemento ternario mezclado tipo IT (S <25), ASTM C 595/595M. 2019. . . . .	124
Tabla D1	Extracto de la base de datos de 1074 ensayos con todas sus variables. . . . .	125
Tabla E1	Base de datos integra utilizada para el estudio con 709 ensayos y 22 variables, incluidas las variables predicción. . . . .	127

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

La palabra hormigón proviene del latín: “formicus” que significa forma, “concretus” que quiere decir: crecer unidos o unir, “bitumen” que se traduce como: primer conglomerante (betún) y del arameo “beta” que significa casa. Desde el hormigón más antiguo que data hace 9000 años, un suelo de cal descubierto en la región de Galilea hasta el hormigón convención actual que es la mezcla de un conglomerante hidráulico (generalmente, cemento Portland), áridos y agua. Se ha convertido hoy en día en el material más usado en la construcción a nivel global (Milly, Dunne, & Vecchia, 2005)

La maleabilidad en su estado fresco y su resistencia una vez endurecido se han convertido en las principales características de este material, siendo estas las especificaciones básicas al momento de elegir un hormigón para un determinado elemento o una estructura a construir; estas características se denominan trabajabilidad y resistencia a compresión simple.

El hormigón ha sido utilizado no solo por sus capacidades de resistencia, sino también por su durabilidad, tal es el caso de estructuras que datan sobre los dos milenios de construcción como es Panteón de Roma (27 A.C). El hormigón romano o “opus caementicium” contenía ladrillo fragmentado y agregado grueso de roca volcánica de dimensiones de escala decimétrica unidas por un mortero puzolánico, basado en cenizas volcánicas alteradas inicialmente mezcladas con cal

hidratada (Brune & Perucchio, Ingraffea & Jackson, 2010). Haciendo de este no solo un elemento netamente estructural cuya finalidad es soportar carga sino también convirtiéndose en un creador de espacio como son las obras de Eduardo Torroja Miret (1899-1961), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Oscar Niemeyer (1907-2012) entre otros.



(a) Panteón de Roma, 27 A.C.



(b) Hipódromo de la Zarzuela. 1941.



(c) Palazzetto dello Sport. 1957.



(d) Le Volcan (salle). 2015.

**Figura 1.1.** Estructuras de hormigón. (a) Diseño: Imperio Romano. Foto: Wynand van Poortvliet (<https://unsplash.com/@wwwynand>). (b) Diseño: Eduardo Torroja. Foto: Ximo Michavila (<http://ximomichavila.es/>). (c) Diseño: Pier Luigi Nervi. Foto: <https://flickr.com/people/javier1949/>. (d) Diseño: Oscar Niemeyer. Foto: Philippe Breard - Ville du Havre.

En cuanto a la resistencia del material el comité estadounidense, American Concrete Institute (ACI) en su norma 211.1 (Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete) menciona que la resistencia a compresión del hormigón se determina por la cantidad neta de agua que se emplea por cantidad unitaria de cemento total de los materiales cementantes, esta correlación es conocida como la relación agua/cemento ( $a/c$ ). Lo que indica que a menor valor de  $a/c$  mejorará la resistencia a compresión del elemento de hormigón.

En lo que tiene que ver con la dosificación del hormigón el ACI-318 (Requisitos de reglamento para hormigón estructural) establece que debe cumplir 3 aspectos: trabajabilidad y consistencia, resistencia a la exposición que va a ser sometida la estructura y cumplir la resistencia a compresión

mínima establecida en el diseño. Independiente de la norma que se aplique o el país donde este se fabrique el objetivo será siempre el mismo, construir estructuras más resistentes y duraderas, en donde el contenido de material cementante y agua total serán las principales variables a la hora de diseñar un hormigón.

En cuanto a la fabricación de hormigones que se realizan en plantas industriales, se trata de controlar al máximo las cantidades de cada uno de los componentes y los equipos disponen de tecnología para garantizar que los pesos de cada uno de los elementos estén dentro un rango aceptable de valores y se puede tener todas estas variables controladas pero en algunas ocasiones es difícil obtener información certera de las cantidades exactas de cada una de las descargas que estos realizan o la variabilidad por ejemplo de humedad que tendrán los áridos a diferentes horas del día, por más que este valor sea calculado a diferentes horas, la heterogeneidad propia de los materiales hará que los cálculos realizados no tengan una exactitud de laboratorio.

Los métodos normativos de la fabricación del hormigón han sido utilizados por décadas, teniendo resultados satisfactorios por lo que otras variables distintas a la relación a/c y granulometrías de áridos, no han sido consideradas para la predicción de valores de resistencia a compresión a los 28 días, entre las cuales tenemos la temperatura a la que está siendo fabricada y colocada, los tiempos de transporte del camión hormigonera, el tiempo que dura la descarga, entre otras variables que no constan en las normativas internacionales que *a priori* deberíamos suponer que no tendrían mayor impacto o relevancia a la hora de entender y conocer la evolución de las resistencias del hormigón a diferentes edades.

Según Marcel van Gerven y Sander Bohte, las RNA (redes neuronales artificiales) son modelos computacionales vagamente inspirados en el comportamiento observado en su homólogo biológico. Las RNA son modelos de caja negra, desarrollados para resolver problemas en los que las relaciones de los diferentes componentes son complejas, las variables o reglas de relación no son fáciles de obtener, o existe escaso conocimiento pero sí existe la experiencia de una serie de datos (López y Caicedo 2006). Diversos autores coinciden en definir la inteligencia artificial (IA) como una ciencia que tiene por objeto el diseño y la construcción de máquinas capaces de imitar el comportamiento inteligente de los seres humanos (Navarro Ferrer, 2016).

Con estos algoritmos que se han desarrollado en los últimos años, podemos realizar modelos predictivos con correlaciones bastante aceptables, en el caso que concierne a este trabajo de fin de máster, obtener una variable de salida como la resistencia a compresión a los 7 y 28 días, en función de variables que normalmente no se tiene en cuenta en diseños de dosificación

convencionales usadas en el ACI 211.1, como son la hora a la que fue fabricado el hormigón, el tiempo que tomó el transporte desde su fabricación hasta la llegada a obra, el tiempo en hormigonar un determinado volumen de un camión hormigonera, entre otros.

La aplicación de las RNA se ha extendido también a la predicción de propiedades del hormigón relacionadas con la durabilidad, como la estimación de la profundidad de carbonatación (Lu y Liu 2008), la permeabilidad (Yasarer 2010), la difusión del ión cloro (Peng y col. 2002) (Nezhad y col. 2010), la corrosión en el refuerzo (Ukrainczyk y col. 2007), la degradación por ataque de sulfatos (Hewayde y col. 2007), la categoría del hormigón en términos de durabilidad (Morcoux y Lounis 2005) (Ukrainczyk y col. 2007).

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es utilizar las RNA para comprender y predecir resultados de resistencias a la compresión simples de especímenes que fueron tomados in situ, en base a variables que normalmente no son consideradas para el diseño de dosificación clásico, estos ensayos fueron realizados durante la construcción de una central hidroeléctrica construida en Ecuador en el año 2016; estas muestras fueron cilindros que cumplían la norma ASTM C 172 (Práctica estándar para el muestreo del hormigón recién mezclado) y ASTM C 31 (Práctica estándar para la fabricación y curado en campo de especímenes de hormigón para su ensayo).

Para la comprensión de estos resultados se utilizarán correlaciones de variables y con modelos de regresión, analizaremos el coeficiente de determinación entre estas variables utilizando estadística clásica compararemos con los resultados obtenidos utilizando RNA y modelos de optimización heurísticos.

## 1.2 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

*Capítulo 1:* Introducción: en este capítulo se hace una breve descripción de conceptos fundamentales y un preámbulo de lo que el lector encontrará en los siguientes capítulos más a detalle, así como también los objetivos y estructura de este trabajo de fin de máster.

*Capítulo 2:* Estado del Conocimiento: se aborda el estado actual que está el conocimiento en materiales, normativas y avances de estudios académicos publicados que compete al desarrollo de este trabajo en la fabricación, dosificación de mezclas y desarrollo de técnicas que se ha utilizado

para la comprensión del comportamiento del hormigón. Además se compila información de los avances y usos de las redes neurales artificiales e inteligencia artificial en el ámbito del desarrollo tecnológico para realizar modelos predictivos en campo del hormigón y sus aplicaciones. En este capítulo se encuentra un extracto de la traducción al castellano de las normas ASTM, referente a los materiales constituyentes del hormigón, además se recopila información actual de la industria cementera de España en el primer semestre del 2020 y se hace una comparación de los últimos años con el Ecuador.

*Capítulo 3:* Base de Datos: describe detalladamente el origen y la forma de obtención de la información de los diferentes ensayos de los materiales que se realizaron al cemento, aditivos y áridos que fueron utilizados para la elaboración de la base de datos en la cual se aplicaron los diferentes métodos análisis tanto de estadística clásica como de redes neuronales y modelos de optimización heurísticos.

*Capítulo 4:* Estudio estadístico clásico: se analiza la resistencia a compresión del hormigón mediante el uso del coeficiente de determinación, en función de diferentes parámetros medidos como el contenido del agua, cemento, temperatura, descenso del cono de Abrams, entre otros. Además se analiza la evolución de la resistencia que tuvo el hormigón en el proyecto ecuatoriano y se compara con estudios realizados en la ciudad española de Valencia.

*Capítulo 5:* Aplicación de redes neuronales artificiales: en la base de datos obtenidas en el capítulo 3, se aplica Inteligencia Artificial, mediante uso de redes neuronales artificiales en los softwares Matlab e IBM SPSS Statics, también se aplica métodos de optimización metaheurísticos en donde el parámetro de medición en cada ejecución es el coeficiente de determinación.

*Capítulo 6:* Análisis de resultados: luego de haber recabado la información del proyecto hidroeléctrico y este ser sometido a un análisis estadístico clásico, redes neuronales y métodos de optimización metaheurístico, se compara la potencia que tiene cada método utilizado observando cual software y método es más confiable en la predicción de la resistencia a compresión del hormigón.

*Capítulo 7:* Conclusiones: se escribe las conclusiones y recomendaciones luego del estudio realizado a los resultados de los ensayos de los materiales del proyecto realizado en Ecuador.

## Capítulo 2

# ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1 Materiales constituyentes del hormigón.

#### 2.1.1 Cemento

El 21 de octubre de 1824 el británico Joseph Aspdin, le conceden en su país de origen la patente BP5022 titulada “*An Improvement in the Modes of Producing an Artificial Stone*” (Una mejora en el modo de producción de una piedra artificial) como indica la figura 2.1. Que define al cemento Portland como: un material pulverulento que amasado con agua y con arena endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la isla de Pórtland, por ello lo denominó cemento Portland. En este caso, la temperatura empleada era inferior a la necesaria para producir la clinkerización. Puede decirse que el prototipo del cemento moderno fue producido a escala industrial por Isaac Johnson quien en 1845 logró conseguir temperaturas suficientemente altas para clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza empleadas como materia prima (Criado Sanz, 2007). El primer embarque de cemento llegó a América en 1868, siendo EEUU el primer país del continente en tener una planta propia en Pensilvania en 1871. La producción de cemento en Latinoamérica empezó al final del siglo XIX y principios del siglo XX: 1888 en Brasil, 1897 en Guatemala, 1898 en Cuba, 1903 en México, 1907 en Venezuela, 1908 en Chile, 1909 en Colombia,



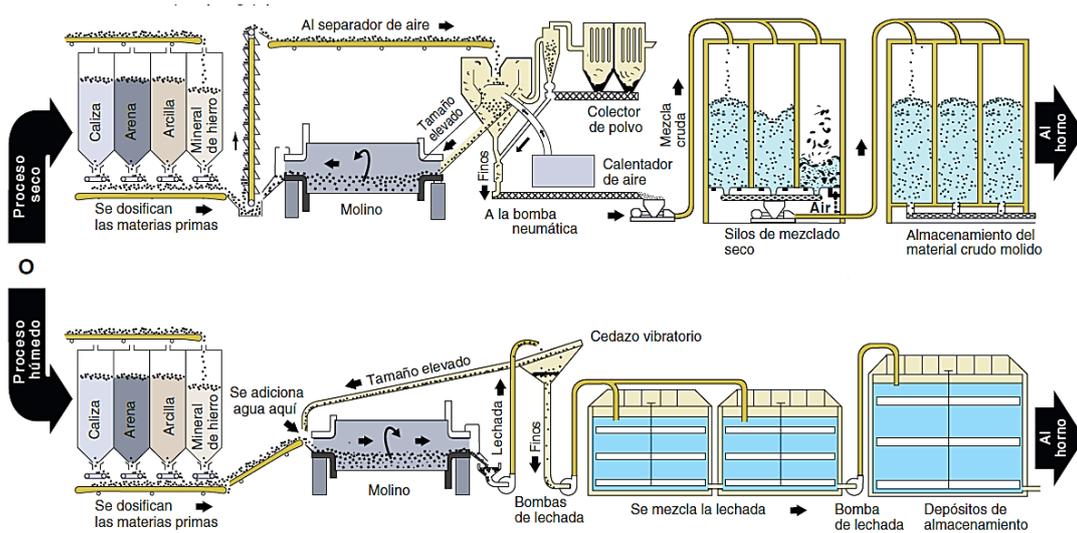


Figura 2.2 b Producción tradicional del cemento Portland, procesos. Portland Cement Association. 2004.

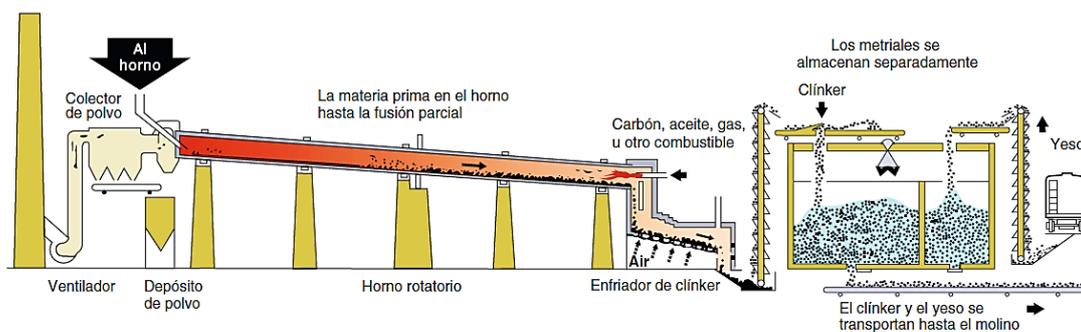


Figura 2.2 c Producción tradicional del cemento Portland, calcinación. Portland Cement Association. 2004.

4. Cuando el clinker y el yeso son almacenados, estos se dosifican como indica la figura 2.2 d hasta tener el cemento en presentación comercial. El cemento Portland es polvo fino que pasa a través de un tamiz de abertura 45 micrómetro (No. 325).

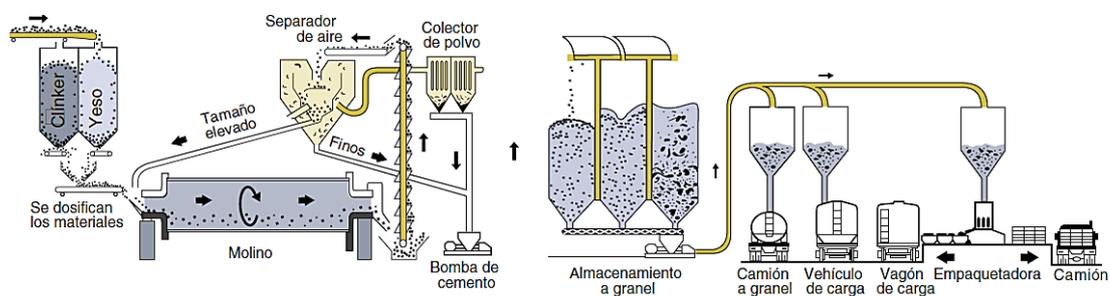


Figura 2.2 d Producción tradicional del cemento Portland, dosificación y distribución. Portland Cement Association. 2004.

### 2.1.1.2. Producción Moderna de Cemento Portland

En cuanto a la *producción moderna* se ilustra desarrollos tecnológicos importantes en cuanto a temas como la productividad y eficiencia energética de las plantas con proceso seco. El proceso de extracción de materias primas se realiza igual como se indica la figura 2.2 a.

1. Las materias primas se mezclan de manera controlada por la parte superior del horno, mientras que en el horno rotatorio se realiza la combustión desde la parte inferior.

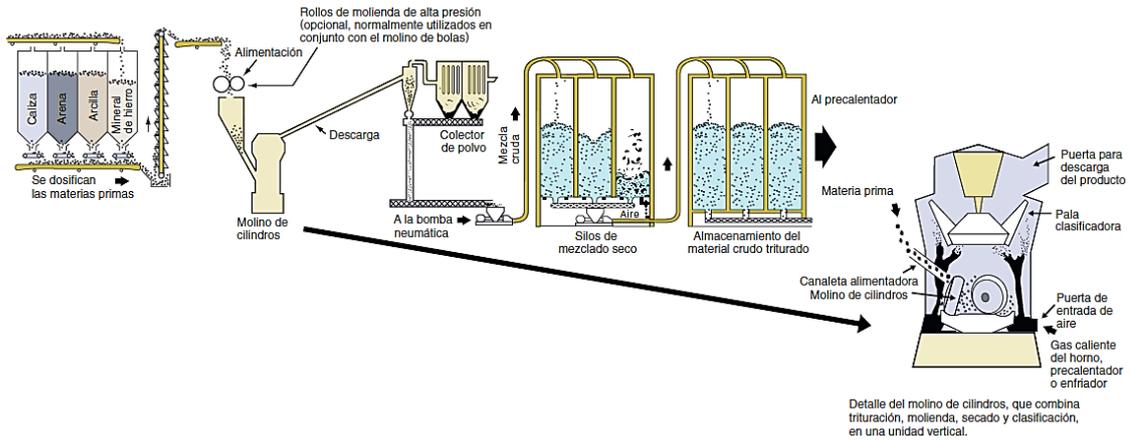


Figura 2.3 a Producción moderna del cemento Portland, proceso seco. Portland Cement Association. 2004.

2. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento, a diferencia del proceso *tradicional*, en este se observa un precalentador de 4 etapas antes de llegar al horno instantáneo y el horno rotatorio de menor longitud.

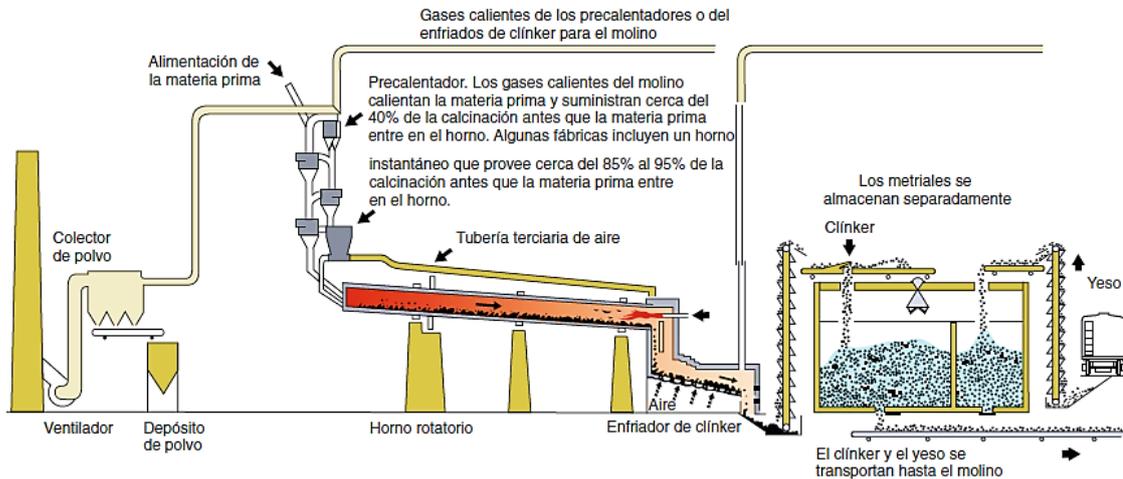


Figura 2.3 b Producción moderna del cemento Portland, proceso seco. Portland Cement Association. 2004.

- El yeso y el clinker son almacenados para luego molerlos y convertirlos en cemento Portland listos para ser despachados.

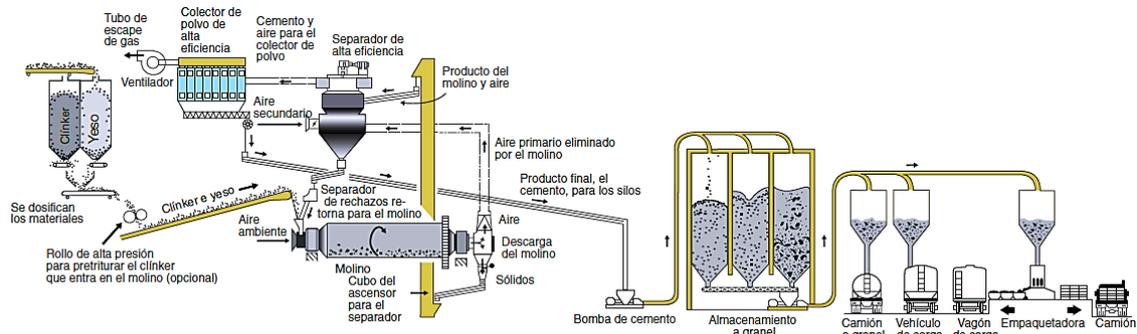


Figura 2.3 c Producción moderna del cemento Portland, dosificación y distribución. Portland Cement Association. 2004.

### 2.1.1.3. Definiciones de algunos autores

Entre la bibliografía consultada, hemos de destacar a los siguientes autores la definición de cemento:

- *ASTM C 219 (Terminología estándar relacionada con el cemento hidráulico)*: un cemento hidráulico producido por pulverización de clinker, 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 (Terminología del cemento y el hormigón)*: cemento hidráulico que se produce pulverizando clinker de cemento Portland y que generalmente contiene sulfato de calcio.
- *UNE-EN-197-1 (Norma española: Cemento, Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes)*: el cemento es un conglomerante hidráulico, es decir un material inorgánico molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.
- *H. F. Taylor (1978)* El cemento es el conglomerante hidráulico que se utiliza para fabricar hormigón y mortero. En la fabricación del cemento intervienen calizas, margas y arcillas en proporciones adecuadas. Estas materias primas, una vez trituradas y tamizadas son introducidas en un horno cilíndrico que gira a razón de dos vueltas por minuto y en el que se inyecta el combustible pulverizado a contracorriente, alcanzándose temperaturas superiores a los 1.500 °C. Se logra así obtener el clinker, que está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminatos de calcio.

### 2.1.1.1 Normativa del Cemento en España

La producción del cemento en España esta se realiza de acuerdo con la norma española, que cumple con los estamentos de la Comisión Europea, esta norma define las especificaciones de 27 cementos comunes distintos, 7 cementos comunes resistentes a los sulfatos, así como 3 cementos de horno alto de baja resistencia inicial y de 2 cementos de horno alto de baja resistencia inicial resistentes a los sulfatos y de sus componentes. Las especificaciones a detalle de cada uno de los componentes principales que se precisan a continuación se recogen en el artículo 5.2 de la mencionada norma:

- ❖ Clinker de Cemento Portland (K).
- ❖ Escoria granulada de horno alto (S).
- ❖ Materiales puzolánicos (puzolana natural (P), puzolana natural calcinada(Q)).
- ❖ Ceniza volante (sílicea V, calcárea W).
- ❖ Esquisto calcinado (T).
- ❖ Caliza (<0,2% en masa LL, <0,5% en masa L).
- ❖ Humo de sílice (D).

En la figura 2.4 se recogen la familia de los 27 cementos comunes con su respectiva denominación los cuales se agrupan en 5 familias principales.

1. CEM I: Cemento Portland.
2. CEM II: Cemento Portland compuesto.
3. CEM III: Cemento de horno alto.
4. CEM IV: Cemento puzolánico.
5. CEM V: Cemento compuesto.

Los 7 productos de la familia de los cementos Portland comunes resistentes a los sulfatos se presentan en la figura 2.5, los cuales se agrupan en tres tipos de cementos principales:

1. CEM I-SR 0: Cemento Portland resistente a los sulfatos ( $C_3A$  en el clinker = 0%).
2. CEM I-SR 3: Cemento Portland resistente a los sulfatos ( $C_3A$  en el clinker  $\leq 3\%$ ).
3. CEM I-SR 5: Cemento Portland resistente a los sulfatos ( $C_3A$  en el clinker  $\leq 5\%$ ).
4. CEM III/B-SR: Cemento de horno alto resistente a los sulfatos (no tiene requisito relativo al contenido de  $C_3A$  en el clinker).
5. CEM III/C-SR: Cemento de horno alto resistente a los sulfatos (no tiene requisito relativo al contenido de  $C_3A$  en el clinker).

6. CEM IV/A-SR Cemento puzolánico resistente a los sulfatos (contenido de C<sub>3</sub>A en el clínker ≤ 9%).
7. CEM IV/B-SR Cemento puzolánico resistente a los sulfatos (contenido de C<sub>3</sub>A en el clínker ≤ 9%).

Tipos principales	Designación y denominación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa <sup>a</sup> )										Componentes minoritarios adicionales		
			Componentes principales												
			Clinker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado	Caliza				
						natural	natural calcinada	silicea	calcárea		L	LL			
K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5	
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM II/A-P	80-94	—	—	6-20	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
	Cemento Portland con puzolana	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
		CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	—	—	0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/B-L	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	—	—	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6-20	—	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Cemento Portland compuesto <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->										0-5	
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->										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 <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	—	←----- 11-35 ----->					—	—	—	0-5		
		CEM IV/B	45-64	—	←----- 36-55 ----->					—	—	—	0-5		
CEM V	Cemento compuesto <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	—	←----- 18-30 ----->		—	—	—	—	—	—	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	—	←----- 31-49 ----->		—	—	—	—	—	—	0-5	

<sup>a</sup> Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.  
<sup>b</sup> La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.  
<sup>c</sup> 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 clínker se deben declarar en la designación del cemento (véanse los ejemplos en el capítulo 8).

Figura 2.4: Familia de 27 cementos comunes, dividida en las 5 familias principales. 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 <sup>a</sup> )				Componentes minoritarios adicionales
			Componentes principales				
			Clinker	Escoria de horno alto	Puzolana natural	Ceniza volante silicea	
K	S	P	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 <sup>b</sup>	CEM IV/A-SR	65-79	—	←----- 21-35 ----->		0-5
		CEM IV/B-SR	45-64	—	←----- 36-55 ----->		0-5

<sup>a</sup> Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.  
<sup>b</sup> 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 2.5: Familia de 7 cementos comunes resistentes a los sulfatos, dividida en las 3 familias principales. UNE-EN-197-1. 2011.

La nomenclatura para todos estos cementos CEM, viene acompañada de los valores de resistencia a compresión a los 28 días comerciales de 32,5, 42,5 y 52,5 MPa, 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 – SR 5, se deberá leer como un cemento Portland de resistencia 32,5 MPa con elevada resistencia inicial y resistente a los sulfatos con un contenido de  $C_3A$  en el clínker  $\leq 5\%$  en masa.

#### 2.1.1.2 Normativa del cemento en Ecuador

El cemento viene especificado por la norma técnica ecuatoriana INEN (instituto ecuatoriano de normalización): INEN, *NTE-INEN-152:2012* Cemento Portland, *NTE-INEN-2380:2011* Cemento hidráulico y *NTE-INEN-490:2011* Cementos Hidráulicos Compuestos Requisitos; que están basadas en las normas:

- *ASTM C 150 -11*: Especificación normalizada para cemento Portland.
- *ASTM C 1157-10*: Especificación normalizada de desempeño para cemento hidráulico.
- *ASTM C 595 -10*: Especificación normalizada para cementos hidráulicos mezclados.

Dado que las normas norteamericanas se actualizan en periodos de tiempo más cortos que la ecuatoriana, detallaremos la versión más reciente de estas.

#### **ASTM C150/C150M-20 Especificación estándar para el cemento Portland<sup>1</sup>:**

La ASTM C150, contempla el uso de 10 familias de cementos:

1. Tipo I: para unas cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.
2. Tipo IA: cemento incorporador de aire para los mismos usos que Tipo I, donde se desea incorporación de aire.
3. Tipo II: para uso general, pero más específicamente cuando se desee una resistencia moderada a los sulfatos.
4. Tipo II A: cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II, cuando se desee incorporación de aire.
5. Tipo II (MH): para uso general, pero más especialmente cuando se desee un calor de hidratación moderado y una resistencia a sulfatos moderada.

---

<sup>1</sup> Standard Specification for Portland Cement. La versión más reciente, aprobada el 24 de abril de 2020, se encuentra en Inglés, se ha realizado una traducción para este TFM.

6. Tipo II (MH)A: cemento con incorporación de aire para los mismos usos que los del Tipo II(MH), cuando se desee incorporación de aire.
7. Tipo III: para uso cuando se desea alta resistencia inicial.
8. Tipo IIIA: cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo III, donde se desea incorporación de aire.
9. Tipo IV: para uso cuando se desee un bajo calor de hidratación.
10. Tipo V: para uso cuando se desee una alta resistencia a los sulfatos.

NOTA 1: Algunos cementos se designan con una clasificación de tipo combinada, como, por ejemplo, el Tipo I/II, lo cual indica que el cemento cumple con los requisitos de los tipos indicados y se ofrece como apropiado para el uso cuando se desee utilizar cualquiera de esos tipos.

NOTA 2: En algunas áreas, no hay disponibilidad comercial de cemento que cumpla con los requisitos de todos los tipos. Antes de especificar el uso de un cemento que no sea el de Tipo I, determine si el tipo de cemento sugerido está disponible o podría estarlo.

El contenido de la norma abarca temas como: información de pedidos, ingredientes, composición química, propiedades físicas, guía del contenido del suministrador, se encuentran en el *Anejo A*.

## **ASTM C1157/C1157M-20: Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico.<sup>2</sup>**

Esta especificación de desempeño trata de los cementos hidráulicos para uso tanto general como especial. No hay restricciones en la composición del cemento o de sus componentes:

NOTA 1: Hay dos normas relacionadas con el cemento hidráulico, la Especificación C 150 para cemento Portland y las Especificaciones C 595 (esta especificación prescribe ingredientes y proporciones, con algunos requisitos de desempeño, mientras que la C1157 es una especificación para el cemento hidráulico en la cual los criterios de desempeño por sí solos rigen a los productos y su aceptación) para cementos adicionados, ambas contienen requisitos prescriptivos y de desempeño.

Esta especificación de desempeño clasifica cementos en base a los requisitos específicos para uso general:

- Alta resistencia inicial.
- Resistencia al ataque de sulfatos.
- Calor de hidratación.

Se indican requisitos opcionales para la propiedad de baja reactividad con agregados reactivos álcali-sílice y para los cementos incorporadores de aire.

---

<sup>2</sup> Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. La versión más reciente, aprobada el 24 de abril de 2020, se encuentra en Inglés, se ha realizado una traducción para este TFM.

Los tipos de cementos hidráulicos cubiertos por esta especificación están clasificados de acuerdo con las propiedades específicas definidas en la Tabla 1. Los cementos conforme a esta norma deben ser designados de acuerdo con la siguiente nomenclatura, cuando no se especifique el tipo, debe aplicarse los requisitos del tipo GU.

- Tipo GU: Cemento hidráulico para construcción general. Utilícelo cuando uno o más de los tipos especiales no son requeridos.
- 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.

Opciones adicionales: Las siguientes opciones adicionales de compra se aplica para cualquiera de los tipos principales listados. Cuando una o ambas de estas opciones se invoca, su designación de letra y título debe seguir inmediatamente después de la designación de letra respectiva y título del tipo principal (por ejemplo, Tipo MS(R) o Tipo MS(A)).

- Opción R: (baja reactividad con Agregados Reactivos Álcali-Sílice) Cuando sea ensayado a la actividad potencial con agregados reactivos, el cemento debe cumplir con los requisitos de la Tabla 1 para la Opción R.
- Opción A: (incorporadores de aire) Cementos incorporadores de aire deberán cumplir con los requisitos de contenido de aire la Tabla 1 para la Opción A.

La tabla 1 mencionada se encuentran en el *Anejo B*.

### **ASTM C595/C595M-19 Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados<sup>3</sup>.**

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 clínker de cemento Portland o escoria con caliza.

NOTA 1: Esta especificación prescribe ingredientes y proporciones, con algunos requisitos de desempeño, mientras que la Especificación de desempeño C1157 es una especificación para el cemento hidráulico en la cual los criterios de desempeño por sí solos rigen a los productos y su aceptación.

---

<sup>3</sup> Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. La versión más reciente, aprobada el 24 de abril de 2020, se encuentra en Inglés, se ha realizado una traducción para este TFM.

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

Cementos hidráulicos mezclados para construcción general con hormigón:

- *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.
- La denominación para los cementos mezclados se deberá hacer agregando el sufijo (X) a la designación del tipo, donde la (X) equivale al porcentaje deseado de escoria, puzolana o caliza del producto, expresado como un número entero de masa del producto mezclado final, dentro de la variación admisible, según lo estipulado en 15.3 de esta norma.
- La práctica de denominación para los cementos ternarios mezclados se deberá hacer agregando los sufijos (AX) y (BY) a la designación Tipo IT, donde:
- A corresponde a “S”, de escoria (slag), o a “P”, de puzolana, o a “L”, de caliza (limestone),
- el material que esté presente en mayor cantidad en masa; y
- X es el porcentaje deseado en masa del componente A, y
- B corresponde a “S”, de escoria, o a “P”, de puzolana, o a “L”, de caliza; e
- Y es el porcentaje deseado en masa del componente B.
- Tanto el valor X como el valor Y se expresan como un número entero de masa del producto mezclado final, dentro de la variación admisible, según lo estipulado en 15.3 de esta norma.
- Si X e Y fueran iguales, enumere los dos componentes en orden alfabético por tipo de componente (caliza, escoria o puzolana).

A continuación se muestran ejemplos de la práctica de denominación de acuerdo con los dos puntos anteriores (todos porcentajes en masa):

Tipo IS(20)= Cemento binario mezclado con 80 % de cemento Portland y 20 % de escoria

Tipo IT(S20)(P10)= Cemento ternario mezclado con 70 % de cemento Portland, 20 % de escoria

Tipo IT(L10)(P10) = Cemento ternario mezclado con 80 % de cemento Portland, 10 % de caliza y 10 % de puzolana

El contenido de la norma abarca temas como: propiedades especiales, materiales, fabricación, requisitos químicos y propiedades físicas se encuentran en el *Anejo C*.

## Resumen de uso de los cementos aplicados con la norma ASTM C150, C1157 y C595:

En la tabla 2.1 se indica el uso de cementos especificados en las tres normas de cementos comúnmente utilizados en la fabricación de hormigón.

Especificación Cemento	Uso General	Moderado calor de hidratación	Alta resistencia inicial	Bajo calor de hidratación	Moderada resistencia a los sulfatos	Alta resistencia a los sulfatos	Incorporador de aire
ASTM C 150 Cemento Portland	I	II (MH)	III	IV	II, II (MH)	V	IA, IIA, II(MH)A, IIIA
ASTM C1157 Cementos hidráulicos	GU	MH	HE	LH	MS	HS	A**
ASTM C595 Cementos hidráulicos mezclados	IL, IP IS (<70), IT (S<70)	IL (MH), IP(MH), IS (<70)(MH), IT (S<70)(MH)	-	IL (LH), IP(LH), IS (<70)(LH), IT (S<70)(LH)	IL (MS), IP(MS), IS (<70)(MS), IT (S<70)(MS)	IL (HS), IP(HS), IS (<70)(HS), IT (S<70)(HS)	A**

\*\* Cualquier cemento en las columnas a la izquierda puede ser usado como cemento con aire incorporado

**Tabla 2.1** Resumen de los cementos aplicados con la norma ASTM C150, C1157 y C595. (Adaptada de Tabla 2-3 Applications for commonly used cements), Design and control of concrete mixtures. PCA (Portland Cement Association), 2016.

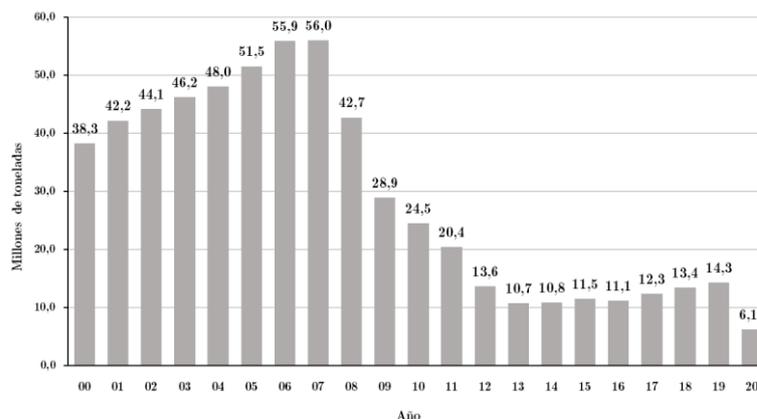
### 2.1.2 Estudio sobre de la Industria Cementera en España y Ecuador

El consumo de cemento en España cerró 2019 en 14'254.420 toneladas, un 5,9% más que en 2018, lo que supone un crecimiento cercano a las 800.000 toneladas, según los últimos datos publicados en la Estadística del Cemento. España acumula una caída en el primer semestre del año 2020 del 16,5%, que en valores absolutos supone la pérdida de 1'226.458 t respecto al mismo período de 2019. Entre enero y junio se consumieron en nuestro país 6'187.818 t, según los últimos datos publicados en la Estadística del Cemento. (Oficemen 2020).

En el mes de enero se registró un decrecimiento de 9,6%, en febrero un aumento de 0,5%, entre los meses de marzo y abril que España estuvo en Estado de Alarma confinada debido a la pandemia por el Covid-19 el consumo decayó a 39,6% y 101% respectivamente, durante el mes de mayo que en algunas provincias de España reiniciaron de manera restringida las actividades hubo un aumento de consumo respecto a los meses anteriores, pero la cifra respecto al año anterior fue de 21,7% menor.

En el mes de junio, el consumo de cemento en España se elevó a 1'338.600 t, lo que supone un 5,2% más que en el mismo mes del pasado año y un crecimiento en valores absolutos de casi 67.000 toneladas. Este porcentaje positivo ha estado influido por el hecho de que el mes de junio de este año contara con dos días hábiles más que el pasado. "En junio se han retomado muchas de las obras paralizadas durante el confinamiento, por ejemplo, las promociones inmobiliarias, pero el

dato positivo mensual no debe hacernos pensar en una recuperación del sector”, explica el presidente de Oficemen, Víctor García Brosa. (Oficemen, 2020)



**Figura 2.6** Consumo de cemento (Mt, millones de toneladas) en España 2000-2019 (Oficemen, 2020). Consumo de Cemento en España enero-junio 2020 (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, 2020).

### Consumo de Cemento en España 2019 -2020 (Mt)

	2019	2020	Comparación 2019 - 2020
Enero	1,135	1,035	-9,6%
Febrero	1,169	1,174	0,5%
Marzo	1,287	0,922	-39,6%
Abril	1,202	0,598	-101,0%
Mayo	1,392	1,144	-21,7%
Junio	1,271	1,338	5,0%

**Tabla 2.2** Consumo en Mt(millones de toneladas) de cemento en España durante los años 2019 y 2020. (Estadística del cemento, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, 2020).

Mientras tanto que en Ecuador el consumo de cemento creció durante la década de 2007-2017, cuando la inversión estatal tuvo un auge en la construcción, llegando a un consumo de 6,60 millones de toneladas en el año 2013, superando el consumo per cápita de España entre el periodo 2012 – 2016.

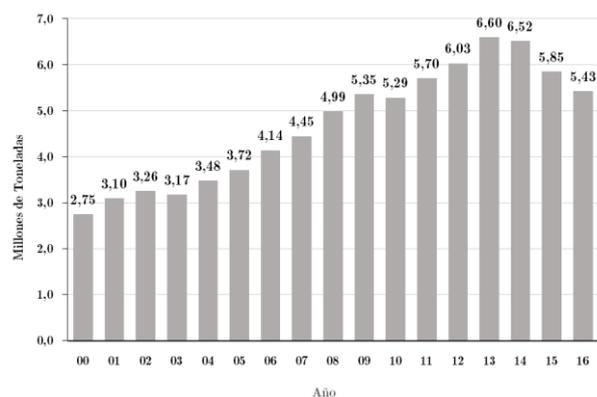
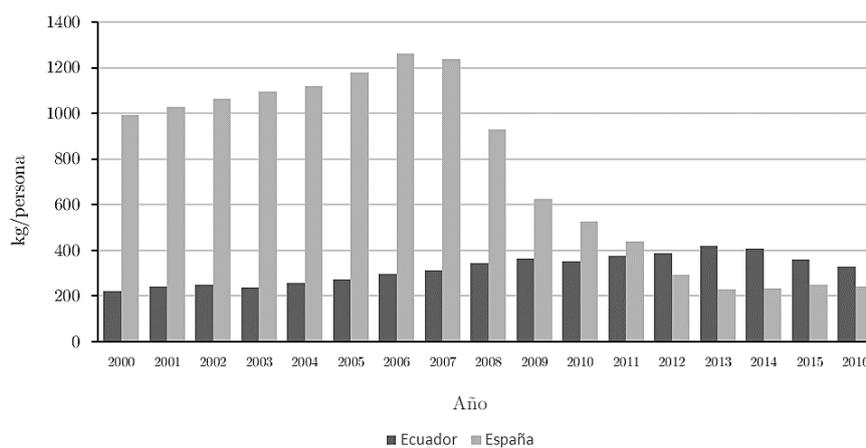


Figura 2.7 Consumo de cemento en Ecuador 2000-2016 (Instituto ecuatoriano del cemento y del hormigón, 2017)

Año	Ecuador kg/persona	España kg/persona
2000	219	994
2001	242	1027
2002	249	1065
2003	238	1095
2004	257	1120
2005	271	1180
2006	297	1260
2007	313	1238
2008	345	929
2009	363	624
2010	352	525
2011	374	437
2012	389	291
2013	418	231
2014	406	233
2015	359	248
2016	328	239

(a)



(b)

Figura 2.8 Consumo per cápita de cemento en Ecuador y España durante los años 2000-2016 (Instituto ecuatoriano del cemento y del hormigón, Oficemen), 2017

### 2.1.3 Áridos

La importancia del uso del tipo y de la calidad correctos del agregado (árido) no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del hormigón (70% a 85% de la masa) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del hormigón (Kosmatka *y col*, 2011).

Los áridos utilizados comúnmente en el hormigón son de tres tipos: naturales, artificiales y reciclados. Los áridos naturales generalmente son obtenidos de rocas naturales trituradas en una planta destinada a este propósito, la distribución por cantidad y tamaño es conocida como granulometría, y dependiendo del tipo de hormigón que vayamos a utilizar, se escogerá el tamaño máximo de agregado que tendrá este. Los agregados por su tamaño se dividen en dos grandes grupos, áridos finos que son arenas naturales o piedra triturada y áridos gruesos obtenidas usualmente en canteras destinadas para este uso.

En la norma *ASTM C294-19 Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates*, establece que los constituyentes de los agregados naturales son minerales y rocas.

Los minerales son sustancias inorgánicas naturales de composición química más o menos definida y generalmente de una estructura cristalina específica. La naturaleza física de los minerales formadores de rocas y los aspectos de la química de los cristales determinan las importantes propiedades físicas y químicas de los agregados minerales naturales. Ciertos conjuntos de minerales formadores de rocas poseen cualidades deseables para su uso como agregados en materiales cementosos.

Las rocas se clasifican según su origen en tres divisiones principales: ígneas, sedimentarias, metamórficas.

Estos tres grupos principales se subdividen en tipos según la composición mineral y química, la textura y la estructura interna. La mayoría de las rocas están compuestas de varios minerales, pero algunas están compuestas de un solo mineral. Ciertos ejemplos de la roca de cuarcita se componen exclusivamente del mineral de cuarzo, y ciertas calizas se componen exclusivamente de la calcita mineral. Los granos de arena individuales con frecuencia están compuestos de partículas de roca, pero pueden estar compuestos de un solo mineral, particularmente en los tamaños más finos.

Las rocas *ígneas* se forman a partir de materia fundida en la superficie de la tierra o debajo de ella.

Las rocas *sedimentarias* se forman cerca de la superficie de la tierra por la acumulación y consolidación de los productos de la intemperie y la erosión de las rocas existentes, o por precipitación química directa. Las rocas sedimentarias pueden formarse a partir de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias preexistentes.

Las rocas *metamórficas* se forman a partir de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas preexistentes por la acción del calor o la presión o ambas.

En la tabla 2.3 se encuentra los constituyentes de rocas y minerales en los agregados:

Minerales	Rocas ígneas	Rocas Sedimentarias	Rocas metamórficas	
Sílice	Carbonato	Granito	Conglomerado	Mármol
Cuarzo	Calcita	Sienita	Arenisca	Metacuarcita
Ópalo	Dolomita	Diorita	Cuarcita	Pizarra
Calcedonia	Sulfato	Gabro	Grauvaca	Filita
Tridimita	Yeso	Periodita	Subgrauvaca	Esquisto
Cristobalita	Anhidrita	Pegmatita	Arcosa	Anfibolita
Silicatos	Sulfato de hierro	Vidrio Volcánico	Piedra arcillosa, limonita, argilita y esquisto	Hornfels (roca córnea)
Feldespato	Pirita	Obsidiana	Carbonatos	Gneis
Ferromagnesiano	Marcasita	Piedra pómez (pumita)	Caliza	Serpentinita
Homblenda	Pirolita	Tufa (toba volcánica)	Dolomita	
Augita	Óxido de hierro	Cagafierro (escoria)	Marga	
Arcilla	Magnetita	Perlita	Greda (Creta)	
Ilita	Hematita	Vidrio volcánico		
Caolines	Goetita	Felsita	Chert	
Cloritas	Ilmenita	Basalto		
Montmorinollita	Limonita			
Mica				
Ceolita				

Tabla 2.3 Rocas y constituyentes minerales en los agregados. Tabla 8.1: Design and control of concrete mixtures, PCA, 2016

Los áridos que se utilizan en la composición del hormigón son materiales granulares inertes de tamaño inferior a 100 mm, de naturaleza inorgánica y de procedencia natural o artificial, que contribuyen a la estabilidad de volumen, resistencias y economía de los morteros y hormigones (Fernández Cánovas 2013).

La PCA (Portland Cement Association) recomienda que se evite el uso de materiales porosos, deleznales, o rocas que tengan esquistos, tampoco es deseado el empleo de ciertos tipos de roca chert (roca sedimentaria) debido a una mala respuesta que tienen frente a la intemperie y causan defectos en las superficies tales como erupciones.

Los agregados para hormigón de acuerdo con el peso se dividen en tres categorías: *pero normal*, *ligero* y *pesado*. 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 (Esta especificación cubre agregados especiales y / o agregados de alta densidad). Las características que los áridos deberán cumplir de acuerdo a la norma ASTM están recogidas en la tabla 2.4.

Característica	Significado	Designación del Test	Requerimiento o punto reportado
Definición de Constituyentes	Clara comprensión y comunicación	ASTM C125 ASTM C294	-
Resistencia a la abrasión y degradación	Índice del agregado: resistencia desgaste de pisos y pavimentos	ASTM C131 ASTM C535 ASTM C779	Porcentaje máximo de pérdida 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 período de inmunidad a congelación, factor de durabilidad
Resistencia a la desintegración de sulfatos	Solidez contra la acción de la intemperie	ASTM C88	Pérdida de masa, partículas que muestren fallas
Forma y textura superficial de las partículas	Trabajabilidad del hormigón fresco	ASTM C295 ASTM D3398 ASTM D4791	Porcentaje máximo de partículas planas y alongadas
Granulometría	Trabajabilidad del hormigón fresco; economía	ASTM C117 ASTM C136	Porcentajes mínimo y máximo que pasan por los tamices estándar
Degradación del agregado fino	Índice de calidad del agregado: resistencia a degradación durante el mezclado	ASTM C1137	Cambio de la granulometría
Contenido de vacíos no compactado del agregado fino	Trabajabilidad del hormigón fresco	ASTM C1252	Contenido de vacíos no compactado del agregado fino y gravedad específica
Densidad aparente (peso unitario)	Cálculo del diseño de la mezcla, clasificación	ASTM C29	Peso compactado y peso suelto
Densidad relativa (gravedad específica)	Cálculo del diseño de la 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	Aceptación del agregado fino que no haya pasado en los otros ensayos	ASTM C38 ASTM C79	La resistencia que exceda 95% de la resistencia lograda con arena purificada
Constituyentes de los agregados	Determinar la cantidad de material deletéreo y orgánico	ASTM C40 ASTM C87 ASTM C117 ASTM C123 ASTM C142 ASTM C295	Porcentaje máximo permitido de los constituyentes individuales
Resistencia a la reactividad con los álcalis y cambio de volumen	Sanidad contra cambios de volumen	ASTM C295 ASTM C586 ASTM C1105 ASTM C1260 ASTM C1293 ASTM C1778	Cambio máximo longitudinal, constituyentes, cantidad de sílice y alcalinidad

Tabla 2.4 Principales características y ensayos que deben cumplir los áridos, Design and control of concrete mixtures, PCA, 2016.

### 2.1.2.1 Granulometrías

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas del agregado, esta clasificación se realiza mediante el cribado del material en tamices con aberturas de malla estandarizadas, las medidas de abertura estándar de cada tamiz se encuentran en la norma ASTM C 136 para Ecuador mientras que en España se encuentra en la norma EHE-08.

La ASTM C136 (Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de los agregados finos y gruesos) en función del tamaño de partícula del agregado se clasifica en: agregados gruesos y agregados finos. El *agregado grueso* es la porción de material que se queda retenido en 11 tamices en donde la abertura de malla varía desde 5 pulgadas (125mm) hasta un tamaño de abertura de 3/8 pulgada (9,5 mm). El *agregado fino* es la porción de material retenido entre el tamiz N.4 (4,75 mm) y tamiz N.200 (75  $\mu$ m) distribuidos en un total de 7 tamices. La norma EHE-08 en su apartado 28.4 referente a la granulometría de los áridos, establece como *serie básica* de tamices la formada por los siguientes: 0,063 – 0,125 – 0,250 – 0,500 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 31,5 – 63 – 125 mm. Para el *árido fino*, la Instrucción utiliza únicamente los tamices de dicha serie. Para el *árido grueso*, utiliza además los tamices 10 – 20 – 40 mm, que están incluidos en la serie complementaria R20 admitida por la indicada norma. Además en este apartado se indica que es permitido un 6% de árido fino que pase por el tamiz de abertura de malla 0,063 mm en el caso de que sean arenas naturales de canto rodado y de un 6% a 16% que pase el tamiz de abertura de malla de 0,063 mm si son arenas producto de trituración o machaqueo de acuerdo a la exposición que este vaya a tener. En cuanto al árido grueso, la norma establece un límite de finos del 1.5% que pase el tamiz de 0,063 mm. Estos valores se resumen en la tabla 2.5.

	ASTM				EHE			
	Denominación	Unidad	Abertura	Unidad	Abertura	Unidad	Abertura	Unidad
Árido Grueso	5	in	125	mm	125	mm	125	mm
	4	in	100	mm	63	mm	63	mm
	3 1/2	in	90	mm	31,5	mm	40	mm
	3	in	75	mm	16	mm	31,5	mm
	2 1/2	in	63	mm	8	mm	20	mm
	2	in	50	mm	4	mm	16	mm
	1 1/2	in	37,8	mm	2	mm	14	mm
	1	in	25	mm	1	mm	12,5	mm
	3/4	in	19	mm	0,5	mm	10	mm
	1/2	in	12,5	mm	0,25	mm	8	mm
	3/8	in	9,5	mm	0,125	mm	6,3	mm
Árido Fino	No. 4		4,75	mm	0,063	mm	4	mm
	No. 8		2,36	mm			2	mm
	No. 16		1,18	mm			1	mm
	No. 30		600	$\mu$ m			0,5	mm
	No. 50		300	$\mu$ m			0,25	mm
	No. 100		150	$\mu$ m			0,125	mm
	No. 200		75	$\mu$ m			0,063	mm

Tabla 2.5 Tamices estándar para granulometrías de los áridos de acuerdo con las normas ASTM C136 2020 y EHE-08 2008.

La *Portlad Cement Association* (PCA) en su libro sobre el *Diseño y control de mezclas de hormigón* en lo referente al tamaño de los áridos indica que: la granulometría y los límites granulométricos se expresan generalmente en porcentaje de material que pasa a través de cada tamiz. La figura 2.9 enseña estos límites para el agregado fino y un tamaño de agregado grueso. Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, bien como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del hormigón. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del hormigón de una amasada a otra. Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad. En general, los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios.

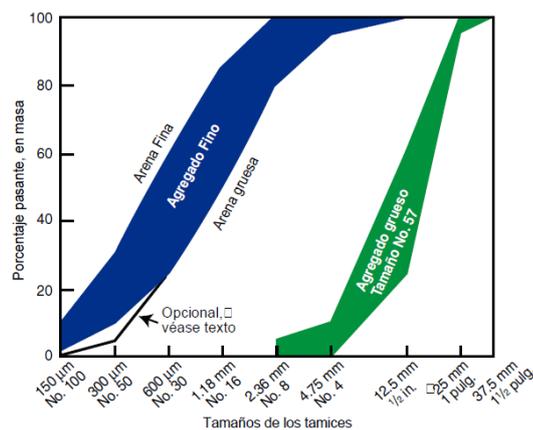


Figura 2.9 Límites especificados en la norma ASTM C33 para el agregado fino y grueso. (Design and control of concrete mixtures ), 2016

Otro parámetro que es comúnmente utilizado y que permite conocer las propiedades de los agregados tanto fino como grueso es el **módulo de finura (de Abrams) o módulo granulométrico**, en la norma ecuatoriana se calcula de acuerdo a la ASTM C125 (Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates) en su edición 2020 define al *módulo de finura* como un factor que se obtiene sumando los porcentajes acumulados retenidos en los siguientes tamices: No. 100 (150 µm), No. 50 (300 µm), No. 30 (600 µm), No. 16 (1,18 mm), No. 8 (2,36 mm), No.4 (4,75 mm), 3/8 pulgada (9,5 mm), 3/4 pulgada (19,0 mm), 1 1/2 pulgada (37,5 mm), 3 pulgadas (75 mm) y 6 pulgadas (150 mm) y dividido para 100.

En tanto que en España, la EHE-08 establece que el *módulo granulométrico* se calcule de acuerdo con la norma UNE 7295 (Determinación del contenido, tamaño máximo característico y módulo

granulométrico del árido grueso en el hormigón fresco), este se obtiene sumando el porcentaje retenido y acumulado en los tamices 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 31,5, 63 y 125 mm y dividiendo para 100.

La gradación o distribución del tamaño de partícula de los áridos afecta las propiedades del hormigón como la densidad de empaque, el contenido de huecos, la trabajabilidad y la resistencia (P. Goltermann y otros, 1997). Fuller adoptó el módulo de finura como una forma de ajustar la granulometría con la que consideró como óptima. De acuerdo con Abrams y Hummel y otros autores, no es necesario ceñirse a una curva granulométrica teórica, basta con que el módulo granulométrico del árido sea el mismo que el de la curva teórica adoptada, a igualdad de consistencia, ya que todas las mezclas con el mismo módulo demandan la misma cantidad de agua para producir hormigón de la misma docilidad y resistencia, siempre y cuando se utilice la misma cantidad de cemento. Esto es válido, también según Hummel y Abrams, para el caso de granulometría discontinua. (Navarro Ferrer, 2016).

Jimenez Montoya y col. (2010) indica que puede correlacionarse la resistencia a compresión del hormigón en términos relativos del módulo granulométrico, la figura 2.10 indica esta relación.



Figura 2.10 Relación entre el módulo granulométrico y la resistencia del hormigón (Jimenez Montoya y col. 2010).

En cuanto a la cantidad óptima de agregados gruesos y finos que una mezcla debe llevar, Abrams (1918) y James Shilstone (1990) demostraron los beneficios del análisis de la combinación de los agregados, ya que con una mezcla controlada de cada una de las partes se puede mejorar la trabajabilidad, la bombeabilidad, la retracción y otras propiedades del hormigón. En la figura 2.11 se indica el gráfico que propone Shilstone.

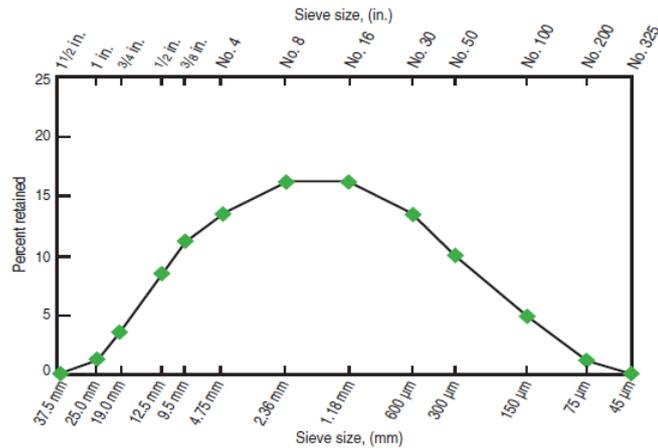


Figura 2.11 Granulometría óptima para el hormigón. (Concrete Mixture Optimización, James S. M. Shilstone, ACI 1990).

### 2.1.4 Agua

El agua conjuntamente con el cemento son los ingredientes más importantes de las mezclas de hormigón, si bien se recomienda siempre que sea posible el uso de agua potable a la hora de fabricar un hormigón no siempre es posible, debido a que muchas construcciones se llevan a cabo en lugares en donde el abastecimiento aún no ha llegado. En Ecuador la norma que el agua debe cumplir es la ASTM C1602 (*Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*) en donde se limita la cantidad de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos suspendidos presentes que son sustancias que son nocivas en el hormigón, la tabla 2.6 resume los límites que establece esta norma.

En tanto que la norma EHE-08, en su artículo 27 indica que el agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. Además la muestra será tomada conforme la norma UNE 83951. Este artículo citado además establece que está permitida el agua reciclada procedente de cubas en la propia central de hormigonado siempre y cuando cumplan los requisitos de la figura 2.12 cumpliendo además que la densidad no supere el valor de 1,3 g/cm<sup>3</sup> y que la densidad del agua total esté por debajo del valor de 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

La EHE también permite el uso de agua de mar únicamente en hormigones sin armadura, teniendo en cuenta que reduce un 15% la resistencia a compresión y recomienda que si se usa el agua de este origen se utilice un cemento con características adicionales MR o SR.

### Límites químicos para aguas usadas en el hormigón

	Limite	Método de ensayo
A. Cloruro, como $\text{Cl}^-$ , ppm		
Hormigón pretensado, losas de puentes, u otra designación.	500	C114
Hormigón armado en ambientes húmedos o que contengan incrustaciones de aluminio o metales diferentes o con encofrados metálicos galvanizados que permanezca en el lugar	1000	C114
B. Sulfatos como $\text{SO}_4$ , ppm	3000	C114
C. Álcalis como ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$ ), ppm	600	C114
D. Total de solidos por masa, ppm	50000	C1603

A No se prohíbe que los límites de especificación de esta tabla se especifiquen como elementos individuales o como un todo de acuerdo con la sección sobre información para pedidos de la Especificación C94 / C94M.

B ppm, es la abreviatura de partes por millón

C Los requisitos para hormigón en ACI 318 regirán cuando el fabricante pueda demostrar que estos límites para el agua de mezcla pueden excederse.

Para las condiciones que permiten el uso de acelerador de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) como aditivo, el comprador puede renunciar a la limitación de cloruro.

D Los métodos de prueba C114 incluyen métodos de prueba de referencia y alternativos para medir la concentración de cloruros, sulfatos y álcalis en soluciones preparadas a partir de la disolución de materiales cementosos. Utilice los métodos de prueba aplicables en los Métodos de prueba C114 para medir estos componentes. El laboratorio que realiza estas pruebas no está obligado a cumplir con los requisitos de calificación del método de los Métodos de prueba C114. Se permiten métodos alternativos de química húmeda e instrumental no enumerados en los Métodos de prueba C114 que miden la concentración de estas especies químicas en solución. Cuando se utilicen métodos alternativos, el método de prueba utilizado se incluirá en el informe.

**Tabla 2.6** Límites permitidos del agua para el uso de mezclas de hormigón. Tabla 2 de ASTM C1602. 2019.

— Exponente de hidrógeno pH (UNE 83952)	$\geq 5$
— Sustancias disueltas (UNE 83957)	$\leq 15$ gramos por litro (15.000 p.p.m)
— Sulfatos, expresados en $\text{SO}_4^-$ (UNE 83956), excepto para el cemento SR en que se eleva este límite a 5 gramos por litro (5.000 p.p.m)	$\leq 1$ gramo por litro (1.000 p.p.m)
— Ión cloruro, $\text{Cl}^-$ (UNE 7178):	
a) Para hormigón pretensado	$\leq 1$ gramo por litro (1.000 p.p.m)
b) Para hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	$\leq 3$ gramos por litro (3.000 p.p.m)
— Hidratos de carbono (UNE 7132)	0
— Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235)	$\leq 15$ gramos por litro (15.000 p.p.m)

**Figura 2.12** Límites permitidos del agua para el uso de mezclas de hormigón. EHE 2008.

#### 2.1.3.1 Agua reciclada para la mezcla de hormigón

El alto consumo de agua y la generación de aguas residuales en la industria del hormigón se han convertido en problemas medioambientales muy importantes (YL Mack-Vergara, 2017). En Brasil, se producen anualmente en planta unos 51 millones de  $\text{m}^3$  de hormigón y es el líder mundial en la

reutilización de este excedente de hormigón: alrededor del 9,0%, frente al 6,0% de EE. UU., El 2,5% de Europa y el 1,5% de Japón y Hong Kong (D. Xuan y otros, 2018). Según Borger (1994), el lavado externo e interno de cada camión mezclador demanda 800-1000 L de agua, generando las aguas grises. En tanto L. de BP Vieira (2016) indica que la limpieza de los camiones hormigonera generan unos 10 mil m<sup>3</sup> de agua de lavado al día. Después del lavado de los camiones, las aguas grises se llevan a los tanques de decantación (o decantador), que tienen la función de reducir la cantidad de material sólido y segregar aceites y otros elementos inmiscibles en agua. El agua resultante de este proceso de decantación se denomina agua reciclada (RW) o agua regenerada. En la mayoría de las situaciones el agua reciclada pasa a través de estanques de sedimentación donde los sólidos se depositan, dejando el agua clarificada, como se indica en la figura 2.13.

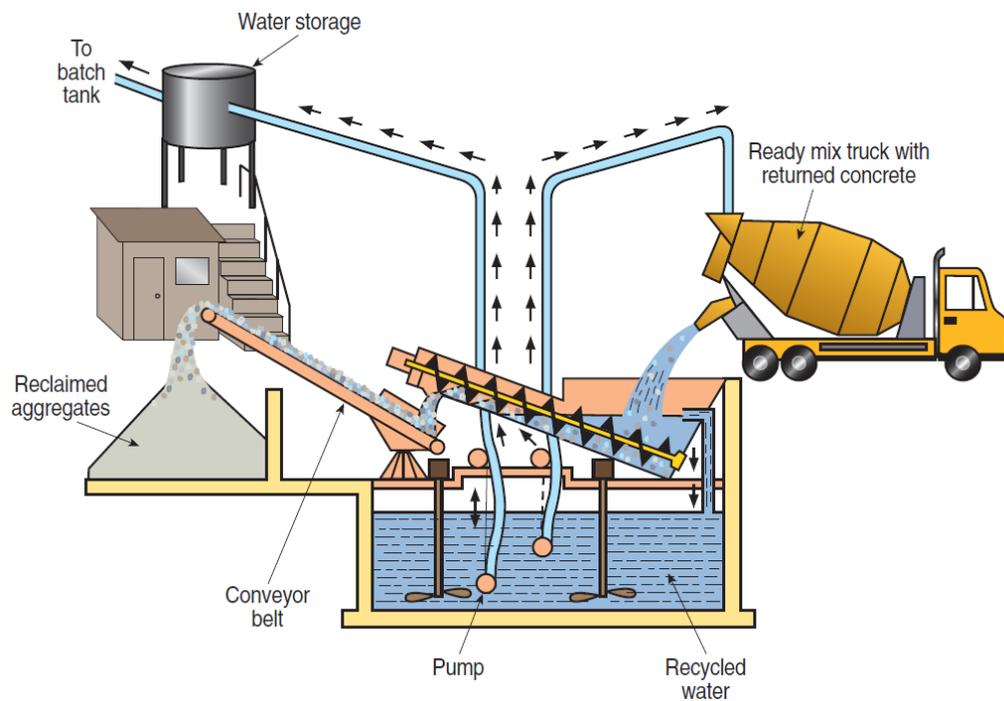


Figura 2.13 Sistema de reutilización de agua en el hormigón. Design and Control of Concrete Mixture 16th Edition. 2016

### 2.1.5 Aditivos

Varios tipos de aditivos químicos son usados para mejorar las propiedades de construcción del hormigón, como la trabajabilidad, la capacidad de bombeo, las propiedades de fraguado, el rendimiento mecánico, la durabilidad, como la resistencia a la congelación y descongelación y las propiedades de contracción. Como componente esencial del hormigón, se han aplicado ampliamente diferentes tipos de aditivos químicos para mejorar las propiedades. Los aditivos

químicos permiten la fabricación y construcción de hormigón premezclado de alto rendimiento y también de hormigones prefabricados. (J. Plank y otros, 2015).

Por definición del ACI 116 R un aditivo es: “un material diferente al agua, agregados, cemento hidráulico y fibras de refuerzo que se emplean como un ingrediente del hormigón o mortero y se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado”. Los aditivos químicos son usados para modificar las propiedades del hormigón y hacerlo más trabajable, durable y/o económico; incrementar o disminuir el tiempo de fraguado, acelerar la adquisición de resistencia, y/o controlar el desarrollo de la temperatura.

La norma norteamericana que establece los requisitos que los aditivos deben cumplir es la norma ASTM C494 (Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Hormigón), esta especificación trata sobre materiales para ser utilizados como aditivos químicos a ser agregados a mezclas de hormigón de cemento hidráulico en obra para el propósito indicado por los ocho tipos siguientes:

- *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, de alto rango,
- *Tipo G*: Aditivos reductores de agua, de alto rango, y retardadores,
- *Tipo S*: Aditivos de comportamiento específico.

Referente a los ensayos que se deben realizar a los aditivos esta norma indica que, excepto cuando los ensayos están siendo hechos para *comportamientos específicos*, todo hormigón debe ser dosificado utilizando la norma ACI 211.1-91 para cumplir con los requisitos exigidos. Un aditivo *Tipo S* debe ser ensayado en una dosificación dentro del rango recomendado por el fabricante para su uso en obra. Esta norma define a los aditivos de acuerdo a la tabla 2.7:

La UNE-EN934-2:2010+A1: (2012) define al aditivo químico como: "Producto incorporado en el momento del amasado del hormigón en una cantidad no superior al 5 %, en masa, en relación al contenido de cemento".

Tipo de Aditivo	Definición
<b>Acelerador</b>	Acelera el fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial o temprana del hormigón.
<b>Retardador</b>	Disminuye la velocidad de reacción de los materiales cementosos aumentando así el tiempo de fraguado del hormigón.
<b>Reductor de agua</b>	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.
<b>Reductor de agua, de alto rango</b>	Reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un hormigón de una consistencia dada en un 12% o más.
<b>Reductor de agua y acelerador</b>	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.
<b>Reductor de agua y retardador</b>	Reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un hormigón de una consistencia dada y retarda el fraguado del hormigón.
<b>Reductor de agua, de alto rango, y retardador</b>	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.
<b>Comportamiento específico</b>	Brinda una característica deseada de comportamiento (o varias) 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 2.7** Definición de los tipos de aditivos. ASTM C494-19, 2020.

La norma EHE-08, detalla en su artículo 29 que se entiende por aditivo aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento. En los hormigones armado o pretensado no podrán utilizarse como aditivos el cloruro de calcio, ni en general productos que intervengan cloruros, sulfuros, sulfitos y otros componentes químicos que puedan favorecer la corrosión de las armaduras. En cuanto a los elementos pretensados con armaduras ancladas exclusivamente por adherencia, no se podrá utilizar aditivos aireantes. En la prefabricación se podrá usar aditivos plastificantes que tengan un efecto secundario de inclusión de aire, siempre que se compruebe que no afecta a la adherencia con el hormigón y la armadura. En cualquier caso la cantidad total del aire ocluido nunca será mayor del 6% del volumen, medido según la UNE-EN 12350-7.

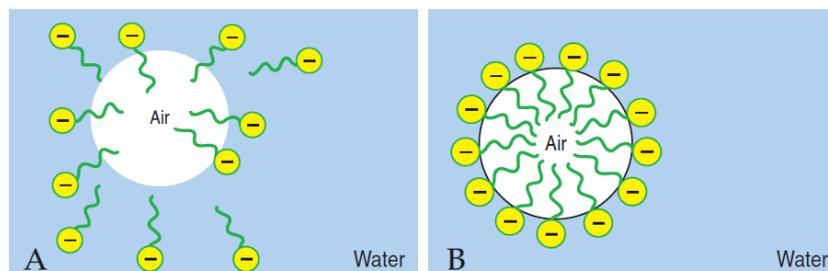
La figura 2.14 indica la tabla 29.2 de la norma EHE-08 en donde resume los tipos de aditivos que recoge esta norma.

**Tabla 29.2**  
Tipos de aditivos

Tipo de aditivo	Función principal
Reductores de agua / Plastificantes	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Reductores de agua de alta actividad / Superplastificantes	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Modificadores de fraguado / Aceleradores, retardadores	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón.
Incluidores de aire	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
Multifuncionales	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.

**Figura 2.14** Tabla 29.2 Tipos de aditivos. EHE. 2008.

La siguiente información es recogida por la *PCA* sobre aditivos incorporadores de aire y reductores de agua. Los *aditivos incorporadores de aire* fomentan la formación de burbujas de aire microscópicas (de 10 a 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro) sus partículas tensioactivas que se concentran en la interfaz aire-agua y reducen la tensión superficial fomentando la formación de burbujas microscópicas durante el proceso de mezcla. Los aditivos incorporadores de aire suelen tener una "cabeza" cargada negativamente que es hidrófila y atrae el agua, y una cola hidrófoba que repele el agua. El extremo hidrofóbico es atraído por el aire dentro de las burbujas generadas durante el proceso de mezcla. El extremo polar, que es hidrófilo, se orienta hacia el agua. El aditivo incorporador de aire forma una película resistente que repele el agua, similar a una película de jabón, con suficiente fuerza y elasticidad para contener y estabilizar las burbujas de aire. La película hidrófoba también mantiene el agua fuera de las burbujas (figura 2.15 A y B). La acción de agitar y amasar de la mezcla mecánica dispersa las burbujas de aire. La carga alrededor de cada burbuja genera fuerzas repulsivas que evitan la coalescencia de las burbujas (figura 2.15 C y D). La carga superficial hace que la burbuja de aire se adhiera a las superficies cargadas de cemento y partículas agregadas. Las partículas finas de agregado también actúan como una rejilla tridimensional para ayudar a mantener las burbujas en la mezcla. Esto mejora la cohesión de la mezcla y estabiliza aún más las burbujas de aire. (figura 2.15 E y F).



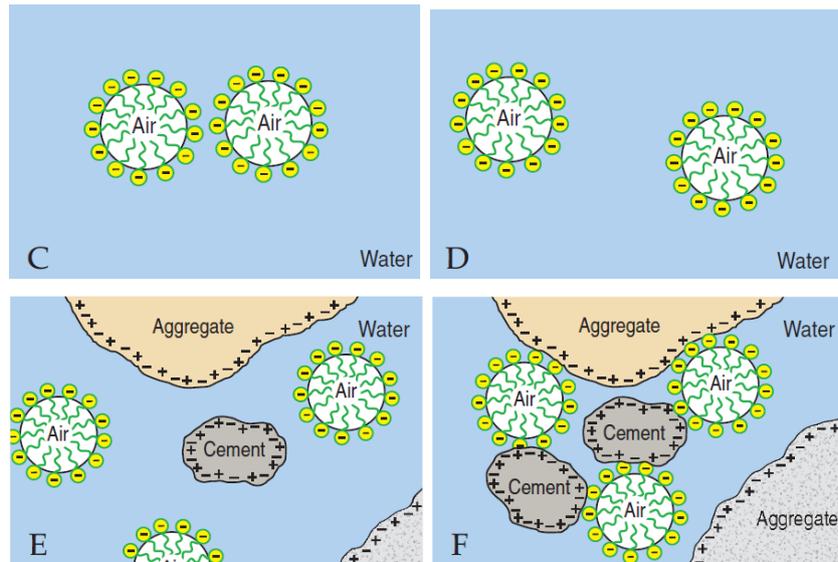


Figura 2.15 Mecanismo de arrastre de aire. Thomas and Wilson. Portland Cement Association, 2002.

Los aditivos *reductores de agua* funcionan como dispersantes de cemento principalmente a través de fuerzas repulsivas electrostáticas y estéricas. Los grupos ácidos dentro del polímero neutralizan las cargas superficiales de las partículas de cemento. Estos grupos se unen a iones positivos en las superficies de las partículas de cemento. Estos iones unen el polímero y le dan al cemento una ligera carga negativa, además de crear una capa en la superficie. Esta carga negativa y la capa de compuestos adsorbidos crean una combinación de fuerzas de repulsión electrostática y estérica entre partículas de cemento individuales, dispersándolas, liberando así el agua atrapada en aglomeraciones y reduciendo la viscosidad de la pasta y el hormigón como se muestra en la figura 2.16.

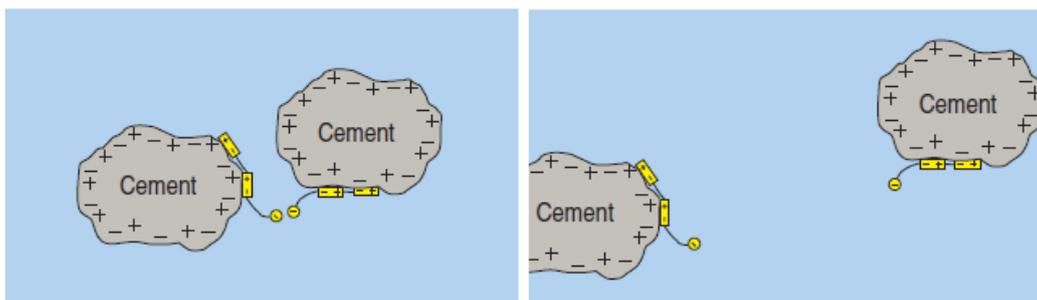
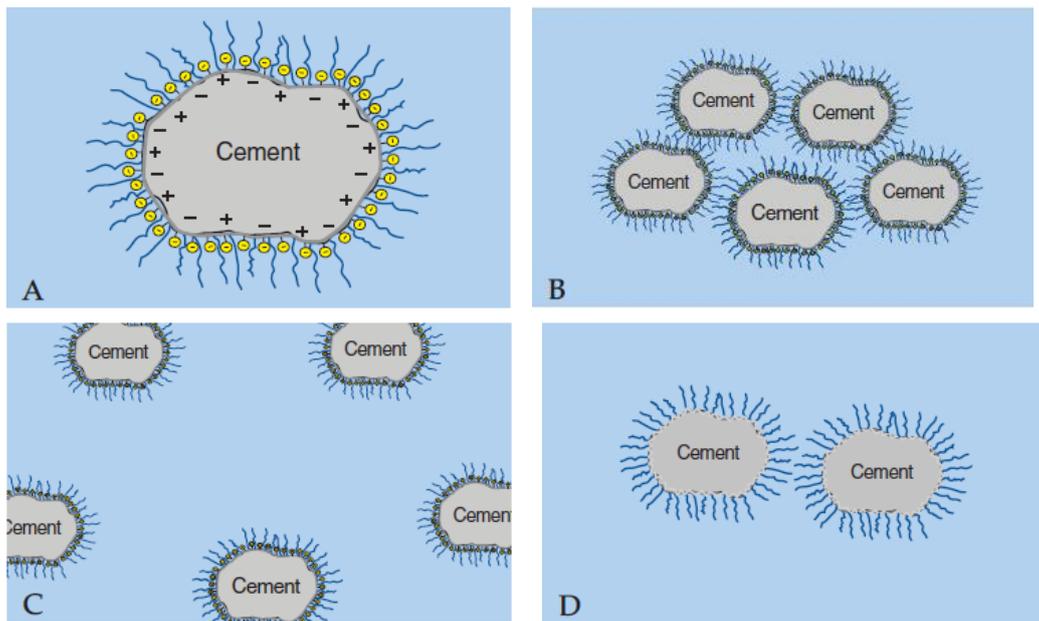


Figura 2.16 Mecanismo de acción dispersiva de los aditivos reductores de agua (Thomas y Wilson 2002).

Los aditivos derivados de *policarboxilato* son la última generación de reductores de agua y superplastificantes de alto rango. Estos polímeros están compuestos por una cadena de carbono principal con grupos carboxilato y cadenas laterales de óxido de polietileno (PEO). Las cadenas laterales de PEO se extienden desde las partículas de cemento y agregan el mecanismo de

impedimento estérico a la repulsión electrostática típica. Las largas cadenas laterales ayudan físicamente a mantener separados los granos de cemento, permitiendo que el agua los rodee por completo, como se indica en la figura 2.17 A y B. La cadena polar imparte una ligera carga negativa que hace que los granos de cemento se repelan entre sí (repulsión electrostática). A medida que el efecto de dispersión de la repulsión electrostática desaparece debido a la hidratación del cemento, las cadenas laterales largas aún mantienen físicamente el cemento disperso, figura 2.17 C y D.



**Figura 2.17** Mecanismo de impedimento estérico de los aditivos reductores de agua de policarboxilato (Thomas y Wilson 2002).

## 2.2 Dosificación

A la hora de tomar la decisión de elegir las cantidades optimas de cada ingrediente de la mezcla que conforma el hormigón, debemos tener en cuenta algunos aspectos para elegir la cantidad de cada uno de ellos, la exposición del ambiente al que el elemento va a estar sometido, la vida útil, el tamaño y la forma de la estructura son entre otros los aspectos o características más importantes a considerar cuando debemos elegir la dosificación del hormigón.

Desde los mismos inicios de la tecnología del hormigón, los investigadores, expertos e ingenieros han dedicado gran esfuerzo al estudio de la composición del hormigón. Sin embargo, muchos han concluido, después de numerosos estudios teóricos y experimentales, la gran dificultad para dosificar y fabricar el hormigón especificado para un proyecto de construcción (Navarro Ferrer, 2016).

Abrams en 1918 en su publicación sobre *Design of Concrete Mixtures* menciona que dentro del rango normal de resistencias usadas en la construcción del hormigón, la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua – material cementante. Para hormigones totalmente compactados, producidos con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades requeridas del hormigón, bajo las condiciones de obra, se gobiernan por la cantidad de agua de mezcla usada por unidad de cemento o material cementante.

Desde entonces diversas metodologías y recomendaciones en cuanto a dosificaciones para fabricar un hormigón durable han estado en función de la relación a/c, tanto en la norma Norteamérica ACI que es la más utilizada en América como la norma que se utiliza en Europa, la durabilidad de las estructuras viene condicionados por este valor dependiendo de la exposición a la que va a estar sometido. La figura 2.18 indica la tabla 19.3.2.1 del ACI-318-19 (Requisitos de reglamento para hormigón estructural) referente a los requisitos para el hormigón según la clase de exposición, vigente para el Ecuador y todos los países que tengan como base la norma norteamericana.

**Tabla 19.3.2.1 — Requisitos para el concreto según la clase de exposición**

Clase de Exposición	Relación a/mc máxima <sup>[1][2]</sup>	f <sub>c</sub> <sup>'</sup> Mínimo MPa	Requisitos mínimos adicionales			Límites en los Materiales cementantes
			Contenido de aire			
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0.55	24	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			N/A
F2	0.45	31	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			N/A
F3	0.40 <sup>[3]</sup>	35 <sup>[2]</sup>	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			26.4.2.2(b)
			Tipos de material cementante <sup>[4]</sup>			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150M	ASTM C 595M	ASTM C 1157M	
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.50	28	II <sup>[5][6]</sup>	Tipos con designación (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31	V <sup>[6]</sup>	Tipos con designación (HS)	HS	No se permite
S3	Op- ción 1	0.45	V más puzolanas o cemento de escoria <sup>[7]</sup>	Tipos con designación (HS) más puzolanas o cemento de escoria <sup>[7]</sup>	HS más puzolanas o cemento de escoria <sup>[7]</sup>	No se permite
	Op- ción 2	0.40	V <sup>[8]</sup>	Tipos con designación (HS)	HS	No se permite
W0	N/A	17	Ninguna			
W1	N/A	17	26.4.2.2(d)			
W2	0.50	28	26.4.2.2(d)			
			Contenido máximo de iones de cloruro (Cl <sup>-</sup> ) soluble en agua en el concreto, porcentaje por masa de materiales cementantes <sup>[9][10]</sup>		Requisitos adicionales	
			Concreto no preesforzado	Concreto preesforzado		
C0	N/A	17	1.00	0.06	Ninguno	
C1	N/A	17	0.30	0.06		
C2	0.40	35	0.15	0.06	Recubrimiento de concreto <sup>[11]</sup>	

<sup>[1]</sup> La a/mc se basa en todos los materiales cementantes y materiales cementantes suplementarios en la mezcla de concreto.

<sup>[2]</sup> Los límites de la a/mc máxima no aplican a concreto liviano.

<sup>[3]</sup> Para concreto simple, la máxima a/mc debe ser 0.45 y el mínimo f<sub>c</sub><sup>'</sup> debe ser 31 MPa.

<sup>[4]</sup> Las combinaciones alternativas de materiales cementantes que se incluyen se permiten para todas las clases de exposición a los sulfatos se ensayan para resistencia a los sulfatos y cumplen con 26.4.2.2(c).

<sup>[5]</sup> Para exposición a agua marina, se permiten otros tipos de cemento pórtland con aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) hasta de 10 por ciento si la relación a/mc no excede 0.40.

<sup>[6]</sup> Se permiten otros tipos disponibles de cemento tales como Tipo I o Tipo III en las Clases Exposición S1 ó S2 si el contenido de C<sub>3</sub>A es menos del 8 por ciento en la Clase de Exposición S1 o menos de 5 por ciento en la Clase de Exposición S2.

<sup>[7]</sup> La cantidad a usar de la fuente específica de puzolanas o cemento de escoria debe ser al menos la cantidad que se haya determinado por medio del registro de servicio para mejorar la resistencia a los sulfatos cuando se utilice en concreto que contenga cemento Tipo V. Alternativamente, la cantidad a usar de la fuente específica de puzolanas o cemento de escoria debe ser al menos la cantidad que se haya determinado por medio del ensayos de la mezcla hechos cumpliendo la norma ASTM C1012M y de acuerdo con el criterio dado en 26.4.2.2(c).

<sup>[8]</sup> Si se utiliza cemento Tipo V como el único material cementante, debe especificarse el requisito opcional de resistencia a los sulfatos de 0.040 por ciento de máxima expansión de ASTM C150M.

<sup>[9]</sup> La masa de materiales cementantes suplementarios utilizada para determinar el contenido de cloruros en el cemento no debe exceder la masa de cemento portland.

<sup>[10]</sup> Los criterios para determinación del contenido de cloruros se presentan en 26.4.2.2.

<sup>[11]</sup> El recubrimiento de concreto debe cumplir con 20.5.

**Figura 2.18** Requisitos para el hormigón según la clase de exposición. ACI 318. 2019.

La norma EHE-08 en el artículo 37.3.2 referente a limitaciones a los contenidos de agua y de cemento, en su tabla 37.3.2.a establece la máxima relación a/c y mínimo contenido de cemento para hormigones, la figura 2.19 muestra estos valores para los hormigones dependiendo de la exposición a la que va a ser sometido durante su vida útil.

**Tabla 37.3.2.a**  
Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición													
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E	
Máxima relación a/c	Masa	0,65	—	—	—	—	—	—	—	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50	
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50	
Mínimo contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Masa	200	—	—	—	—	—	—	275	300	325	275	300	275	
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300	
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300	

**Tabla 37.3.2.b**  
Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad (\*)

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia mínima (N/mm <sup>2</sup> )	Masa	20	—	—	—	—	—	—	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

(\*) Estos valores reflejan las resistencias que pueden esperarse con carácter general cuando se emplean áridos de buena calidad y se respetan las especificaciones estrictas de durabilidad incluidas en esta Instrucción. Se trata de una tabla meramente orientativa, al objeto de fomentar la deseable coherencia entre las especificaciones de durabilidad y las especificaciones de resistencia. En este sentido, se recuerda que en algunas zonas geográficas en las que los áridos sólo pueden cumplir estrictamente las especificaciones definidos para ellos en esta Instrucción, puede ser complicado obtener estos valores.

**Figura 2.19** Relación a/c recomendadas por la EHE de acuerdo a su exposición. 2008.

Además de la relación a/c, varios autores han estudiado y propuestos modelos no solamente basados en la cantidad de agua y material cementante sino también en la cantidad y distribución de los áridos a emplearse, existiendo curvas granulométricas recomendadas para varios tipos de hormigones. Los primeros en proponer el uso de curvas granulométricas de referencia continuas a las cuales se deben adaptar las granulometrías de los áridos fueron Fuller y Thompson en 1907, Bolomey en 1926 y Faury en 1944. En los dos primeros métodos se toma como dato de partida la dosificación de cemento y se determina el volumen de agua de amasado mediante tablas que indican el volumen de agua que se debe añadir al hormigón según el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y la consistencia requerida (Navarro Ferrer, 2016).

Fuller y Thompson (1907) propusieron que la curva de distribución granulométrica del árido debe ajustarse a la siguiente ecuación general, donde  $p$  es el porcentaje que pasa por cada tamiz,  $d$  es el tamaño de cada tamiz,  $D_{max}$  es el tamaño máximo del árido y  $q$  es un parámetro variable que toma el valor de 0,5, esta curva de potencia  $n$ , es conocida como curva de Fuller.

$$p = \left( \frac{d}{D_{máx}} \right)^q \quad \text{Ec. 2.1}$$

En 1926 el suizo Jean Bolomey propuso una curva granulométrica de referencia basada en la ecuación 2.2, donde  $p$  es el porcentaje que pasa por cada tamiz,  $d$  es el tamaño de cada tamiz,

$D_{max}$  es el tamaño máximo del árido y  $a$  depende de la consistencia del hormigón y de la naturaleza del árido ( $a$  varía entre 10 y 14), esta expresión además de estar en función de la granulometría de los aridos, el término  $a$  incluye características de la pasta del cemento haciéndola más completa que el método descrito en el párrafo anterior.

Ec. 2.2

$$p = a + (100 - a) \left( \frac{d}{D_{max}} \right)^{0.5}$$

En el año 1944 el francés Jean Faury propone otra expresión en donde los tamaños de las partículas están representados proporcionalmente a  $\sqrt[5]{D_{max}}$  en el eje de las Y, mientras que en el eje X corresponde a la proporción en volumen real presente en el hormigón de partículas de un tamaño dado con respecto al volumen real total de partículas sólidas, incluido el cemento. Faury distingue los granos medios y finos inferiores a  $D_{max}/2$  y los granos gruesos superiores a  $D_{max}/2$ . La curva granulométrica de referencia está compuesta de dos rectas en las que la abscisa del punto de corte es  $X = D_{max}/2$  y la ordenada Y toma un valor según la fórmula 2.3 como se indica en la figura 2.20. El valor de A esta en función de la forma de los áridos y consistencia del hormigón, el coeficiente B depende del tipo de compactación y vibración del hormigón, mientras que el valor de R corresponde al radio del encofrado en la zona con más densidad de armado.

$$Y = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D_{max}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{max}} - 0,75} \quad \text{Ec. 2.3}$$

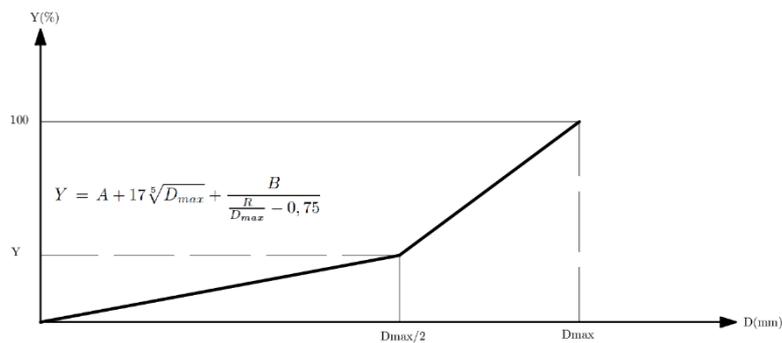


Figura 2.20 Curva granulométrica de J. Faury, 1944. Fuente: Elaboración propia

La dosificación para la mayoría de los países americanos esta la norma ACI 211.1 que tiene en cuenta para su diseño de mezcla, su facilidad de colocación, consistencia, resistencia, relación a/c, durabilidad, densidad y generación de calor de hidratación. A continuación se indica los siete pasos que la norma indica con un breve resumen en cada uno de ellos.

1. *Elección del revenimiento*: si no se especifica revenimiento se puede seleccionar un valor apropiado de acuerdo a la estructura que se vaya a hormigonar.
2. *Elección del tamaño máximo nominal del agregado*: por regla general el tamaño máximo de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y compatible con las dimensiones de las estructuras. En ningún caso el tamaño máximo del árido debe exceder  $1/5$  de la menor dimensión entre los lados de las cimbras,  $1/3$  del espesor de las losas, ni  $3/4$  del espacio mínimo entre varillas individuales de refuerzo, paquete de varillas o torones de pretensado.
3. *Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire*: la cantidad de agua por volumen unitario de hormigón que se requiere para producir cierto revenimiento depende del tamaño máximo de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, la temperatura del hormigón, así como la cantidad de aire incluido y el uso de aditivos químicos.
4. *Selección de la relación a/c o a/mc*: esta relación se determina no solo por requisitos de resistencia, sino también por factores como la durabilidad. Para condiciones de exposición severas la relación a/c se debe mantener baja, aun cuando los requerimientos de resistencia puedan cumplirse con valores mayores, de acuerdo a tablas que existen en esta norma.
5. *Cálculo del contenido de cemento*: la cantidad de cemento por volumen unitario de hormigón se rige por las determinaciones expuestas en el tercero y cuarto paso. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado (tercer paso) dividido entre la relación a/c (cuarto paso), no obstante la especificación incluye un límite mínimo para la cantidad de cemento.
6. *Estimación del contenido de agregado grueso*: para igual trabajabilidad, el volumen de agregado grueso en un volumen unitario de hormigón depende únicamente de su tamaño máximo y del módulo de finura del agregado fino. Las diferencias en la cantidad de mortero requerido para la trabajabilidad con diferentes agregados, debidas a diferencias en la forma y granulometría de las partículas, quedan compensadas automáticamente por las diferencias en la cantidad de huecos en el varillado en seco.
7. *Estimación del contenido de agregado fino*: al término del sexto paso se estimado todos los componentes del hormigón, excepto el agregado fino, cuya cantidad se termina por diferencia.

## 2.3. Redes Neuronales Artificiales

### 2.3.1 Introducción

En la ingeniería estructural, la resistencia a la compresión del hormigón es el parámetro de rendimiento más importante para diseñar las estructuras convencionales de hormigón y hormigón de alto rendimiento. La predicción precisa de este parámetro se vuelve más crucial cuando se considera este parámetro para el análisis de costos-beneficios y el punto de vista del tiempo (Mosbeh R y col, 2020).

M.A. DeRousseau y col (2018) en su publicación *Computational design optimization of concrete mixtures: A review*, establece que hay dos enfoques para dosificar las mezclas de hormigón de manera tradicional.

- Enfoque prescriptivo.
- Basados en el rendimiento.

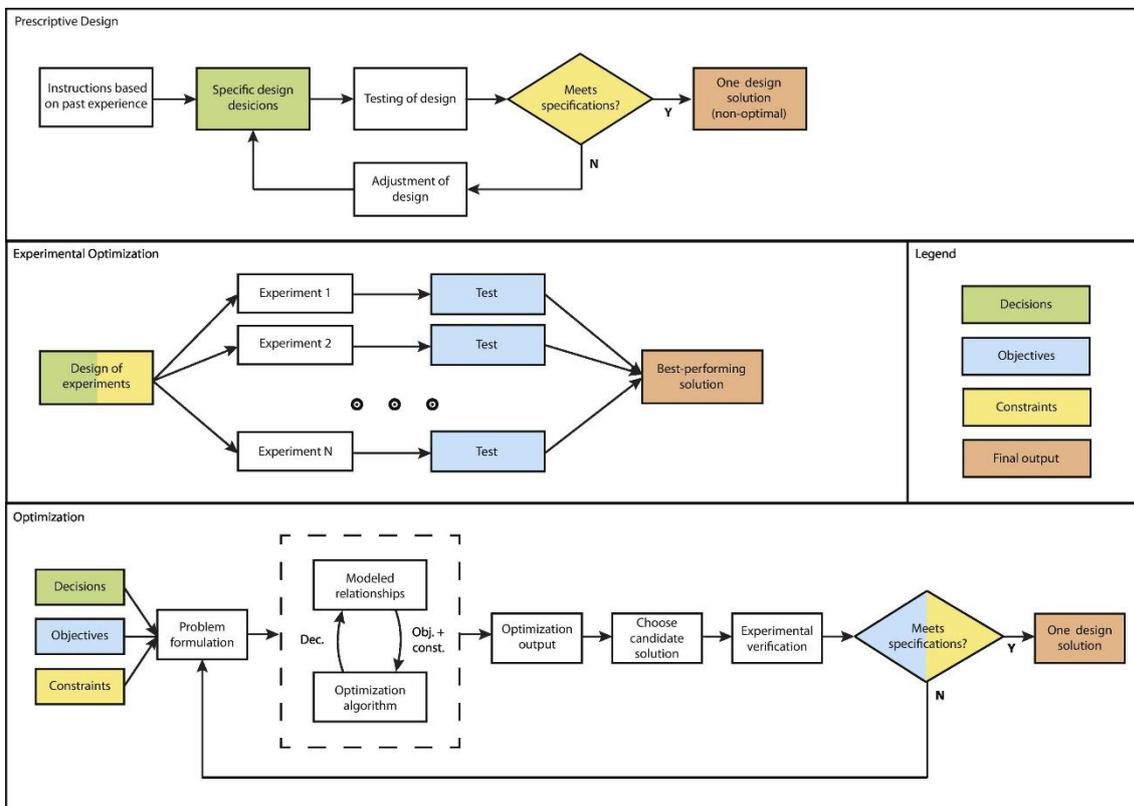
Los *enfoques prescriptivos* son metodologías de diseño paso a paso. Los métodos prescriptivos (figura 2.21 a) de dosificación han evolucionado desde métodos arbitrarios de relación volumétrica de cemento-arena-agregado 1:2:3 (Abrams) establecidos a principios del siglo XX, hasta el método actual de volumen absoluto prescrito por el American Concrete Institute (ACI) y Portland Cement Association (PCA). Una ventaja principal de los métodos de dosificación prescriptivos es que la dosificación de la mezcla está dirigida por el método mismo; quien toma las decisiones no necesita tomar decisiones de diseño subjetivas. Si bien estos métodos son más efectivos para aplicaciones de construcción general de gran volumen, la falta de flexibilidad para que un diseñador adapte y ajuste las proporciones de mezcla individuales es una limitación notable del método.

Las metodologías de diseño de mezclas *basadas en el rendimiento* no imponen directrices estrictas sobre las cantidades y proporciones de los componentes. Más bien, este enfoque permite al diseñador un margen sustancial para cumplir con las especificaciones de diseño al proporcionar mezclas directamente de lotes de prueba de laboratorio (un enfoque iterativo de prueba y error). La Figura 2.21 (a) demuestra el proceso de diseño de mezcla tradicional, donde se utilizan métodos de diseño prescriptivos o basados en el desempeño para decidir las proporciones de la mezcla; el resultado es una solución de diseño aceptable, pero a menudo no óptima.

Ambos enfoques requieren un proceso de diseño extenso con solo una solución de diseño de mezcla aceptable. Para eludir las limitaciones experimentales de estas metodologías, un importante cuerpo de investigación se ha centrado recientemente en formular y validar enfoques y herramientas de optimización del diseño computacional para la dosificación de mezclas de hormigón que

aprovechan la riqueza de los datos experimentales relacionados con el hormigón, las técnicas matemáticas avanzadas y el poder de computación de alto rendimiento.

A pesar de ser útil en su propósito, la optimización del diseño experimental sufre aumentos exponenciales en el número requerido de muestras y experimentos cuando muchos parámetros de mezcla o valores de esos parámetros se consideran variables en la optimización. Como resultado, la optimización experimental detallada de las mezclas de hormigón puede requerir mucho tiempo y recursos. Además, la generalización de los resultados obtenidos de la optimización experimental es limitada debido a las diferencias matizadas en el rendimiento del hormigón introducidas por la variabilidad ambiental espaciotemporal (es decir, temperatura, humedad) y características específicas de los constituyentes, como el tipo y la química de los materiales cementosos y el tamaño, forma y textura de los agregados, detalladas en la figura 2.21.



**Figura 2.21** Enfoques de dosificación del hormigón: (a) Diseño tradicional; (b) optimización experimental; (c) optimización computacional. Computational design optimization of concrete mixtures: A review. M.A.De Rousseau y col. 2018.

Como el hormigón es un material compuesto, el diseño de la mezcla puede afectar significativamente sus propiedades. Para diseñar una mezcla de hormigón, es necesario fabricar varias mezclas de prueba; sin embargo, considerando que este método consume tiempo, genera desperdicio, desperdicia materias primas y requiere mano de obra calificada, lo que a su vez lo

convierte en una estrategia no sustentable. Además, lograr el diseño de mezcla óptimo entre mezclas de prueba finitas puede ser impracticable (Naseri y col, 2019 ).

Recientemente, para prevalecer tales deficiencias, se utilizan métodos de aprendizaje automático y técnicas computacionales para predecir las características críticas del hormigón. Por ejemplo, estos métodos se han utilizado para estimar la resistencia a la compresión del hormigón, que es una de las propiedades mecánicas esenciales para examinar la calidad del hormigón (Mirzahassemi y col, 2019 ). Las redes neuronales artificiales (RNA) son uno de los métodos más utilizados para predecir la resistencia a la compresión de varios tipos de hormigones. Se utilizaron RNA para estimar la resistencia a la compresión del hormigón ordinario, y se postuló que este modelo está adecuadamente calificado para evaluar la resistencia a la compresión del hormigón, antes de la preparación de la muestra (Ni y Wang, 2000). Hammoudi y col. (2019) aplicaron RNA y la metodología de superficie de respuesta (RSM) para estimar la resistencia a la compresión del hormigón. Posteriormente, se compararon los resultados de estos modelos y se reveló que la precisión de las RNA es superior a la de RSM ( Hammoudi y col, 2019 ).

### 2.3.2 Funcionamiento

Las RNA son modelos de caja negra, desarrollados para resolver problemas en los que las relaciones de los diferentes componentes son complejas, las variables o reglas de relación no son fáciles de obtener, o existe escaso conocimiento pero sí existe la experiencia de una serie de datos (López y Caicedo, 2006). Las RNA son sistemas inteligentes inspirados en los sistemas neuronales biológicos y, funcionalmente son procesadores de información, con un canal de entrada de la información y un canal de salida, con alta capacidad de comunicarse y unirse entre sí. Sus primeros usos datan de los años 80, encontrándose ejemplos de aplicación en campos como el reconocimiento de caracteres, el procesado de imágenes o voz, control de sistemas dinámicos complejos, optimización, etc (Flood y Kartman 1994) (Cladera y col. 2002).

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

capa oculta. También se ha demostrado que una red con más de una capa oculta puede aproximar relaciones que impliquen funciones discontinuas (Rzempoluck 1998).

Navarro Ferrer (2016), indica que la elaboración de una RNA involucra el número de capas ocultas, el número de neuronas en las capas ocultas, el tipo de conexiones entre neuronas, la función de transferencia o respuesta de las neuronas y el mecanismo de aprendizaje.

El funcionamiento de una neurona consiste en la transformación de los valores de las entradas a través de las conexiones, en una salida. La salida se obtiene a partir de una función de propagación, una función de activación y una función de transferencia. La función de propagación más común consiste en el sumatorio de todas las entradas multiplicadas por los pesos de las conexiones, más un valor de sesgo o "bias", como ilustra la figura 2.22.

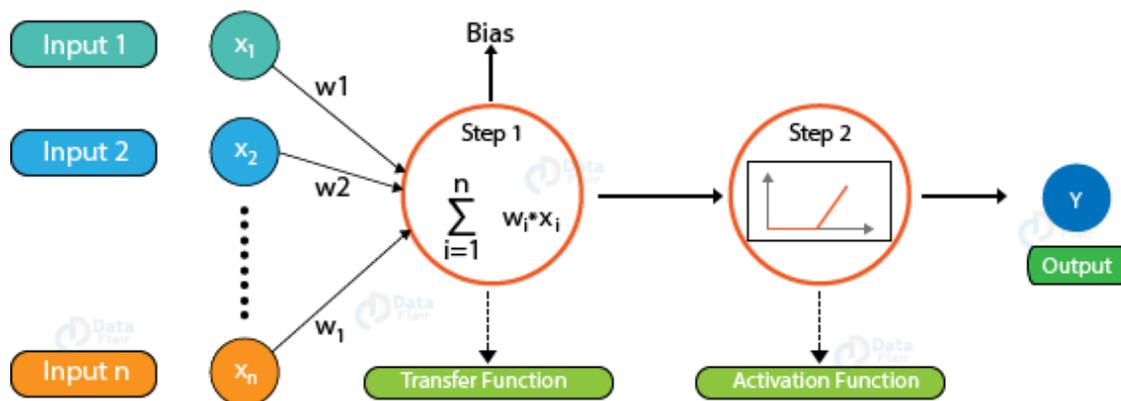


Figura 2.22 Funcionamiento de una red neuronal. Tomado de: [data-flair.training/blogs/artificial-neural-networks-for-machine-learning/](https://data-flair.training/blogs/artificial-neural-networks-for-machine-learning/). 2020.

La función de activación, en caso de existir, activa la salida de esta neurona. La función de transferencia se aplica al resultado de la función de propagación y normalmente, consiste en una función de salida acotada. Algunas funciones de transferencia pueden ser las mencionadas en la figura 2.23.

### 2.3.3 Tipos de redes neuronales artificiales.

Las redes neuronales artificiales, son uno de los métodos más utilizados en el campo de la inteligencia artificial (IA) (Azadeh et al., 2016 ). Estos métodos son sencillos y tienen un alto rendimiento y un bajo costo computacional (Yazdani et al., 2019 ). Hay diferentes tipos de RNA en la literatura, incluyendo, red neuronal Spiking (Ghosh-Dastidar y Adeli, 2009 ), red Feedforward (Bebis y Georgiopoulos, 1994 ), red neuronal recurrente (Dorffner, 1996 ), red de

función de base radial (Park y Sandberg, 1993 ) y la red autoorganizada de Kohonen (Kohonen, 1990). Entre estas RNA, *Feedforward Neural Network* (FNN) es la más utilizada y la más simple (Mirjalili et al., 2014 ). Además las RNA se pueden clasificar por su tipo de conexión y tipo de aprendizaje lo que se indica en la tabla 2.8.

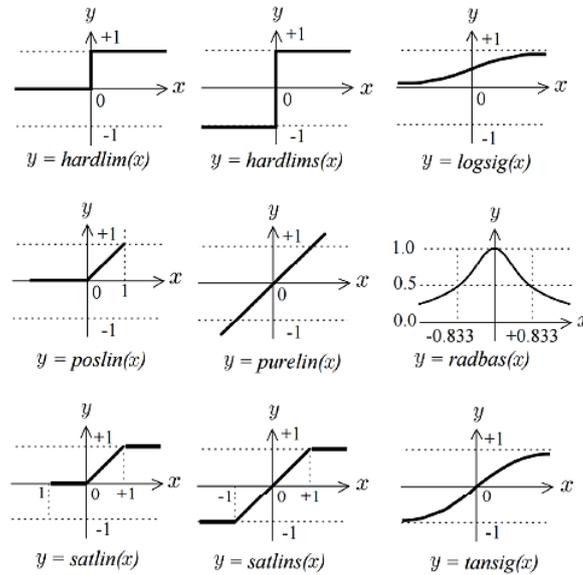


Figura 2.23 Tipología de funciones de transferencia. Navarro Ferrer, 2016.

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

Tabla 2.8 Clasificación de RNA, por tipo de conexión y aprendizaje. Adaptación de Navarro Ferrer. 2016.

Las RNA que se aplicaron en el estudio de este TFM, son redes neuronales de propagación hacia adelante, con aprendizaje supervisado, empleadas en la aproximación de funciones. Las conexiones tipo *feedforward* fueron definidas por Rumelhart y col. (1986), la cual corresponde a un tipo de computación paralela donde muchas pequeñas unidades de cálculo llamadas neuronas están masivamente interconectadas con la capa anterior de donde reciben información, y con la capa posterior donde la transmiten. Sus capas ocultas poseen una función de activación que limita la

salida a un rango cercano y desde esta, la capa de salida puede producir todos los valores de estimación. La salida de cada capa es representada como

$$Y_{Nx1} = f(W_{Nx1} X_{M,1} + b_{N,1}) \quad \text{Ec. 2.4}$$

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

### 2.3.4 Número de neuronas de la capa oculta.

El número de neuronas de la capa oculta se determina usualmente mediante prueba y error (Nehdi y col. 2001). Existen diversos autores que han propuesto algunos métodos empíricos para aproximar el número de neuronas de la capa oculta  $k$  en función del número de neuronas de la capa de entrada  $n$  y del número de neuronas de la capa de salida  $m$ , como se indica en la tabla 2.9:

Número de neuronas de la capa oculta $k$	Referencia bibliográfica
Redondeo $\sqrt{n \cdot m}$	Tabares y col (2006) y Shibata e Ikeda (2009)
$2n+1$	Hecht - Nielsen (1987)
$2n$	Gallant (1992)
$n+m$	Nagendra (1998)
$0,75n$	Ozturan y col (2008)
$n$	Lai y Serra (1997) y Dias y Pooliyadda (2001)
$(n+m)/2$	Popovics

Tabla 2.9 Número de neuronas de la capa oculta según algunos autores. Navarro Ferrer. 2016.

### 2.3.4 Aprendizaje de la red neuronal

El aprendizaje a gran escala pretende desarrollar algoritmos eficientes y escalables con respecto a los requisitos de computación, memoria, tiempo y comunicaciones. Aumentar el tamaño del conjunto de entrenamiento a menudo aumenta la precisión (Catlett, 1991) pero, si la complejidad computacional del algoritmo excede la memoria principal, entonces el algoritmo no se escalará bien o no será factible ejecutarlo. Por lo tanto, para ampliar los algoritmos de aprendizaje, el problema no es tanto acelerar un algoritmo lento como convertir un algoritmo impráctico en uno práctico (Peteiro-Barral y col, 2013).

Para evitar el sobreaprendizaje podemos optar por obtener más datos (no siempre es posible) o bien reducir el tamaño de la red (menor número de parámetros). Si reducimos el tamaño de la red, esta es menos flexible y más robusta frente al ruido, aunque si se reduce demasiado puede

que no sea capaz de aprender. Dotar a la red neuronal de suficientes parámetros para que sea capaz de aprender y evitar el sobreaprendizaje, es el principal aspecto a tener en cuenta en el dimensionamiento de una red neuronal. Otra forma de evitar el sobreaprendizaje es utilizar procesos de validación cruzada (*Cross Validation*), esto es entrenando y validando la red simultáneamente con el fin de detectar el punto óptimo de aprendizaje (Flórez y Fernández 2008).

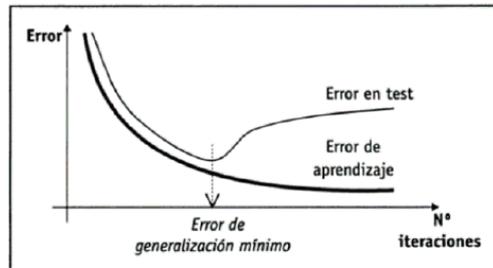


Figura 2.24 Gráfico del sobreaprendizaje de la red neuronal. Flores López y col. 2008.

### 2.3.5 Entrenamiento, validación y test.

Durante la fase de *entrenamiento*, existe una tendencia de la red neuronal a sobreajustar o sobreaprender los patrones ejemplares presentados durante la fase de entrenamiento. Esto conduce a una mala generalización de la red cuando se somete a datos invisibles. El conjunto de datos de *validación* se usa indirectamente durante el entrenamiento de RNA para monitorear el ajuste excesivo de la red neuronal y actuar como una guía para detener el entrenamiento de la red neuronal cuando el error de validación comienza a aumentar. El *test* de la red neuronal se realiza después de completar la fase de entrenamiento. El conjunto de datos de prueba utilizado durante la fase de prueba evalúa el rendimiento de predicción de la red neuronal entrenada (Vinay C y col, 2015).

La parada temprana (Morgan y col, 1990) o *early stopping*, se utiliza una técnica para evitar el sobreajuste problema y fue el preferido para el presente trabajo ya que tiene menos carga computacional.

Otra técnica para evitar el sobreaprendizaje consiste en aplicar el principio de parsimonia o navaja de Ockham, por el que a igualdad de condiciones, la explicación más simple es la correcta. La regularización consiste en agregar el sumatorio ponderado de los pesos de la red a la función de coste, de modo que para un error similar de dos redes neuronales, aquella que tiene menores valores de los pesos es mejor (Figueres, 2010).

$$MSE_{reg} = \gamma MSE + (1 - \gamma)MSW \quad \text{Ec. 2.5}$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$MSW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N W_j^2 \quad \text{Ec. 2.7}$$

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

### 2.3.6 Evaluación de desempeño de una RNA.

El desempeño de una RNA se puede evaluar usando diversas técnicas, entre ellas, la raíz del promedio de los errores al cuadrado RMSE (Root Mean Square Error), el total de los cuadrados de los errores SSE (Sum of Squares of Error), el error relativo promedio MER (Mean Error Ratio), el promedio de los errores al cuadrado MSE (Mean Square Error), o el factor de correlación al cuadrado  $R^2$  ( $R^2$  Correlation Factor) de acuerdo con Goyal y Goyal (2011).

Los indicadores mencionados se calculan utilizando las ecuaciones siguientes:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$MSE = \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2} \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \text{Ec. 2.10}$$

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

## Capítulo 3

# BASE DE DATOS

La base de datos que se utiliza en el estudio de este trabajo de fin de máster se basa en una recopilación de ensayos de los materiales y del hormigón, realizados en el laboratorio de control de calidad de una central hidroeléctrica construida en el cantón Gonzalo Pizarro ubicado en la provincia amazónica de Sucumbíos, Ecuador durante los años 2015 a 2017.

### 3.1. Hormigón

La base de datos de la construcción del proyecto corresponde a 1074 ensayos realizados con información de 56 variables que a continuación se detallan en los siguientes 30 ítems:

1. Código de información de la muestra – *IM*.
2. Tipo de Mezcla – *TM*.
3. Modo de fabricación del hormigón, dosificadora o mezcladora – *DóM*.
4. Peso del contenido real del cemento – *Cem* ( $kg/m^3$ ).
5. Tipo y marca del cemento – *TipoCem*.
6. Tipo y cantidad de aditivo – *Ad1:4* ( $kg/m^3$ ).
7. Peso de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos – *Ar1:4* ( $kg/m^3$ ).
8. Peso de agua añadida a la mezcla – *Ag* ( $kg/m^3$ ).
9. Porcentaje de Humedad en cada uno de los tipos de áridos –  $\%H\_Ar1:4$ .

10. Contenido de agua en cada uno de los tipos de áridos –  $Ag\_Ar1:4$  ( $kg/m^3$ ).
11. Agua total contenida en los áridos –  $Ag\_Aridos$  ( $kg/cm^3$ ).
12. Fecha de hormigonado –  $F\_hor$ .
13. Cantidad de fibras colocadas –  $Fibra$  ( $kg/m^3$ ).
14. Medida de consistencia de la muestra en el momento de la fabricación en el laboratorio.  
Descenso en el cono de Abrams –  $CA1$  ( $cm$ ).
15. Medida de consistencia de la muestra en el momento de hormigonar en la obra. Descenso en el cono de Abrams –  $CA2$  ( $cm$ ).
16. Temperatura del hormigón en el laboratorio –  $Temp1$  ( $^{\circ}C$ ).
17. Temperatura del hormigón en la obra –  $Temp2$  ( $^{\circ}C$ ).
18. Código de las probetas –  $Cod\_Prob$
19. Hora de la salida del camión hormigonera del laboratorio –  $H1$ .
20. Hora de llegada del camión hormigonera a la obra –  $H2$ .
21. Hora de inicio del hormigonado –  $H3$ .
22. Hora de finalización del hormigonado –  $H4$ .
23. Diámetro, altura y peso de las probetas –  $D$  ( $cm$ ),  $h$  ( $cm$ ),  $P$ ( $gr$ ).
24. Densidad de las probetas –  $Den$  ( $gr/cm^3$ ).
25. Edad de rotura de las probetas –  $E\_rot3$ ,  $E\_rot7$ ,  $E\_rot28$  (días).
26. Fecha de la rotura de las probetas –  $F\_rot3$ ,  $F\_rot7$ ,  $F\_rot28$ .
27. Carga de rotura de las probetas –  $C\_rot3$ ,  $C\_rot7$  y  $C\_rot28$  ( $kN$ ).
28. Resistencia a compresión a 3, 7 y 28 días –  $Rc3$ ,  $Rc7$ ,  $Rc28$  ( $kg/cm^2$ ).
29. Porcentaje alcanzando de la resistencia a compresión respecto al esperado –  $\%fc3$ ,  $\%fc7$   
 $\%fc28$ .
30. Promedio de las resistencias alcanzadas a diferentes edades –  $fc3$ ,  $fc7$  y  $fc28$  ( $kg/cm^2$ ).

Los 30 ítems se encuentran distribuidos en 44 columnas, numeradas desde la columna A hasta la columna AS en una hoja de Excel, cuyo extracto se encuentra en el Anejo D. Los ítems 1 y 2 indican el lugar de trabajo en donde se realizó el hormigonado dentro del proyecto y el nombre asignado a la mezcla que se utilizó al momento de su despacho desde la planta de fabricación al lugar de trabajo.

El ítem 3 se refiere a la fabricación del hormigón, ya que el proyecto constaba de dos centrales de fabricación, una planta mezcladora y una planta dosificadora, se codificó a esta variable con un valor de 1 y 0, respectivamente.

El *ítem 4* es el peso del cemento real dosificado en la mezcla, mientras que el *ítem 5* es referente a la marca y el tipo de cemento que se usó, para este último se utilizó 4 tipos de cementos diferentes, los cuales fueron codificados con los números 1 a 4, de la siguiente manera: Holcim HE (1), Holcim GU (2), Holcim MH (3) y Selva Alegre HS (4).

En las dosificaciones de las mezclas se utilizó 4 tipos de aditivos distintos, todos de la marca comercial Sika, las cantidades de cada uno de ellos se detallan en el *ítem 6*. El aditivo 1 (Ad1) corresponde a Viscocrete 1200, que es un aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante fabricado en base de polycarboxilatos. El aditivo 2 (Ad2) Plastiment 300- R, es un plastificante-retardante formulado para hormigones elaborados en clima cálido, es un aditivo químico reductor de agua y retardador del fraguado. El aditivo 3 (Ad3) Viscocrete 2100 y aditivo 4 (Ad4) Viscocrete 4100, son aditivos reductores de agua de alto rango e hiperplastificante, fabricado con polímeros polycarboxilatos, que proporciona una buena plasticidad mientras mantiene la trabajabilidad por más de una hora, son usados en hormigones autocompactantes, con su fórmula pueden reducir hasta un 45% de agua además otorga alta fluidez manteniendo la cohesión evitando de esta manera sangrado o segregación de la mezcla.

Las fracciones granulométricas empleadas en las mezclas corresponden a 4 granulometrías diferentes, fueron clasificadas de acuerdo con el tamaño máximo de agregado (TMA) en cada uno de los grupos como indica la tabla 3.1:

Clasificación de los áridos		
Nomenclatura	Descripción	TMA, pulgadas [mm]
Ar1	Granulometría 1	1/4 [4,38]
Ar2	Granulometría 2	3/8 [9,53]
Ar3	Granulometría 3	3/4 [19,1]
Ar4	Granulometría 4	1 1/2 [38,1]

Tabla 3.1 Clasificación de las granulometrías de acuerdo con el tamaño máximo de agregado.

El peso de cada una de las fracciones granulométricas, el porcentaje de humedad presente en ellas y el agua que retienen debido a su absorción natural se detallan en los *ítems 7, 9, 10* entre tanto que el *ítem 11* es la suma de agua contenida en cada una de estas fracciones; el *ítem 8* indica el peso del agua añadida al momento de fabricación, es decir el valor mostrado en la báscula durante su preparación.

La fecha del hormigonado se muestra en el *ítem 12*, en el *ítem 13* se indica el peso por metro cúbico de fibras metálicas añadidas a la mezcla. En lo referente a consistencia y temperatura del hormigón, el control se realizó dos veces, la primera vez en el laboratorio una vez finalizada su

fabricación y la segunda, una vez que el camión llegaba a su destino, estos valores se encuentran del ítem 14 al 17. Además durante este proceso de salida y llegada del camión hormigonera se registró la hora de salida desde la planta ítem 19, la hora de llegada a obra ítem 20, la hora de inicio del hormigonado ítem 21 y la hora de finalización ítem 22.

Las probetas fueron fabricadas en la obra, una vez que el hormigón del camión cumplía con los requisitos de consistencia requeridos, a estas se les asignaba un código de información detallado en el ítem 18. Luego de 24 horas las probetas se procedían a desmoldar y se trasladaban al laboratorio para ser curadas en ambiente controlado, cuando alcanzaban las edades de rotura eran medidas, pesadas y ensayadas, cuya información se detallan entre los ítems 23 a 30.

Posteriormente, se ha elaborado una base de datos reducida en donde se dispone de toda la información de las variables que se desea aplicar en la red neuronal, con el fin de predecir el valor de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 y 7 días de edad,  $fc_{28}$   $fc_7$ . Esta nueva base de datos cuenta con 709 ensayos y 22 variables incluidas las de salida que se indican en la tabla 3.2, en el Anejo E se encuentra íntegramente la información de cada uno de los ensayos.

Variable	Descripción	Unidad de medida
M6D	Lugar de fabricación Mezcladora o Dosificadora	1 ó 0
Cem	Peso del cemento	kg/m <sup>3</sup>
TipoCem	Tipo de cemento	1 a 4
Ad1	Peso aditivo 1	kg/m <sup>3</sup>
Ad2	Peso aditivo 2	kg/m <sup>3</sup>
Ad3	Peso aditivo 3	kg/m <sup>3</sup>
Ad4	Peso aditivo 4	kg/m <sup>3</sup>
Ar1	Peso árido 1	kg/m <sup>3</sup>
Ar2	Peso árido 2	kg/m <sup>3</sup>
Ar3	Peso árido 3	kg/m <sup>3</sup>
Ar4	Peso árido 4	kg/m <sup>3</sup>
Agua	Agua añadida y contenida en los áridos	kg/m <sup>3</sup>
Mes	Mes del hormigonado	1 a 12
Fibra	Peso de fibra metálica	kg/m <sup>3</sup>
CA1	Descenso del cono de Abrams en laboratorio	cm
CA2	Descenso del cono de Abrams en obra	cm
Temp1	Temperatura del hormigón en laboratorio	°C
Temp2	Temperatura del hormigón en obra	°C
t1	Tiempo de traslado del camión hormigonera desde laboratorio a obra	h
t2	Tiempo transcurrido desde fabricación del hormigón hasta fabricación de probetas	h
fc28	Resistencia a compresión a los 28 días*	kg/cm <sup>2</sup>
fc7	Resistencia a compresión a los 7 días*	kg/cm <sup>2</sup>

\*Variable de salida

Tabla 3.2 Variables utilizadas en la base de datos del estudio de predicción de compresión mediante uso de redes neuronales.

## 3.2 Cemento

El cemento es el componente principal a la hora de fabricar un hormigón, este valor conjuntamente con el volumen de agua añadida determinará la resistencia y durabilidad de los elementos hormigonados, en la figura 3.1 se indica la frecuencia de los tipos de cemento usados en las dosificaciones de las mezclas.

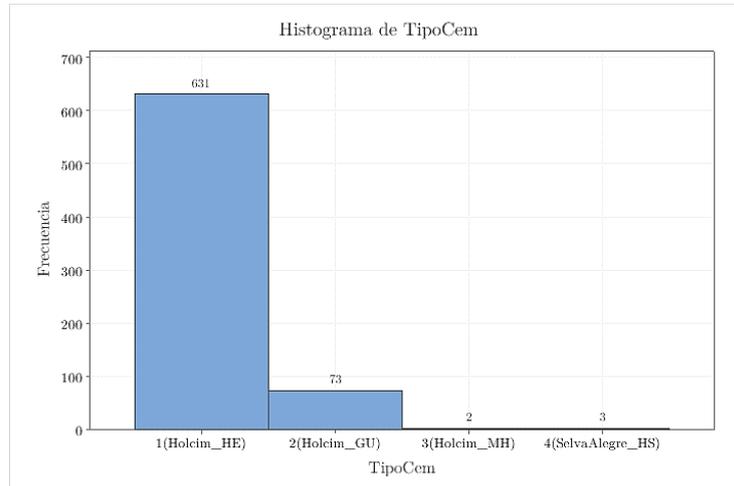


Figura 3.1 Histograma del tipo de cemento en las dosificaciones.

El 89% de los cementos usados corresponde a tipo 1 (Holcim HE), un cemento hidráulico de alta resistencia inicial. El cemento tipo 2 (Holcim GU) cemento hidráulico para uso general, representa el 10% del total de las muestras y el 1% de los tipos de cemento restantes, corresponden a cementos de moderado calor de hidratación en el caso del tipo 3 (Holcim MH) y de alta resistencia a los sulfatos el tipo 4 (Selva Alegre HS). En la tabla 3.3 y figura 3.2 se indica la resistencia a compresión y el tiempo de fraguado de cada uno de los cementos de acuerdo con la información entregada por el fabricante.

Codificación Variable TipoCem	Tipo de Cemento	Resistencia [MPa]				Tiempo de fraguado, min
		Edad [días]				
		1	3	7	28	
1	Holcim HE	14	25	32	40	150
2	Holcim GU	9	17	22	31	190
3	Holcim MH	-	10	17	22	> 45
4	Selva Alegre HS	-	17	21	28	138

Tabla 3.3 Información de la resistencia a compresión y tiempo de fraguado de los cementos usados en las mezclas. Fuente: fabricantes.

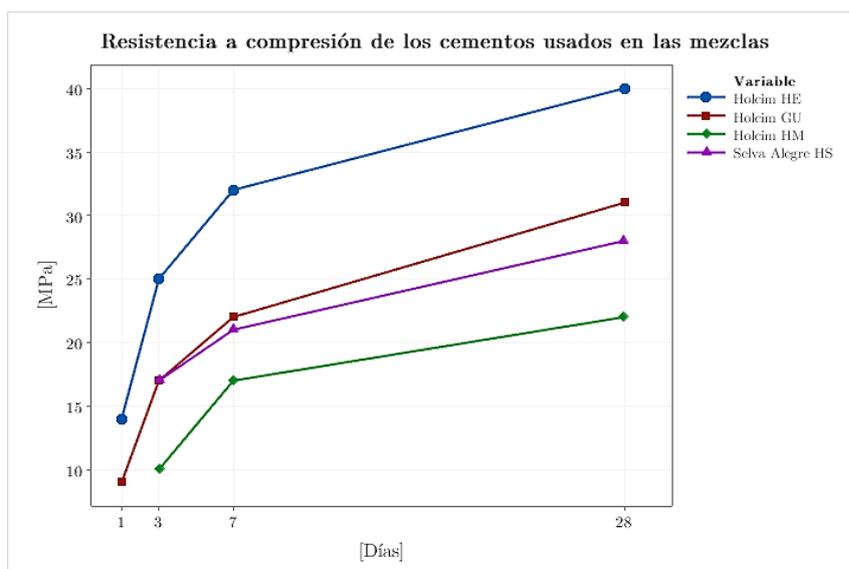


Figura 3.2 Resistencia a compresión de los cementos usados en las mezclas. Fuente: fabricantes

### 3.3 Aditivos

En la tabla 3.4 y en la figura 3.3, se indican las características entregadas por los fabricantes y la frecuencia de los tipos de aditivos utilizados en las mezclas, respectivamente.

Cod.	Descripción	Densidad Relativa (20°C) [gr/cc]	Tipo	Aspecto físico	Dosis Recomendada (%)	Descripción Química
Ad1	Viscocrete 1200	1,20	Reductor de agua de alto rango y superplastificante	Líquido marrón	0,9% - 1,5%	Polímero policarboxilato
Ad2	Viscocrete 2100	1,08	Reductor de agua de alto rango e hiperplastificante	Líquido azul	0,19% - 0,9%	Polímero policarboxilato
Ad3	Plastiment 300R	1,18	Plastificante – retardante para hormigones fabricados en clima cálido	Líquido marrón	0,3% - 0,5%	Gluconato
Ad4	Viscocrete 4100	1,10	Reductor de agua de alto rango e hiperplastificante	Líquido amarillo claro	0,19% - 0,9%	Polímero policarboxilato

Tabla 3.4 Características de los aditivos utilizados. Fuente: fabricantes.

En los 709 ensayos referentes al estudio realizado, el uso de los aditivos en las diferentes mezclas se combinó de acuerdo con lo que indica la tabla 3.5 y la figura 3.4.

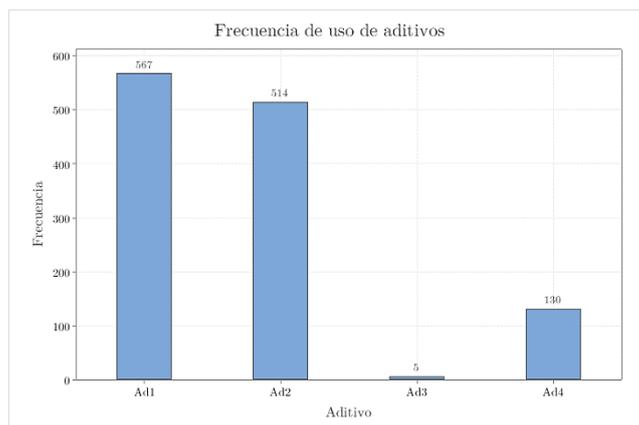


Figura 3.3 Frecuencia de los aditivos utilizados en las mezclas

Combinación	Frecuencia	Frecuencia acumulada	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Solo Ad 1	192	192	27,1%	27,1%
Solo Ad 2	4	196	0,6%	27,6%
Solo Ad 3	0	196	0,0%	27,6%
Solo Ad 4	0	196	0,0%	27,6%
Ad1 + Ad2	375	571	52,9%	80,5%
Ad2 + Ad3	5	576	0,7%	81,2%
Ad2 + Ad4	130	706	18,3%	99,6%
Sin Aditivo	3	709	0,4%	100,0%

Tabla 3.5 Tabla con frecuencias acumuladas de los aditivos utilizados.

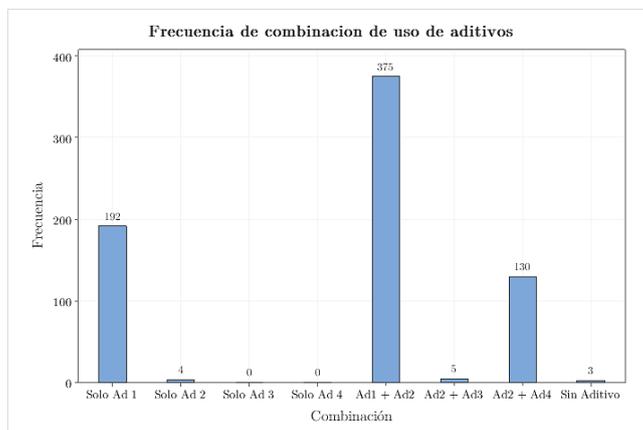


Figura 3.4 Frecuencia de combinación entre los aditivos utilizados en las mezclas.

### 3.4 Áridos

Las fracciones granulométricas como se indicó en la tabla 3.1, corresponden a 4 granulometrías diferentes clasificadas por el TMA, en la tabla 3.6 se detallan las frecuencias y los porcentajes de la manera en que se usó los áridos para la elaboración del hormigón. Del estudio realizado de 709

muestras, el 14,0% utilizó la combinación de dos áridos, el 51,9% la combinación de tres y el 34,1% las cuatro.

Mezclas	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	% Frecuencia	% Frecuencia Acumulada
Dos áridos	99	99	14,0%	14,0%
Tres áridos	368	467	51,9%	65,9%
Cuatro áridos	242	709	34,1%	100,0%

Tabla 3.6 Frecuencias del uso combinado de los áridos en las mezclas.

En la tabla 3.7 y figura 3.5 se indica a detalle la combinación de los áridos en las mezclas.

Combinación áridos	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	%Frecuencia	% Frecuencia acumulada
Ar1 + Ar2	68	68	9,6%	9,6%
Ar1 + Ar3	5	73	0,7%	10,3%
Ar1 + Ar4	0	73	0,0%	10,3%
Ar2 + Ar3	25	98	3,5%	13,8%
Ar2 + Ar4	1	99	0,1%	14,0%
Ar3 + Ar4	0	99	0,0%	14,0%
Ar1+Ar2+Ar3	355	454	50,1%	64,0%
Ar2+Ar3+Ar4	10	464	1,4%	65,4%
Ar1+Ar3+Ar4	3	467	0,4%	65,9%
Ar1+Ar2+Ar4	0	467	0,0%	65,9%
Ar1+Ar2+Ar3+Ar4	242	709	34,1%	100,0%

Tabla 3.7 Uso de las diferentes porciones granulométricas usadas en el estudio.

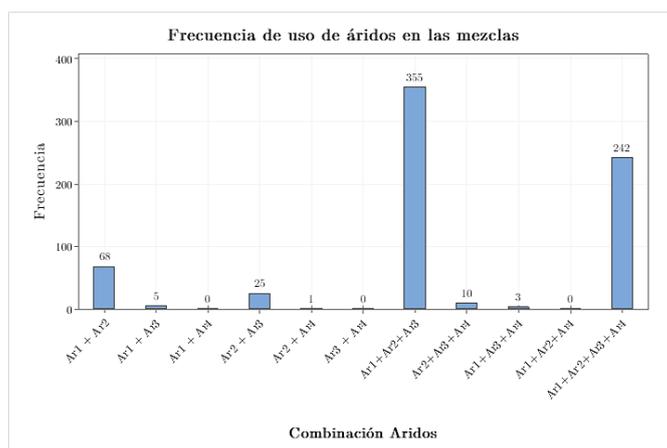


Figura 3.5 Frecuencia de combinación detallada entre los áridos utilizados en las mezclas

Los áridos al estar usualmente a la intemperie están sometidos a cambios constantes de humedad, por lo que es necesario llevar un control diario del porcentaje de humedad presente en ellos, con el fin de conocer la cantidad de agua que los áridos retienen debido a la absorción, en la tabla 3.8

y en la figura 4.11 se detalla la humedad promedio registrada durante el mes de cada tipo de árido. Estos valores se obtuvieron de promediar los valores diarios realizados durante cada mes.

<b>Mes</b>	<b>Ar1</b>	<b>Ar2</b>	<b>Ar3</b>	<b>Ar4</b>
Enero	6,6%	9,5%	3,4%	2,1%
Febrero	9,2%	7,8%	2,8%	1,8%
Marzo	7,6%	9,4%	3,2%	2,2%
Abril	5,3%	8,2%	3,0%	3,1%
Mayo	7,6%	9,7%	3,1%	3,1%
Junio	8,3%	9,8%	2,7%	2,7%
Julio	8,9%	9,8%	3,9%	2,6%
Agosto	5,8%	8,7%	2,3%	1,2%
Septiembre	8,6%	8,1%	3,0%	2,0%
Octubre	8,2%	7,4%	2,6%	1,9%
Noviembre	7,7%	6,2%	2,2%	1,4%
Diciembre	5,5%	7,2%	2,3%	1,8%

**Tabla 3.8** Promedio mensual de humedad presente en los áridos.

## Capítulo 4

# ESTUDIO ESTADÍSTICO CLÁSICO

En este apartado se aplica un análisis estadístico convencional a las diferentes variables presentes en el estudio de la base de datos de los 709 ensayos disponibles, mediante el uso de softwares estadísticos se muestra la influencia que tiene cada una de las variables de nuestra base de datos al momento de encontrar una correlación simple y/o múltiple con diversos parámetros medidos.

Los softwares empleados para el análisis son:

- Minitab® 19.2020.1, Minitab Inc.
- IBM SPSS Statistics 25, IBM Corp®.

El parámetro de evaluación y análisis entre variables será el coeficiente de Pearson  $R$  al cuadrado  $R^2$ , denominado también coeficiente de determinación. Este parámetro será calculado mediante un análisis de modelos de regresión lineales o modelos múltiples. Primeramente, se intenta explicar cada variable de respuesta en función de aquella variable independiente con la que se encuentra más correlacionada. No obstante es posible explicar un mayor porcentaje de la variabilidad aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva. (Navarro Ferrer, 2016).

Se estudiará la variable de resistencia a compresión del hormigón a diferentes edades y como esta es influenciada por diferentes variables registradas como el contenido de agua, cemento, relación

a/c, la temperatura, el descenso del cono de Abrams, tiempo desde su fabricación hasta la toma de probetas, mes en el que se realizó el hormigonado, entre otras.

#### 4.1 Resistencia del hormigón en función del contenido de agua y cemento

Como es de esperarse, la correlación que mejor explica el comportamiento de la variable dependiente de la resistencia del hormigón a los 28 días ( $fc_{28}$ ) es la variable independiente del contenido de agua, a mayor contenido de agua en una mezcla la resistencia decrecerá, como indica la figura 4.1, mientras que la figura 4.2 realiza el mismo análisis con la resistencia de las probetas a los 7 días.

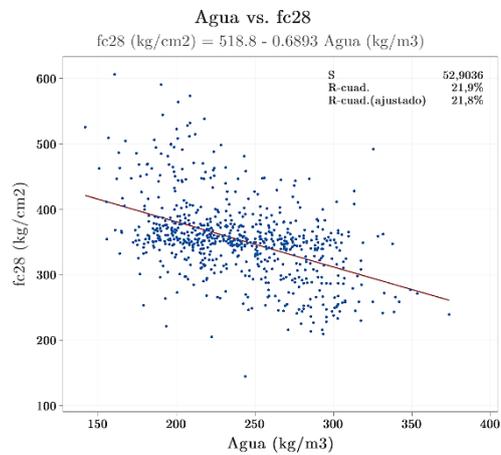


Figura 4.1 Resistencia a compresión de las probetas de hormigón a la edad de 28 días en función del contenido de agua.

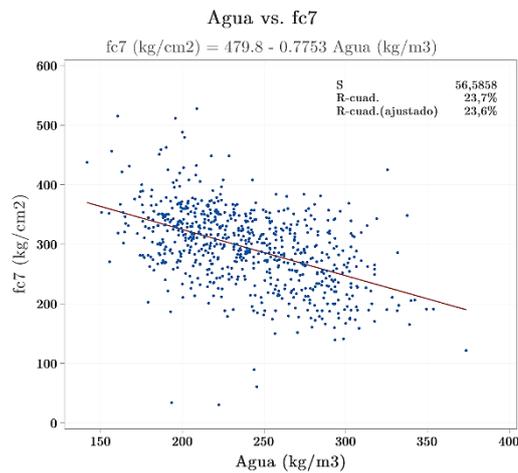


Figura 4.2 Resistencia a compresión de las probetas de hormigón a la edad de 7 días en función del contenido de agua.

El coeficiente de determinación para el caso de la variable independiente de contenido de agua muestra en ambos casos un  $R^2$  similar de 23,6% y 21,8% para la resistencia a compresión a los 7 y 28 días, respectivamente.

Otra de las variables de mayor influencia en la resistencia final del hormigón es el contenido de cemento existente en la mezcla, al igual que en el caso del contenido de agua se observa una correlación marcada y dispersa, en este caso a mayor contenido de cemento la resistencia a compresión aumentará tanto a la edad de 28 como a los 7 días, como indican la figura 4.3 y 4.4. El valor de  $R^2$  del modelo lineal en ambos casos corresponden a 10,0% a los 28 días y 16,2% a los 7 días.

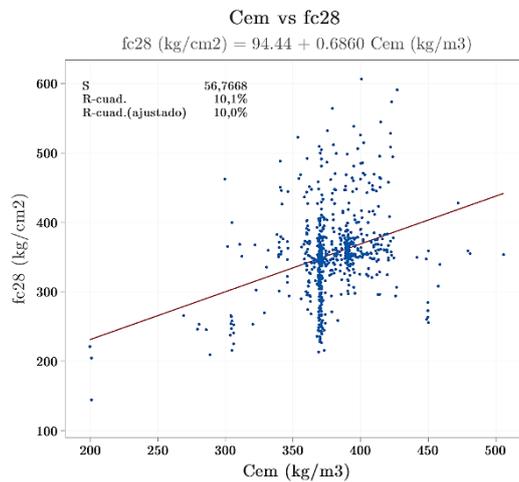


Figura 4.3 Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 28 días en función del contenido de cemento.

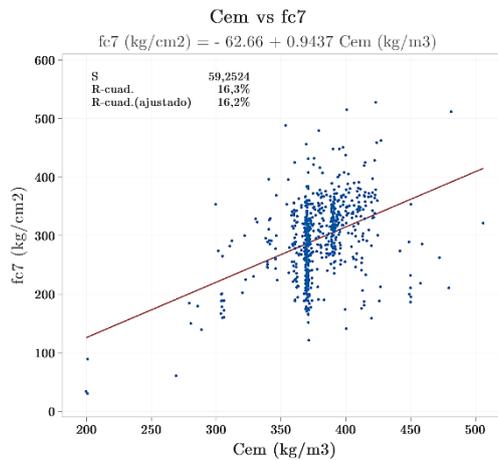


Figura 4.4 Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 7 días en función del contenido de cemento.

Para el análisis de la relación a/c el coeficiente  $R^2$  de la regresión lineal de la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 días es 29,2% y para la edad de 7 días es 34,9%, el contenido de agua de esta relación es la cantidad de agua total (agua de los áridos y agua añadida) de la mezcla dividido para el contenido de cemento. Los coeficientes de determinación obtenidos con la relación a/c explican de mejor manera la resistencia a compresión del hormigón, en comparación de hacerlo de manera independiente tanto con el agua como el cemento, como se indican en las figuras 4.5 y 4.6.

Esta relación del comportamiento de la resistencia a compresión en función de la relación a/c es uno de los fenómenos más estudiados y documentados del hormigón, muchos autores coinciden en que mientras mayor sea este valor, la resistencia será menor.

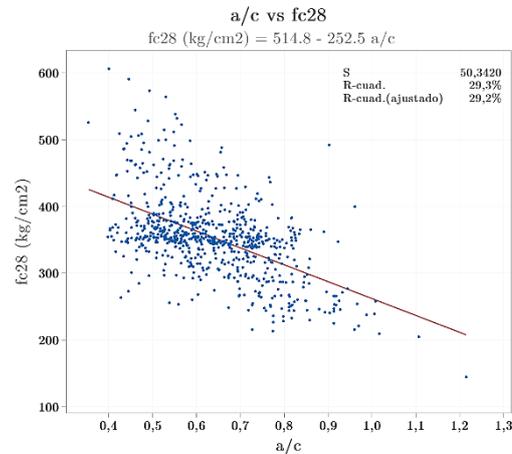


Figura 4.5 Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 28 días de edad en función de la relación a/c.

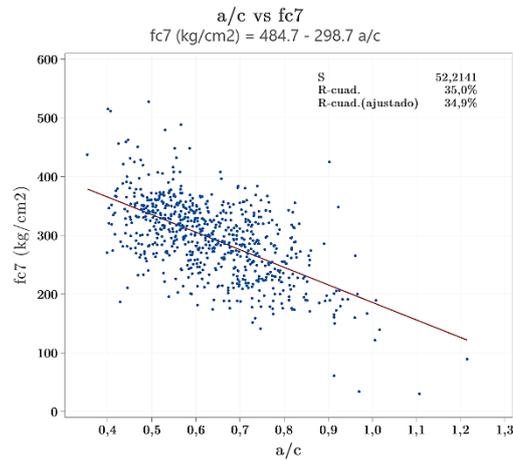


Figura 4.6 Resistencia a compresión de las probetas a la edad de 7 días de edad en función de la relación a/c.

## 4.2 Resistencia del hormigón en función de la temperatura del hormigón y del clima

En lo referente a la variable de la temperatura del hormigón, como se indicó en el punto 3.1 se tomaron dos veces, una en el laboratorio inmediatamente después de haber sido fabricado (Temp1) y la segunda en la obra momento antes de hormigonar (Temp2). En las figuras 4.7 y 4.8 se observa que no existe correlación alguna referente a la resistencia a compresión del hormigón a ninguna edad respecto a las temperaturas medidas en el hormigón.

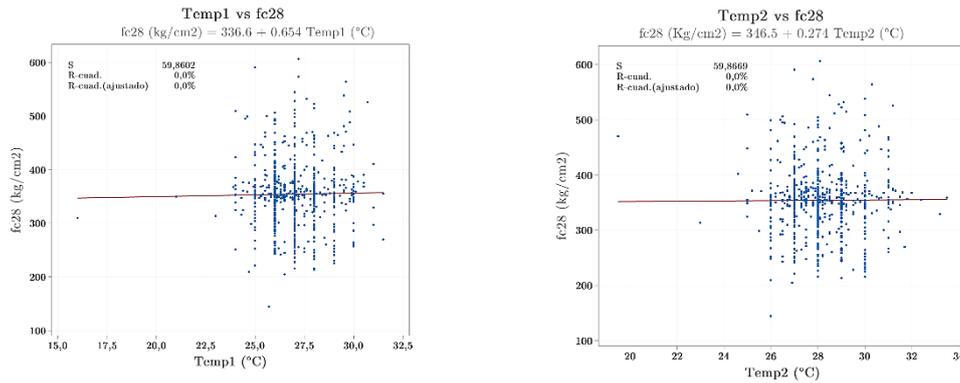


Figura 4.7 Resistencia de las probetas a la edad de 28 días en función de la temperatura medida en el laboratorio y en la obra.

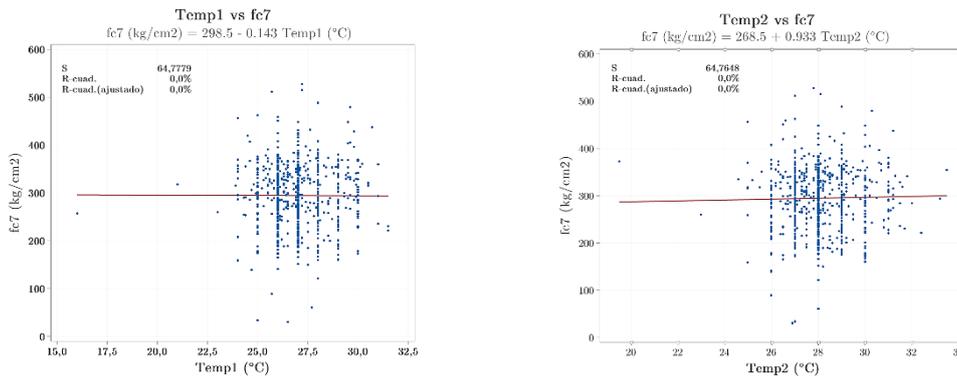


Figura 4.8 Resistencia de las probetas a la edad de 7 días en función de la temperatura medida en el laboratorio y en la obra.

Para realizar un análisis de la resistencia a compresión del hormigón en función de la fecha en el que se realizó el hormigonado se ha discretizado esta variable con un valor de acuerdo al mes del 1 al 12, en donde a enero se ha asignado el valor de 1 y a diciembre el 12. Las temperaturas que se tienen registro durante el proyecto fueron las temperaturas del hormigón y no la del ambiente, debido a eso es importante conocer el clima de la zona en donde se realizó los hormigones que estamos estudiando, para realizar un análisis de las variables disponibles en función de la resistencia a compresión, se ha tomado información entregada por instituciones que llevan el control de estos parámetros.

El cantón Gonzalo Pizarro está ubicado en la selva ecuatoriana, tiene un clima tropical húmedo que durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 22 °C a 33 °C y rara vez baja a menos de 20 °C o sube a más de 36 °C, cuyo promedio anual bordea los 27°C en la figura 4.9 se indica el rango de temperaturas máximas y mínimas promedio esperadas del cantón ecuatoriano conjuntamente con el de la ciudad de Valencia, España.

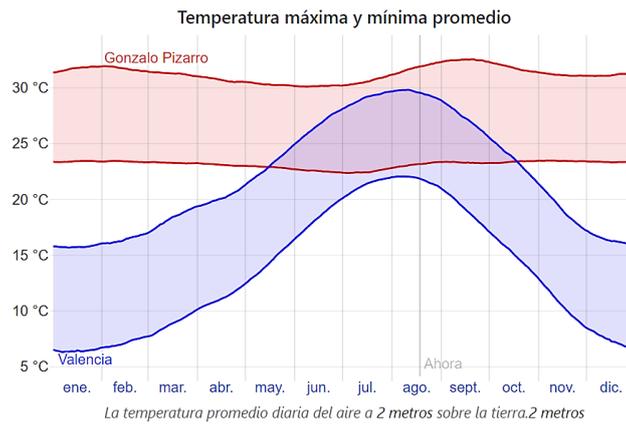


Figura 4.9 Temperatura máxima y mínima promedio de las ciudades de Gonzalo Pizarro y Valencia.

Fuente: www.weatherspark.com.

Además, del registro de las temperaturas promedios diarias es importante conocer las precipitaciones registradas, de igual manera en figura 4.10 se realiza una comparación de las precipitaciones tanto entre estas dos ciudades. En la ciudad ecuatoriana la temporada mojada (al menos 1mm de precipitación) es de 253 días, según el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador).

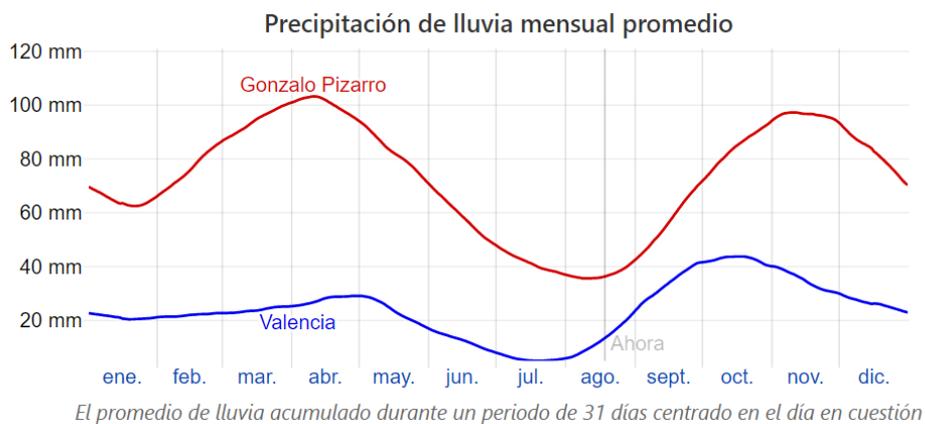


Figura 4.10 Precipitación mensual promedio de las ciudades de Gonzalo Pizarro y Valencia. Fuente:

www.weatherspark.com.

En el apartado 3.4 referente a los áridos, en la tabla 3.8 se indica el promedio mensual de humedad presente en los áridos, estos valores se encuentran graficados en la figura 4.11. En la figura 4.10 se puede observar que durante los meses de marzo a mayo se espera que la precipitación sea mayor por ende esto debería evidenciarse en las humedades de los áridos que se encuentran a la intemperie y de acuerdo con la figura 4.11 se observa que el árido 2 presenta valores de humedad altos en los meses de marzo, mayo, junio y julio, entre tanto que los meses de agosto que usualmente las

precipitaciones son menores se observa que los áridos 1, árido 3 y el árido 4 presentan humedades más bajas que los otros meses.

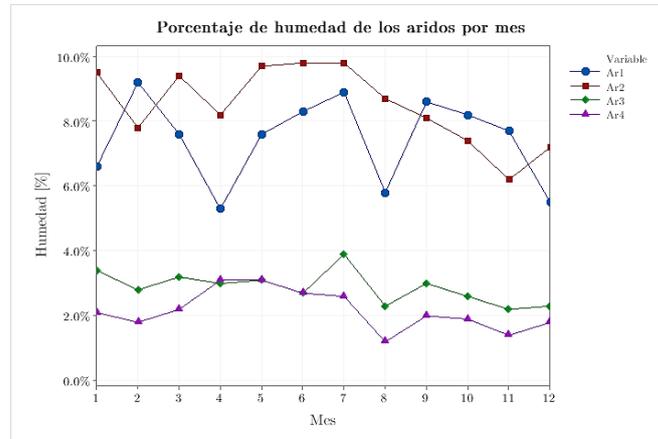


Figura 4.11 Promedio mensual de humedad presente en los áridos.

Referente a la resistencia a compresión del hormigón a diferentes edades en función del mes de hormigonado se realizó una correlación cuadrática en donde se obtuvieron coeficientes  $R^2$  de 15,4% a los 28 días y 19,8% a los 7 días, como se indica en las figuras 4.12 y 4.13 respectivamente. Para poder inferir si hay evidencia que la humedad natural debido a las precipitaciones del lugar y presente en los áridos afectos de alguna manera a la resistencia a compresión de las probetas se realizó un gráfico de intervalo de las resistencias a compresión a la edad de 28 días y 7 días, como indican las figuras 4.14 y 4.15 respectivamente.

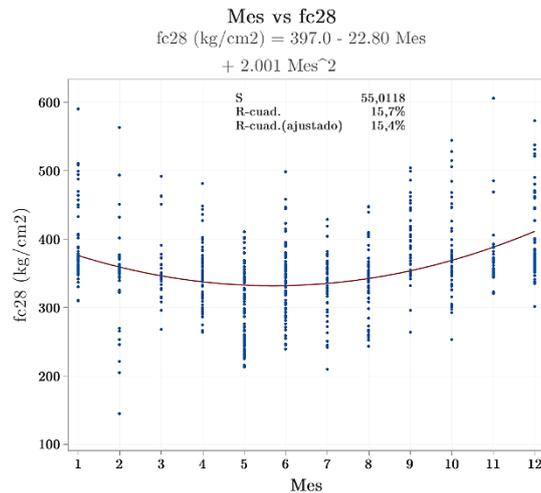
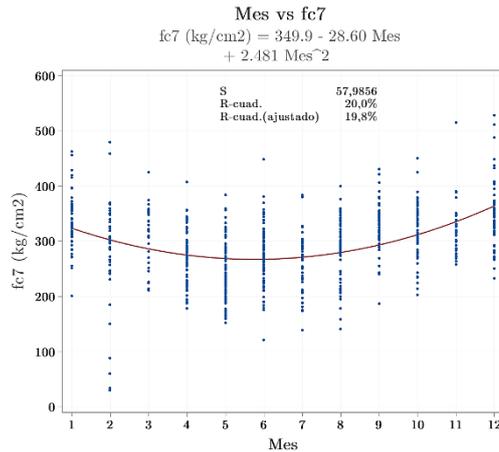
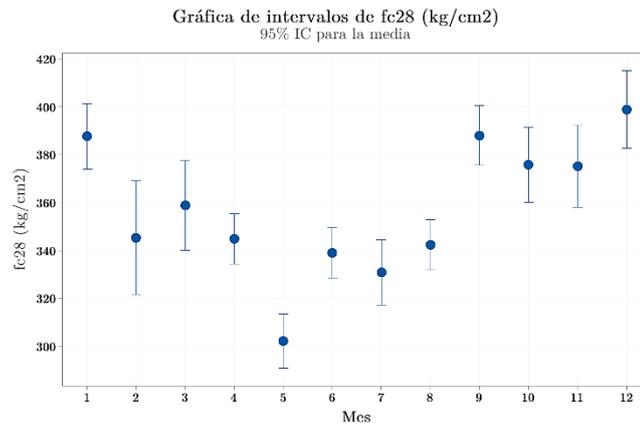


Figura 4.12 Correlación cuadrática de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días en función del mes de hormigonado.



**Figura 4.13** Correlación cuadrática de la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días en función del mes de hormigonado.

Si bien la temperatura es constante a lo largo de todo el año en la ciudad ecuatoriana, nos enfocamos en la precipitaciones de la zona y la humedad presente en los áridos, la figura 4.11 indica que los meses de mayo, junio y julio son los meses de mayor humedad registrada para el árido 2, en cuanto al árido 4 se observa también un pico en los meses de abril, mayo y junio, en lo referente a las resistencias a los 28 y 7 días las figuras 4.14 y 4.15 muestran que los valores más bajos se registraron en los meses de mayo y julio, evidenciando que durante el mes de mayo en donde el árido 2 y árido 4 presentaban mayor humedad se registraron también las resistencias más bajas del año.

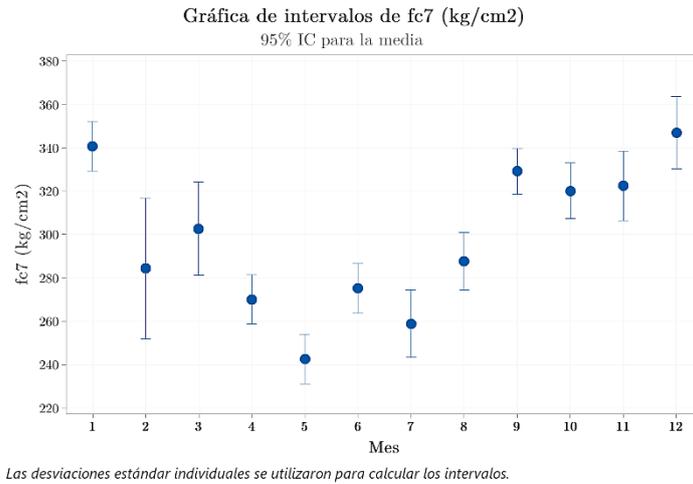


*Las desviaciones estándar individuales se utilizaron para calcular los intervalos.*

**Figura 4.14** Evolución de la resistencia a compresión a los 28 días respecto al mes de fabricación.

Si tomamos la figura 4.10 referente a precipitaciones se espera que los meses entre julio y septiembre sean los de menor precipitación promedio, de igual manera se observa una disminución de precipitación durante los meses de diciembre y enero, de acuerdo con la figura 4.14 se observa que las mayores resistencias a los 28 días ocurren en los meses diciembre, enero y septiembre

respectivamente, guardando una relación de resistencia a los 28 días y precipitaciones promedio anuales.

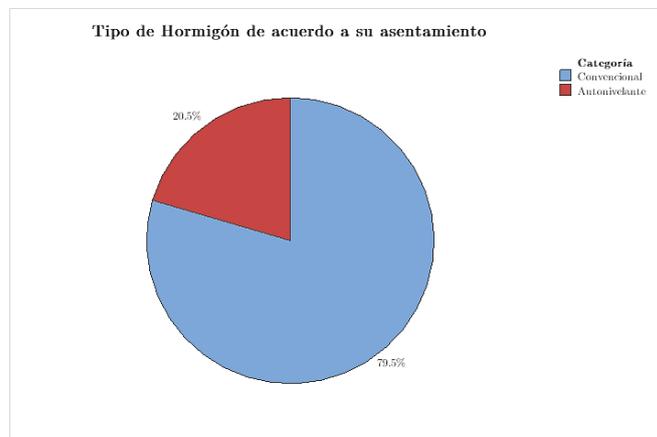


**Figura 4.15** Evolución de la resistencia a compresión a los 7 días respecto al mes de fabricación.

En cuanto a la medición y caracterización del hormigón por su consistencia y trabajabilidad, se usó: hormigón convencional y hormigón autocompactante. La trabajabilidad del primero se realizó con la medición del descenso del cono de Abrams y el segundo mediante la medición del diámetro una vez retirado el cono de manera invertida, es decir el cono truncado con el diámetro mayor en la parte de arriba y el diámetro menor en la parte de abajo. Del estudio de las 709 muestras, 564 corresponden a un hormigón convencional esto es el 79,5% del total, los 145 restantes que equivalen al 20,5% de la muestra son hormigón autonivelante, como se indica en la tabla 4.1 y la figura 4.16.

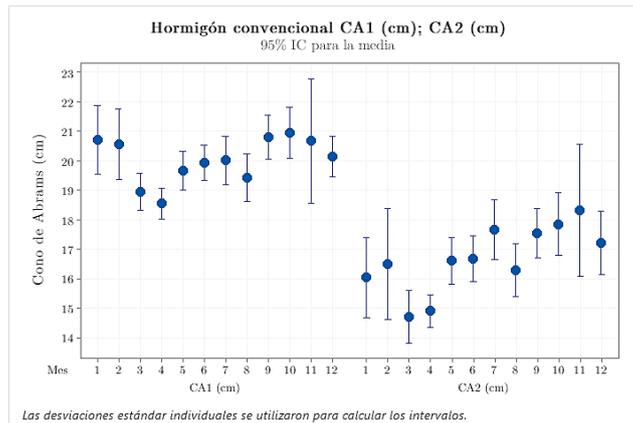
<u>Tipo de Hormigón</u>	<u>Frecuencia</u>	<u>Frecuencia Acumulada</u>
Convencional	564	564
Autonivelante	145	709

**Tabla 4.1** Frecuencias del tipo de hormigón en función de su consistencia.



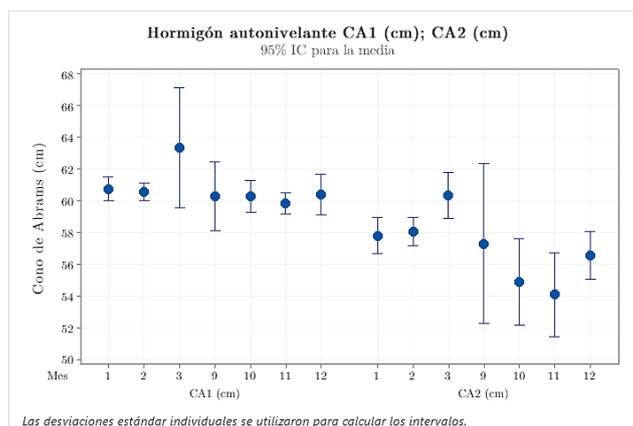
**Figura 4.16** Porcentaje de los hormigones en función de su consistencia.

En la figura 4.17 se indica la consistencia del hormigón convencional medida en el laboratorio (CA1) y la medida en la obra (CA2) por mes, como es de esperarse por el paso del tiempo la consistencia del hormigón disminuye conforme pasa el tiempo. Se observa que en la obra durante el mes de noviembre se tiene una consistencia más fluida, esto comparado con la figura 4.10 referente a la precipitación mensual esperada, coincide el pico de precipitación promedio mensual del mes de noviembre.



**Figura 4.17** Descenso del cono de Abrams en laboratorio y en obra del hormigón convencional de acuerdo con el mes de hormigonado.

En cuanto al hormigón autonivelante, al igual que el hormigón convencional la consistencia disminuye en obra respecto al medido en laboratorio, en este caso se observa que la consistencia en obra más alta en el laboratorio ocurre en marzo y septiembre, al igual que en la obra aunque la dispersión durante el mes de septiembre es más alta, como indica la figura 4.18.



**Figura 4.18** Descenso cono de Abrams en laboratorio y en obra del hormigón autonivelante de acuerdo con el mes de hormigonado.

En lo referente a la correlación entre nuestra variable de estudio que es la resistencia a compresión a diferentes edades en función de la consistencia mediante la medición del descenso del cono de

Abrams no se encontró correlación entre ellas, ni del hormigón convencional como tampoco del hormigón autonivelante, estos valores se encuentran indicados en las figuras 4.19 y 4.20.

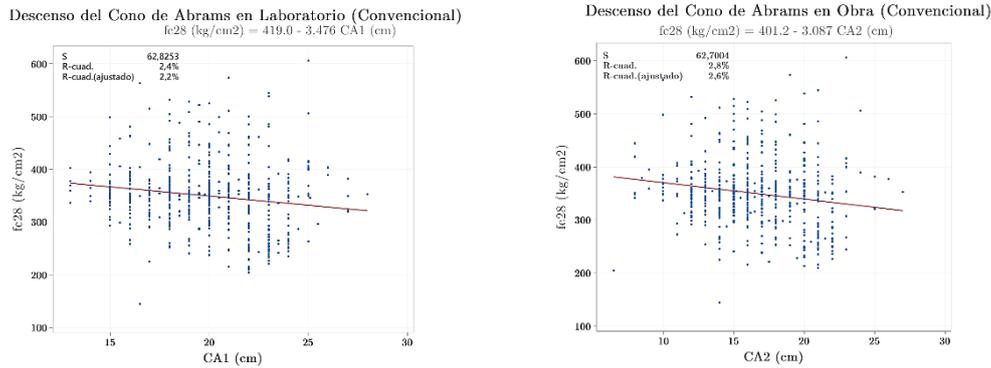


Figura 4.19 Resistencia a compresión a los 28 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón convencional en el laboratorio y en la obra.

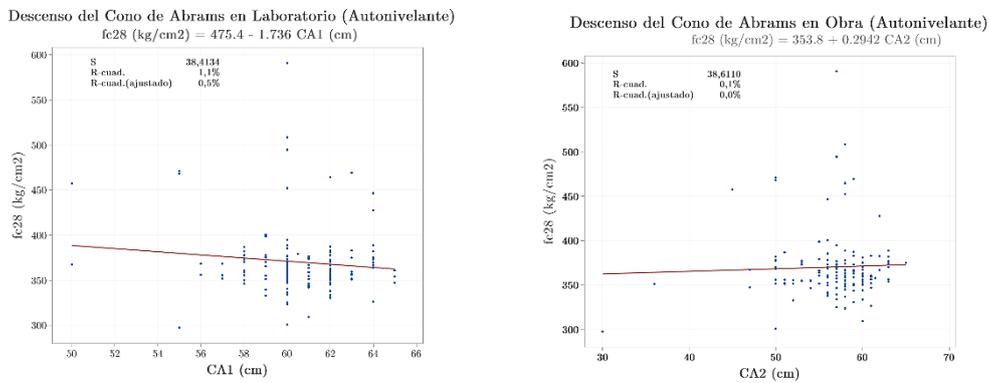


Figura 4.20 Resistencia a compresión a los 28 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón autonivelante en el laboratorio y en la obra.

Algo similar ocurre a la edad de 7 días de edad del hormigón, no existe una correlación en cuanto al descenso del cono tanto para hormigones convencionales y autonivelantes, así lo señalan las figuras 4.21 y 4.22 que indican el coeficiente de determinación en las mediciones registradas en laboratorio como las realizadas en obra.

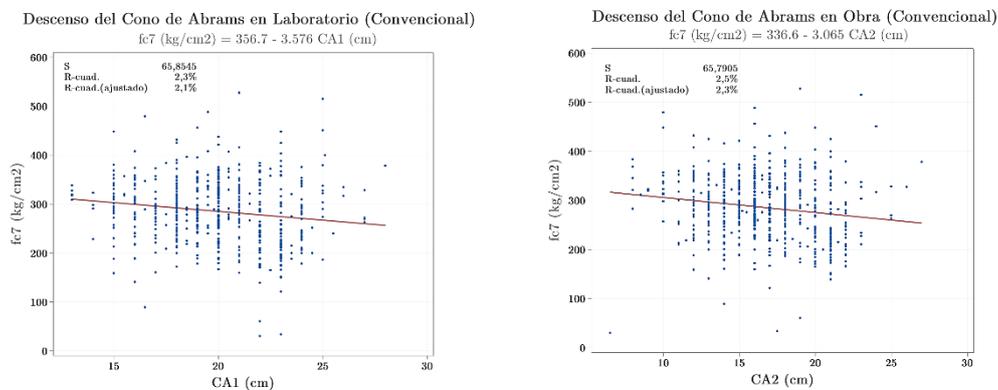


Figura 4.21 Resistencia a compresión a los 7 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón convencional en el laboratorio y en obra.

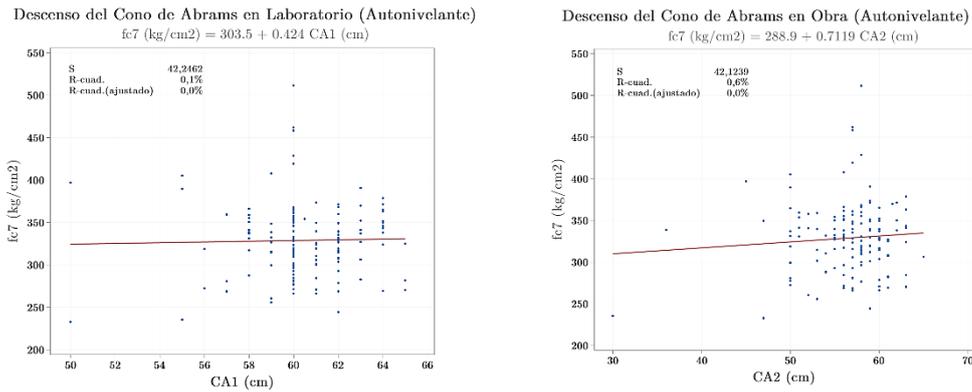


Figura 4.22 Resistencia a compresión a los 7 días en función del descenso del cono de Abrams en hormigón autonivelante en laboratorio y en obra.

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de los coeficientes de determinación  $R^2$  obtenidos de la resistencia a compresión del hormigón a diferentes edades de la base de datos estudiada, las variables que mejor se ajustan son la cantidad de agua y el contenido de cemento en la mezcla, estos valores de correlación bajos quieren decir que las variables no explican por sí solas el fenómeno que estamos estudiando, más bien lo que los resultados indican son una tendencia de lo que ocurre. En el caso de la variable *mes*, se observa un  $R^2$  de 19,8% y 15,4% a los 7 y 28 días de edad, esta correlación se ajustó a una función cuadrática ( $R^2$  lineal: 3,0%, 2,7%) a diferencia de las otras variables que fueron correlaciones de orden lineal. Para el caso de la temperatura y la medición del descenso del cono de Abrams no se observa correlación en la resistencia a compresión del hormigón tanto a 7 como a 28 días.

Variable Descripción	Codificación	R <sup>2</sup>	
		fc7	fc28
Agua	Agua	23,6%	21,8%
Cemento	Cem	16,2%	10,0%
Relación a/c	a/c	34,9%	29,2%
Temperatura del hormigón en el laboratorio	Temp1	0,0%	0,0%
Temperatura del hormigón en la obra	Temp2	0,0%	0,0%
Mes*	Mes	19,8%	15,4%
Cono de Abrams hormigón convencional en laboratorio	CA1	2,1%	2,2%
Cono de Abrams hormigón convencional en obra	CA2	2,3%	2,6%
Cono de Abrams hormigón autonivelante en laboratorio	CA1	0,0%	0,5%
Cono de Abrams hormigón autonivelante en obra	CA2	0,0%	0,0%

\*Correlación cuadrática

Tabla 4.2 Resultados del coeficiente de determinación  $R^2$  de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días de edad en función de las diferentes variables.

### 4.3 Resistencia del hormigón en función de varias variables.

De acuerdo con la tabla 4.2 observamos que la regresión simple aplicada a las variables no explica de una manera clara la variable independiente de la resistencia a compresión de las probetas tanto a los 7 días como a los 28 días de edad, pero este valor se puede mejorar realizando un modelo de regresión aditiva, con el fin de incrementar nuestro coeficiente de determinación  $R^2$  a medida que ingresamos variables independientes mediante el proceso *stepwise* de pasos sucesivos.

Este proceso consiste en introducir variables una por una y comprobar si la variable permanece o sale del modelo. 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  $R$  más alto. A continuación se vuelven a calcular todas las correlaciones eliminando la influencia de aquella que ya ha entrado en el modelo, y se introduce la siguiente variable con mayor  $R$ , consiguiéndose de esta forma que las variables que entren en el modelo no sean dependientes de las que ya figuraban (Navarro Ferrer, 2016).

La tabla 4.3 indica los resultados del proceso de pasos sucesivos realizados en el software SPSS Statics, para la variable de respuesta que es la compresión a los 28 días  $fc_{28}$ , se tiene 11 modelos con varias variables diferentes. En cada uno de estos se incorpora una variable y no sale ninguna. Las variables son las siguientes: el contenido de agua en la mezcla (Agua), cantidad de árido 3 (Ar3), el peso del cemento (Cem), cantidad de aditivo 1 (Ad1), el tipo de cemento utilizado (TipoCem), el peso del árido 4 (Ar4), la cantidad de fibra usada (Fibra), la planta en donde la mezcla fue fabricada (Mezcladora o Dosificadora, MÓD), el mes de hormigonado (Mes), la cantidad del aditivo 4 (Ad4).

**Resumen del modelo<sup>1</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,468 <sup>a</sup>	,219	,218	52,904	
2	,529 <sup>b</sup>	,279	,277	50,858	
3	,576 <sup>c</sup>	,332	,329	48,993	
4	,591 <sup>d</sup>	,349	,345	48,400	
5	,601 <sup>e</sup>	,362	,357	47,964	
6	,607 <sup>f</sup>	,369	,363	47,734	
7	,612 <sup>g</sup>	,374	,368	47,572	
8	,616 <sup>h</sup>	,380	,372	47,393	
9	,619 <sup>i</sup>	,384	,376	47,265	
10	,622 <sup>j</sup>	,387	,379	47,164	

11	,622 <sup>k</sup>	,387	,379	47,135	1,681
----	-------------------	------	------	--------	-------

- a. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3)
- b. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3)
- c. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3)
- d. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3)
- e. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3), TipoCem
- f. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3), TipoCem, Ar4 (Kg/m3)
- g. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3), TipoCem, Ar4 (Kg/m3), Fibra (Kg/m3)
- h. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3), TipoCem, Ar4 (Kg/m3), Fibra (Kg/m3), M6D
- i. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3), TipoCem, Ar4 (Kg/m3), Fibra (Kg/m3), M6D, Mes
- j. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), Ad1 (Kg/m3), TipoCem, Ar4 (Kg/m3), Fibra (Kg/m3), M6D, Mes, Ad4 (Kg/m3)
- k. Predictores: (Constante), Agua (Kg/m3), Ar3 (Kg/m3), Cem (Kg/m3), TipoCem, Ar4 (Kg/m3), Fibra (Kg/m3), M6D, Mes, Ad4 (Kg/m3)
- l. Variable dependiente: fc28 (kg/cm2)

Tabla 4.3 Pasos sucesivos para la resistencia a compresión de las variables de hormigón, fc28.

Un modelo lineal múltiple con 4 factores es capaz de explicar el 34,9% de la variabilidad de la resistencia a compresión a los 28 días, siendo los más influyentes: la cantidad de agua de la mezcla (Agua), la cantidad de árido 3 (Ar3), la cantidad de cemento (Cem) y la cantidad de aditivo 1 (Ad1), se observa con la introducción de siete variables más, el valor de R<sup>2</sup> tan solo incrementa a 38,7%, más adelante en el apartado 5.2 se abordarán estas variables usando redes neuronales artificiales. En la tabla 4.4 se muestran las ecuaciones de regresión con los respectivos coeficientes detallados de la tabla 4.3, evidenciando que de estas la cantidad de agua y la cantidad de cemento son las variables que mejor definen el comportamiento de la resistencia del hormigón.

Ecuación de regresión	R <sup>2</sup> (%)
$fc_{28} = 518,83 - 0,69 \text{ Agua}$	21,9
$fc_{28} = 479,35 - 0,66 \text{ Agua} + 0,06 \text{ Ar3}$	27,9
$fc_{28} = 274,361 - 0,601 \text{ Agua} + 0,057 \text{ Ar3} + 0,505 \text{ Cem}$	33,2
$fc_{28} = 282,77 - 0,65 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,48 \text{ Cem} + 8,61 \text{ Ad1}$	34,9
$fc_{28} = 287,04 - 0,66 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,54 \text{ Cem} + 8,96 \text{ Ad1} - 18,69 \text{ TipoCem}$	36,2
$fc_{28} = 255,79 - 0,61 \text{ Agua} + 0,06 \text{ Ar3} + 0,55 \text{ Cem} + 10,11 \text{ Ad1} - 18,54 \text{ TipoCem} + 0,04 \text{ Ar4}$	36,9
$fc_{28} = 256,94 - 0,59 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,56 \text{ Cem} + 10,19 \text{ Ad1} - 19,28 \text{ TipoCem} + 0,03 \text{ Ar4} - 1,42 \text{ Fibra}$	37,4
$fc_{28} = 246,17 - 0,54 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,53 \text{ Cem} + 10,66 \text{ Ad1} - 20,07 \text{ TipoCem} + 0,03 \text{ Ar4} - 1,55 \text{ Fibra} + 12,17 \text{ M6D}$	38,0
$fc_{28} = 241,08 - 0,52 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,51 \text{ Cem} + 10,26 \text{ Ad1} - 22,07 \text{ TipoCem} + 0,03 \text{ Ar4} - 1,51 \text{ Fibra} + 11,73 \text{ M6D} + 1,33 \text{ Mes}$	38,4
$fc_{28} = 230,95 - 0,55 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,62 \text{ Cem} + 1,83 \text{ Ad1} - 25,76 \text{ TipoCem} + 0,03 \text{ Ar4} - 1,57 \text{ Fibra} + 12,26 \text{ M6D} + 1,50 \text{ Mes} - 8,45 \text{ Ad4}$	38,7
$fc_{28} = 229,24 - 0,55 \text{ Agua} + 0,05 \text{ Ar3} + 0,63 \text{ Cem} - 26,38 \text{ TipoCem} + 0,03 \text{ Ar4} - 1,58 \text{ Fibra} + 12,28 \text{ M6D} + 1,54 \text{ Mes} - 9,94 \text{ Ad4}$	38,7

Tabla 4.4 Ecuaciones de regresión para la resistencia a compresión a 28 días, fc28 y sus respectivos R<sup>2</sup>.

En cuanto a la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 días, la tabla 4.5 indica que el modelo de correlación lineal múltiple con cuatro factores es capaz de explicar el 39,1% de la variabilidad del fenómeno estudiado, las variables independientes que más influyen en el comportamiento son: la cantidad de agua que hay en la mezcla (Agua), el peso del cemento (Cem), la cantidad del árido 3 (Ar3) y el tipo de cemento (TipoCem). Si se toma siete variables, estas explican el 41,2% del fenómeno, las cuatro variables independientes adicionales son: el tiempo que tardo el hormigón desde su fabricación hasta la llegada a obra (t1), la cantidad de fibras colocadas (Fibra) y la cantidad de aditivo 3 (Ad3).

**Resumen del modelo<sup>h</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,487 <sup>a</sup>	,237	,236	56,586	
2	,583 <sup>b</sup>	,340	,338	52,653	
3	,609 <sup>c</sup>	,371	,368	51,453	
4	,626 <sup>d</sup>	,391	,388	50,644	
5	,633 <sup>e</sup>	,400	,396	50,313	
6	,639 <sup>f</sup>	,408	,403	50,013	
7	,642 <sup>g</sup>	,412	,406	49,901	1,466

a. Predictores: (Constante), Agua

b. Predictores: (Constante), Agua, Cem

c. Predictores: (Constante), Agua, Cem, Ar3

d. Predictores: (Constante), Agua, Cem, Ar3, TipoCem

e. Predictores: (Constante), Agua, Cem, Ar3, TipoCem, t1

f. Predictores: (Constante), Agua, Cem, Ar3, TipoCem, t1, Fibra

g. Predictores: (Constante), Agua, Cem, Ar3, TipoCem, t1, Fibra, Ad3

h. Variable dependiente: fc7

**Tabla 4.5** Pasos sucesivos para la resistencia a compresión de las variables de hormigón, fc7.

En la tabla 4.6 se indica las ecuaciones de regresión para la variable de salida fc7 con su coeficiente de determinación  $R^2$  obtenidos del proceso de pasos sucesivos y detallados en la tabla 4.5.

De las tablas 4.4 y 4.6, referente a las ecuaciones que explican la variable de resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 y 7 días respectivamente, los valores del coeficiente de determinación es de 34,9% y 39,1% en cada uno de los casos, estos valores están en función de

cuatro variables independientes, estos valores son de baja calidad y poco fiables para determinar la resistencia del material, por lo que hace necesario el uso de otras herramientas como el uso de redes neuronales artificiales para obtener una predicción más cercana al valor real.

Ecuación de regresión	R <sup>2</sup> (%)
$fc_7 = 479,84 - 0,78 \text{ Agua}$	23,7
$fc_7 = 168,38 - 0,68 \text{ Agua} + 0,76 \text{ Cem}$	34,0
$fc_7 = 142,82 - 0,66 \text{ Agua} + 0,75 \text{ Cem} + 0,05 \text{ Ar3}$	37,1
$fc_7 = 148,23 - 0,68 \text{ Agua} + 0,83 \text{ Cem} + 0,04 \text{ Ar3} - 25,77 \text{ TipoCem}$	39,1
$fc_7 = 161,77 - 0,70 \text{ Agua} + 0,83 \text{ Cem} + 0,04 \text{ Ar3} - 24,85 \text{ TipoCem} - 19,60 \text{ t1}$	40,0
$fc_7 = 158,09 - 0,66 \text{ Agua} + 0,84 \text{ Cem} + 0,03 \text{ Ar3} - 25,80 \text{ TipoCem} - 19,07 \text{ t1} - 1,89 \text{ Fibra}$	40,8
$fc_7 = 145,69 - 0,66 \text{ Agua} + 0,85 \text{ Cem} + 0,04 \text{ Ar3} - 20,99 \text{ TipoCem} - 17,45 \text{ t1} - 1,84 \text{ Fibra} - 16,10 \text{ Ad3}$	41,2

Tabla 4.6 Ecuaciones de regresión para la resistencia a compresión a 7 días,  $fc_7$  y sus respectivos R<sup>2</sup>.

#### 4.4 Evolución de la resistencia a compresión del hormigón

Como es conocido conforme avanza la edad de hormigón su resistencia irá creciendo también, existe bibliografía bien documentada en cuanto a la evolución de la resistencia del hormigón entre la edad de 7 a 28 días, a continuación se indica una formulación de varios autores y estos se compararán con los datos obtenidos en nuestro estudio. La figura 4.23, se muestra un R<sup>2</sup> de 67,7% en la resistencia a la edad de 28 días en función de la resistencia a la edad de 7 días.

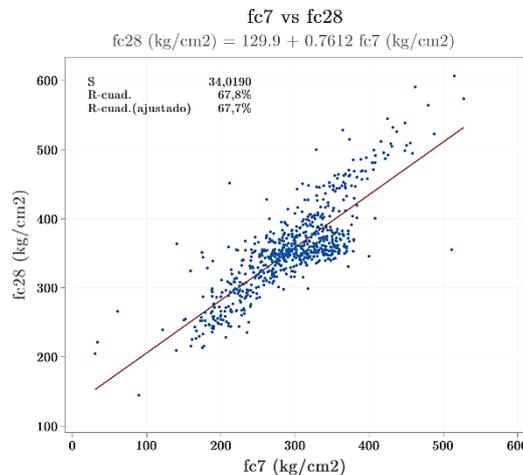


Figura 4.23 Grafica de correlación entre resistencias a compresión del hormigón a los 7 y 28 días de edad de la muestra de estudio.

El comité ACI (ACI 209R-92) propone el siguiente modelo para la resistencia a compresión en función del tiempo:

$$f_{ct} = \frac{t}{a + b \cdot t} \cdot f_{c28} \quad (4.1)$$

En donde,  $f_{c28}$  es la resistencia a los 28 días y los coeficientes  $a$  y  $b$  son las constantes que se indican en la tabla 3.14.

	a	b
CEM I	4	0,85
CEM II	2,3	0,92

Tabla 4.7 Coeficientes de las constantes a y b del modelo

ACI 209R-92 para condiciones de curado medio.

La Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08 en su artículo 31.3 referente a características mecánicas del hormigón, establece que para la resistencia a la edad de  $t$  días.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (4.2)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4.3)$$

donde:

$f_{cm}$  Resistencia media a compresión a 28 días que puede calcularse como  $f_{c,m} = f_{ck} + 8$  si las condiciones de ejecución son buenas.

$\beta_{cc}$  Coeficiente que depende de la edad del hormigón.

$t$  Edad del hormigón en días.

$s$  Coeficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento:

0,2 para cementos de endurecimiento rápido.

0,25 para cementos de endurecimiento normal.

0,38 para cementos de endurecimiento lento.

En la tabla 4.8 se muestra los resultados obtenidos de la relación  $f_{c7}/f_{c28}$  obtenido en el proyecto de la ciudad ecuatoriana conjuntamente con los valores de las normas ACI, EHE y además se adjuntan los resultados de estudios realizados en la ciudad de Valencia de las tesis doctorales de J.V Cánoves (2012) y Navarro Ferrer (2016).

	$f_{c7}/f_{c28}$
ACI 209R	0,7035
EHE-08	0,7788
J. Cánovas	0,8166
F. Navarro	0,8367
<b>Estudio en Ecuador</b>	<b>0,8320</b>

Tabla 4.8 Relación de resistencias a compresión a 7 y 28 días de edad, según diferentes autores.

Se puede observar que los valores de las normas norteamericana y europea otorgan resultados conservadores, la relación  $f_{c7}/f_{c28} = 0,8320$  realizado en la hidroeléctrica ecuatoriana están más apegados a los estudios experimentales realizados en el país español que a las normas citadas, la relación encontrada es 18,3% más alta que la norma ACI y 6,8% más elevada que la EHE, mientras que con Cánoves la relación difiere un 1,8% y con Navarro Ferrer hay una diferencia de 0,6%.

## 4.5 Análisis descriptivo de la resistencia a compresión del hormigón.

En este apartado se realizará un estudio descriptivo estadístico de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días de la base de datos de estudio, en la figura 4.24 se muestra que la resistencia a compresión media es  $354,20 \text{ kg/cm}^2$ , con una desviación estándar  $59,83 \text{ kg/cm}^2$ , el intervalo de confianza de 95% para la media esta entre  $349,79 \text{ kg/cm}^2$  y  $358,65 \text{ kg/cm}^2$ , también se observa que la distribución de los valores de resistencias cumple con la prueba de normalidad ( $p < 0,05$ ), el gráfico de la normalidad se indica en la figura 4.25.

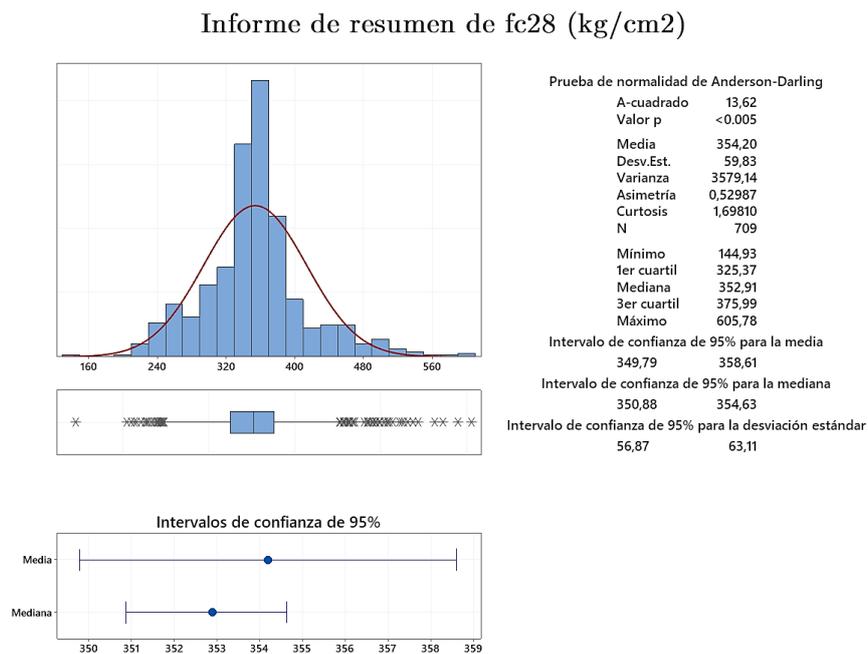


Figura 4.24 Resumen estadístico descriptivo para la resistencia del hormigón a la edad de 28 días.

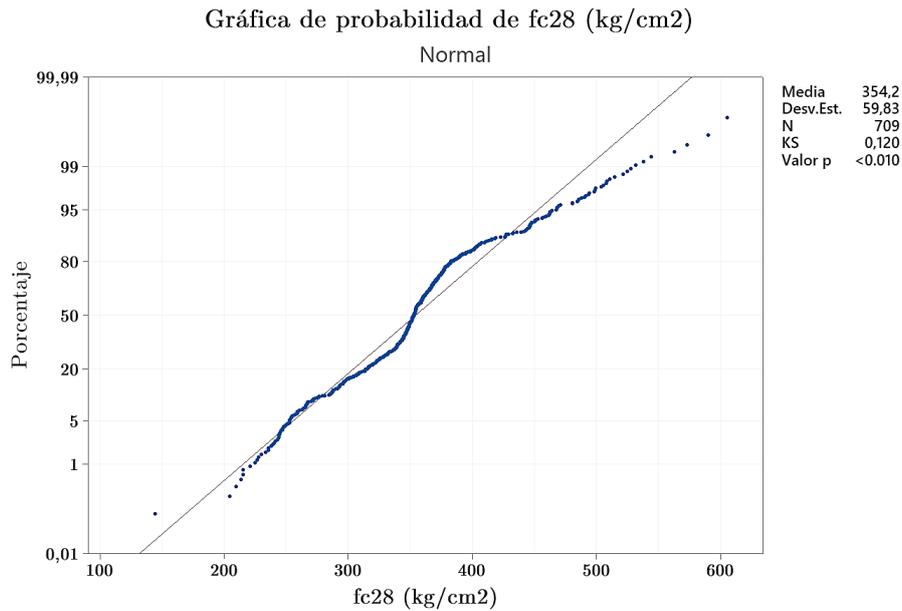


Figura 4.25 Gráfica de normalidad de la muestra de resistencia del hormigón a 28 días.

Para el caso de la resistencia a compresión a los 7 días la media de la resistencia a compresión del hormigón es 294,69 kg/cm<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 64,73 kg/cm<sup>2</sup>, los valores de resistencia de la media para un intervalo del 95% varían entre 289,91 kg/cm<sup>2</sup> y 299,46kg/cm<sup>2</sup>, en la figura 4.26 se indica el resumen de estos valores, además en la figura 4.27 se comprueba que la los valores de la resistencia a los 7 días de la muestra cumplen una distribución normal ( $p < 0,05$ ).

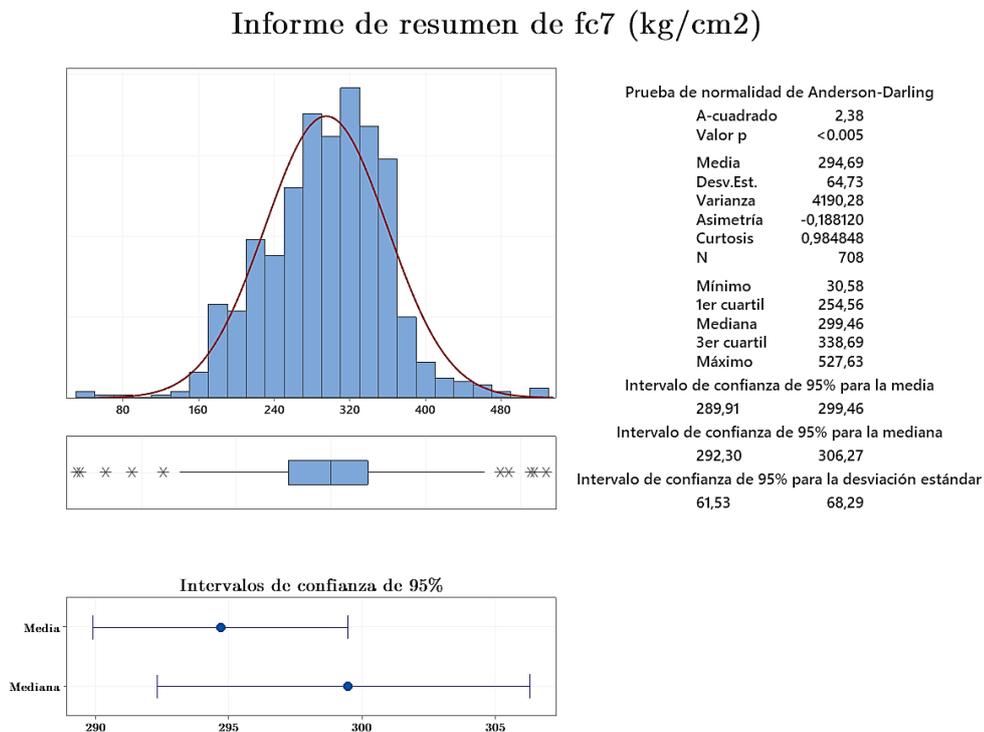


Figura 4.26 Resumen estadístico descriptivo para la resistencia del hormigón a la edad de 7 días.

Gráfica de probabilidad de fc7 (kg/cm2)  
Normal

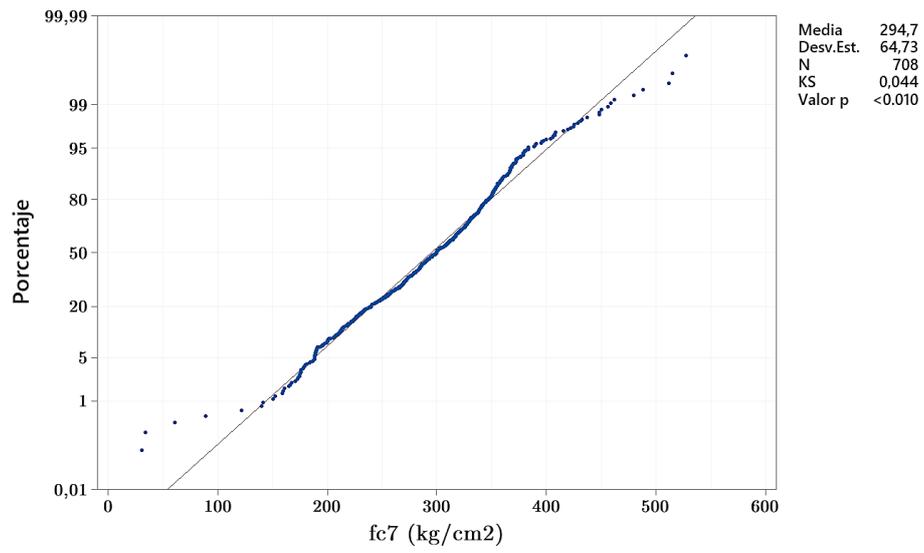


Figura 4.27 Gráfica de normalidad de la muestra de resistencia del hormigón a 7 días.

## Capítulo 5

# APLICACIÓN DE REDES NEURONALES

Como se observó el uso de estadística clásica para la predicción de resultados de los valores de resistencia a compresión son de baja calidad, los coeficientes de determinación  $R^2$  calculados evidencian la necesidad de utilizar otros métodos más potentes y confiables que puedan explicar de mejor manera el fenómeno. En este apartado se aplicará redes neuronales artificiales (RNA) en los softwares Matlab R2018b (Neural Network Toolbox) y SPSS Statics a la base de datos descrita en el punto 3. El punto 5.1 compara la robustez de las redes neuronales tanto en Matlab como en SPSS, estas fueron ejecutadas utilizando todas las variables disponibles de la base de datos y al final del apartado se compara los resultados y rendimientos que tuvieron cada una de las redes neuronales en los dos programas, mientras que en el punto 5.2 se realizará una serie de redes neuronales combinando diferentes variables de entrada para observar el comportamiento en cada uno de los casos.

### 5.1 Red Neuronal Artificial en Matlab y SPSS

Las cuatro primeras redes neuronales evalúan la capacidad de predecir la resistencia a compresión del hormigón a las edades de 28 y 7 días, en Matlab se ejecutaron las RNA\_1 y RNA\_2 mientras que en SPSS las RNA\_3 y RNA\_4, la RNA\_1 y RNA\_3 predicen el valor de la resistencia a los 28 días mientras que las RNA\_2 y RNA\_4 la resistencia a los 7 días de edad, como se muestra en la tabla 5.1.

**Variables utilizadas en las redes neuronales artificiales**

Variables de Entrada	RNA			
	1	2	3	4
MóD	x	x	x	x
Cem	x	x	x	x
TipoCem	x	x	x	x
Ad1	x	x	x	x
Ad2	x	x	x	x
Ad3	x	x	x	x
Ad4	x	x	x	x
Ar1	x	x	x	x
Ar2	x	x	x	x
Ar3	x	x	x	x
Ar4	x	x	x	x
Agua	x	x	x	x
Mes	x	x	x	x
Fibra	x	x	x	x
CA1	x	x	x	x
CA2	x	x	x	x
Temp1	x	x	x	x
Temp2	x	x	x	x
t1	x	x	x	x
t2	x	x	x	x
Número variables	20	20	20	20
Variable predicción	fc <sub>28</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>	fc <sub>7</sub>
Software utilizado	Matlab	Matlab	SPSS	SPSS

Tabla 5.1 Variables y software utilizados para las cuatro primeras redes neuronales artificiales.

### 5.1.1 Red Neuronal Artificial en Matlab

La tipología de la RNA en Matlab 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`. (Haykin 2008).

Se ha utilizado la técnica de división de datos para entrenamiento-validación-test denominada validación cruzada (*K-Fold Cross Validation*) con  $K = 3$  para evitar el problema del sobre aprendizaje. 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 a criterio del investigador, generalmente por ensayo y error, aunque también depende de la precisión y velocidad requerida y del algoritmo de

aprendizaje escogido. En problemas de predicción en redes multicapa se suele utilizar como función de transferencia la tangente hiperbólica (*tansig*) (Navarro Ferrer, 2016), que es la que se eligió para este trabajo.

En el presente trabajo, se ha configurado la RNA con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Las neuronas de la capa de entrada son variables para cada red neuronal y la capa de salida tiene una única neurona (Navarro Ferrer, 2016). 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 como indica los resultados obtenidos para nuestra base de datos con el número total de datos y variable, en la tabla 5.1.

Numero de neuronas en capas ocultas	Valor de R	Numero de neuronas en capas ocultas	Valor de R
1	0,61	17	0,71
2	0,64	18	0,71
3	0,67	19	0,73
5	0,70	20	0,72
10	0,70	25	0,70
11	0,70	30	0,72
12	0,70	35	0,72
13	0,69	40	0,79
14	0,67	45	0,81
15	0,73	50	0,83
16	0,73	55	0,82

Tabla 5.2 Valores de R obtenidos del número de neuronas en la capa oculta en la RNA\_1.

Para el proceso de aprendizaje, validación y resultado de todas las redes neuronales, se ha usado el método de la validación cruzada y el número total de datos disponibles se ha distribuido de la siguiente manera:

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

En la figura 5.1 se indica los gráficos obtenidos de la interfaz de Matlab, durante el proceso de predicción de los resultados de los valores de correlación R, tanto para aprendizaje, validación y test, como también el valor de R total.

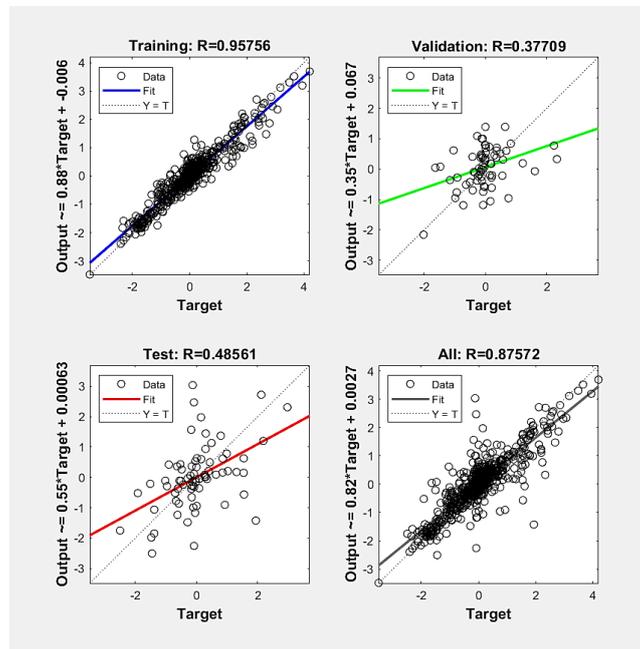


Figura 5.1 Coeficientes de correlación obtenidos en una de las ejecuciones de la RNA\_1 en Matlab.

Para cuantificar la calidad de la solución y potencia del algoritmo, en el código desarrollado el criterio un criterio de parada para evitar el sobre aprendizaje del algoritmo, es el análisis de los valores 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*) se calcula mediante la ecuación 5.1, mide la media de la diferencia de los errores al cuadrado, compara un valor predicho y un valor conocido. En la ecuación 5.2 se calcula el RMSE (*root mean squared error*), mide la precisión del pronóstico calculando la desviación entre las valoraciones de usuario previstas y las reales. (Qing Xie, 2020). Con la ecuación 5.3 se obtiene la PSE (*predicted squared error*) es un recurso indirecto para resumir tanto la diferencia entre los efectos observados (por ejemplo, entre los porcentajes o las medias correspondientes a diferentes tratamientos), como el grado en que la diferencia observada entre los grupos comparados se aproxima a la verdadera diferencia entre ellos (Sarria Castro y Silva Aycaguer, 2005).

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

$$RMSE = \frac{MSE}{var(tstd)} \quad (5.2)$$

$$PSE = MSE \cdot \left(1 + \frac{2NPar}{N - NPar}\right) \quad (5.3)$$

La figura 5.2 muestra el entorno de la red neuronal del programa Matlab y la información sobre el cálculo de estos tres valores, como también la información del número de iteraciones del proceso, el tiempo empleado en encontrar la solución del algoritmo, en la sección *Plots (Regression)* se imprime el grafico que esta detallado en la figura 5.1 el factor de correlación R (para aprendizaje, test, validación y total) todos estos valores son calculados en cada una de las ejecuciones que se realicen a la red neuronal.

Para cada red neuronal artificial se realizan 9 ejecuciones de acuerdo con 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 (Navarro Ferrer, 2016).

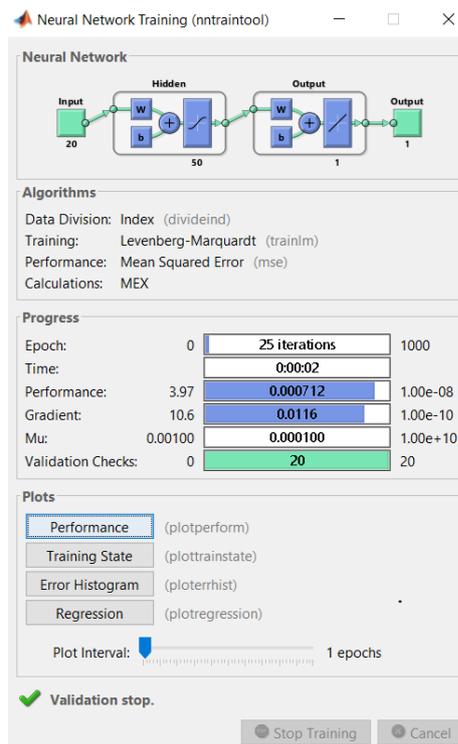


Figura 5.2 Entorno de la red neuronal en Matlab R2018b.

Como ya se explicó anteriormente las dos primeras redes neuronales RNA\_1 y RNA\_2, plantean la predicción de la resistencia del hormigón a diferentes edades con todas las variables de entrada que se tiene disponible (20 variables), el valor de salida de la RNA\_1 es la compresión a los 28 días y la RNA\_2 a los 7 días. La figura 5.3 y 5.4 indican los resultados de las ejecuciones de la

RNA\_1 y RNA\_2, con un coeficiente de determinación  $R^2=0,802$  y  $R^2=0,886$ , respectivamente. Los valores predichos de la resistencia a compresión a los 7 días ( $fc_7$ ) tienen un ligeramente un mejor ajuste en comparación a la resistencia de los 28 días ( $fc_{28}$ ).

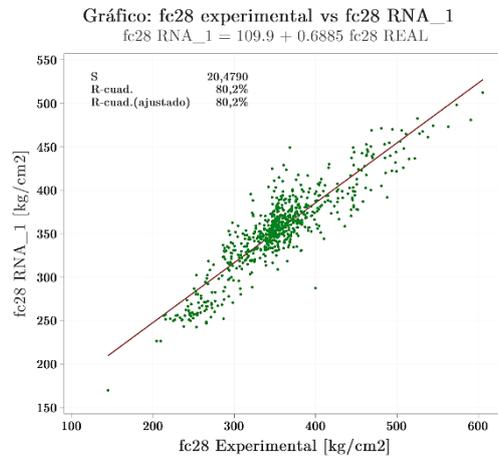


Figura 5.3 RNA\_1: resistencia a compresión a los 28 días con todas las variables.

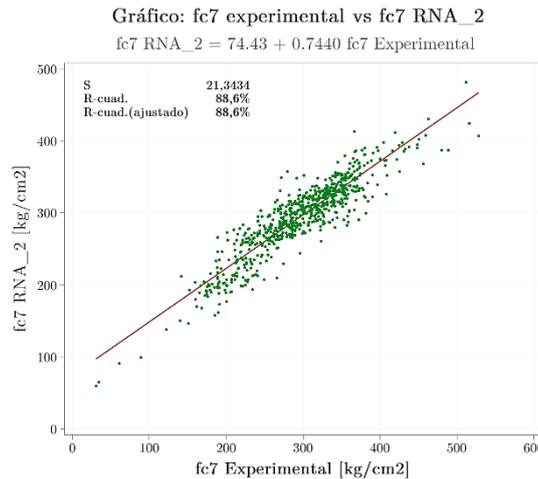


Figura 5.4 RNA\_2: resistencia a compresión a los 7 días con todas las variables.

### 5.1.2 Red Neuronal Artificial en SPSS

Para comparar el comportamiento y la potencia de la red neuronal de Matlab, adicionalmente se ejecutó en el programa IBM SPSS Statics, una RNA de tipo *perceptrón multicapa*, a la cual se configuró con los mismos criterios de la RNA\_1 y RNA\_2, para el proceso de validación de los datos se utilizó la misma distribución para el aprendizaje, entrenamiento y test (80%, 10%, 10%) como se observa en la figura 5.5a. En la figura 5.5b se observa el número de capas ocultas que se desea ingresar en nuestro caso es 1 con 50 neuronas y la función con la que deseamos trabajar para nuestra variable de salida, en nuestro caso se escoge la función tangente hiperbólica. Mientras que en la figura 5.5c, se indica los resultados que se desea visualizar luego de la ejecución, los

minutos máximos de procesamiento que el usuario desea esperar hasta que el algoritmo converja y los valores de errores que se desea obtener.

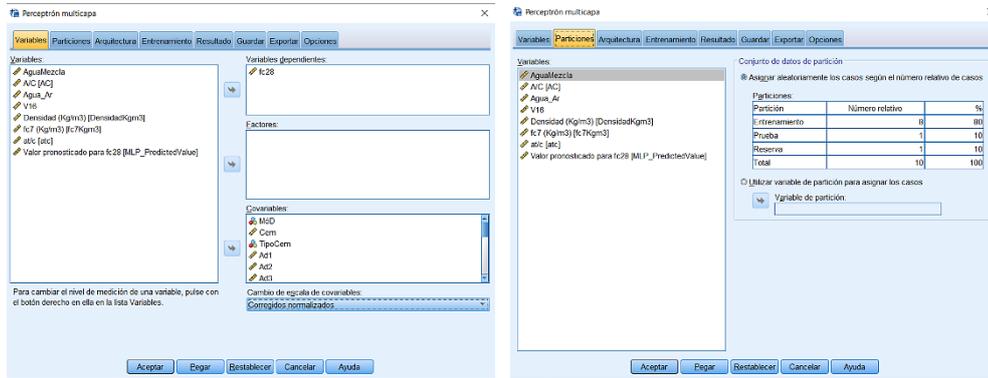


Figura 5.5a Entorno de la red neuronal en SPSS.

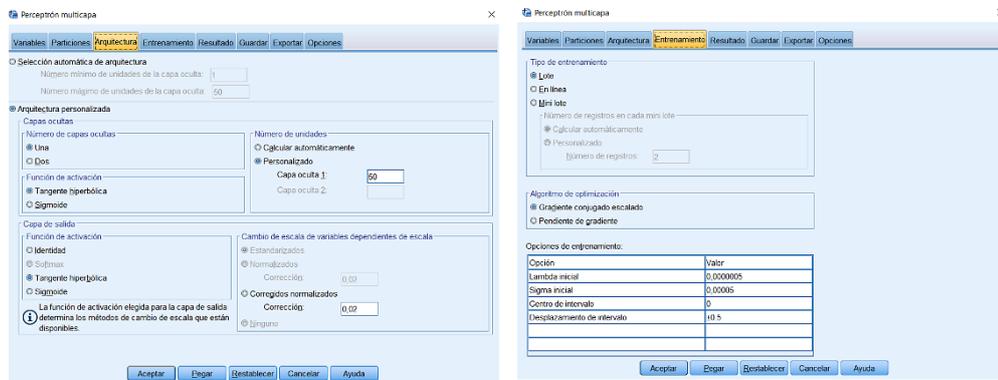


Figura 5.5b Entorno de la red neuronal en SPSS.



Figura 5.5c Entorno de la red neuronal en SPSS.

La información de la red neuronal ejecutada en SPSS se indica en la figura 5.6, en ella consta la información de las capas de entrada, oculta y de salida en donde se indica lo siguiente:

- El número y la descripción de cada una de las variables empleadas.
- El número de capas ocultas y la función de transferencia de las redes multicapa.
- La capa de salida con la variable de predicción.

El algoritmo de IBM imprime entre los resultados la importancia de cada una de las variables al momento de predecir la variable de salida, que para nuestro estudio es la resistencia a compresión a los 7 y 28 días ( $fc_7$  y  $fc_{28}$ ), en la figura 5.7 se indica el resultado obtenido en una de las ejecuciones, en esta se puede observar que las 4 variables más influyentes al momento de predecir fueron: la cantidad de cemento (Cem, 13,0%), la cantidad de agua (Agua, 8,60%), el tipo de cemento (TipoCem, 6,70%) y la temperatura del hormigón al momento de hormigonar (Temp2, 6,60%), entre ellos explican el 34,9% del fenómeno.

**Perceptrón multicapa**

Información de red			
Capa de entrada	Covariables	1	MóD
		2	Cem
		3	TipoCem
		4	Ad1
		5	Ad2
		6	Ad3
		7	Ad4
		8	Ar1
		9	Ar2
		10	Ar3
		11	Ar4
		12	Agua
		13	Mes
		14	Fibra
		15	CA1
		16	CA2
		17	Temp1
		18	Temp2
		19	t1
		20	t2
Número de unidades <sup>a</sup>		20	
Método de cambio de escala para las covariables		Estandarizados	
Capas ocultas	Número de capas ocultas	1	
	Número de unidades en la capa oculta 1 <sup>a</sup>	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	Estandarizados	
	Función de activación	Identidad	
	Función de error	Suma de cuadrados	

a. Se excluye la unidad de sesgo

Figura 5.6 Información de la red neuronal en SPSS.

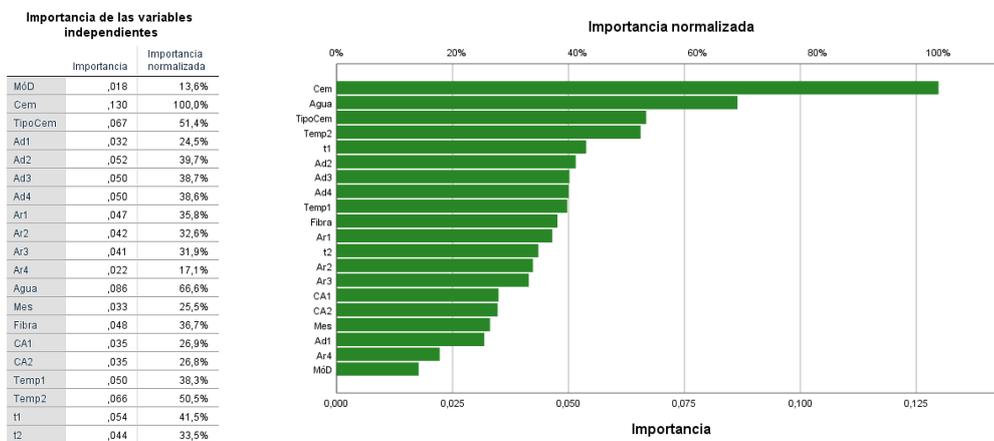


Figura 5.7 Importancia de las variables independientes para la red neuronal en SPSS.

Los resultados de estas redes neuronales se han denominado RNA\_3 y RNA\_4, que corresponde a la predicción del valor de resistencia a la compresión del hormigón a los 28 y 7 días respectivamente, con el mismo criterio descrito anteriormente se ejecutó 9 veces y se obtuvo un  $R^2=0,53$  para las resistencias a 28 días mientras que para las resistencias a los 7 días se obtuvo un  $R^2=0,52$ , como se indican en la figura 5.8 y 5.9.

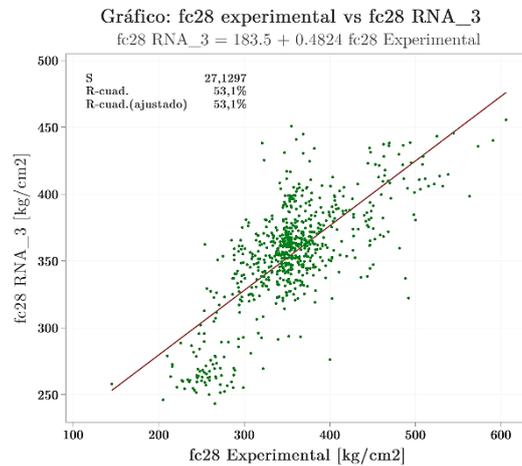


Figura 5.8 RNA\_3: resistencia a compresión a los 28 días con todas las variables. Red neuronal de SPSS.

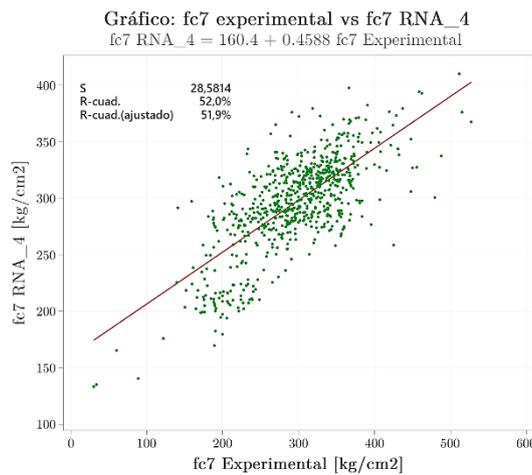


Figura 5.9 RNA\_4: resistencia a compresión a los 7 días con todas las variables. Red neuronal de SPSS.

Los coeficientes de determinación de las redes neuronales, teniendo como variable de salida el valor de la resistencia a compresión a 7 y 28 días, con el algoritmo de Matlab se obtuvieron mejores ecuaciones de ajuste en comparación al calculado en SPSS, en la tabla 5.3 se observan los resultados obtenidos para las 4 redes neuronales.

Para las redes neuronales ejecutadas en Matlab se observa un aumento de aproximadamente 30 puntos porcentuales de  $R^2$  tanto para la predicción de los resultados tanto a los 28 como a los 7 días de edad, evidenciando lo robusto que es el algoritmo empleado en Matlab.

R <sup>2</sup> obtenidos con Matlab y SPSS		
Edad de rotura	Matlab	SPSS
<b>fc28</b>	80,2%	53,1%
<b>fc7</b>	88,6%	51,9%

Tabla 5.3 Valores de R<sup>2</sup> obtenidos en Matlab y SPSS.

## 5.2 Redes neuronales artificiales con diferentes combinaciones de variables

Debido a los resultados que se obtuvieron en el punto anterior, en adelante todos los resultados de las redes neuronales han sido ejecutadas en Matlab. Se plantean varias redes neuronales, con el fin de predecir la resistencia a compresión del hormigón a los 28 y a los 7 días de edad, las variables de entrada y salida que vamos a utilizar encuentran marcadas con una x y se encuentran resumidas en la tabla 5.4.

Variables utilizadas en las redes neuronales artificiales												
Variables de Entrada	RNA											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
MóD	x	x	x	x	x	x			x			
Cem	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TipoCem	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Ad1	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Ad2	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Ad3	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Ad4	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Ar1	x	x	x	x							x	x
Ar2	x	x	x	x							x	x
Ar3	x	x	x	x					x	x	x	x
Ar4	x	x	x	x					x		x	x
Agua	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mes	x	x	x	x	x	x			x		x	x
Fibra	x	x	x	x					x	x	x	x
CA1	x	x			x	x	x	x				
CA2			x	x							x	x
Temp1	x	x			x	x	x	x				
Temp2			x	x			x	x			x	x
t1							x	x		x		
t2	x	x	x	x	x	x					x	x
Número Variables	17	17	17	17	12	12	11	11	9	7	15	15
Variable Predicción	fc28	fc7	fc7	fc28								

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

La RNA\_5 y RNA\_6 tienen 17 variables de entrada, se mantuvieron las variables referentes al lugar de fabricación del hormigón, la cantidad y tipo del cemento, aditivos, áridos, agua, fibras y el mes de hormigonado. Las variables concernientes a la medición del descenso del cono y la temperatura del hormigón que fueron medidas tanto en el laboratorio como en la obra, para estas dos redes neuronales se tomó en cuenta solamente las que fueron medidas en el laboratorio, las medidas en obra se descartaron. Respecto a la variable que relaciona el tiempo se tomó en cuenta el transcurrido desde fabricación del hormigón hasta fabricación de probetas (t2). Las variables de salida son la resistencia a los 28 y 7 días. Los resultados se observan en la figura 5.10 y 5.11.

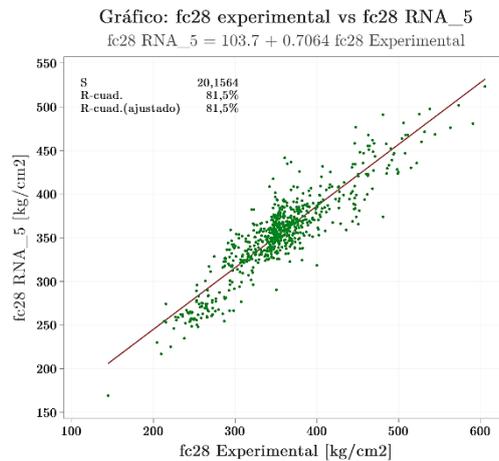


Figura 5.10 RNA\_5 resistencia a compresión a los 28 días con 17 variables.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,83879	0,82548	0,82911	0,82524	0,81981	0,83293	0,82505	0,825	0,83272
MSE	0,2962	0,3212	0,3122	0,3227	0,3343	0,3067	0,3193	0,3223	0,3138
RMSE	0,2962	0,3212	0,3122	0,3227	0,3343	0,3067	0,3193	0,3223	0,3138
PSE	-2,0321	-2,203	-2,1413	-2,2133	-2,2934	-2,1036	-2,1899	-2,211	-2,1528
Iteraciones	24	24	25	26	25	25	24	26	27

Tabla 5.5 Parámetros obtenidos para la RNA\_5.

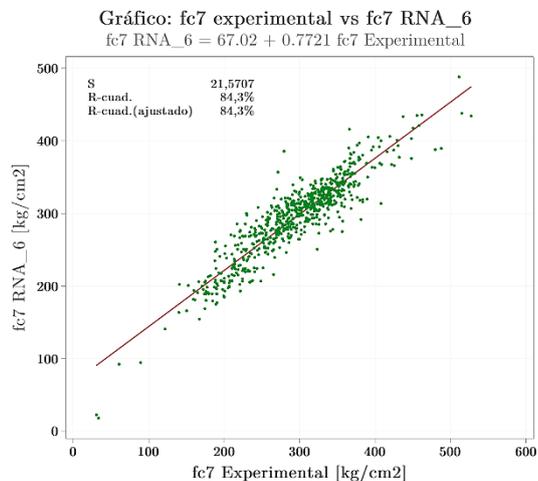


Figura 5.11 RNA\_6 resistencia a compresión a los 7 días con 17 variables.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,84713	0,8764	0,86999	0,86416	0,86888	0,88961	0,8716	0,85994	0,87153
MSE	0,2822	0,2318	0,2441	0,2548	0,2457	0,214	0,2405	0,2663	0,2413
RMSE	0,2822	0,2318	0,2441	0,2548	0,2457	0,214	0,2405	0,2663	0,2413
PSE	-1,9263	-1,5824	-1,6667	-1,7394	-1,6776	-1,461	-1,6421	-1,8178	-1,6476
Iteraciones	23	24	24	24	25	28	24	24	25

Tabla 5.6 Parámetros obtenidos para la RNA\_6.

Para las RNA\_7 y RNA\_8, se realizó con el mismo criterio que los casos anteriores con la diferencia que esta vez se tomó en cuenta las mediciones que se realizaron en la obra tanto de la medida del descenso del cono como de la temperatura del hormigón, descartando las mediciones realizadas en el laboratorio. las demás variables se mantuvieron igual que las RNA\_5 y RNA\_6. Los resultados se observan en la figura 5.12 y 5.13.

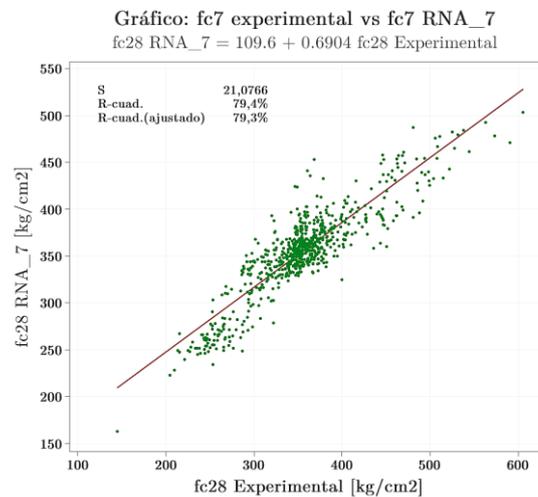


Figura 5.12 RNA\_7 resistencia a compresión a los 28 días con 17 variables.

N.º Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,81324	0,82288	0,83083	0,82402	0,82758	0,82156	0,81969	0,83388	0,85026
MSE	0,3388	0,3233	0,3094	0,3223	0,3165	0,3259	0,3296	0,3053	0,2781
RMSE	0,3388	0,3233	0,3094	0,3223	0,3165	0,3259	0,3296	0,3053	0,2781
PSE	-2,3241	-2,2175	-2,1221	-2,2108	-2,171	-2,2353	-2,2611	-2,0944	-1,9075
Iteraciones	24	24	24	24	26	24	25	25	25

Tabla 5.7 Parámetros obtenidos para la RNA\_7.

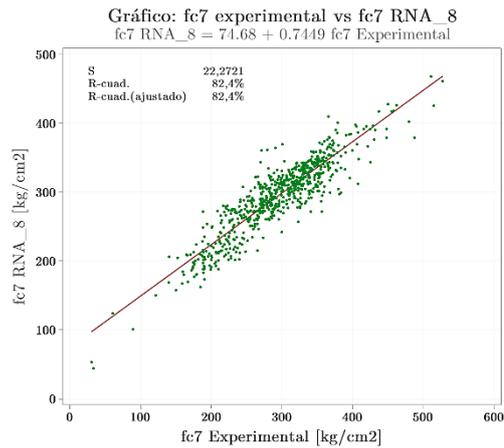


Figura 5.13 RNA\_8 resistencia a compresión a los 7 días con 17 variables.

N.º Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,85392	0,86513	0,85382	0,84786	0,85702	0,86206	0,87987	0,87255	0,87938
MSE	0,273	0,253	0,271	0,2808	0,2696	0,2574	0,2309	0,2481	0,2314
RMSE	0,273	0,253	0,271	0,2808	0,2696	0,2574	0,2309	0,2481	0,2314
PSE	-1,8637	-1,7272	-1,8499	-1,9168	-1,8403	-1,7575	-1,5764	-1,6937	-1,5799
Iteraciones	23	24	23	23	24	24	26	26	24

Tabla 5.8 Parámetros obtenidos para la RNA\_8.

Con el fin de determinar si la cantidad de áridos y la cantidad de fibras son influyentes o no en la determinación de la resistencia del hormigón, se ejecutaron las RNA\_9 y RNA\_10 que cuentan con 12 variables de entrada, se tomaron en cuenta las variables referentes al lugar de fabricación del hormigón, la cantidad y tipo del cemento, aditivos, agua, y el mes de hormigonado, se descartaron las variables que indican el peso en la mezcla tanto de los áridos (Ar1 a Ar4), como la cantidad de fibras (Fibra), las variables del descenso del cono y de la temperatura del hormigón y las que fueron tomadas en cuenta son las medidas en laboratorio, y lo que concierne al tiempo se tomó t2. Los resultados se observan en la figura 5.14 y 5.15.

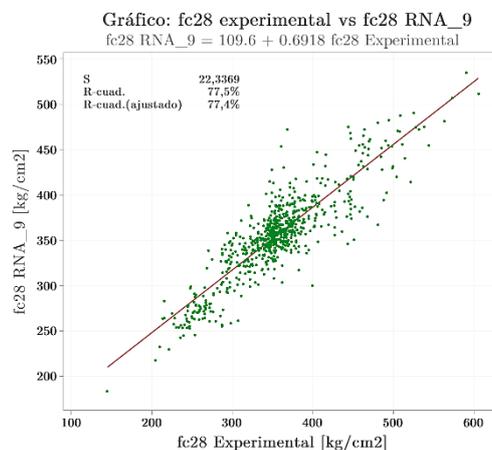


Figura 5.14 RNA\_9 resistencia a compresión a los 28 días con 12 variables.

N.º Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,85791	0,81014	0,81154	0,82701	0,81205	0,82123	0,80885	0,80095	0,81025
MSE	0,27	0,3448	0,3411	0,3169	0,342	0,3293	0,3466	0,3589	0,3432
RMSE	0,27	0,3448	0,3411	0,3169	0,342	0,3293	0,3466	0,3589	0,3432
PSE	47,5923	60,7722	60,1241	55,8607	60,2734	58,0349	61,0947	63,2604	60,4813
Iteraciones	36	27	25	27	25	26	25	24	25

Tabla 5.9 Parámetros obtenidos para la RNA\_9.

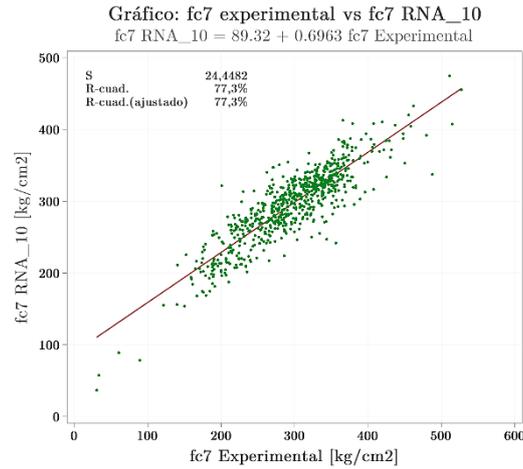


Figura 5.15 RNA\_10 resistencia a compresión a los 7 días con 12 variables.

N.º Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,8359	0,8272	0,83249	0,82041	0,83423	0,84236	0,83536	0,83919	0,84236
MSE	0,3016	0,3453	0,3081	0,3284	0,3055	0,293	0,3037	0,2956	0,2964
RMSE	0,3016	0,3153	0,3081	0,3284	0,3055	0,293	0,3037	0,2956	0,2964
PSE	60,7149	63,4724	62,0083	66,1014	61,4984	58,9802	61,1405	59,4958	59,6653
Iteraciones	24	24	24	24	24	25	24	25	30

Tabla 5.10 Parámetros obtenidos para la RNA\_10.

Para las RNA\_11 y RNA\_12 se tomaron en cuenta las siguientes 10 variables: cantidad y tipo del cemento, aditivos, agua, se descartaron las variables que indican el lugar en donde se fabricó el hormigón, el peso en la mezcla tanto de los áridos (Ar1 a Ar4) como la cantidad de fibras (Fibra) y el mes de hormigonado, en cuanto a las variables del descenso del cono y de la temperatura del hormigón se tomaron en cuenta las medidas en el laboratorio y en lo que concierne al tiempo se tomó t2. Los resultados se observan en la figura 5.16 y 5.17.

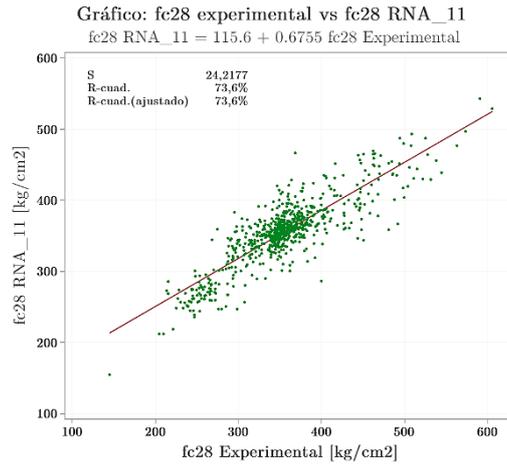


Figura 5.16 RNA\_11 resistencia a compresión a los 28 días con 10 variables.

Nº. Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,79673	0,7993	0,80303	0,80344	0,79734	0,82361	0,79636	0,80529	0,8261
MSE	0,365	0,3621	0,3549	0,3573	0,3649	0,3252	0,3746	0,3521	0,32
RMSE	0,365	0,3621	0,3549	0,3573	0,3649	0,3252	0,3746	0,3521	0,32
PSE	4,4272	4,3917	4,3049	4,3334	4,4256	3,944	4,5443	4,2705	3,882
Iteraciones	26	25	26	29	27	31	28	28	28

Tabla 5.11 Parámetros obtenidos para la RNA\_11.

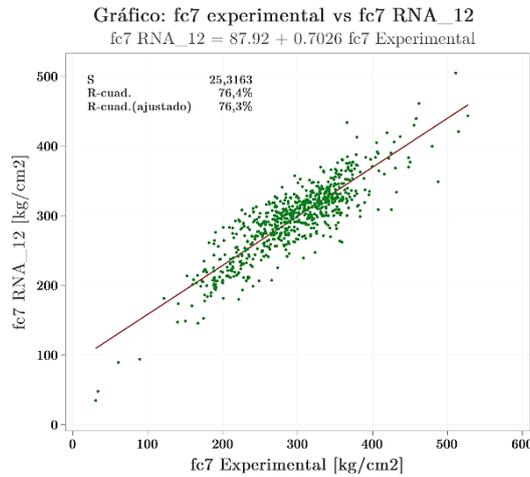


Figura 5.17 RNA\_12 resistencia a compresión a los 7 días con 10 variables.

N.º Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,82374	0,82323	0,83549	0,82328	0,82169	0,8368	0,83273	0,83267	0,8223
MSE	0,3238	0,3221	0,3018	0,3231	0,3245	0,2996	0,3065	0,3074	0,3279
RMSE	0,3238	0,3221	0,3018	0,3231	0,3245	0,2996	0,3065	0,3074	0,3279
PSE	3,9615	3,9402	3,6921	3,9522	3,9692	3,6655	3,75	3,7604	4,0115
Iteraciones	26	27	26	26	26	28	25	27	38

Tabla 5.12 Parámetros obtenidos para la RNA\_12.

Para la ejecución de la RNA\_13 se tomó en cuenta las 9 variables más influyentes en la ecuación de regresión lineal que se obtuvo con estadística clásica mediante el proceso de *stepwise* del apartado 4,3 resumidas en tabla 4.4 (Agua, Ar3, Cem, TipoCem, Ar4, Fibra, M6D, Mes y Ad4). Con el fin de observar y comparar con la red neuronal ejecutada en Matlab. Los resultados se observan en la figura 5.18.

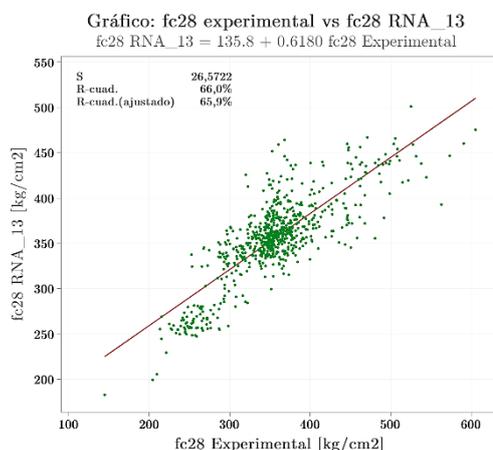


Figura 5.18 RNA\_13 resistencia a compresión a los 28 días con 9 variables tomadas del proceso de stepwise.

N,º Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,76951	0,77495	0,77253	0,77227	0,77783	0,77321	0,77161	0,79353	0,79856
MSE	0,4081	0,4012	0,4028	0,404	0,3959	0,4029	0,4061	0,375	0,365
RMSE	0,4081	0,4012	0,4028	0,404	0,3959	0,4029	0,4061	0,375	0,365
PSE	3,2546	3,1995	3,2123	3,2219	3,1572	3,2129	3,2383	2,9904	2,9111
Iteraciones	25	30	25	24	25	25	25	30	29

Tabla 5.13 Parámetros obtenidos para la RNA\_13.

Al igual que la red neuronal anterior la RNA\_14 tomó en cuenta las 7 variables más influyentes en la ecuación de regresión lineal que se obtuvo con estadística clásica mediante el proceso de *stepwise* en el apartado 4.3 y resumidas en tabla 4.6 (Agua, Cem, Ar3, TipoCem, t1, Fibra, Ad3). Con el fin de observar y comparar con la red neuronal ejecutada en Matlab y los resultados obtenidos en SPSS mediante el método de regresión aditiva. Los resultados se observan en la figura 5.19.

Para las dos últimas redes neuronales que se ejecutaron RNA\_15 y RNA\_16, se tomaron en cuenta 15 variables que normalmente se podrían disponer de la información en cualquier momento de un hormigonado en una obra convencional, estas variables son: Cem, Ad1, Ad2, Ad3, Ad4, Ar1, Ar2, Ar3, Ar4, Agua, Mes, Fibra, CA2, Temp2 y t2. Los resultados se observan en la figura 5.20 y 5.21.

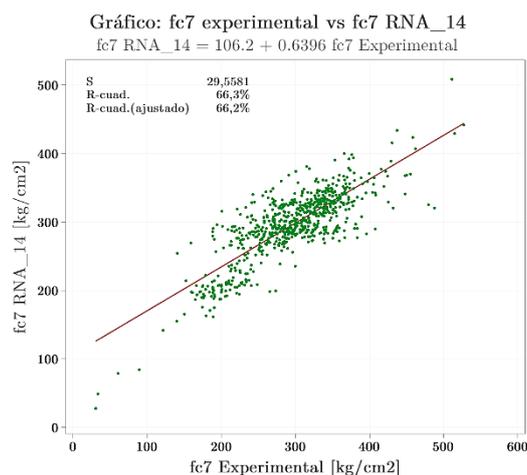


Figura 5.19 RNA\_14 resistencia a compresión a los 7 días con 7 variables tomadas del proceso de stepwise.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,85861	0,85215	0,86125	0,87224	0,85231	0,87289	0,86858	0,86055	0,89
MSE	0,2632	0,2778	0,2699	0,2402	0,2733	0,2405	0,2505	0,2606	0,2698
RMSE	0,2632	0,2778	0,2699	0,2402	0,2733	0,2405	0,2505	0,2606	0,2698
PSE	-2,869	-3,0291	-2,943	-2,6181	-2,9795	-2,6224	-2,7308	-2,8411	-2,9415
Iteraciones	26	23	27	26	23	26	27	25	23

Tabla 5.14 Parámetros obtenidos para la RNA\_14.

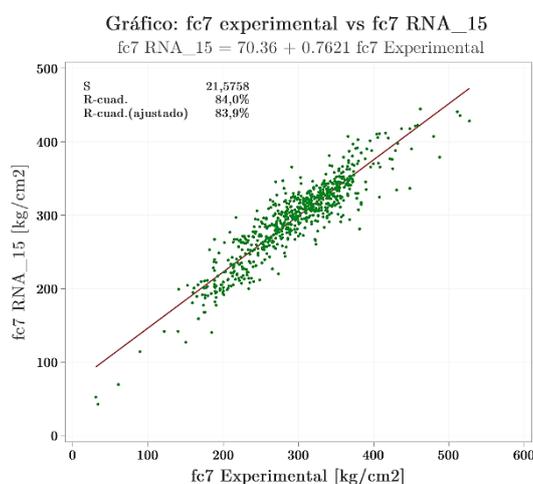


Figura 5.20 RNA\_15 resistencia a compresión a los 7 días con 15 variables.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,85861	0,85215	0,86125	0,87224	0,85231	0,87289	0,86858	0,86055	0,89
MSE	0,2632	0,2778	0,2699	0,2402	0,2733	0,2405	0,2505	0,2606	0,2698
RMSE	0,2632	0,2778	0,2699	0,2402	0,2733	0,2405	0,2505	0,2606	0,2698
PSE	-2,869	-3,0291	-2,943	-2,6181	-2,9795	-2,6224	-2,7308	-2,8411	-2,9415
Iteraciones	26	23	27	26	23	26	27	25	23

Tabla 5.15 Parámetros obtenidos para la RNA\_15.

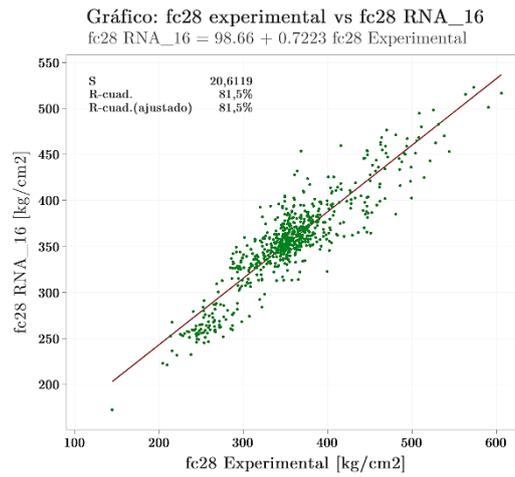


Figura 5.21 RNA\_16 resistencia a compresión a los 28 días con 15 variables.

Nº. Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,82537	0,83429	0,84594	0,8325	0,84209	0,86253	0,84066	0,83301	0,82785
MSE	0,3195	0,3048	0,2907	0,3067	0,292	0,257	0,2939	0,3058	0,3143
RMSE	0,3195	0,3048	0,2907	0,3067	0,292	0,257	0,2939	0,3058	0,3143
PSE	-3,5096	-3,3489	-3,1941	-3,3698	-3,2074	-2,8228	-3,229	-3,3596	-3,4534
Iteraciones	24	25	28	26	27	27	26	25	24

Tabla 5.16 Parámetros obtenidos para la RNA\_16.

En la tabla 5.17, se muestra un resumen con todas las RNA ejecutadas a la base de datos de estudio en donde se indican las variables, el software y los resultados obtenidos en cada una de ellas.

Resumen de las RNA

Variables de Entrada	RNA															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
M6D	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
TipoCem	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Ad1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Ad2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Ad3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Ad4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Ar1	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x
Ar2	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x
Ar3	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x
Ar4	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
Mes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		x	x
Fibra	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x
CA1	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x				
CA2	x	x	x	x			x	x							x	x
Temp1	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x				
Temp2	x	x	x	x			x	x							x	x
t1	x	x	x	x										x		
t2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x
Número Variables	20	20	20	20	17	17	17	17	12	12	10	10	9	7	15	15
Variable Predicción	fc28	fc7	fc7	fc28												
Software ejecutado	M	M	S	S	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
<b>R</b>	<b>0,90</b>	<b>0,94</b>	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	<b>0,89</b>	<b>0,91</b>	<b>0,88</b>	<b>0,88</b>	<b>0,86</b>	<b>0,93</b>	<b>0,81</b>	<b>0,81</b>	<b>0,92</b>	<b>0,90</b>
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,80</b>	<b>0,88</b>	<b>0,53</b>	<b>0,52</b>	<b>0,82</b>	<b>0,84</b>	<b>0,79</b>	<b>0,82</b>	<b>0,77</b>	<b>0,77</b>	<b>0,74</b>	<b>0,87</b>	<b>0,66</b>	<b>0,66</b>	<b>0,84</b>	<b>0,82</b>

M = Matlab

S = IBM SPSS Statics

Tabla 5.17 Resumen redes neuronales ejecutadas: variables y resultados.

### 5.3 Aplicación del modelo de optimización metaheurística basada en kriging.

Las heurísticas constituyen métodos sencillos que proporcionan soluciones satisfactorias a un problema dado mediante algoritmos específicos con procedimientos tales como los métodos constructivos, de mejora local o combinación de ambos. En cambio las metaheurísticas hacen referencia a métodos generales aplicables a amplios conjuntos de problemas, que emulan estrategias eficientes empleadas por la Naturaleza o conceptos basados en la inteligencia artificial y permiten guiar el funcionamiento de las heurísticas y otros procedimientos específicos (Víctor Yepes, 2002).

La optimización estructural se realiza normalmente mediante la optimización heurística convencional debido a la complejidad de los problemas estructurales. Sin embargo, la optimización heurística convencional todavía consume una gran cantidad de tiempo. La optimización heurística basada en *kriging* se presenta como una alternativa para llevar a cabo una optimización acelerada de problemas complejos. (Penadés-Plà Vicent y col. 2018).

*Kriging* es un metamodelo que tiene su origen en aplicaciones geoestáticas que involucran datos correlacionados espacial y temporalmente y fue desarrollado por el ingeniero de minas sudafricano Danie Gerhardus Kirge. Más tarde, muchas investigaciones contribuyeron al problema de la predicción espacial óptima, pero el enfoque fue formalizado por Matheron en 1963, quien utilizó el término *kriging* en honor a la contribución de Danie Gerhardus Kirge. (Cressie N, 1990).

*Kriging* está basado en la siguiente ecuación:

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (5.4)$$

Donde  $f(x)$  es una función de aproximación conocida y  $Z(x)$  es una realización de un proceso estocástico con media cero, varianza  $\sigma^2$  y covarianza distinta de cero. El primer término de la ecuación,  $f(x)$ , es similar a un modelo de regresión que proporciona una aproximación global del espacio de diseño. El segundo término,  $Z(x)$ , crea desviaciones locales de modo que el modelo de *kriging* interpola los puntos muestrales iniciales. En muchos casos,  $f(x)$  es simplemente un término constante y el método se denomina *kriging* ordinario. Si  $f(x)$  se establece en 0, lo que implica que la respuesta  $y(x)$  tiene una media de cero, el método se denomina *kriging simple*. (Simpson TW y col, 2001).

La base de datos fue ejecutada utilizando este modelo con el fin de ver el comportamiento y comparar los resultados obtenidos con los métodos anteriores, se han utilizado todas las variables, dejando las variables de salida a la resistencia a compresión del hormigón a los 7 y 28 días de

edad. El modelo metaheurístico se ejecutó en el software Matlab y las funciones que se explican en la ec. 5.4, se utilizó una función de correlación exponencial y una regresión polinomial de orden 0, estos criterios fueron propuestos por Vicent Penadés-Plà y col. (2018) en el estudio sobre optimización de puentes tipo cajón de tres vanos.

Con el uso del algoritmo metaheurístico *kriging* para 21 variables tenemos los resultados a la compresión que se indican en la figura 5.22 a la edad de 28 días y la figura 5.23 a los 7 días de edad. Los resultados obtenidos son de  $R^2 = 41,0\%$  y  $R^2=39,5\%$ , respectivamente.

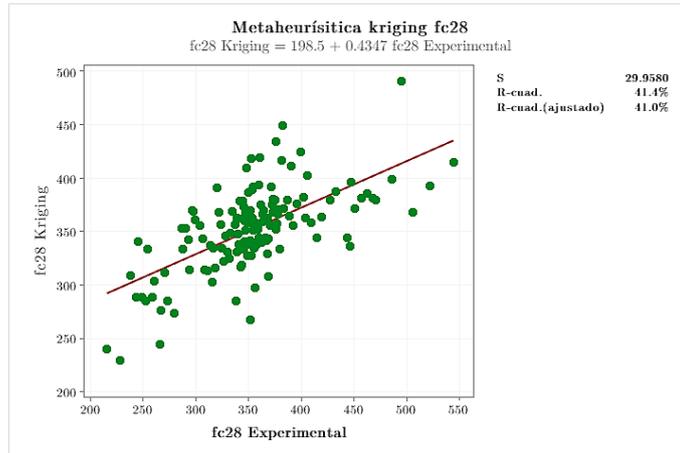


Figura 5.22 Predicción de fc28 mediante el uso de la metaheurística kriging.

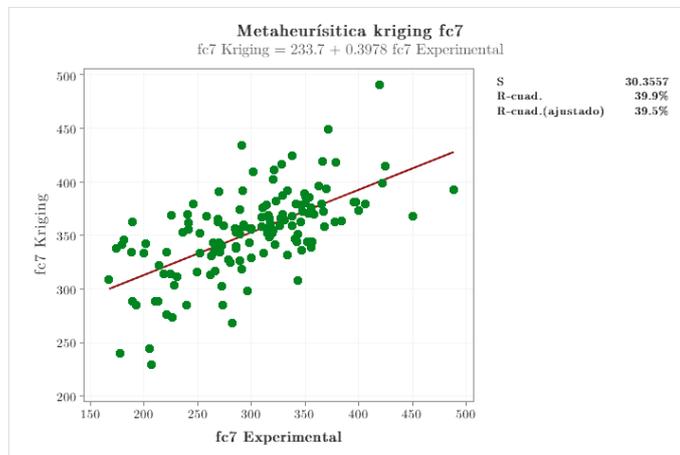


Figura 5.23 Predicción de fc7 mediante el uso de la metaheurística kriging.

## Capítulo 6

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Comparación estadística clásica y redes neuronales artificiales

En el capítulo 4 se abordó el estudio con estadística clásica y se obtuvo coeficientes de determinación que se encuentran resumidos en la tabla 4.2, los valores a los 7 de edad varían entre 0,0 a 0,35 mientras que los resultados para la edad de 28 días van desde 0,0 hasta 0,29; en los dos casos los valores inferiores tanto los superiores coinciden en la variable independiente, para el primer caso es la medida del descenso del cono de Abrams en el campo CA2 y para el segundo la relación  $a/c$ .

Si bien la relación  $a/c$  es considerada como una variable, en esta se encuentra de manera intrínseca la información de dos, la cantidad de agua y cemento que contiene la mezcla de hormigón. Como se detalló en el capítulo 2, este valor ha sido durante más de un siglo una de las características más importantes a la hora de diseñar una dosificación de una mezcla de hormigón, pero como se puede constatar el valor de esta relación aplicando el método de regresión lineal solo explica alrededor de un 30% la variabilidad de los resultados de la resistencia a compresión obtenidos durante la construcción del proyecto hidroeléctrico estudiado.

De la misma manera en el punto 4.3 en donde se explicó el proceso *stepwise*, a la edad de 28 días se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,39 en función de 9 variables. Mientras que para la edad de 7 días se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,41 en función de 7 variables. Estas mismas variables fueron ejecutadas en las RNA\_13 (9 variables) y RNA\_14 (7 variables) para observar la mejoría en cuanto a la predicción de resultados de la compresión del hormigón a los 28 y 7 días, es decir se ejecutaron las mismas variables independientes para calcular la misma dependiente objeto del estudio  $fc_{28}$  y  $fc_7$ .

<b>Resultados de predicción a los 28 días de compresión del hormigón</b>			
Métodos	R <sup>2</sup>	% mejoría respecto a Reg. Simple	% mejoría respecto a stepwise
Mejor resultado regresión lineal (a/c)	0,29	-	-25%
Stepwise	0,39	32,5%	-
RNA_13	0,66	126,0%	71%

**Tabla 6.1** Resultados de diferentes métodos para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días de edad.

En la tabla 6.1 se indica los resultados obtenidos utilizando el método de regresión lineal, regresión aditiva mediante el proceso de *stepwise* y redes neuronales artificiales. Al comparar el mejor resultado obtenido en la regresión lineal con el método *stepwise* y con las RNA, se observa una mejoría de 32,5% para el caso de regresión aditiva y 126% cuando se usó inteligencia artificial.

Al comparar específicamente los métodos *stepwise* con el uso de RNA, con el mismo número de variables, hay una mejoría del 71% en la predicción del valor de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días.

En la tabla 6.2 se realiza el mismo análisis que el anterior a la edad de 7 días, el proceso *stepwise* mejoró en un 18,1% al mejor resultado de regresión lineal y las RNA un 89,1% al valor de la resistencia a compresión del hormigón. Mientras que si comparamos el método *stepwise* y las RNA con el mismo número de variables, la inteligencia artificial mejora un 60% al resultado de la estadística clásica.

<b>Resultados de predicción a los 7 días de compresión del hormigón</b>			
Métodos	R <sup>2</sup> $fc_7$	% mejoría respecto a Reg. Simple	% mejoría respecto a stepwise
Mejor resultado regresión lineal (a/c)	0,35	-	-15%
Stepwise	0,41	18,1%	-
RNA_14	0,66	89,1%	60%

**Tabla 6.2** Resultados de diferentes métodos para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días de edad.

## 6.2 Comportamiento de las redes neuronales en SPSS, Matlab y optimización metaheurística

Las RNA ejecutadas en SPSS y Matlab, de configuración idéntica en cuanto al número de neuronas, capa de salida, validación, función de transferencia, el coeficiente de determinación  $R^2$  que se obtuvo en Matlab explica mejor el fenómeno de la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 días (RNA\_2) respecto con la edad de 28 días (RNA\_1), incrementando un 10% el valor del coeficiente.

RNA Matlab		
	$R^2$	V. Predicción
RNA_1	0,80	fc <sub>28</sub>
RNA_2	0,88	fc <sub>7</sub>

Tabla 6.3 RNA en Matlab con todas las variables a la edad de 7 y 28 días.

En el caso de las RNA ejecutadas en SPSS Statics, los resultados son de predicción son semejantes independientes de la edad de rotura de los cilindros.

RNA SPSS		
	$R^2$	V. Predicción
RNA_3	0,53	fc <sub>28</sub>
RNA_4	0,52	fc <sub>7</sub>

Tabla 6.4 RNA en SPSS con todas las variables a la edad de 7 y 28 días.

En cuanto a resultados de las RNA ejecutadas en diferentes softwares existe una diferencia marcada en la resistencia a compresión del hormigón tanto a los 7 como los 28 días de edad de rotura, el algoritmo utilizado en Matlab tiene una mejor predicción respecto al algoritmo de IBM, evidenciando una mejora del 66% a la edad de 28 días y 69% a los 7 días de edad.

Al ejecutar un algoritmo metaheurístico tipo *kriging* se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,41 a los 28 días y a los 7 días 0,40, los valores calculados indican un valor semejante a las dos edades como se indica en la tabla 6.5.

Metaheurística kriging		
	$R^2$	V. Predicción
1	0,41	fc <sub>28</sub>
2	0,40	fc <sub>7</sub>

Tabla 6.5 Metaheurística kriging con todas las variables a la edad de 7 y 28 días.

Los resultados del coeficiente de determinación a la misma base de datos, utilizando el mismo número de variables con diferentes métodos se encuentran resumidos en la tabla 6.6.

<b>R<sup>2</sup> resistencia a compresión del hormigón con todas las variables disponibles y diferentes metodologías</b>		
Metodología	7 días	28 días
RNA Matlab	0,88	0,80
RNA SPSS	0,52	0,53
Metaheurística kriging	0,40	0,41

**Tabla 6.6** Coeficientes de determinación obtenidos para la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 y 28 días, con diferentes metodologías a la misma base de datos.

El algoritmo que mejor predice el valor de la resistencia a compresión del hormigón a los 7 y 28 días es la RNA ejecutada en Matlab. Al analizar el valor de resistencia a los 7 días la RNA de Matlab respecto a la RNA de SPSS aumenta un 69,2% y respecto a la metaheurística aumenta un 122,8%. A los 28 días sucede algo parecido, comparando la RNA de Matlab aumenta el resultado de SPSS en un 50,9% y respecto a la optimización metaheurística krigin el valor crece un 95,1%.

En adelante todas las RNA han sido ejecutadas en Matlab.

La tabla 6.7 indica los resultados del valor del coeficiente de determinación de la predicción del valor de la resistencia a compresión de los cilindros que fueron ensayados a la edad de 28 días de la base de datos estudiada.

<b>Coefficiente de determinación de la resistencia a compresión a los 28 días del proyecto</b>		
Nomenclatura	R <sup>2</sup>	VARIABLES
RNA_1	0,80	20
RNA_5	0,82	17
RNA_7	0,79	17
RNA_9	0,77	12
RNA_11	0,74	10
RNA_13	0,66	9
RNA_16	0,82	15

**Tabla 6.7** Coeficiente de determinación de la resistencia a compresión a los 28 días de las probetas del proyecto, ejecutadas con RNA.

Las RNA\_5 y la RNA\_16 son las que mejor explican el fenómeno estudiado con un R<sup>2</sup> de 0,82, la primera de ellas con 17 variables y la segunda con 15 variables. En la RNA\_13 se utilizó la menor cantidad de variables (9) con un resultado de R<sup>2</sup> igual a 0,66, esta combinación de variables fue la que peor comportamiento tuvo al predecir la resistencia a compresión del hormigón a la

edad de 28 días ejecutadas en Matlab, no obstante el coeficiente de determinación incremento de un valor de 0,387 cuando se calculó con estadística clásica mediante el proceso de pasos sucesivos *stepwise* a 0,66 con el uso de redes neuronales, un incremento de 70,5%, validando así la potencia del algoritmo.

La tabla 6.8 indica los resultados del valor del coeficiente de determinación de la predicción del valor de la resistencia a compresión de los cilindros que fueron ensayados a la edad de 7 días de la base de datos estudiada.

**Coefficiente de determinación de la resistencia a compresión a los 7 días del proyecto**

Nomenclatura	R <sup>2</sup>	Variables
RNA_2	0,88	20
RNA_6	0,84	17
RNA_8	0,82	17
RNA_10	0,77	12
RNA_12	0,87	10
RNA_14	0,66	7
RNA_15	0,84	15

**Tabla 6.8** Coeficiente de determinación de la resistencia a compresión a los 7 días de las probetas del proyecto, ejecutadas con RNA.

En la RNA\_2 se utilizaron todas las variables disponibles, es la combinación que mejor se comportaron al momento de predecir la resistencia a compresión del hormigón con un R<sup>2</sup> igual a 0,88, sin embargo la RNA\_12 tiene un valor de R<sup>2</sup> igual a 0,87 utilizando la mitad de las variables, dentro de las 10 variables que se combinaron no incluye ninguna referente a información de los áridos, ni fibra metálica.

Los valores de R<sup>2</sup> de las RNA\_6 y RNA\_15 presentan un valor igual a 0,84 con el uso de 17 y variables.

En la RNA\_14 se utilizó la menor cantidad de variables con un resultado de R<sup>2</sup> igual a 0,66, esta combinación de variables fue la que peor comportamiento tuvo al predecir la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 días ejecutadas en Matlab, sin embargo e el coeficiente de determinación incremento de un valor de 0,412 cuando se calculó con estadística clásica mediante el proceso de pasos sucesivos *stepwise* a 0,66 con el uso de redes neuronales, un incremento de 60,1%, validando así la potencia del algoritmo.

## Capítulo 7

# CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

### 7.1 Conclusiones Generales

Para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón se tomaron en cuenta variables como la temperatura del hormigón en el momento de ser fabricado y al momento previo al hormigonado, el tiempo que demora el camión hormigonera desde la planta de fabricación hasta el lugar donde va a ser vertido y se ha evidenciado que al momento de realizar una predicción para el valor de la resistencia a compresión con estas variables que normalmente no se contemplan en los métodos de dosificaciones clásicos, estas variables influyen y pueden ser tomadas en cuenta para futuros diseños basados en inteligencia artificial, concretamente en el uso de redes neuronales artificiales dando resultados robustos cuando se disponga información de estos.

VARIABLES específicas como el asentamiento del descenso del cono de Abrams, el tipo y cantidad de aditivos estos junto con la cantidad de agua y cemento que tienen la mezcla fueron los más influyentes en a hora de predecir el valor de la resistencia tanto a los 7 como a los 28 días.

## 7.1 Conclusiones Específicas

Sobre la industria cementera en España y Ecuador:

- En España durante el primer semestre de 2020 el consumo de cemento ha caído un 16,5% respecto al mismo periodo del año 2019, lo que representa una disminución de 1'226.458t.
- En el mes de junio 2020 España consume un 5,2% más, en comparación a ese mes del año 2019.
- Con información registrada durante los años 2000-2016, España en el periodo 2000-2011 consumió en promedio de 3,47 veces más kg por persona que Ecuador, mientras que Ecuador durante el periodo 2012-2016 supero en promedio 1,54 veces más el consumo de cemento per cápita a España, periodo en el cual se construyó el proyecto hidroeléctrico estudiado.

Sobre la elaboración y estudio de la base de datos:

- Los componentes que tuvieron mayor presencia en las dosificaciones del hormigón fueron el cemento Holcim HE fue utilizado en el 89% de las mezclas y el aditivo Sika Viscocrete 1200 estuvo incluido en el 80% de los cilindros que fueron ensayados.
- En lo referente a los áridos, el 52% de las mezclas se utilizó 3 tipos de agregados diferentes, siendo la combinación Ar1 + Ar2 + Ar3 la combinación que estuvo presente en el 50% de todas las mezclas estudiadas, seguida con un 34% la combinación de todos los áridos (Ar1+Ar2+Ar3+Ar4).

Sobre el estudio con estadística clásica:

- En general el estudio con estadística clásica no otorga una confianza certera para la predicción de resultados de resistencia a compresión del hormigón evaluados en términos del coeficiente de determinación, en los modelos de regresión lineal tanto a los 7 como a los 28 días el valor más alto fue de 0,35, obtenido de la relación a/c y  $fc_7$ .
- En cuanto a la regresión múltiple el coeficiente de determinación mejoro en comparación a la simple, con un total de nueve variables explicativas para  $fc_{28}$  se obtuvo un  $R^2=0,39$  mientras que para  $fc_7$  con un total de siete variables explicativas el  $R^2=0,41$ .
- Los valores más bajos de la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 días se registraron en el mes de mayo y durante este mes también se registró mayor porcentaje de humedad en los áridos 2 y 4, pudiendo esta ser una de las razones de los resultados obtenidos.

- Los valores más altos de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días se registraron en el mes de diciembre que coincide con el mes de menor precipitación esperada en la provincia ecuatoriana.
- De todos los ensayos realizados en la ciudad ecuatoriana la relación  $f_{c7}/f_{c28}$  es 0,8320, difiere 1,8% con Cánoves y 0,6% con Navarro Ferrer que han sido ensayos realizados en la ciudad de Valencia, España.

Sobre el estudio con redes neuronales artificiales y optimización metaheurística:

- El algoritmo de aprendizaje elegido *Levenberg-Marquart* en Matlab es el que mejor respondió en cuanto a la predicción del valor de la resistencia a compresión del hormigón en comparación a la RNA tipo perceptrón del software IBM SPSS Statics y el modelo de optimización metaheurística basada en *kriging*. Los resultados indicaron un aumento de 69% respecto a SPSS y 122% a la metaheurística.
- Para la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días de edad, se necesitaron 15 variables para obtener el mejor coeficiente de determinación, estas variables fueron: Cem, Ad1, Ad2, Ad3, Ad4, Ar1, Ar2, Ar3, Ar4, Agua, Mes, Fibra, CA1, Temp2 y t2, no se tomaron en cuenta: MÓD, TipoCem, CA1, Temp1 y t1.
- Para la resistencia a compresión del hormigón a los 7 días de edad, el mejor resultado en la predicción fue la combinación de todas las variables disponibles es decir de 20 con un  $R^2=0,88$ , no obstante se observó que con la combinación de solo 10 variables se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,87, estas variables fueron: Cem, TipoCem, Ad1, Ad2, Ad3, Ad4, Agua, CA1, Temp1 y t2. Para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón para esta base de datos se podría o no utilizar la información de los áridos y obtener resultados muy similares, lo que se podría inferir que para resistencias tempranas la cantidad y tipo de áridos no tendría mayor influencia.
- Las combinaciones de variables que coeficientes de determinación más bajo registraron fueron con 9 para  $f_{c28}$  y 7 para  $f_{c7}$  en ambos casos  $R^2=0,66$ , sin embargo este resultado mejoro un 71% y 60% respectivamente a los obtenidos mediante el proceso *stepwise* realizado en SPSS utilizando la misma combinación de variables.

### 7.3 Futuras líneas de Investigación

- En la base de datos elaborada incluir temas de importancia como la sostenibilidad y obtener dosificaciones más amigables con el ambiente cumpliendo con los requisitos de diseño y durabilidad de las estructuras de hormigón.

- Analizar los datos de las variables en las combinaciones que no fueron tomadas en cuenta y en donde se obtuvieron resultados igual y a veces mejores en referencia a la predicción de la resistencia a compresión del hormigón.
- Comparar con otras bases de datos de diferente procedencia los algoritmos utilizados en este estudio y comparar los resultados y potencias para realizar predicción de resultados.
- Analizar los resultados de las redes neuronales en SPSS Statics con menos variables, observar y comparar con los realizados en este estudio.
- Establecer protocolos para toma de datos en un laboratorio, con el fin de obtener bases de datos robustas y confiables en donde sea posible continuar realizando aplicaciones vanguardistas como la inteligencia artificial en estructuras de hormigón.

# BIBLIOGRAFÍA

1. **A. Azadeh, J. Seif, M. Sheikhalishahi, M. Yazdani.** An integrated support vector regression–imperialist competitive algorithm for reliability estimation of a shearing machine. *Int. J. Comput. Integrated Manuf.*, 29 (1) (2016), pp. 16-24.
2. **A. Hammoudi, K. Moussaceb, C. Belebchouche, F. Dahmoune.** Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Construct. Build. Mater.*, 209 (2019), pp. 425-436.
3. **Abrams, D. A.**, Design of Concrete Mixtures, Lewis Institute, Structural Materials research Laboratory, Bulletin No.1, PCA Chicago (1918), pp 20.
4. **ACI 116** Cement and Concrete Terminology. 2015
5. **ACI 211.1** Standar Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete. 2002.
6. **ACI 318-19** Requisitos de reglamento para hormigón estructura. 2019.
7. **ASTM C 172** Practica estándar para el muestreo del hormigón recién mezclado). 2017.
8. **ASTM C 219** Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement. 2020
9. **ASTM C 31** Práctica estándar para la fabricación y curado en campo de especímenes de hormigón para su ensayo. 2020
10. **ASTM C1157/ C1157M** Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. 2020.
11. **ASTM C150/C150M** Standard Specification for Portland Cement. 2020.
12. **ASTM C1602** Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete. 2019.
13. **ASTM C294-19** Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates. 2019.
14. **ASTM C494.** Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. 2020.
15. **ASTM C595/C595M** Standard Specification for Blended Hydraulic Cements. 2019.
16. **Bolomey, J.** Determination of the compressive strength of mortar and concrete (in German). *Schweizerische Bauzeitung* 2-3, 41-44 and 55-59 (1926), pp. 183, 190.
17. **Bowles, O y Teaves, A.** Cement in Latin America. Información circular. United Status, department of the interior. Bureau of Mines, (1946).

18. **Brune, P., Perucchio, R., Ingraffea, A. R., & Jackson, M. D.** The toughness of imperial roman concrete. In Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Jeju Island, Korea, (2010), pp. 23-28.
19. **Cánoves, J. V.** Evolución de la resistencia del hormigón de obra. Método de predicción a partir de los ensayos de control de la conformidad del hormigón Tesis doct. (Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, 2012)
20. **Catlett, J.** Megainduction: Machine learning on very large databases. Ph.D. thesis. School of Computer Science, University of Technology, Sydney, Australia, (1991).
21. **Cladera, A., Marí, A. R., Martínez, F. y González, B.** Aplicación de Redes Neuronales a Problemas de Hormigón Estructural. II Congreso ACHE de Puentes y Estructuras de Hormigón (2002), pp 112.
22. **Cressie N.** The origins of kriging. *Mathematical Geology*, Volume 22. (1990), pp 239-252.
23. **Criado Sanz María** Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes. Caracterización de geles N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble. Efecto del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Tesis doctoral, Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid, 2007.
24. **D. Xuan, C.S. Poon, W. Zheng.** Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: a review. *Resour. Conserv. Recycl.*, 136 (2018), pp 238-247.
25. **Dias, W. P. S. y Pooliyadda, S. P.** Neural Networks for Predicting Properties of Concrete with Admixtures. *Construction and Building Materials* 15, (2001) pp. 371-379.
26. **Diego Peteiro-Barral, Bertha Guijarro-Berdiñas, Beatriz Pérez-Sánchez, Oscar Fontenla-Romero,** A comparative study of the scalability of a sensitivity-based learning algorithm for artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*. Volume 40, Issue 10. (2013), pp 3900-3905.
27. **Fernández Cánovas, M.** HORMIGÓN 10 Edición (ed. Garceta, G. E.) Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, (2013), pp. 24, 25.
28. **Figueres, M.** Introducción a las redes neuronales. *Sistemas Inteligentes en Ingeniería Civil*. (2010).
29. **Flood, I. y Kartman, N.** Neural Networks in Civil Engineering. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* 8(2) (1994), pp. 112.
30. **Flórez, R. y Fernández, J. M.** Las Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas. *NETBIBLO*, (2008), pp. 248-253.

31. **G. Bebis, M. Georgiopoulos.** Feed-forward neural networks. *IEEE Potentials*, 13 (4) (1994), pp. 27-31.
32. **G. Dorffner.** Neural networks for time series processing. *Neural network world* (1996).
33. **Gallant, S. I.** *Neural Network Learning and Expert Systems* (MIT Press, Cambridge, 1993) pp 248.
34. **García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J. y Pérez-López, E.** Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges. *Engineering Structures* 92, (2015), pp 112-122.
35. **Goyal, S. y Goyal, G. K.** Cascade and feedforward backpropagation artificial neural network models for prediction of sensory quality of instant coffee flavoured sterilized drink. *Canadian Journal on Artificial Intelligence, Machine Learning and Pattern Recognizing* 2(6), (2011) pp. 78-82.
36. **H. Naseri , H. Jahanbakhsh , F. Moghadas Nejad ,** Developing a novel machine learning method to predict the compressive strength of fly ash concrete in different ages. *AUT J. Civ. Eng.* (2019).
37. **H.-G. Ni, J.-Z. Wang.** Prediction of compressive strength of concrete by neural networks. *Cement Concr. Res.*, 30 (2000), pp. 1245-1250.
38. **Haykin, S.** *Neural Networks and Learning Machines* (PrentPrentice, 3 edition, 2008), pp. 252.
39. **Haykin, S.** *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* ISBN: 9780139083853. Prentice Hall, Upper Saddle River (USA), (1999), pp 244-245.
40. **Hecht-Nielsen, R.** Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. 1st International Conference on Neural Networks 3, (1987), pp. 11-14.
41. **Hewayde, E., Nehdi, M., Allouche, E. y Nakhla, G.** Neural Network prediction of concrete degradation by sulphuric acid attack. *Structure and Infrastructure Engineering* 3(1), (2007) pp. 17-27.
42. **J. Borger, R.L. Carrasquillo, D.W. Fowler.** Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete. *Adv. Cem. Based Mater.*, 1 (1994), pp 267-274.
43. **J. Park, I.W. Sandberg.** Approximation and radial-basis-function networks. *Neural Comput.*, 5 (2) (1993), pp. 305-316.
44. **J. Plank, E. Sakai, C.W. Miao, C. Yu, J.X. Hong.** Chemical admixtures — chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cem. Concr. Res.*, 78 (Part A) (2015), pp. 81-99.

45. **Jiménez Montoya, P., Meseguer, Á., Cabré, F. y Portero, J.** Hormigón armado, 15a Ed. ISBN: 9788425223075, Editorial Gustavo Gili, S.L., (2010).
46. **Kosmatka, Steven H. and Wilson, Michelle L.,** Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 16th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, (2016).
47. **Kurkova, V.** Kolmogorov theorem and multilayer neural networks. *Neural Networks* 5 (3 ed. Ltd., O. U. E. S.), (1992), pp 501-506.
48. **L. de B.P. Vieira, A.D. de Figueiredo.** Evaluation of concrete recycling system efficiency for ready-mix concrete plants. *Waste Manag.* 56 (2016), pp 337-351.
49. **Lai, S. y Serra, M.** Concrete Strength Prediction by Means of Neural Network. *Construction and Building Materials* 11(2), (1997), pp 93-98.
50. **Leshno, M., Lin, V. Y., Pinkus, A. y Schocken, S.** Multilayer feedforward networks with nonpolynomial activation function can approximate any function (New York University, Center for Research on Information Systems, 1992).
51. **López, J. A. y Caicedo, E.** Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales. Conferencias del Curso de Redes Neuronales Artificiales, Colombia: Universidad del Valle (2006).
52. **López, J. A. y Caicedo, E.** Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales. Conferencias del Curso de Redes Neuronales Artificiales, Colombia: Universidad del Valle (2006).
53. **Lu, C. y Liu, R.** Carbonation depth prediction of pre-stressed concrete based on artificial neural network. *Journal of Harbin Institute of Technology* (2008).
54. **M. Mirzahosseini, P. Jiao, K. Barri, K.A. Riding, A.H. Alavi.** New machine learning prediction models for compressive strength of concrete modified with glass cullet. *Eng. Comput.*, 36 (2019), pp. 876-898.
55. **M. Yazdani, M. Babagolzadeh, N. Kazemitash, M. Saberi.** Reliability estimation using an integrated support vector regression-variable neighborhood search model. *J. Ind. Inf. Integrat.*, 15 (2019), pp. 103-110.
56. **M.A. DeRousseau, J.R. Kasprzyk, W.V. Srubar.** Computational design optimization of concrete mixtures: A review. *Cement and Concrete Research*. Volume 109. 2018. pp 42-53.
57. **Martín del Brío, B. y Sanz, A.** Redes neuronales y sistemas borrosos, Madrid: Ra-Ma, (1997).
58. **Milly, P. C., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V.** Global pattern on trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* (438), (2005), pp 347-350.

59. **Morcous, G. y Lounis, Z.** Prediction of Onset of Corrosion in Concrete Bridge Decks Using Neural Networks and Case-Based Reasoning. *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (2005).
60. **Mosbeh R. Kaloop, Deepak Kumar, Pijush Samui, Jong Wan Hu, Dongwook Kim.** Compressive strength prediction of high-performance concrete using gradient tree boosting machine. *Construction and Building Materials*. Volume 264. ISSN 0950-0618. (2020), pp 120198.
61. **N. Morgan , H. Bourlard.** Generalization and parameter estimation in feedforward nets: Some experiments. D. Touretzky (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, Morgan Kaufmann (1990).
62. **Nagendra, S.** Practical Aspects of Using Neural Networks: Necessary Preliminary Specifications, GE Research y Development Center, (1998).
63. **Navarro Ferrer Ferran** Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales.- Tesis doctoral, Valencia, España :0Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
64. **Nehdi, M., El Chabil, H. y El Naggar, M. H.** Predicting Performance of Self-Compacting Concrete Mixtures Using Artificial Neural Networks. *Materials Journal* 98(5), (2001), pp 394-401.
65. **Oficemen.** Agrupación de fabricantes de cementos en España. (2020).
66. **Özturan, M., Kutlu, B. y Özturan, T.** Comparison of concrete strength prediction techniques with artificial neural network approach. *Building Research Journal* 56(1), (2008), pp. 23-36.
67. **P. Goltermann, V. Johansen, L. Palbful.** Packing of aggregates: An alternative tool to determine the optimal aggregate mix, *ACI Mater. J.*, 94 (1997), pp. 435-443.
68. **Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F. y Hospitaler, A.** On the Weibull cost estimation of building frames design by simulated annealing. *Meccanica* 45, (2010), pp 693-704.
69. **Peng, J., Li, Z. y Ma, B.** Neural Network Analysis of Chloride Diffusion in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14(4), (2002), pp 327-333.
70. **Popovics, S.** Analysis of Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship. *ACI Materials Journal* 87(5), (1990), pp 517-529.
71. **Qing Xie, Yajie Zhu, Feng Xiong, Lin Li, Zhifeng Bao, Yongjian Liu.** Interactive resource recommendation with optimization by tag association and significance analysis, *Neurocomputing*. Volume 391, (2020), pp. 210-219.

72. **Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. y Williams, R. J.** Learning internal representations by error propagation (Cambridge (USA): MIT Press, 1986).
73. **Rzempoluck, E. J.** Neural network data analysis using Simulnet, Springer-Verlag: New York, (1998).
74. **S. Ghosh-Dastidar, H. Adeli.** Spiking neural networks Int. J. Neural Syst., 19 (2009), pp. 295-308.
75. **S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Lewis.** Let a biogeography-based optimizer train your Multi-Layer Perceptron. Inf. Sci., 269 (2014), pp. 188-209.
76. **Sarria Castro M, Silva Ayçaguer LC.** Las pruebas de significación estadística en tres revistas biomédicas: una revisión crítica. Rev Panam Salud Publica, Ed 15. (2004).
77. **Shibata, K. e Ikeda, Y.** Effect of number of hidden neurons on learning in large-scale layered neural networks. ICROS-SICE International Joint Conference, (2009), pp. 5008-5013.
78. **Shilstone, James M.,** Concrete Mixture Optimization, Concrete International, American Concrete Institute (ACI), Michigan (1990), pp 33 a 39.
79. **Simpson TW, Mauery TM, Korte J, Mistree F.** Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization. AIAA J Ed 39, (2001), pp 2233–2241.
80. **T. Kohonen.** The self-organizing map. Proc. IEEE, 78 (9) (1990), pp. 1464-1480.
81. **Tabares, H., Branch, J. y Valencia, J.** Generación dinámica de la topología de una red neuronal artificial del tipo Perceptrón multicapa. Revista Facultad de Ingeniería 38, (2006), pp 146-162.
82. **Taylor , H. F. W.** La química de los cementos (ed. Urmo, E. Bilbao) (1978).
83. **Ukrainczyk, N, Banjad, P. I. y Bolf, N.** Evaluating rebar corrosion damage in structures exposed to marine environment using Neural Networks. Civil Engineering and Environment Systems 24(1), (2007), pp 15-32.
84. **UNE -EN-197-1\_2011** (Cemento, Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes). 2011.
85. **UNE-EN934-2:2010+A1:** Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. 01/01/2014. 28pag, AENOR, (2012).
86. **van Gerven M and Bohte S** Editorial: Artificial Neural Networks as Models of Neural Information Processing. Front. Comput. Neurosci. Vol 11 (2017), pp 114.

87. **Vicent Penadés-Plà, Tatiana García-Segura, Víctor Yepes.** Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete boxgirder bridge design. *Engineering Structures* 179 (2019), pp. 556-565.
88. **Víctor Yepes Piqueras.** Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW. Tesis doctoral, Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia, (2002).
89. **Vinay Chandwani, Vinay Agrawal, Ravindra Nagar.** Modeling slump of ready mix concrete using genetic algorithms assisted training of Artificial Neural Networks. *Expert Systems with Applications*. Volume 42, Issue 2. 2015.
90. **Y.L. Mack-vergara, V.M. John.** Life cycle water inventory in concrete production—a review. *Resour. Conserv. Recycl.*, (2017), pp. 15-32.
91. **Yasarer, H. I.** Characterizing the permeability of concrete mixes used in transportation application: a neuronet approach Tesis doct. (Kansa State University, Manhattan, KA, USA, 2010).

## ANEJO A

### ASTM C150/C150M-20 Especificación estándar para el cemento Portland

#### *Información de Pedidos:*

Los pedidos del cemento Portland deberá incluir la información lo siguiente:

1. Número y fecha de esta especificación,
2. Tipo o tipos admisibles. Si no se especifica ningún tipo, se deberá suministrar el Tipo I,
3. Cualquier requisito químico opcional de la Tabla 2.2, si se desea, y
4. Cualquier requisito físico opcional de la Tabla 2.4, si se desea.

#### *Ingredientes:*

El cemento a que se refiere esta especificación no deberá contener otros ingredientes además de los que se indican a continuación:

1. Clinker de cemento Portland
2. Agua o sulfato de calcio, o ambos. Las cantidades deberán ser tales que no se excedan los límites que se muestran en la Tabla 2.1 para el trióxido de azufre y la pérdida en ignición.
3. Caliza. La cantidad no deberá ser mayor al 5,0 % en masa, de modo tal que se cumpla con los requisitos químicos y físicos de este estándar (consulte la Nota 3). La caliza, se define en la norma ASTM C51, deberá ser natural y deberá consistir en al menos un 70% en masa de una o más de las formas minerales del carbonato de calcio.

NOTA 3: Este estándar permite que el cemento Portland contenga caliza, pero no exige que la caliza sea un ingrediente del cemento. En el contrato o pedido se puede especificar el cemento sin caliza molida.

4. Aditivos inorgánicos de procesamiento. La cantidad no deberá exceder el 5,0 % en masa del cemento. No se deberá utilizar más de un aditivo inorgánico de procesamiento por vez. Se deberá haber demostrado que las cantidades mayores al 1,0 % cumplen con los requisitos de la Especificación C465 para el aditivo inorgánico de procesamiento en la cantidad utilizada o en una cantidad mayor. Si se utiliza un aditivo inorgánico de procesamiento, el fabricante deberá informar la cantidad utilizada, expresada como porcentaje en masa del cemento, junto con la composición del aditivo de procesamiento.

Consulte la Nota 4.

NOTA 4: Estos requisitos se basan en los datos y las recomendaciones de Taylor.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Taylor, P., "Specifications and Protocols for Acceptance Tests on Processing Additions in Cement Manufacturing," NCHRP Report 607, Transportation Research 3 Board, Washington, DC 20008, pp. 96. Available at [www.trb.org](http://www.trb.org).

5. Aditivos orgánicos de procesamiento. Se deberá haber demostrado que cumplen con los requisitos de la Especificación C465 en las cantidades utilizadas o cantidades mayores, y la cantidad total de aditivos orgánicos de procesamiento utilizados no deberá exceder el 1,0 % en masa del cemento.
6. Aditivo incorporador de aire (solo para cemento Portland con incorporación de aire). El aditivo de molienda deberá cumplir con los requisitos de la Especificación C226.

*Composición química:*

El cemento Portland de cada uno de los diez tipos que se muestran en el punto 2.1.2 deberá cumplir con los requisitos químicos estándar respectivos indicados en la Tabla 1.1 Además, los requisitos químicos opcionales se muestran en la Tabla 2.2.

NOTA 5: El límite de la suma,  $C_3S + 4,75C_3A$ , de la Tabla 2.1 proporciona un control sobre el calor de hidratación del cemento, y es consistente con el límite de calor de hidratación de 315 kJ/kg [75 cal/g] a tres días del Método de prueba C1702.

NOTA 6: Existen casos en los que el desempeño de un cemento es mejorado con más  $SO_3$  que el indicado en los límites para esta especificación en la Tabla 2.1 La Guía C563 es uno de los diversos métodos que un fabricante puede utilizar para evaluar el efecto del contenido de sulfatos en las características del cemento. Cuando el contenido de  $SO_3$  de un cemento sea mayor al indicado en los límites de la Tabla 2.1, los resultados del Método de prueba C1038 proporcionan evidencia de que no se produce una expansión excesiva con ese contenido de sulfato mayor.

*Propiedades físicas:*

El cemento Portland de cada uno de los diez tipos que se muestran en la Sección 1 deberá cumplir con los requisitos físicos estándar respectivos indicados en la Tabla 2.3. Además, los requisitos físicos opcionales se muestran en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.1 Requisitos de composición estándar**

Tipo de cemento <sup>A</sup>	Método de prueba aplicable	I y IA	II y IIA	II (MH) y II (MH)A	III y IIIA	IV	V
Óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), máx., %	C114	...	6,0	6,0	...	...	...
Óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ), máx., %	C114	...	6,0 <sup>B</sup>	6,0 <sup>B,C</sup>	...	6,5	...
Óxido de magnesio ( $MgO$ ), máx., %	C114	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Trióxido de azufre ( $SO_3$ ) <sup>D</sup> máx. %	C114						
Cuando ( $C_3A$ ) <sup>E</sup> sea 8% o menos		3,0	3,0	3,0	3,5	2,3	2,3
Cuando ( $C_3A$ ) <sup>E</sup> sea más de 8%		3,5	F	F	F	F	F
Pérdida en ignición, máx., %	C114						
Cuando la caliza no sea un ingrediente		3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	3,0
Cuando la caliza no sea un ingrediente		3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Residuo insoluble, máx., %	C114	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Álcalis equivalentes ( $Na_2O + 0,658 K_2O$ ), %	C114	G	G	G	G	G	G
Silicato tricálcico ( $C_3S$ ) <sup>E</sup> , máx. %.	Ver Anexo A1	...	...	...	...	35 <sup>C</sup>	...
Silicato dicálcico ( $C_2S$ ) <sup>E</sup> , mín. %.	Ver Anexo A1	...	...	...	...	40 <sup>C</sup>	...
Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) <sup>E</sup> , máx. %.	Ver Anexo A1	...	8,0	8,0	15,0	7 <sup>C</sup>	5 <sup>B</sup>
Suma de $C_3S + 4,75 C_3A$ , <sup>H</sup> máx. %.	Ver Anexo A1	...	...	100 <sup>CI</sup>	...	...	...
Ferritoaluminato tetracálcico más dos veces el aluminato tricálcico ( $C_4AF + 2(C_3A)$ ), o solución sólida ( $C_4AF + C_2F$ )	Ver Anexo A1	...	...	...	...	...	25 <sup>B</sup>

según corresponda, máx. %.

<sup>A</sup> Consulte la nota 2

<sup>B</sup> No aplica cuando se especifica el límite de resistencia a sulfatos de la Tabla 2.4.

<sup>C</sup> No aplica cuando el cemento cumple con el límite de calor de hidratación de la Tabla 2.4

<sup>D</sup> Es admisible exceder los valores de contenido de SO<sub>3</sub> de la tabla, siempre y cuando se haya demostrado mediante el Método de prueba C1038 que el cemento con mayor cantidad de SO<sub>3</sub> no desarrollará una expansión mayor al 0,020 % a los 14 días. Cuando el fabricante suministre el cemento en virtud de esta disposición, se deberán proporcionar datos de respaldo al comprador. Consulte la Nota 7.

<sup>E</sup> Consulte el anexo A1 para el cálculo

<sup>F</sup> No aplicable

<sup>G</sup> Informe los álcalis equivalentes como parte de la certificación del fabricante (consulte la Nota 5).

<sup>H</sup> Consulte la nota 6.

<sup>I</sup> Además, al menos una vez cada seis meses se deberán realizar análisis del calor de hidratación durante tres días utilizando el Método de prueba C1702. Dichas pruebas no se deberán utilizar para la aprobación o el rechazo del cemento, sino que los resultados se deberán suministrar solo

**Tabla A1.** Tabla 1. Requisitos de composición estándar de la norma ASTM C 150 – 20. 2020.

**Tabla 2.2** Requisitos de composición opcionales

Tipo de cemento	Método de prueba aplicable	I y IA	II y IIA	II (MH) y II (MH)A	III y IIIA	IV	V	Comentarios
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A) <sup>B</sup> , máx. %.	Ver Anexo A1	...	...	...	8	...	...	Para resistencia moderada a sulfatos
Aluminato tricálcico (C <sub>3</sub> A) <sup>B</sup> , máx. %.	Ver Anexo A1	...	...	...	5	...	...	Para resistencia alta a sulfatos

<sup>A</sup> Estos requisitos opcionales solo aplican cuando se solicitan específicamente. Verifique la disponibilidad antes de hacer su pedido (consulte la Nota 2)

<sup>B</sup> Consulte el Anexo A1 para hacer los cálculos.

**Tabla A2** Tabla 2. Requisitos de composición opcionales de la norma ASTM C 150 – 20. 2020.

**Tabla 2.3** Requisitos físicos estándar

Tipo de cemento <sup>A</sup>	Método de prueba aplicable	I	IA	II	IIA	II(MH)	II(MH)A	III	IIIA	IV	V
Contenido de aire del mortero <sup>B</sup> , % en volumen:	C 185										
máx		12	22	12	22	12	22	12	22	12	12
mín		...	16	...	16	...	16	...	16	...	...
Finura, superficie específica, m <sup>2</sup> /kg											
Prueba de permeabilidad al aire	C 204										
mín		260	260	260	260	260	260	...	...	260	260
máx		...	...	...	...	430 <sup>C</sup>	430 <sup>C</sup>	...	...	430	...
Expansión en autoclave, máx. %	C151/C151M	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Resistencia, no menor a los valores que se muestran para las edades indicadas, a saber: <sup>D</sup>											
Resistencia a compresión, MPa	C109/C109M										
1 día		...	...	...	...	...	...	12,0	10,0	...	...
3 días		12,0	10,0	10,0	8,0	10,0	8,0	24,0	19,0	...	8,0
7 días		19,0	16,0	17,0	14,0	17,0	14,0	...	...	7,0	15,0
28 días		...	...	...	...	...	...	...	...	17,0	21,0
Tiempo de fraguado, prueba de Vicat: <sup>E</sup>	C191										
Tiempo de fraguado, minutos, no menos de		45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
Tiempo de fraguado, minutos, no más de		375	375	375	375	375	375	375	375	375	375

<sup>A</sup> Consulte la nota 2.

<sup>B</sup> Cumplir con los requisitos de esta especificación no garantiza, necesariamente, que se obtendrá el contenido de aire deseado en el hormigón.

<sup>C</sup> Los límites máximos de finura no aplican si la suma de C<sub>3</sub>S + 4,75C<sub>3</sub>A es menor o igual que 90, o el cemento cumple con el límite de calor de hidratación en la Tabla 2.4.

<sup>D</sup> La resistencia a cualquier edad especificada de la prueba no deberá ser menor a la obtenida a cualquier edad especificada previa de la prueba.

<sup>E</sup> El tiempo de fraguado es el descrito como tiempo de fraguado inicial en el Método de prueba C191.

**Tabla A3** Tabla 3. Requisitos físicos estándar de la norma ASTM C 150 – 20. 2020.

<b>Requisitos físicos opcionales<sup>A</sup></b>									
Tipo de Cemento	Método de prueba aplicable	I y II	IA y IIA	II (MH)	II (MH) A	III	III A	IV	V
Endurecimiento temprano, penetración final, min,%	C451	50	50	50	50	50	50	50	50
Calor de hidratación:									
Calorimetría de conducción isotérmica									
3 días, máx, kJ/kg	C1702	...	...	335 <sup>B</sup>	335 <sup>B</sup>	...	...	200 <sup>C</sup>	...
7 días, máx, kJ/kg		...	...	...	...	...	...	225 <sup>C</sup>	...
Resistencia, no menor a los valores que se muestran									
C10									
Resistencia a la compresión MPa	9/C109M								
28 días		28	22	28	22	...	...	...	...
Resistencia a sulfatos <sup>D</sup> , 14 días, máx, % de expansión	C452	... <sup>E</sup>	... <sup>E</sup>	... <sup>E</sup>	... <sup>E</sup>	...	...	...	0,040
Prueba de Gillmore:									
C266									
Fraguado inicial, min, no menos de		60	60	60	60	60	60	60	60
Fraguado final, no más de		600	600	600	600	600	600	600	600

<sup>A</sup> Estos requisitos opcionales solo aplican cuando se solicitan específicamente. Verifique la disponibilidad antes de hacer su pedido. Consulte la Nota 2.

<sup>B</sup> El límite para la suma de C<sub>3</sub>S + 4,75C<sub>3</sub>A en la Tabla 1 no se aplicará cuando el cemento cumpla con este límite.

<sup>C</sup> Los límites de C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la Tabla 1 no se aplicará cuando el cemento cumpla con este límite.

<sup>D</sup> Cuando se especifique la resistencia a sulfatos, deberá ser en vez de los límites de C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF + 2 C<sub>3</sub>A y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> indicados en la Tabla 2.1.

<sup>E</sup> Se considera que el cemento que cumple con el límite de alta resistencia a sulfatos para el Tipo V cumple con el requisito de moderada resistencia a sulfatos de los Tipos II y II(MH).

**Tabla A4** Tabla 4. Requisitos físicos opcionales de la norma ASTM C 150 – 20. 2020.

Además esta norma indica que si a petición del comprador al fabricante, este deberá proporcionar un informe al momento del envío, indicando los resultados de las pruebas realizadas, certificando que cumple con todos los requisitos aplicables de esta especificación.

Ejemplo de informe de prueba de planta:

La norma ASTM C-150-20 detalla una guía del contenido que deberá suministrar una plana de fabricación de cemento Portland.

ABC Portland Cement Company

Qualitytown, N.J.

Tipo Cemento: II (MH)

REQUISITOS ESTÁNDAR

ASTM C 150 /150 M

PRUEBAS QUÍMICAS			PRUEBAS FÍSICAS		
Elemento	Limite Especificado	Resultado de la prueba	Elemento	Limite Especificado	Resultado de la prueba
SiO <sub>2</sub> (%)	A	20,6	Contenido del aire del mortero (% en volumen)	12 máx	8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,0 máx	4,4	Finura mediante el método de Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	260 máx	377
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	6,0 máx	3,3		430 máx	
CaO (%)	A	62,9	Expansión de autoclave (%)	0,80 máx	0,04
MgO (%)	6,0 máx	2,2	Resistencia a la compresión (MPa)	min.:	
SO <sub>3</sub> (%)	3,0 máx	3,2	A 1 día	A	
Pérdida en Ignición (%)	3,5 máx	2,7	A 3 días	7,0	23,4
Na <sub>2</sub> O (%)	A	0,19	A 7 días	12,0	29,8
K <sub>2</sub> O (%)	A	0,50	A 28 días	A	
Álcalis equivalentes (%)	A	0,52	Tiempo de fraguado (minutos) (Vicat)		
Residuo Insoluble (%)	1,5 máx	0,27	Inicial no menor a	45	124
CO <sub>2</sub> (%)	A	1,2	No más de	375	
Caliza (%)	5,0 máx	3,5	Calor de hidratación (kJ/kg) ASTM 1702		
CaCO <sub>3</sub> en caliza (%)	70 min	79	A 3 días	B	245
Aditivo inorgánico de procesamiento (escoria molida granulada de horno alto)	5,0 máx	3,0	Método de prueba C1038 Expansión en barras de mortero (%)	D	0,010 E
Composición potencial de fases (%) <sup>C</sup>					
C <sub>3</sub> S	A	59			
C <sub>2</sub> S	A	10			
C <sub>3</sub> A	8 máx	5			
C <sub>4</sub> AF	A	10			
C <sub>4</sub> AF+2(C <sub>3</sub> A)	A	20			
C <sub>3</sub> S+4,75 C <sub>3</sub> A	100 máx	83			

<sup>A</sup> No aplicable

<sup>B</sup> El resultado de la prueba representa el valor más reciente y se proporciona únicamente con fines informativos

<sup>C</sup> Ajustado de acuerdo con A1.6. (ASTMC150)

<sup>D</sup> Solo se requiere si el porcentaje de SO<sub>3</sub> excede el límite indicado en la Tabla 1, en cuyo caso la expansión del Método de prueba C1038 no deberá exceder 0,020 % a los 14 días.

<sup>D</sup> El resultado de la prueba para este período de producción no está disponible. Se proporciona el resultado de la prueba más reciente.

**REQUISITOS OPCIONALES  
ASTM C150/150M**

PRUEBAS QUÍMICAS			PRUEBAS FÍSICAS		
Elemento	Limite Especifica do	Resultado de la prueba	Elemento	Limite Especifica do	Resultado de la prueba
Cloruro (%)	F	0,020	Endurecimiento temprano	50 min	82
			Resistencia a compresión (MPa)		
			A 28 días	28 min	G

<sup>F</sup> Limite no especificado por el comprador. El resultado de la prueba se proporciona únicamente con fines informativos

<sup>G</sup> El resultado de la prueba para este período de producción no está disponible aún.

Certificamos que el cemento anteriormente descrito cumple, en el momento del envío, con los requisitos químicos y físicos de ASTM C150 – XX o de la especificación \_\_\_\_\_ (otra).

Firma:

Título:

**Tabla A5** Figura X1.1. Ejemplo de informe de prueba de la planta, ASTM C 150 – 20. 2020.

Cuando se utilizan caliza o aditivos inorgánicos de procesamiento, o ambos, en el cemento, el fabricante informa datos adicionales. En la Fig. X1.2 se proporciona un ejemplo de informe de datos adicionales.

**REQUISITOS OPCIONALES  
ASTM C150/150M**

PRUEBAS QUÍMICAS			PRUEBAS FÍSICAS		
Elemento	Limite Especificado	Resultado de la prueba	Elemento	Limite Especifica do	Resultad o de la prueba
Cloruro (%)	F	0,020	Endurecimiento temprano	50 min	82
			Resistencia a compresión (MPa)		
			A 28 días	28 min	G

<sup>F</sup> Limite no especificado por el comprador. El resultado de la prueba se proporciona únicamente con fines informativos

<sup>G</sup> El resultado de la prueba para este período de producción no está disponible aún.

Certificamos que el cemento anteriormente descrito cumple, en el momento del envío, con los requisitos químicos y físicos de ASTM C150 – XX o de la especificación \_\_\_\_\_ (otra).

Firma:

Título:

**Tabla A6** Figura X1.2. Ejemplo de informe de datos adicionales, ASTM C 150 – 20. 2020.

## ANEJO B

### ASTM C1157/C1157M-20: Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento

#### Hidráulico.

Tabla 1 Requisitos Físicos estándar

Tipo de Cemento	Método de Ensayo Aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Fineza	C 204, C430	A	A	A	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave, máx, %	C151/C151M	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tiempo de fraguado, ensayo de Vicat. B	C191						
Inicial, no menos de, min		45	45	45	45	45	45
Inicial, no más de, min		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire en el volumen de mortero, máx., % C	C185	12	12	12	12	12	12
Resistencia mínima a la compresión, MPa. D	C109/C109M						
1 día		...	12,0	...	...	...	...
3 días		13,0	24,0	11,0	11,0	5,0	...
7 días		20,0	...	18,0	18,0	11,0	11,0
28 días		28,0	...	...	25,0	...	21,0
Calor de Hidratación, máx, kJ/kg	C1702						
3 días		...	...	...	...	335	200
7 días		...	...	...	...	...	225
Expansión de barra de mortero	C1038/C1038M						
14 días, % máx		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos). E	C1012/C1012M						
6 meses, máx, %		...	...	0,10	0,05	...	...
1 año, máx, %		...	...	...	0,10	...	...
<b>Requisitos Físicos Opcionales</b>							
Opción A, Incorporadores de Aire. C, F	C 185						
Contenido de aire en el mortero, vol., %							
máx		22	22	22	22	22	22
mín		16	16	16	16	16	16
Opción R, baja reactividad con reactivo alcali-silice. G	C 227						
Expansión a:							
14 días, máx, %		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
56 días, máx, %		0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
Endurecimiento temprano, final penetración, min, %	C451	50	50	50	50	50	50
Resistencia a la compresión, D, 28 días, min, MPa	C109/C109M	...	...	28,0	...	22,0	...

<sup>A</sup> Ambas cantidades retenidas en tamizado por vía húmeda en el tamiz 45  $\mu\text{m}$  (Nº 325) y área de superficie específica por aparato de permeabilidad al aire en  $\text{m}^2/\text{kg}$  deben ser informadas en todos los certificados de resultados de ensayos requeridas al fabricante.

<sup>B</sup> El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en el método de ensayo C 191.

<sup>C</sup> Un valor dado de contenido de aire en el mortero no asegura necesariamente que el contenido de aire deseado será obtenido en el hormigón.

<sup>D</sup> Los cementos pueden ser despachados antes de que sea realizable el ensayo a la mayor edad. En tales casos, el valor en del ensayo debe dejarse en blanco. Alternativamente, el fabricante puede, en general, proveer estimaciones basadas en los datos históricos de su producción. El informe debe indicar si se proporcionan estas estimaciones.

<sup>E</sup> En los ensayos de cemento HS, los ensayos a un año no deben ser requeridos cuando el cemento cumpla con el límite a 6 meses. Un cemento HS que no cumple con el límite de los 6 meses no debe ser rechazado a menos que tampoco cumpla el límite de un año.

<sup>F</sup> Cuando esta opción se invoca, se sustituye el contenido de aire máximo de mortero de figuran en los requisitos de tabla por omisión. La resistencia mínima a la compresión de los cementos incorporadores de aire será de no menos del 80% de la del tipo de cemento comparable no incorporador de aire.

<sup>F</sup> No se solicitará el cumplimiento de este requisito a menos que el cemento se use con el reactivo a agregado alcali.

Tabla B1 Tabla 1. Requisitos físicos estándar, ASTM C 1157 – 20. 2020.

## ANEJO C

### **ASTM C595/C595M-19 Especificación estándar para cementos hidráulicos mezclados.**

#### *Propiedades especiales:*

- Cuando el comprador desee cemento con incorporación de aire, se lo deberá especificar agregando el sufijo (A) a la designación del tipo.
- Cuando el comprador desee un calor de hidratación moderado, se lo deberá especificar agregando el sufijo (MH) a la designación del tipo.
- Cuando el comprador desee una resistencia a sulfatos moderada, se lo deberá especificar agregando el sufijo (MS) a la designación del tipo.
- Cuando el comprador desee una alta resistencia a sulfatos, se lo deberá especificar agregando el sufijo (HS) a la designación del tipo.
- Cuando el comprador desee un calor de hidratación bajo, se lo deberá especificar agregando el sufijo (LH) a la designación del tipo.

#### *Materiales:*

Para cumplir con esta especificación, los materiales que se permite utilizar como ingredientes en los cementos fabricados son:

1. Cemento Portland: A los fines de esta especificación, es adecuado el cemento Portland que cumple con los requisitos de la Especificación C150. No se prohíbe el uso de cemento Portland o de otros materiales hidráulicos, o de ambos, que contengan un alto contenido de cal libre, siempre y cuando se cumpla con los límites de la prueba de autoclave para el cemento mezclado.
2. Clinker de cemento Portland.
3. Escoria: La escoria deberá ser cemento de escoria o escoria granulada de alto horno, y deberá cumplir con los requisitos de la Sección 9 de esta norma.
4. Puzolana: La puzolana deberá cumplir con los requisitos de la Sección 9.
5. Caliza: La caliza, tal como se la define en la Terminología C51, deberá ser natural y deberá cumplir con los requisitos indicados en 8.2 de esta norma.
6. Cal hidratada: La cal hidratada utilizada como parte de un cemento mezclado deberá cumplir con los requisitos de la Especificación C821, excepto que cuando es agregada durante la molienda en el proceso de producción no deberá haber requisitos de finura mínima.

7. Aditivo incorporador de aire: Cuando se especifique un cemento con incorporación de aire, se deberá utilizar un aditivo que cumpla con los requisitos de la Especificación C226.
8. Cuando se utilicen aditivos de procesamiento en la fabricación del cemento, se deberá haber demostrado que cumplen con los requisitos de la Especificación C465 en las cantidades utilizadas o cantidades mayores (consulte la Subsección 15.2).
9. Cuando se utilicen aditivos funcionales (utilizados a exclusivo criterio del comprador), se deberá haber demostrado que cumplen con los requisitos de la Especificación C688 cuando se los analice con el cemento a utilizar, en la cantidad utilizada o cantidades mayores (consulte la Subsección 15.2 de esta norma).
10. Otros aditivos: El cemento que abarca esta especificación no deberá contener otros aditivos que no sean los arriba mencionados, excepto que las cantidades de agua o sulfato de calcio (consulte la Terminología C219), o ambos, si se los agrega, deberán ser tales que no se excedan los límites que se muestran en la Tabla 1 para el sulfato informado como  $SO_3$  y la pérdida en ignición.

*Fabricación:*

*Cemento binario mezclado:* El cemento binario mezclado deberá ser un cemento hidráulico que consista de una mezcla íntima y uniforme producida por medio de mezclado o de adición durante la molienda, o mediante una combinación de mezclado o adición durante la molienda de clinker de cemento Portland o cemento Portland con una puzolana o una escoria, o con caliza. Se deberán aplicar los siguientes requisitos:

- *Cemento Portland de escoria de alto horno:* El cemento Portland de escoria de alto horno deberá ser un cemento hidráulico cuyo componente de escoria sea de hasta 95 % en masa del cemento mezclado. Se permite que el cemento Portland de escoria de alto horno con un contenido de escoria igual o mayor al 70% en masa contenga cal hidratada.
- *Cemento Portland de escoria de alto horno con incorporación de aire:* El cemento Portland de escoria de alto horno con incorporación de aire deberá ser un cemento Portland de escoria de alto horno al cual se le haya agregado suficiente cantidad de aditivo incorporador de aire, de modo tal que el producto resultante cumpla con los requisitos sobre contenido de aire del mortero.
- *Cemento Portland-puzolana:* El cemento Portland-puzolana deberá ser un cemento hidráulico cuyo componente de puzolana sea de hasta 40 % en masa del cemento mezclado.
- *Cemento Portland-puzolana con incorporación de aire:* El cemento Portland-puzolana con incorporación de aire deberá ser un cemento Portland-puzolana al cual se le haya agregado

suficiente cantidad de aditivo incorporador de aire, de modo tal que el producto resultante cumpla con los requisitos sobre contenido de aire del mortero.

- *Cemento Portland-caliza*: El cemento Portland-caliza deberá ser un cemento hidráulico cuyo componente de caliza sea mayor al 5 % pero menor o igual que el 15 % en masa del cemento mezclado.
- *Cemento Portland-caliza con incorporación de aire*: El cemento Portland-caliza con incorporación de aire deberá ser un cemento Portland-caliza al cual se le haya agregado suficiente cantidad de aditivo incorporador de aire, de modo tal que el producto resultante cumpla con los requisitos sobre contenido de aire del mortero.

*Cemento ternario mezclado*: El cemento ternario mezclado deberá ser un cemento hidráulico que consista de una mezcla íntima y uniforme producida por medio de mezclado o de adición durante la molienda, o mediante una combinación de mezclado o adición durante la molienda de clinker de cemento Portland o cemento Portland con (1) dos puzolanas diferentes, (2) escoria y una puzolana, (3) una puzolana y una caliza, o (4) una escoria y una caliza. El cemento ternario mezclado de Tipo IT(S $\geq$ 70) deberá contener un máximo de caliza de 15 % en masa, y se permite que contenga cal hidratada. Todos los demás cementos ternarios mezclados deberán contener un máximo de puzolana del 40 % en masa del cemento mezclado, un máximo de caliza del 15 % en masa del cemento mezclado y un total de puzolana, caliza y escoria menor al 70 % en masa del cemento mezclado.

**Requisitos Químicos:**

El cemento del tipo especificado deberá cumplir los requisitos químicos aplicables prescritos en la Tabla 1.

*Caliza*: La caliza para uso en la fabricación de cemento Portland-caliza, o de un cemento ternario mezclado en el cual la caliza sea un ingrediente, deberá contener al menos un 70 % en masa de carbonato de calcio. El contenido de carbonato de calcio de la caliza se deberá determinar multiplicando el contenido de CaO de la caliza, determinado mediante los Métodos de prueba C114, por un factor de 1,785.

*Puzolana*: La puzolana para uso en la fabricación de cemento Portland-puzolana, o de un cemento ternario mezclado en el cual la puzolana sea un ingrediente, deberá cumplir con el requisito sobre pérdida en ignición indicado en la Tabla 4.

TABLA 1 Requisitos Químicos

Tipo de cemento <sup>A</sup>	Método de prueba aplicable	IS (<70)	IS (≥ 70)	IP,	IL,
		IT (P<S<70) IT (L<S<70)	IT (≥ 70)	IT (P≥S) IT(P≥L)	IT (L≥S) IT(L≥P)
Óxido de magnesio (MgO), máx, %	C114	...	...	6,0	...
Sulfato informado como SO <sub>3</sub> , máx, % <sup>B</sup>	C114	3,0	4,0	4,0	3,0
Sulfuro informado como S <sup>2-</sup> , máx, %	C114	2,0	2,0	...	...
Residuo insoluble, máx, % <sup>C</sup>	C114	1,0	1,0	...	...
Pérdida en ignición, máx, %	C114	3,0 <sup>D</sup>	4,0 <sup>D</sup>	5,0 <sup>D</sup>	10,0

<sup>A</sup> Los requisitos químicos de esta tabla son aplicables a todos los equivalentes de cemento con incorporación de aire.

<sup>B</sup> Es admisible exceder los valores de contenido de SO<sub>3</sub> de la tabla, siempre y cuando se haya demostrado mediante el Método de prueba C1038 que el cemento con mayor cantidad de SO<sub>3</sub> no desarrollará una expansión mayor al 0,020 % a los 14 días. Cuando el fabricante suministre el cemento en virtud de esta disposición, se deberán proporcionar datos de respaldo al comprador. Consulte la Nota 10.

<sup>C</sup> El límite máximo de residuo insoluble no aplica a los cementos ternarios mezclados.

<sup>D</sup> En el caso de los cementos ternarios mezclados que contengan caliza, la pérdida en ignición es de un máximo de 10,0 % en masa.

Tabla C1 Tabla 1. Requisitos químicos, ASTM C 595/595M. 2019.

### Propiedades físicas:

*Cemento mezclado:* El cemento mezclado del tipo especificado deberá cumplir los requisitos físicos aplicables prescritos en la Tabla 2. Cuando se lo especifique, el cemento mezclado con propiedades especiales deberá cumplir con los requisitos físicos aplicables de la Tabla 3, y los requisitos en materia de resistencia a la compresión y contenido de aire de la Tabla 3 sustituyen a los de la Tabla 2.

*Puzolana o escoria:* La puzolana o la escoria que se vaya a mezclar con el cemento deberá ser analizada en el mismo estado de subdivisión en el que se la vaya a mezclar. La puzolana deberá cumplir con el requisito sobre finura y con el requisito sobre índice de actividad de la Tabla 4. La escoria a utilizar para cementos Portland de escoria de alto horno de Tipo IS(<25) o para cementos ternarios mezclados de Tipo IT(S<25) deberá cumplir con el requisito sobre índice de actividad de la Tabla 4. Dicha puzolana o escoria que se vaya a agregar durante la molienda al clinker de cemento Portland deberá, antes de que se la analice para ver si cumple con los requisitos de la Tabla 4, ser molida en el laboratorio hasta que tenga una finura que permita percibirla como presente en el cemento terminado. Es responsabilidad del fabricante decidir sobre la finura a la cual se van a realizar las pruebas, y, cuando el comprador así lo solicite, informar sobre qué datos y criterios se basó la decisión.

**Tabla 2. Requisitos físicos para cementos mezclados**

Tipo de cemento	Método de prueba aplicable	IL, IP, IS(<70), IT (S<70)	IS (≥ 70), IT (≥ 70)
Finura	C204, C430	A	A
Densidad	C188	A	A
Expansión en autoclave, máx, % <sup>B</sup>	C151	0,80	0,80
Contracción en autoclave, máx, % <sup>B</sup>	C151	0,20	0,20
Tiempo de fraguado inicial; prueba de Vicat <sup>C</sup>	C191		
Fraguado, minutos, no menos de:		45	45
Fraguado, horas, no más de:		7	7
Contenido de aire del mortero, % en volumen, máx.	C185	12	12
Resistencia a la compresión, mín., MPa	C109/C109M		
A 3 días		13,0	...
A 7 días		20,0	5,0
A 28 días		25,0	11,0

<sup>A</sup> La cantidad retenida cuando se lo tamiza en húmedo en un tamiz de 45 µm (N° 325), la superficie específica determinada mediante un aparato de permeabilidad al aire, los m<sup>2</sup>/kg y la densidad, g/cm<sup>3</sup>, se deberán informar en todos los informes de prueba de la planta requeridos según el punto 15.4 de esta norma.

<sup>B</sup> Los especímenes deberán mantenerse firmes y duros y no mostrar signos de distorsión, rajaduras, agrietamiento, picaduras o desintegración cuando se los somete a la prueba de expansión en autoclave.

<sup>C</sup> No es necesario que el tiempo de fraguado de los cementos que contienen un aditivo funcional acelerador o retardante solicitado por el usuario cumplan con los límites de esta tabla, pero deberá estar indicado por el fabricante.

**Tabla C2** Tabla 2. Requisitos físicos para cementos mezclados, ASTM C 595/595M. 2019.

**Tabla 3. Requisitos físicos para los cementos mezclados con propiedades especiales**

Designación de la propiedad especial (A)	Método aplicable de prueba					
		A	MS	HS	MH	LH
Contenido de aire del mortero:	C185					
mínimo, % en volumen		16 (B)	...	...	...	...
máximo, % en volumen		22 (B)	12	12	12	12
Resistencia a la Compresión,(C) min, MPa:	C109/C109M					
A 3 días		10,0	13	13	10	...
A 7 días		16,0	20	20	17	11
A 28 días		22,0	25	25	22	21
Calor de hidratación, máx., kJ/kg:	C702					
A 7 días		...	...	...	335	200
A 28 días		...	...	...	...	225
Necesidades de agua, % en peso máx. del cemento	C109/C109M	...	...	...	...	64
Resistencia a sulfatos, máx., %:	C1012					
Expansión a los 180 días		...	0,10	0,05 (D)	...	...
Expansión a 1 año		...	...	0,10 (D)	...	...

<sup>A</sup> Estos requisitos aplican únicamente si están especificados, y se designan agregando los sufijos A, MS, HS, MH o LH, según corresponda, a las designaciones del tipo IL, IP, IS(<70) o IT(S<70). Consulte 4.3 de esta norma. Los requisitos de finura, expansión en autoclave, contracción en autoclave y tiempo de fraguado deberán estar en conformidad con la Tabla 2.

<sup>B</sup> Estos requisitos sobre contenido de aire aplican a los cementos con múltiples designaciones de propiedades especiales cuando una de esas designaciones es (A).

<sup>C</sup> Cuando se apliquen múltiples designaciones de propiedades especiales, se deberá aplicar el conjunto de requisitos sobre resistencia para la designación de la propiedad especial que tenga el requisito de resistencia mínima a los 7 días más bajo.

<sup>D</sup> No se deberán exigir pruebas a un año cuando el cemento cumpla con el límite de los 180 días. No se deberá rechazar un cemento que no cumpla con el límite de los 180 días, a menos que tampoco cumpla con el límite de un año.

**Tabla C3** Tabla 3. Requisitos físicos para cementos mezclados con propiedades especiales, ASTM C 595/595M. 2019.

**Tabla 4. Requisitos para la puzolana para uso en cementos mezclados y para escoria para uso en cemento de escoria de alto horno Portland tipo IS (<25) y cemento ternario mezclado tipo IT (S <25)**

Puzolana y escoria, según corresponda	Método de prueba aplicable	
Finura; cantidad retenida cuando se lo tamiza en húmedo en un tamiz de 45 μm (N° 325), máx., %	C430	20,0
Índice de actividad con cemento Portland, a los 28 días, mín., %	Anexo 1 de esta norma	75
Pérdida en ignición de la puzolana, máx., %	C311	
Puzolana natural		10,0
Ceniza volante		6,0
Humo de sílice		6,0

**Tabla C4** Tabla 4. Requisitos para la puzolana para uso en cementos mezclados y para escoria para uso en cemento de escoria de alto horno Portland tipo IS (<25) y cemento ternario mezclado tipo IT (S <25), ASTM C 595/595M. 2019.

ANEJO D

EXTRACTO BASE DE DATOS COMPLETA DE 1074 ENSYOS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	IM	TM	D6M	Com	TipCom	A41	A42	A43	A44	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Aq	F_Hor	%H_Ar1	%H_Ar2	%H_Ar3	%H_Ar4	Aq_Ar1	Aq_Ar2	Aq_Ar3	Aq_Ar4
2	Codigo	Tipo Mezcla	Tipo Planta	Contenido Cemento real (kg/m3)	Tipo y Marca Cemento	Aditivo kg/m3				ARIDO 1 1/4" kg (1611 kg/m3)	ARIDO 2 3/8" Kg (1620 kg/m3)	ARIDO 3 3/4" kg (1349 kg/m3)	ARIDO 4 1 1/2" kg (1369 kg/m3)	Agua kg/m3	Fecha Hormigonado	Porcentaje Humedad Aridos (%H_Ar)				Contenido Agua en los Aridos kg/m3 (% humedad x peso aridos)			
3						V1200	Plastime n 300R	V2100	V4100							1/4"	3/8"	3/4"	1 1/2"	1/4"	3/8"	3/4"	1 1/2"
4																							
5																							
6	M01	HE-395	Darificadora	395	Halcim_HE	2.22	1.00			364	742	720	426	150	02/06/2016	6.7%	7.4%	2.4%		24.39	54.91	17.28	0.00
7																							
8																							
9																							
10																							
11	M02	HE-395	Darificadora	396	Halcim_HE	2.22	1.00			364	742	720	426		03/06/2016	6.5%	8.7%	2.2%		23.66	64.55	15.84	0.00
12																							
13																							
14																							
15																							
16																							
17																							
18	M03	HE-395	Mozcladora	400	Halcim_HE	2.37	0.00			376	779	704	0	149	31/05/2016					0.00	0.00	0.00	0.00
19																							
20																							
21																							
22																							
23																							
24	M04	HE-395	Darificadora	396	Halcim_HE	2.22	1.00			364	742	720	426		02/06/2016	6.7%	7.4%	2.4%		24.39	54.91	17.28	0.00
25																							
26																							
27																							
28																							
29																							
30	M05	HE-395	Mozcladora	396	Halcim_HE	2.36	0.00			379	770	707	0	133	29/05/2016	4.6%	9.2%	2.5%		17.43	70.86	17.66	0.00
31																							
32																							
33																							
34																							
35																							
36	M06	HE-395	Mozcladora	399	Halcim_HE	2.36	0.00			371	762	704	0	166	30/05/2016					0.00	0.00	0.00	0.00
37																							
38																							
39																							
40																							
41																							
42	M07	HE-395	Mozcladora	400	Halcim_HE	2.37	0.00			392	760	702	0	178	27/05/2016					0.00	0.00	0.00	0.00
43																							
44																							
45																							
46																							
47																							
48	M08	HE-395	Mozcladora	386	Halcim_HE	2.43	1.08			271	831	800	0	151	15/06/2016	7.7%	8.6%	4.2%		20.90	71.48	33.61	0.00
49																							
50																							
51																							

EXTRACTO BASE DE DATOS COMPLETA DE 1074 ENSYOS

X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS
Ag_Aridos	Fibra		CA1	CA2	Temp1	Temp2	Cod_Prob	H1	H2	H3	H4	D	h	P	Den	E_rot 3, T, 28	F_rot3, T, 28	C_rot 3, T, 28	Rc3, T, 28	fc3, T, 28	%fc3, T, 28
Agua total contenida en los aridos	Fibra	kg/m3	Asentamiento Laboratorio	Asentamiento Obra	Temperatura Laboratorio	Temperatura Obra	Codigo de Cilindros	Hora Salida Planta	Hora Llegada Obra	Hora Inicio Hormigonado	Hora Fin Hormigonado	DIÁMETRO (D) cm	Altura (h) cm	Peso (P) gr	Densidad (Den) (kg/cm3)	EDAD ROTURA (E_rot)	FECHA Rotura	CARGA (KN)	RESISTENCIA Kg/cm²	f'c	Promedio % de f'c
36.58	NO	0	24	19	26	29	ST123-ST128 DOSIFICADORA	10:10	11:02	11:04	11:12	15	30.2	12450	2.3329	3	05-jun-16	362	209	75	75
												15.2	30.2	12702	2.3180	3	05-jun-16	378	212	76	
												15.1	30.2	12678	2.3442	7	09-jun-16	477	272	97	96
												15.2	30	12612	2.3168	7	09-jun-16	478	268	96	
												15.2	30	12729	2.3383	28	30-jun-16	547	307	110	110
												15.2	30	12668	2.3087	28	30-jun-16	545	306	109	
												15.1	30	12497	2.3262	3	06-jun-16	388	220	78	
												15.1	30	12571	2.3299	3	06-jun-16	423	241	85	82
												15.2	30	12402	2.3229	7	10-jun-16	468	260	100	
												15.2	30	12524	2.3254	7	10-jun-16	468	272	100	100
												15.2	30	12785	2.3491	28	01-jul-16	631	384	124	
												15.2	30	12740	2.3403	28	01-jul-16	632	355	127	127
												10.1	20.2	3980	2.3851	3	03-jun-16	204	260	93	
												10.2	20.2	3988	2.3373	3	03-jun-16	215	263	96	94
												10.2	20.3	3982	1.7374	7	07-jun-16	240	299	107	
												10.1	20.3	3985	1.7739	7	07-jun-16	250	318	114	110
												10	20.1	3999	2.4698	28	28-jun-16	304	394	141	
												10.1	20.2	3983	2.3993	28	28-jun-16	296	376	134	138
												15	30.2	12603	2.3615	3	05-jun-16	421	243	87	85
												15.2	30.2	12630	2.3047	3	05-jun-16	416	234	83	
												15.1	30.1	12731	2.3818	7	09-jun-16	478	272	97	102
												15	30	12786	2.4118	7	09-jun-16	515	297	106	
												15.1	30.2	12725	2.3529	28	30-jun-16	527	300	107	106
												15	30.2	12637	2.3679	28	30-jun-16	513	296	106	
												15.1	30	12718	2.3673	3	01-jun-16	430	245	87	81
												15.2	30	12672	2.3278	3	01-jun-16	369	207	74	
												15.2	30.2	12779	2.3137	7	05-jun-16	488	272	98	103
												15.2	30.2	12703	2.3180	7	05-jun-16	488	272	98	
												15.2	30.2	12790	2.3539	28	28-jun-16	521	301	108	
												15.2	30.2	12752	2.3347	28	28-jun-16	521	292	105	117
												10.1	20.3	3992	2.3992	3	02-jun-16	207	263	94	89
												10.1	20.2	3982	2.3863	3	02-jun-16	193	233	83	
												10	20.2	3980	2.4016	7	06-jun-16	248	322	115	
												10.2	20.2	3983	2.3825	7	06-jun-16	263	327	117	116
												10.3	20.3	3925	2.3205	28	27-jun-16	306	375	134	
												10.1	20.2	3942	2.4357	28	27-jun-16	201	382	137	135
												15.1	30	12508	2.3282	3	30-may-16	367	209	75	
												15.2	30	12464	2.2900	3	30-may-16	368	206	74	74
												15.1	30	12718	2.3673	7	03-jun-16	436	248	89	
												15.1	30.2	12808	2.3683	7	03-jun-16	462	263	94	91
												15.2	30.2	13050	2.3814	28	24-jun-16	576	324	116	
												15.2	30.2	12623	2.2034	28	24-jun-16	582	327	117	116
												15.2	30.1	12650	2.3160	3	18-jun-16	393	221	79	
												15.1	30.1	12617	2.3407	3	18-jun-16	379	216	77	78
												15	30	12934	2.4397	7	22-jun-16	483	275	99	
												15	30.5	13052	2.4218	7	22-jun-16	481	260	93	96
												15	30	12744	2.4039	28	13-jul-16	518	316	113	
												15.1	30	12811	2.3857	28	13-jul-16	562	320	114	114
												16	30.5	13062	2.4014	3	16-jun-16	366	211	75	

Tabla D1 Extracto de la base de datos de 1074 ensayos con todas sus variables.

## ANEJO E

### BASE DE DATOS UTILIZADA PARA EL ESTUDIO CON 709 ENSAYOS y 22 VARIABLES

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
1	1	395,7	1	2,36	0,00	0,00	0,00	379	770	707	0	238,9	5	0,0	22,0	19,0	26,0	27,0	0,63	0,77	328	287
2	1	399,7	1	2,37	0,00	0,00	0,00	392	760	702	0	292,4	5	0,0	22,0	19,0	27,0	30,0	0,63	1,10	325	255
3	1	386,2	1	2,43	1,08	0,00	0,00	271	831	800	0	276,6	6	0,0	21,0	19,0	27,5	28,0	0,70	0,90	318	269
4	1	384,8	1	2,27	1,08	0,00	0,00	0	1099	817	0	275,1	6	0,0	21,0	15,0	27,0	28,3	0,33	0,75	330	263
5	1	384,4	1	2,51	1,08	0,00	0,00	306	747	760	0	269,1	6	0,0	21,0	18,0	27,0	28,5	0,42	0,85	358	284
6	1	389,8	1	2,50	1,08	0,00	0,00	379	749	765	0	282,9	6	0,0	21,0	19,0	25,0	25,0	1,27	1,35	349	315
7	1	386,0	1	2,50	1,08	0,00	0,00	377	751	775	0	262,3	6	0,0	20,5	20,0	27,0	28,0	1,30	1,72	347	270
8	1	385,2	1	2,52	1,08	0,00	0,00	370	746	771	0	244,9	6	0,0	20,0	18,0	24,0	25,0	0,98	1,10	353	369
9	1	366,0	1	2,89	0,00	0,00	0,00	377	666	798	0	221,7	6	0,0	23,5	21,0	27,0	28,0	0,63	0,72	336	275
10	1	394,5	2	3,31	1,08	0,00	0,00	268	823	831	0	164,1	6	0,0	20,0	20,0	26,0	28,0	0,65	1,28	332	302
11	1	399,5	2	0,00	1,08	3,61	0,00	386	661	796	0	255,3	7	0,0	23,0	19,0	25,0	27,0	1,40	1,43	351	174
12	1	412,0	2	2,69	1,20	0,00	0,00	183	827	779	0	251,9	7	0,0	21,0	15,0	24,4	27,7	1,15	1,42	325	254
13	1	414,2	2	2,90	1,20	0,00	0,00	290	900	677	0	290,3	7	0,0	20,0	18,0	28,0	28,8	0,43	0,53	297	188
14	1	426,8	2	3,20	1,30	0,00	0,00	347	645	775	0	277,2	7	0,0	21,0	18,0	26,0	27,0	0,37	1,03	307	212
15	1	450,0	4	3,40	0,00	0,00	0,00	190	762	838	0	200,5	8	0,6	23,0	11,0	28,5	29,2	1,27	1,60	273	211
16	1	389,0	1	2,77	0,00	0,00	0,00	222	820	969	0	203,6	8	0,0	24,0	15,0	27,0	27,8	0,90	1,02	364	298
17	1	458,7	4	0,00	2,29	2,64	0,00	195	754	833	0	215,8	8	0,6	24,0	20,0	27,0	29,0	0,88	0,98	340	286
18	1	450,2	3	0,00	2,70	3,64	0,00	209	791	913	0	226,1	8	0,0	24,0	19,0	29,5	30,7	0,85	0,95	359	353
19	1	441,7	4	0,00	2,43	3,43	0,00	191	799	912	0	182,0	8	0,0	25,0	22,0	27,0	31,2	1,25	1,28	350	274
20	1	393,8	1	0,00	2,36	0,00	3,49	411	844	678	0	213,7	8	0,0	25,0	23,0	26,0	27,0	0,83	0,88	354	328
21	1	395,0	1	0,00	2,37	0,00	3,66	0	1127	857	0	217,8	8	0,0	24,0	22,0	27,1	28,0	0,57	0,65	352	337
22	1	450,0	3	0,00	2,25	0,00	3,57	0	1008	406	407	193,1	9	0,0	25,0	18,0	27,0	29,0	0,97	1,05	264	187
23	1	393,8	1	0,00	2,36	0,00	3,50	199	935	845	0	175,1	8	0,0	25,1	21,0	27,0	27,3	0,78	0,85	346	400
24	1	385,5	1	0,00	1,93	0,00	3,09	214	926	643	399	202,2	9	0,0	26,0	24,0	29,9	30,1	1,77	1,83	389	317
25	1	390,8	1	0,00	1,78	0,00	3,09	216	885	896	0	188,5	9	0,0	24,0	21,0	27,0	28,6	1,17	1,52	419	345
26	1	384,7	1	0,00	1,78	0,00	2,93	201	956	413	398	208,0	8	0,0	24,0	20,0	26,0	28,0	0,90	0,98	391	376
27	1	385,8	1	0,00	1,78	0,00	3,28	396	806	370	377	189,7	9	0,0	25,5	22,0	27,0	28,5	0,77	0,85	296	240
28	1	385,2	1	0,00	1,78	0,00	3,11	201	1014	377	378	196,9	9	0,0	57,0	57,0	28,0	28,4	0,83	0,92	369	269
29	1	387,0	1	0,00	1,78	0,00	3,21	214	967	403	401	204,6	9	0,0	25,0	20,0	26,0	27,2	0,80	0,95	413	290
30	1	385,7	1	0,00	1,78	0,00	3,08	209	1004	383	382	193,8	9	0,0	60,0	63,0	26,1	27,0	1,10	1,18	376	285
31	1	388,7	1	0,00	1,78	0,00	3,10	197	935	806	0	226,2	9	0,0	61,0	63,0	28,0	29,2	0,68	0,78	377	325
32	1	393,3	1	0,00	1,78	0,00	2,67	221	1029	380	385	185,1	9	0,0	62,0	51,0	26,0	28,2	0,65	0,72	351	331
33	1	389,5	1	0,00	1,78	0,00	2,85	150	926	912	0	214,2	9	0,0	60,0	54,0	25,8	27,1	0,58	0,75	355	289
34	1	391,3	1	0,00	1,78	0,00	2,87	193	887	858	0	199,1	9	0,0	64,0	62,0	25,0	27,2	0,50	0,63	428	338
35	1	396,5	1	0,00	1,50	0,00	2,84	198	853	876	0	215,3	10	0,0	60,0	50,0	27,0	28,0	0,88	0,98	378	365
36	1	389,0	1	0,00	1,78	0,00	2,84	138	916	909	0	191,2	9	0,0	58,0	51,0	27,0	28,6	1,20	1,33	387	342
37	1	391,8	1	0,00	1,50	0,00	3,04	202	964	389	391	174,2	10	0,0	57,0	50,0	27,4	28,2	0,72	0,88	352	281
38	1	391,0	1	0,00	1,50	0,00	2,90	231	868	875	0	206,2	10	0,0	55,0	30,0	31,0	31,5	0,63	0,80	298	236
39	1	397,2	1	0,00	1,50	0,00	3,12	213	814	947	0	179,6	10	0,0	59,0	55,0	28,0	28,5	0,37	1,23	399	327
40	1	389,5	1	0,00	1,50	0,00	3,06	147	1042	399	404	176,0	10	0,0	55,0	50,0	27,6	28,1	0,82	0,90	468	390
41	1	388,3	1	0,00	1,50	0,00	2,98	435	723	405	411	207,8	10	0,0	64,0	61,0	26,4	27,0	0,82	0,87	326	270
42	1	397,8	1	0,00	1,50	0,00	3,05	194	806	942	0	185,5	10	0,0	58,0	50,0	26,0	28,0	0,83	0,90	378	331
43	1	389,0	1	0,00	1,50	0,00	2,99	430	749	394	400	189,6	10	0,0	60,0	58,0	27,4	28,3	1,10	1,25	452	346
44	1	389,5	1	0,00	1,50	0,00	2,97	393	752	394	397	176,2	10	0,0	60,0	51,0	28,4	29,8	0,95	1,03	352	354
45	1	407,2	1	0,00	1,50	0,00	3,18	482	632	763	0	207,0	10	0,0	60,0	58,0	25,8	27,3	0,52	0,67	349	310
46	1	387,8	1	0,00	1,50	0,00	2,97	394	761	394	402	221,9	10	0,0	62,0	60,0	25,5	27,0	1,42	1,47	381	315
47	1	406,0	1	0,00	1,50	0,00	3,15	379	729	789	0	214,8	10	0,0	60,0	57,0	26,0	28,0	0,93	1,05	334	316
48	1	395,5	1	0,00	1,50	0,00	2,98	497	693	373	376	220,2	10	0,0	63,0	65,0	24,7	27,0	0,62	0,67	375	307
49	1	404,8	1	0,00	1,50	0,00	3,17	357	735	803	0	197,6	10	0,0	58,0	50,0	29,4	30,0	0,78	0,85	382	337

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
50	1	392,5	1	0,00	1,50	0,00	3,06	508	749	347	352	217,1	10	0,0	60,0	56,0	27,0	29,0	1,15	1,22	340	297
51	1	391,7	1	0,00	1,50	0,00	3,05	400	752	395	400	197,9	10	0,0	62,0	58,0	25,0	28,2	0,58	0,67	367	315
52	1	390,5	1	0,00	1,50	0,00	3,06	403	745	395	395	176,9	10	0,0	60,0	50,0	27,0	29,3	0,48	0,58	301	278
53	1	404,3	1	0,00	1,50	0,00	3,16	389	799	685	0	175,8	10	0,0	60,0	57,0	26,0	27,1	0,40	0,65	325	281
54	1	405,5	1	0,00	1,50	0,00	3,17	387	795	748	0	289,3	10	0,0	61,0	53,0	26,6	28,5	0,40	0,57	355	340
55	1	389,2	1	0,00	1,50	0,00	3,07	304	887	389	378	217,5	10	0,0	64,0	56,0	25,0	28,0	0,75	0,85	447	352
56	1	413,2	1	0,00	1,50	0,00	3,34	371	808	593	184	181,9	10	0,0	62,0	60,0	28,0	28,5	0,67	0,75	361	304
57	1	406,0	1	0,00	1,50	0,00	3,17	412	780	749	0	197,3	10	0,0	59,0	52,0	27,4	29,5	0,47	0,53	333	261
58	1	390,0	1	0,00	1,50	0,00	3,07	380	847	382	377	180,9	10	0,0	62,0	60,0	27,8	28,0	0,55	0,62	334	279
59	1	396,7	1	0,00	1,50	0,00	2,74	366	847	382	378	209,7	10	0,0	60,0	58,0	26,0	28,1	0,42	0,50	350	368
60	1	390,3	1	0,00	1,50	0,00	2,44	340	868	376	377	187,1	10	0,0	61,0	59,0	26,0	28,0	0,82	0,90	351	301
61	1	390,5	1	0,00	1,50	0,00	3,11	410	797	380	377	224,8	11	0,0	60,0	58,0	27,3	28,1	0,68	0,77	389	331
62	1	390,8	1	0,00	1,50	0,00	3,73	348	863	375	322	155,7	10	0,0	65,0	63,0	27,0	28,0	0,75	0,83	354	271
63	1	389,7	1	0,00	1,50	0,00	3,22	413	791	382	379	248,9	11	0,0	60,0	53,0	30,0	31,2	0,40	0,48	373	302
64	1	390,8	1	0,00	1,50	0,00	2,88	407	837	384	383	199,6	11	0,0	59,0	56,0	26,0	26,7	1,15	1,22	378	327
65	1	390,2	1	0,00	1,50	0,00	2,78	403	839	384	383	187,6	11	0,0	58,0	56,0	24,0	25,6	0,80	0,95	370	351
66	1	391,5	1	0,00	1,50	0,00	2,88	406	838	384	384	207,0	11	0,0	60,0	59,0	26,1	27,3	0,67	0,73	366	312
67	1	390,2	1	0,00	1,50	0,00	2,91	400	835	381	388	184,9	11	0,0	59,0	50,0	29,3	30,2	0,40	0,48	370	300
68	1	389,3	1	0,00	1,50	0,00	2,88	409	834	384	384	188,0	11	0,0	60,0	55,0	25,0	27,0	0,43	0,53	367	350
69	1	393,3	1	0,00	1,50	0,00	2,71	392	820	372	373	207,5	11	0,0	60,0	58,0	28,1	28,1	0,80	0,88	355	317
70	1	412,8	1	0,00	1,50	0,00	3,17	406	902	356	319	186,7	11	0,0	60,0	50,0	24,9	26,5	0,37	0,58	369	299
71	1	389,7	1	0,00	1,50	0,00	2,71	392	831	377	373	172,6	11	0,0	58,0	56,0	26,0	27,5	0,82	1,17	350	317
72	1	389,0	1	0,00	1,50	0,00	2,70	382	815	374	372	216,8	11	0,0	62,0	55,0	29,9	31,2	0,57	0,72	352	293
73	1	391,0	1	0,00	1,50	0,00	2,67	404	830	378	372	198,4	11	0,0	58,0	54,0	25,0	27,0	0,90	1,02	346	288
74	1	409,5	1	0,00	1,50	0,00	3,08	430	871	359	317	164,9	11	0,0	60,0	59,0	25,7	26,2	0,57	0,65	367	320
75	1	388,8	1	0,00	1,50	0,00	2,69	384	783	359	356	202,3	11	0,0	61,0	54,0	26,9	27,5	0,87	0,95	355	311
76	1	391,8	1	0,00	1,50	0,00	2,70	390	783	360	355	208,1	11	0,0	60,0	57,0	27,0	28,5	0,38	0,42	354	346
77	1	410,0	1	0,00	1,50	0,00	3,21	397	784	380	309	223,3	11	0,0	62,0	47,0	27,5	28,0	0,75	0,92	348	350
78	1	389,7	1	0,00	1,50	0,00	2,71	384	790	358	363	228,0	11	0,0	59,0	36,0	26,5	28,0	0,82	0,98	351	339
79	1	391,2	2	0,00	1,50	0,00	2,91	213	1012	430	298	220,2	12	0,0	60,0	58,0	28,0	29,1	0,48	0,55	367	356
80	1	411,0	1	0,00	1,50	0,00	3,42	435	901	363	210	241,7	12	0,0	64,0	63,0	26,9	28,4	0,55	0,70	374	343
81	1	422,3	2	0,00	1,50	0,00	3,27	200	1121	358	175	176,0	12	0,0	64,0	59,0	26,0	28,5	0,40	0,48	373	338
82	1	392,5	1	0,00	1,50	0,00	2,91	207	1115	406	236	237,1	12	0,0	60,0	57,0	27,0	28,2	0,60	0,70	377	324
83	1	391,0	2	0,00	1,50	0,00	2,74	237	1125	476	190	189,3	12	0,0	62,0	56,0	29,4	31,1	0,95	1,03	338	269
84	1	409,7	2	0,00	1,50	0,00	3,26	192	1114	360	173	165,2	12	0,0	64,0	57,0	27,0	29,3	1,00	1,23	364	346
85	1	393,4	1	0,00	1,50	0,00	2,74	201	1095	408	224	213,8	12	0,0	62,0	57,0	26,5	28,8	0,90	0,97	373	336
86	1	389,6	1	0,00	1,56	0,00	2,71	210	1119	479	193	188,3	12	0,0	56,0	50,0	26,7	27,3	1,20	1,28	356	273
87	1	390,0	1	0,00	1,53	0,00	2,60	208	1102	409	242	209,9	12	0,0	60,0	55,0	27,2	28,3	1,15	1,23	364	329
88	1	391,0	1	0,00	1,50	0,00	2,75	196	1076	427	237	194,5	12	0,0	65,0	61,0	26,5	27,6	1,37	1,45	361	325
89	1	390,7	2	0,00	1,50	0,00	2,68	389	875	380	278	226,3	12	0,0	59,0	55,0	25,5	26,8	0,77	0,85	399	316
90	1	390,2	1	0,00	1,50	0,00	2,71	187	1080	408	223	197,5	12	0,0	59,0	55,0	29,6	30,2	0,92	0,98	366	333
91	1	422,8	1	0,00	1,50	0,00	3,17	366	853	360	270	219,8	12	0,0	63,0	61,5	29,0	30,6	0,83	0,92	358	370
92	1	384,5	1	0,00	1,50	0,00	2,71	386	887	375	278	231,5	12	0,0	62,0	59,0	26,0	27,3	0,95	1,03	383	349
93	1	392,8	1	0,00	1,50	0,00	2,88	371	875	369	276	221,4	12	0,0	60,0	56,0	26,0	27,8	0,88	1,02	385	333
94	1	390,5	1	0,00	1,50	0,00	2,70	391	893	398	280	220,9	12	0,0	60,0	52,0	26,0	27,5	0,97	1,10	352	358
95	1	392,3	1	0,00	1,50	0,00	2,85	370	882	368	277	224,6	12	0,0	60,0	57,0	25,0	27,0	1,07	1,15	347	293
96	1	389,5	1	0,00	1,50	0,00	2,87	382	888	369	276	212,8	12	0,0	60,0	57,0	28,2	29,0	0,70	0,85	395	282
97	1	389,5	1	0,00	1,50	0,00	2,87	388	877	369	277	207,8	12	0,0	63,0	60,0	27,1	28,2	0,97	1,03	359	352
98	1	419,7	2	0,00	1,50	0,00	3,19	358	850	442	177	207,6	12	0,0	63,0	61,0	28,5	28,8	1,03	1,15	383	283
99	1	420,5	1	0,00	1,50	0,00	3,03	358	837	445	176	217,9	12	0,0	61,0	59,0	28,5	29,9	0,52	0,60	367	374
100	1	390,0	1	0,00	1,50	0,00	2,86	391	887	398	312	210,8	12	0,0	60,0	57,0	26,3	27,6	0,68	0,75	370	266
101	1	389,2	1	0,00	1,00	0,00	2,92	914	386	368	277	234,6	1	0,0	60,0	60,0	23,9	26,4	0,55	0,62	367	315
102	1	390,8	1	0,00	1,50	0,00	2,92	372	874	370	275	216,0	12	0,0	64,0	60,0	26,8	27,9	0,62	0,65	376	366
103	1	394,7	1	0,00	1,00	0,00	2,84	377	880	365	275	203,4	1	0,0	62,0	58,0	30,2	31,0	0,67	0,75	378	360

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
104	1	391,3	1	0,00	1,00	0,00	2,90	881	429	378	294	232,1	1	0,0	61,0	60,0	25,0	26,7	0,87	0,92	310	271
105	1	391,5	1	0,00	1,00	0,00	2,88	849	336	422	326	199,8	1	0,0	62,0	59,0	25,0	27,0	0,45	0,55	331	372
106	1	391,0	1	0,00	0,83	0,00	2,86	404	815	406	314	221,2	1	0,0	64,0	63,0	25,4	27,3	0,75	0,85	370	379
107	1	389,7	1	0,00	0,83	0,00	2,80	302	906	463	275	242,4	1	0,0	64,0	63,0	25,6	29,2	0,80	0,88	389	324
108	1	395,8	1	0,00	0,83	0,00	2,74	292	932	684	0	190,4	1	0,0	64,0	62,0	25,6	29,2	0,72	0,80	367	350
109	1	391,0	1	0,00	0,83	0,00	2,62	397	800	405	313	202,4	1	0,0	64,0	63,0	25,0	29,2	0,83	0,92	382	364
110	1	392,2	1	0,00	0,83	0,00	2,90	289	866	733	0	237,4	1	0,0	60,0	58,0	26,0	27,4	0,93	1,05	337	277
111	1	391,7	1	0,00	0,83	0,00	2,67	346	808	773	0	199,0	1	0,0	60,0	56,0	27,4	28,4	0,77	0,87	369	362
112	1	385,8	1	0,00	0,83	0,00	2,78	304	924	755	0	242,5	1	0,0	61,0	58,0	26,3	27,6	0,58	0,65	374	300
113	1	389,8	1	0,00	0,83	0,00	2,66	355	808	777	0	196,3	1	0,0	62,0	59,0	26,2	27,3	0,67	0,75	387	330
114	1	388,3	1	0,00	0,83	0,00	2,70	374	806	772	0	194,0	1	0,0	60,0	57,0	25,7	27,9	0,87	0,98	370	361
115	1	390,5	1	0,00	0,83	0,00	2,66	301	801	848	0	205,3	1	0,0	60,5	55,0	28,9	29,7	0,82	0,95	379	355
116	1	391,0	1	0,00	0,83	0,00	2,67	342	804	769	0	222,3	1	0,0	62,0	60,0	26,3	28,0	0,75	0,85	363	317
117	1	391,2	1	0,00	0,83	0,00	2,64	286	945	490	206	231,8	1	0,0	59,0	53,0	30,5	31,2	1,02	1,10	376	315
118	1	418,0	1	0,00	0,83	0,00	2,88	340	778	750	0	192,8	1	0,0	64,0	62,0	26,0	27,0	0,42	0,52	383	372
119	1	389,7	1	0,00	0,83	0,00	2,69	289	938	490	206	240,3	1	0,0	63,0	61,0	26,3	27,0	0,42	0,48	352	328
120	1	404,7	1	0,00	0,83	0,00	2,69	298	961	488	205	200,6	1	0,0	57,0	51,0	26,3	27,0	0,73	0,82	356	360
121	1	389,2	1	0,00	0,83	0,00	2,66	295	955	489	206	244,3	1	0,0	58,0	52,0	28,8	29,7	0,83	0,93	356	341
122	1	389,2	1	0,00	0,83	0,00	2,68	306	940	488	206	220,4	1	0,0	63,0	63,0	29,9	31,8	0,77	0,83	356	341
123	1	390,0	1	0,00	0,83	0,00	2,70	295	947	488	205	189,5	1	0,0	62,0	54,0	26,0	27,4	1,18	1,28	355	332
124	1	389,3	1	0,00	0,83	0,00	2,68	282	938	492	204	226,8	1	0,0	60,0	56,0	27,5	28,3	0,80	0,92	359	330
125	1	394,5	1	0,00	0,83	0,00	2,68	305	937	490	206	198,5	1	0,0	62,0	60,0	26,0	26,7	0,40	0,47	354	339
126	1	389,8	1	0,00	0,83	0,00	2,69	286	934	487	207	223,7	1	0,0	60,0	57,0	30,0	31,5	0,77	0,87	361	329
127	1	391,7	1	0,00	0,83	0,00	2,70	282	906	485	207	243,1	1	0,0	61,0	59,0	26,8	27,3	0,58	0,68	359	319
128	1	388,8	1	0,00	0,83	0,00	2,68	295	952	490	206	185,7	1	0,0	61,0	56,0	25,7	27,0	0,82	0,92	342	285
129	1	390,0	1	0,00	0,83	0,00	2,69	288	908	489	217	289,3	1	0,0	60,0	58,0	26,3	26,8	1,05	1,17	359	320
130	1	391,8	1	0,00	0,83	0,00	2,72	297	903	491	206	240,6	1	0,0	62,0	61,0	26,8	27,4	0,68	0,75	360	308
131	1	389,5	1	0,00	0,83	0,00	2,72	299	919	489	208	257,2	1	0,0	62,0	60,0	27,6	29,0	0,38	0,50	363	328
132	1	391,8	1	0,00	0,83	0,00	2,70	290	906	489	217	269,1	1	0,0	60,0	58,0	27,0	28,6	0,80	0,97	352	312
133	1	374,7	1	0,00	0,83	0,00	2,61	701	411	464	373	239,1	2	0,0	60,0	56,0	25,3	26,5	0,37	0,45	353	272
134	1	390,8	1	0,00	0,83	0,00	2,74	286	928	491	207	260,8	1	0,0	61,0	58,0	27,3	28,0	0,70	0,78	364	326
135	1	374,3	1	0,00	0,83	0,00	2,61	701	425	464	370	182,7	1	0,0	59,0	53,0	25,7	26,8	0,35	0,50	355	256
136	1	390,2	1	0,00	0,83	0,00	2,74	296	904	468	281	193,2	2	0,0	60,0	55,0	26,0	26,8	0,52	0,85	361	340
137	1	375,0	1	0,00	0,83	0,00	2,65	407	695	461	375	210,3	2	0,0	62,0	58,0	26,0	26,8	0,30	0,38	345	320
138	1	391,0	1	0,00	0,83	0,00	2,72	305	900	470	282	238,9	2	0,0	61,0	57,0	27,0	27,8	0,60	0,72	347	306
139	1	390,2	1	0,00	0,83	0,00	2,72	299	888	469	281	185,2	2	0,0	61,0	60,0	26,5	27,3	0,27	0,33	344	267
140	1	390,7	1	0,00	0,83	0,00	2,70	299	914	469	280	216,1	2	0,0	60,0	59,0	29,0	29,6	0,30	0,43	350	340
141	1	390,8	1	0,00	0,83	0,00	2,72	312	905	469	281	230,2	2	0,0	62,0	59,0	26,1	27,0	0,52	0,63	352	245
142	1	392,6	1	0,00	0,83	0,00	2,71	299	905	467	281	234,5	2	0,0	62,0	60,0	25,3	26,2	0,28	0,50	351	327
143	1	390,5	1	0,00	0,83	0,00	2,69	291	896	469	280	215,6	2	0,0	59,0	57,0	28,0	29,0	0,23	1,03	340	349
144	1	389,2	1	0,00	1,04	0,00	2,73	583	506	557	277	205,1	3	0,0	62,0	60,0	29,9	30,3	0,27	0,35	363	329
145	1	394,7	1	0,00	0,83	0,00	2,63	591	504	560	279	189,7	2	0,0	62,0	60,0	26,3	27,5	0,25	0,28	370	340
146	1	390,0	1	0,00	1,04	0,00	2,40	519	648	556	278	192,5	3	0,0	63,0	60,0	26,6	27,8	0,32	0,57	351	337
147	1	390,6	1	0,00	0,80	0,00	2,72	295	898	470	279	239,1	2	0,0	61,0	59,0	25,5	26,8	0,30	0,35	344	301
148	1	390,8	1	0,00	0,83	0,00	2,66	428	693	559	279	222,9	2	0,0	62,0	60,0	26,0	27,0	0,38	0,45	356	327
149	1	390,7	1	0,00	0,83	0,00	2,69	388	690	556	280	191,7	2	0,0	61,0	60,0	26,9	27,5	0,23	0,43	375	350
150	1	372,0	1	2,23	1,08	0,00	0,00	316	792	810	0	293,6	3	0,0	21,0	18,0	29,0	31,0	0,48	0,67	347	310
151	1	370,0	1	2,19	1,08	0,00	0,00	302	788	809	0	290,2	3	0,0	20,0	16,0	21,0	30,0	0,33	0,35	350	318
152	1	368,0	1	2,20	1,08	0,00	0,00	282	650	910	0	276,9	3	0,0	20,0	19,0	29,0	30,0	0,18	0,22	344	320
153	1	360,0	1	2,22	1,08	0,00	0,00	0	954	911	0	254,0	3	0,0	21,0	17,0	29,0	29,0	0,27	0,30	391	336
154	1	362,0	1	2,18	1,08	0,00	0,00	0	1086	801	0	224,2	3	0,0	18,0	14,0	26,0	27,0	0,48	1,40	451	212
155	1	362,0	1	2,20	1,08	0,00	0,00	0	1095	800	0	236,0	3	0,0	21,0	14,5	28,0	29,0	0,65	0,38	373	322
156	1	362,0	1	2,17	1,08	0,00	0,00	0	1089	802	0	282,3	3	0,0	20,5	17,0	28,0	29,0	0,25	0,55	328	271
157	1	369,0	1	2,60	0,00	0,00	0,00	319	830	758	0	281,1	3	0,0	20,0	15,0	29,0	31,0	0,33	0,62	350	367

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
158	1	370,0	1	2,40	0,00	0,00	0,00	338	852	758	0	272,6	3	0,0	20,0	15,0	28,0	29,0	0,47	0,50	339	
159	1	367,0	1	2,20	1,08	0,00	0,00	283	655	909	0	240,3	3	0,0	18,0	12,0	28,0	30,0	0,53	0,57	346	320
160	1	366,0	1	2,19	1,08	0,00	0,00	278	670	908	0	241,7	3	0,0	19,0	13,0	28,0	29,0	0,50	0,58	342	352
161	1	373,0	1	2,21	1,08	0,00	0,00	286	665	908	0	251,3	3	0,0	18,0	13,0	26,0	27,0	0,37	0,58	343	354
162	1	369,0	1	2,19	1,08	0,00	0,00	280	678	908	0	236,1	3	0,0	18,0	12,0	26,0	28,0	0,28	0,42	334	307
163	1	360,2	1	2,16	1,08	0,00	0,00	0	1065	801	0	296,9	3	0,0	18,0	12,0	28,0	28,0	0,40	0,48	357	356
164	1	360,7	1	2,21	1,08	0,00	0,00	0	1085	799	0	325,6	3	0,0	18,0	13,0	26,0	27,0	0,33	0,77	492	425
165	1	366,0	1	2,19	1,08	0,00	0,00	0	1086	817	0	337,6	3	0,0	18,0	14,0	28,0	29,0	0,28	0,50	347	348
166	1	361,8	1	2,20	1,08	0,00	0,00	0	1072	800	0	218,2	3	0,0	18,0	14,0	27,0	27,0	0,55	1,37	314	252
167	1	363,3	1	2,16	1,08	0,00	0,00	0	1072	799	0	219,2	3	0,0	19,0	14,0	27,0	28,0	0,48	0,78	268	214
168	1	361,5	1	2,19	1,08	0,00	0,00	0	1079	802	0	222,2	3	0,0	18,0	14,0	27,0	28,0	0,30	0,80	308	226
169	1	362,8	1	2,21	1,08	0,00	0,00	0	1095	800	0	259,4	3	0,0	18,0	13,0	28,0	28,5	0,35	1,18	326	214
170	1	361,8	1	2,20	1,08	0,00	0,00	0	1080	802	0	238,0	3	0,0	18,0	14,0	27,0	28,0	0,48	0,57	316	246
171	1	360,7	1	2,21	1,08	0,00	0,00	0	1079	803	0	256,8	3	0,0	20,0	15,0	28,0	28,0	0,52	0,58	296	225
172	1	304,5	1	1,52	0,91	0,00	0,00	378	780	753	0	227,8	4	0,0	19,0	14,0	30,0	30,0	0,30	0,90	264	179
173	1	304,2	1	1,50	0,00	0,00	0,00	385	793	750	0	226,2	4	0,0	16,0	14,0	26,0	27,0	0,20	0,23	266	188
174	1	370,8	1	2,19	1,08	0,00	0,00	0	1228	665	0	250,4	4	0,0	15,0	12,0	25,0	27,0	0,57	1,32	339	189
175	1	371,5	1	2,31	1,08	0,00	0,00	426	800	721	0	280,0	4	0,0	18,0	12,0	28,0	28,0	0,80	1,22	292	223
176	1	370,2	1	2,30	1,08	0,00	0,00	365	796	721	0	281,2	4	0,0	18,0	14,0	26,0	27,5	0,45	0,53	287	228
177	1	359,7	1	1,80	1,08	0,00	0,00	395	715	780	0	272,3	4	0,0	18,0	16,0	30,0	30,8	0,37	0,42	300	248
178	1	362,5	1	1,79	1,08	0,00	0,00	389	712	781	0	261,7	4	0,0	20,0	15,0	27,0	28,0	0,33	0,45	351	323
179	1	360,2	1	1,79	1,08	0,00	0,00	418	702	780	0	275,8	4	0,0	20,0	16,0	27,0	28,0	0,35	1,10	444	357
180	1	370,0	1	2,21	0,00	0,00	0,00	359	744	720	0	259,0	4	0,0	16,0	14,0	29,0	29,0	0,28	0,48	372	355
181	1	370,8	1	1,81	1,08	0,00	0,00	404	741	716	0	244,6	4	0,0	20,0	14,0	26,0	28,5	0,37	0,72	320	215
182	1	373,8	1	2,24	0,00	0,00	0,00	375	765	721	0	251,7	4	0,0	19,0	12,0	29,0	31,0	0,32	0,88	316	270
183	1	360,4	1	2,23	0,00	0,00	0,00	357	726	706	0	210,3	4	0,0	20,0	13,0	26,0	29,0	0,43	0,55	338	288
184	1	363,2	1	2,22	0,00	0,00	0,00	356	738	710	0	207,6	4	0,0	15,0	11,0	26,0	27,0	0,50	0,53	293	213
185	1	363,8	1	2,22	0,00	0,00	0,00	352	738	707	0	210,8	4	0,0	18,0	12,0	26,0	27,0	0,42	0,62	342	267
186	1	364,2	1	2,24	0,00	0,00	0,00	356	732	710	0	179,1	4	0,0	15,0	12,0	26,0	28,0	0,47	0,75	332	282
187	1	362,0	1	2,23	0,00	0,00	0,00	357	733	705	0	191,5	4	0,0	17,0	12,0	28,0	30,0	0,15	0,78	313	222
188	1	360,2	1	2,11	1,08	0,00	0,00	403	779	726	0	288,5	4	0,0	20,0	14,0	27,0	28,0	0,65	0,82	338	255
189	1	360,5	1	1,79	1,08	0,00	0,00	409	690	782	0	294,5	4	0,0	18,0	15,0	27,0	28,0	0,45	1,00	383	296
190	1	364,3	1	1,83	1,08	0,00	0,00	406	693	779	0	301,4	4	0,0	18,0	15,0	27,0	28,0	0,42	0,83	349	269
191	1	360,2	1	1,82	1,08	0,00	0,00	377	713	777	0	250,6	4	0,0	20,0	17,0	29,0	29,0	0,27	0,28	331	239
192	1	358,2	1	2,13	1,08	0,00	0,00	392	790	740	0	262,2	4	0,0	20,0	10,0	26,0	28,5	0,42	0,83	368	335
193	1	358,3	1	1,81	1,08	0,00	0,00	386	704	778	0	275,2	4	0,0	18,0	15,0	26,0	27,0	0,48	0,65	436	341
194	1	368,3	1	1,80	1,08	0,00	0,00	374	761	733	0	300,7	4	0,0	21,0	18,0	30,0	30,0	0,47	0,53	353	261
195	1	369,7	1	1,90	0,00	0,00	0,00	379	742	780	0	194,5	4	0,0	17,0	14,0	25,0	26,0	0,45	0,52	305	258
196	1	361,8	1	1,87	0,00	0,00	0,00	374	716	796	0	186,3	4	0,0	16,0	14,0	28,0	29,0	0,57	0,70	389	302
197	1	361,2	1	1,81	1,08	0,00	0,00	384	697	780	0	298,3	4	0,0	19,8	16,0	28,6	31,0	0,40	0,85	352	289
198	1	362,6	1	2,21	1,08	0,00	0,00	372	710	782	0	307,0	4	0,0	20,0	17,0	26,0	29,0	0,48	1,05	295	229
199	1	472,3	1	2,80	1,08	0,00	0,00	360	660	757	0	313,4	4	0,0	20,0	17,0	28,0	28,0	0,28	0,30	428	262
200	1	479,5	1	3,01	1,08	0,00	0,00	354	639	758	0	328,5	4	0,0	20,0	15,0	26,0	28,8	0,20	0,27	359	210
201	1	359,0	1	1,79	1,08	0,00	0,00	412	716	780	0	259,1	4	0,0	20,0	16,0	29,8	30,0	0,30	0,38	341	286
202	1	359,5	1	1,80	1,08	0,00	0,00	433	697	782	0	266,8	4	0,0	20,0	16,0	31,5	32,4	0,27	0,38	355	221
203	1	359,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	386	781	720	0	248,5	4	0,0	15,0	14,0	28,0	28,0	0,40	0,73	373	316
204	1	359,3	1	2,25	0,00	0,00	0,00	363	770	725	0	236,0	4	0,0	18,0	14,0	29,0	29,0	0,43	0,50	372	283
205	1	360,7	1	2,22	0,00	0,00	0,00	383	756	720	0	278,8	4	0,0	18,0	15,0	27,0	28,0	0,40	1,03	403	326
206	1	362,8	1	1,81	1,08	0,00	0,00	400	705	780	0	306,6	4	0,0	21,0	18,0	27,0	27,0	0,30	0,37	286	195
207	1	358,7	1	1,80	1,08	0,00	0,00	393	703	783	0	269,1	4	0,0	19,0	17,0	25,0	28,0	0,42	0,47	347	255
208	1	370,7	1	1,82	1,08	0,00	0,00	404	743	758	0	257,2	4	0,0	20,0	17,0	27,0	28,0	0,43	0,48	288	188
209	1	369,2	1	1,82	1,08	0,00	0,00	404	744	758	0	256,0	4	0,0	19,0	17,0	27,0	28,0	0,47	0,50	309	218
210	1	369,3	1	1,89	1,08	0,00	0,00	357	744	714	0	248,7	4	0,0	20,0	17,0	27,0	28,0	0,30	0,88	293	202
211	1	369,5	1	1,90	1,08	0,00	0,00	356	748	719	0	253,5	4	0,0	23,0	17,0	28,0	29,0	0,75	0,78	332	258

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
212	1	370,5	1	1,88	0,00	0,00	0,00	367	717	783	0	205,4	4	0,0	18,0	17,0	27,0	28,0	1,30	1,88	298	226
213	1	370,5	1	1,87	0,91	0,00	0,00	511	1228	0	0	291,3	5	0,0	24,0	21,0	27,0	28,0	0,57	0,73	276	240
214	1	369,0	1	1,84	0,91	0,00	0,00	551	1222	0	0	248,3	5	0,0	23,0	22,0	27,0	26,0	0,45	0,58	249	211
215	1	369,5	1	1,83	0,91	0,00	0,00	526	1244	0	0	302,5	5	0,0	22,0	19,0	26,0	26,5	0,70	0,93	253	175
216	1	370,4	1	2,06	0,91	0,00	0,00	664	1136	0	0	302,7	5	20,0	23,0	20,0	28,0	30,0	0,58	1,33	233	176
217	1	368,8	1	1,83	0,91	0,00	0,00	600	1153	0	0	314,1	5	0,0	22,0	21,0	26,5	28,0	0,80	1,18	245	189
218	1	371,3	1	1,80	0,91	0,00	0,00	609	1162	0	0	305,9	5	20,0	22,0	21,0	30,0	30,0	0,60	0,77	258	174
219	1	371,0	1	1,84	0,91	0,00	0,00	637	1134	0	0	258,5	5	20,0	23,0	19,0	27,0	27,0	0,40	0,45	266	213
220	1	369,8	1	1,84	0,91	0,00	0,00	534	1212	0	0	271,6	5	20,0	23,0	21,0	28,0	28,0	0,92	1,23	273	239
221	1	369,5	1	1,86	0,91	0,00	0,00	597	1158	0	0	293,2	5	20,0	23,0	21,0	27,0	31,0	0,52	1,18	267	221
222	1	369,0	1	1,83	0,91	0,00	0,00	548	1228	0	0	299,2	5	20,0	23,0	21,0	27,0	28,0	0,57	0,73	244	191
223	1	369,7	1	1,85	0,91	0,00	0,00	592	1138	0	0	349,3	5	20,0	23,0	20,0	26,0	27,0	0,68	0,77	277	191
224	1	373,0	1	1,84	0,91	0,00	0,00	524	1218	0	0	271,2	5	20,0	22,0	21,0	27,0	28,0	0,25	0,75	216	178
225	1	306,0	1	1,51	0,91	0,00	0,00	402	804	754	0	279,4	5	0,0	17,0	14,0	29,0	30,0	0,32	0,37	225	161
226	1	306,3	1	1,46	0,91	0,00	0,00	411	791	751	0	281,2	5	0,0	18,0	16,0	26,0	27,0	0,37	0,55	253	172
227	1	303,7	1	1,41	0,91	0,00	0,00	386	798	748	0	300,1	5	0,0	20,0	17,0	28,0	30,0	0,38	1,53	238	167
228	1	370,0	1	1,87	1,08	0,00	0,00	215	808	836	0	269,0	5	0,0	18,0	13,0	29,0	30,0	0,35	0,48	342	317
229	1	370,0	1	1,89	1,08	0,00	0,00	288	762	808	0	272,8	5	0,0	16,0	13,0	27,0	28,2	0,38	0,45	339	269
230	1	370,0	1	1,89	1,08	0,00	0,00	194	824	837	0	251,6	5	0,0	13,0	14,0	28,0	29,2	0,45	1,00	337	309
231	1	370,0	1	1,90	1,08	0,00	0,00	205	813	834	0	209,1	5	0,0	17,0	14,0	27,0	28,2	0,47	1,67	315	311
232	1	370,0	1	1,88	1,08	0,00	0,00	197	818	838	0	236,6	5	0,0	19,0	16,0	28,0	29,0	0,67	0,82	338	273
233	1	362,0	1	1,89	1,08	0,00	0,00	189	807	837	0	293,4	5	0,0	18,0	16,5	27,0	28,0	0,63	0,77	369	343
234	1	370,0	1	1,92	1,08	0,00	0,00	379	720	786	0	261,1	5	0,0	17,5	15,0	26,0	27,0	0,57	0,62	309	209
235	1	370,0	1	1,89	1,08	0,00	0,00	288	761	812	0	269,9	5	0,0	16,0	13,0	27,0	28,0	0,55	0,85	296	217
236	1	370,0	1	1,75	1,08	0,00	0,00	281	780	809	0	266,1	5	0,0	18,0	14,0	26,0	27,0	0,40	0,57	360	326
237	1	370,0	1	1,72	1,08	0,00	0,00	199	831	832	0	268,0	5	0,0	18,0	16,0	27,0	29,0	0,52	0,68	316	295
238	1	371,0	1	1,90	1,08	0,00	0,00	198	839	838	0	281,2	5	0,0	19,0	14,0	26,0	28,0	0,35	0,53	356	296
239	1	369,8	1	1,91	1,08	0,00	0,00	310	706	835	0	259,0	5	0,0	17,0	15,0	27,0	28,0	0,47	0,57	366	264
240	1	370,0	1	1,91	1,08	0,00	0,00	299	802	806	0	294,0	5	0,0	19,0	17,0	27,0	28,0	0,42	0,45	314	221
241	1	370,3	1	2,22	1,08	0,00	0,00	431	832	672	0	228,2	5	0,0	16,0	8,5	27,0	27,0	0,20	0,87	380	311
242	1	371,0	1	2,20	1,08	0,00	0,00	426	842	669	0	277,3	5	0,0	19,5	12,0	31,0	31,0	0,45	0,58	411	360
243	1	370,0	1	2,22	1,08	0,00	0,00	378	815	674	0	252,5	5	0,0	18,5	11,5	27,5	28,0	0,42	0,58	313	219
244	1	372,3	1	2,11	1,08	0,00	0,00	303	777	834	0	267,3	5	0,0	20,0	11,0	30,0	30,0	0,33	0,65	346	256
245	1	373,4	1	2,22	1,08	0,00	0,00	377	833	671	0	305,2	5	0,0	18,5	12,0	27,0	28,6	0,38	1,02	349	279
246	1	396,2	1	2,00	1,19	0,00	0,00	388	671	809	0	236,7	5	0,0	18,0	16,0	27,0	27,0	0,27	0,35	353	258
247	1	394,8	1	2,38	1,19	0,00	0,00	363	683	798	0	290,3	5	0,0	20,0	15,0	28,0	29,0	0,50	0,83	341	322
248	1	396,0	1	2,42	1,19	0,00	0,00	362	676	802	0	286,6	5	0,0	20,0	16,0	26,0	28,0	0,32	0,42	366	251
249	1	396,0	1	2,00	1,19	0,00	0,00	367	676	799	0	243,6	5	0,0	19,0	17,0	27,0	27,0	0,28	0,43	365	279
250	1	397,8	1	2,01	1,19	0,00	0,00	367	661	797	0	241,4	5	0,0	18,0	11,0	26,0	26,0	0,38	0,82	349	317
251	1	371,0	1	1,85	0,91	0,00	0,00	620	1155	0	0	295,7	6	20,0	23,0	22,0	25,0	26,0	0,63	0,88	287	176
252	1	369,2	1	1,85	1,08	0,00	0,00	588	1152	0	0	291,3	6	20,0	23,0	22,0	28,0	28,0	0,23	0,43	322	225
253	1	371,5	1	1,87	1,08	0,00	0,00	635	1145	0	0	373,8	6	20,0	23,0	17,0	28,0	28,0	0,30	0,80	240	122
254	1	369,6	1	1,81	1,08	0,00	0,00	654	1134	0	0	286,5	6	20,0	22,0	21,0	27,0	28,2	1,17	1,42	289	210
255	1	373,8	1	1,80	1,08	0,00	0,00	633	1143	0	0	303,2	6	20,0	23,0	21,0	27,0	28,2	0,35	0,60	255	190
256	1	372,0	1	1,84	1,08	0,00	0,00	628	1157	0	0	316,2	6	20,0	23,5	20,5	26,0	27,0	0,65	0,78	259	200
257	1	374,0	1	1,84	1,08	0,00	0,00	601	1145	0	0	303,3	6	0,0	24,0	23,0	25,0	26,0	0,68	1,10	267	228
258	1	285,8	1	1,35	0,00	0,00	0,00	0	1109	420	419	265,1	6	0,0	20,0	14,0	28,0	29,0	0,33	0,38	246	180
259	1	379,0	1	1,86	1,08	0,00	0,00	553	1242	0	0	353,6	6	0,0	23,0	20,0	27,0	27,5	0,47	0,75	272	191
260	1	383,3	1	1,74	1,08	0,00	0,00	502	1250	0	0	325,1	6	0,0	23,0	22,0	26,0	27,0	0,38	0,72	259	191
261	1	378,5	1	1,86	1,08	0,00	0,00	0	1212	0	494	275,5	6	0,0	23,0	21,0	26,0	27,0	0,72	0,93	294	213
262	1	370,0	1	1,89	1,08	0,00	0,00	297	727	0	0	233,0	6	0,0	22,0	18,0	27,0	29,0	0,52	0,60	354	233
263	1	368,0	1	1,91	1,08	0,00	0,00	291	728	840	0	248,7	6	0,0	21,0	18,0	28,0	29,0	0,47	0,70	392	287
264	1	370,7	1	1,90	1,08	0,00	0,00	303	700	837	0	234,0	6	0,0	15,0	8,0	26,0	26,6	0,32	1,40	349	283
265	1	371,5	1	1,90	1,08	0,00	0,00	298	705	833	0	213,2	6	0,0	14,0	10,0	28,0	28,0	0,53	1,38	349	299

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
266	1	370,0	1	1,91	1,08	0,00	0,00	294	722	836	0	226,8	6	0,0	16,0	13,0	27,0	27,4	0,40	0,55	396	310
267	1	372,5	1	1,90	1,08	0,00	0,00	380	709	810	0	234,4	6	0,0	15,0	12,0	25,5	27,0	0,28	1,00	390	290
268	1	369,2	1	1,89	1,08	0,00	0,00	390	691	810	0	234,7	6	0,0	14,0	10,0	26,0	27,0	0,48	0,52	378	323
269	1	368,7	1	1,90	1,08	0,00	0,00	388	702	815	0	244,1	6	0,0	15,5	12,0	28,0	29,0	0,50	0,55	458	357
270	1	390,7	1	1,88	1,08	0,00	0,00	200	859	808	0	285,4	6	0,0	19,0	16,0	26,0	27,0	0,40	0,47	318	272
271	1	391,7	1	1,72	1,08	0,00	0,00	189	859	807	0	285,9	6	0,0	19,5	15,0	26,0	28,0	0,33	0,37	353	256
272	1	369,3	1	1,90	1,08	0,00	0,00	195	879	819	0	238,8	6	0,0	18,0	14,0	27,0	28,0	0,38	0,55	344	284
273	1	372,8	1	1,91	1,08	0,00	0,00	198	872	822	0	260,7	6	0,0	20,0	17,0	26,0	27,0	0,33	0,42	391	311
274	1	370,0	1	1,91	1,08	0,00	0,00	366	822	720	0	268,3	6	0,0	16,0	12,0	25,0	26,3	0,47	0,92	380	351
275	1	370,5	2	1,91	1,08	0,00	0,00	377	834	718	0	304,1	6	0,0	16,0	10,0	25,0	27,0	0,50	0,68	337	314
276	1	371,3	1	1,86	1,08	0,00	0,00	204	919	822	0	266,9	6	0,0	20,0	17,0	26,0	27,0	0,28	0,37	348	275
277	1	411,8	1	2,70	1,08	0,00	0,00	450	773	613	0	266,8	6	0,0	21,0	20,0	26,7	28,0	0,28	0,50	445	333
278	1	410,2	1	2,72	1,08	0,00	0,00	464	795	613	0	270,6	6	0,0	22,0	19,0	24,3	27,8	0,45	0,70	347	291
279	1	413,2	1	2,70	1,08	0,00	0,00	458	767	612	0	292,9	6	0,0	24,0	21,0	25,0	26,0	0,52	0,68	346	293
280	1	371,0	1	1,89	1,08	0,00	0,00	384	778	711	0	298,1	6	0,0	19,5	16,0	30,0	31,0	0,40	0,62	286	252
281	1	372,7	1	1,61	1,08	0,00	0,00	369	772	712	0	331,8	6	0,0	21,0	17,0	26,0	26,8	0,45	0,53	362	286
282	1	372,2	1	1,91	1,08	0,00	0,00	194	892	818	0	258,6	6	0,0	19,5	14,0	28,0	28,2	0,55	0,65	288	240
283	1	406,5	1	2,59	1,08	0,00	0,00	433	788	660	0	232,2	6	0,0	20,0	16,0	26,0	27,0	0,53	1,03	415	352
284	1	409,5	1	2,75	1,08	0,00	0,00	410	760	654	0	284,6	6	0,0	21,0	18,0	27,0	28,0	0,27	0,52	447	381
285	1	412,5	1	2,57	1,08	0,00	0,00	404	799	654	0	258,6	6	0,0	20,0	19,0	27,0	28,0	0,33	0,60	375	262
286	1	413,5	1	2,57	1,08	0,00	0,00	416	759	650	0	251,7	6	0,0	19,0	18,0	24,0	26,4	0,27	0,35	423	345
287	1	418,0	1	2,63	1,08	0,00	0,00	408	726	648	0	241,2	6	0,0	21,0	19,0	26,0	27,0	0,48	0,57	360	310
288	1	411,5	1	2,71	1,08	0,00	0,00	478	800	609	0	278,6	6	0,0	21,0	19,0	25,0	27,0	0,47	0,55	359	348
289	1	410,5	1	2,70	1,08	0,00	0,00	458	780	614	0	302,1	6	0,0	22,0	20,0	26,0	27,0	0,20	0,63	412	369
290	1	408,0	1	2,71	1,08	0,00	0,00	443	751	617	0	294,4	6	0,0	20,0	18,0	26,0	25,0	0,20	0,45	355	259
291	1	506,0	1	2,74	1,08	0,00	0,00	451	746	615	0	257,3	6	0,0	21,5	20,0	27,2	28,0	0,22	0,30	353	321
292	1	412,0	1	3,09	1,08	0,00	0,00	427	766	617	0	234,0	6	0,0	22,0	20,0	28,0	28,3	0,25	0,33	355	241
293	1	407,5	1	2,67	1,08	0,00	0,00	447	764	611	0	290,2	6	0,0	23,0	18,0	26,0	27,0	0,30	0,38	373	246
294	1	288,7	1	1,45	0,60	0,00	0,00	421	782	757	0	293,4	7	0,0	22,0	21,0	24,7	26,0	0,47	0,88	210	140
295	1	371,8	1	1,71	0,00	0,00	0,00	372	662	818	0	303,2	7	0,0	20,0	15,0	24,0	27,0	0,30	0,38	363	296
296	1	370,2	1	1,89	0,00	0,00	0,00	375	673	817	0	281,9	7	0,0	19,5	16,0	26,5	27,4	0,33	0,38	369	298
297	1	368,3	1	2,21	0,00	0,00	0,00	192	861	802	0	252,1	7	0,0	17,0	14,0	26,5	27,0	0,58	0,68	366	273
298	1	369,7	1	2,20	0,00	0,00	0,00	198	863	803	0	237,0	7	0,0	19,0	17,0	25,8	27,0	0,47	0,62	353	326
299	1	372,3	1	1,71	0,00	0,00	0,00	376	668	815	0	273,0	7	0,0	20,0	16,0	26,0	27,0	0,30	0,47	379	286
300	1	370,7	1	1,90	0,00	0,00	0,00	381	702	816	0	285,6	7	0,0	17,0	14,0	30,0	30,0	0,32	0,42	340	286
301	1	369,3	1	1,88	0,00	0,00	0,00	402	725	817	0	290,3	7	0,0	16,0	13,0	29,0	29,0	0,45	0,50	382	302
302	1	370,5	1	1,90	0,00	0,00	0,00	389	680	818	0	292,6	7	0,0	18,0	15,0	27,5	28,0	0,50	0,80	297	237
303	1	369,2	1	1,89	0,00	0,00	0,00	395	671	817	0	282,8	7	0,0	18,5	15,0	27,0	28,0	0,58	0,90	320	250
304	1	370,3	1	3,34	1,08	0,00	0,00	198	874	820	0	258,1	6	0,0	19,0	17,0	27,0	28,0	0,58	0,72	321	272
305	1	369,7	1	1,75	1,08	0,00	0,00	194	877	819	0	253,5	6	0,0	21,0	18,0	26,0	27,0	0,37	0,40	364	300
306	1	370,0	1	1,68	0,00	0,00	0,00	369	662	818	0	288,0	7	0,0	18,0	16,0	26,0	28,0	0,33	0,45	329	243
307	1	370,7	1	1,91	0,00	0,00	0,00	423	690	815	0	283,5	7	0,0	16,0	14,5	29,0	28,0	0,35	0,57	288	234
308	1	372,8	1	1,87	0,00	0,00	0,00	377	669	818	0	273,9	7	0,0	18,5	16,0	27,0	28,0	0,33	0,57	343	266
309	1	368,5	1	2,20	0,00	0,00	0,00	277	784	818	0	264,6	7	0,0	19,0	16,0	26,0	27,0	0,28	0,35	324	269
310	1	369,5	1	2,21	0,00	0,00	0,00	280	761	816	0	251,6	7	0,0	18,0	15,0	26,0	27,5	0,35	1,43	332	274
311	1	310,5	1	2,04	0,75	0,00	0,00	326	561	459	0	186,3	7	0,0	23,0	21,0	26,5	27,0	0,50	0,92	369	282
312	1	402,0	1	2,40	0,80	0,00	0,00	374	748	697	0	240,9	7	0,0	22,0	20,0	27,0	28,0	0,30	0,45	376	305
313	1	407,5	1	2,40	0,80	0,00	0,00	360	750	703	0	225,8	7	0,0	22,0	20,0	25,0	26,0	0,38	0,93	356	299
314	1	338,3	1	2,51	0,83	0,00	0,00	388	783	733	0	276,3	7	0,0	23,0	22,0	27,0	27,0	0,35	0,48	382	295
315	1	369,8	2	1,46	1,10	0,00	0,00	639	1214	0	0	304,2	8	0,0	23,0	21,0	27,0	29,0	0,82	0,90	244	213
316	1	369,7	2	2,84	1,10	0,00	0,00	592	1217	0	0	284,1	8	0,0	24,0	21,0	25,0	26,0	0,47	0,82	253	179
317	1	370,8	2	2,84	1,10	0,00	0,00	595	1212	0	0	263,2	8	0,0	24,0	21,0	25,0	26,0	0,25	0,67	267	231
318	1	380,7	2	2,81	1,10	0,00	0,00	601	1217	0	0	295,8	8	0,0	24,0	21,5	26,3	28,0	0,45	0,83	352	282
319	1	380,7	1	2,78	1,10	0,00	0,00	604	1211	0	0	257,5	8	0,0	24,0	22,0	29,0	30,0	0,35	0,52	339	279

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
320	1	369,5	1	1,95	1,10	0,00	0,00	610	1242	0	0	342,1	8	0,0	24,0	22,0	27,0	29,0	0,43	0,58	259	206
321	1	449,0	2	2,84	0,00	0,00	0,00	171	773	778	0	265,3	8	0,0	18,0	16,0	28,6	28,6	0,53	0,63	260	200
322	1	450,2	2	3,02	0,00	0,00	0,00	192	788	777	0	242,7	8	0,0	19,0	17,0	27,2	28,0	1,02	1,05	256	196
323	1	385,5	1	2,28	0,00	0,00	0,00	197	819	831	0	279,7	8	0,0	20,0	18,0	28,5	29,0	0,57	0,60	338	277
324	1	371,2	2	1,88	0,00	0,00	0,00	200	983	738	0	241,5	8	0,0	19,0	18,0	28,0	29,1	0,57	0,93	348	291
325	1	379,4	2	2,27	0,00	0,00	0,00	308	925	353	336	251,8	8	0,0	19,0	15,0	25,0	28,0	0,42	0,50	331	299
326	1	381,0	2	2,27	0,00	0,00	0,00	286	965	366	335	254,9	8	0,0	20,0	16,0	27,0	28,0	0,30	0,33	447	339
327	1	371,0	1	2,39	0,00	0,00	0,00	172	868	800	0	256,8	8	0,0	17,0	14,0	27,0	28,0	0,05	0,17	355	294
328	1	372,0	1	2,79	0,00	0,00	0,00	1046	0	801	0	202,3	8	0,0	15,0	11,0	27,0	29,0	0,67	0,75	350	359
329	1	374,3	1	2,26	0,00	0,00	0,00	172	851	803	0	211,2	8	0,0	18,0	14,0	29,0	29,2	0,27	1,93	348	317
330	1	370,8	2	1,75	0,00	0,00	0,00	0	1096	781	0	261,1	8	0,0	18,0	12,0	30,0	30,5	0,28	0,37	360	296
331	1	370,3	2	1,87	0,00	0,00	0,00	0	1080	783	0	256,1	8	0,0	15,0	14,0	26,2	26,0	0,40	0,97	349	286
332	1	345,8	2	1,68	1,00	0,00	0,00	0	1071	406	0	222,0	8	0,0	20,0	18,0	28,0	29,0	0,50	0,83	347	278
333	1	450,0	2	2,66	0,00	0,00	0,00	192	864	353	355	211,0	8	0,0	21,0	18,0	29,0	30,0	0,32	0,40	285	232
334	1	369,7	1	2,27	0,00	0,00	0,00	192	993	370	377	167,0	8	0,0	20,0	18,0	27,0	28,0	0,37	0,48	405	331
335	1	410,0	1	1,90	2,00	0,00	0,00	198	1203	481	0	289,7	8	0,0	18,0	10,0	24,0	26,0	0,62	1,03	385	357
336	1	312,3	2	1,01	1,00	0,00	0,00	0	982	352	0	231,7	8	0,0	17,0	16,0	27,0	29,0	0,22	0,30	351	291
337	1	371,3	2	0,00	1,00	0,00	0,00	0	1116	406	402	262,7	8	0,0	18,5	17,0	27,0	30,0	0,37	0,43	321	225
338	1	346,3	1	1,98	1,00	0,00	0,00	1082	0	414	411	215,1	8	0,0	23,0	20,0	28,0	30,0	0,42	0,50	363	300
339	1	377,0	1	2,46	0,00	0,00	0,00	1059	0	803	0	205,3	8	0,0	21,0	18,0	29,6	30,0	0,30	0,33	324	295
340	1	371,5	1	2,42	0,00	0,00	0,00	186	874	806	0	231,4	8	0,0	18,0	17,0	29,0	30,0	0,35	0,47	440	354
341	1	370,5	1	2,49	0,00	0,00	0,00	186	852	802	0	239,2	8	0,0	21,0	20,0	30,0	32,0	0,45	0,50	368	284
342	1	372,2	1	2,47	0,00	0,00	0,00	182	874	800	0	239,6	8	0,0	21,0	18,0	31,0	33,2	0,38	0,55	329	294
343	1	370,0	2	1,86	0,00	0,00	0,00	199	999	738	0	264,6	8	0,0	20,0	16,0	28,0	29,5	0,57	0,73	354	360
344	1	370,5	1	2,21	0,00	0,00	0,00	248	898	714	0	218,0	8	0,0	18,0	15,0	26,0	28,0	0,55	0,63	313	267
345	1	374,5	1	2,18	0,00	0,00	0,00	240	908	712	0	210,8	8	0,0	15,0	13,0	26,0	26,0	0,42	0,53	337	331
346	1	375,0	1	2,20	0,00	0,00	0,00	260	902	716	0	215,8	8	0,0	16,5	12,0	28,0	29,0	0,33	0,50	404	347
347	1	370,3	1	2,20	0,00	0,00	0,00	240	908	714	0	213,8	8	0,0	17,0	15,0	25,5	26,7	0,40	0,78	345	299
348	1	368,7	1	2,45	0,00	0,00	0,00	256	900	713	0	232,0	8	0,0	17,0	11,0	27,0	28,0	0,33	0,37	373	300
349	1	368,7	1	2,07	0,00	0,00	0,00	247	898	714	0	262,3	8	0,0	17,0	13,0	26,0	28,0	0,32	1,20	332	281
350	1	457,7	2	2,97	0,00	0,00	0,00	240	899	714	0	287,2	8	0,0	16,0	12,0	26,0	27,0	0,47	0,53	308	219
351	1	370,0	1	1,15	0,00	0,00	0,00	1061	0	800	0	233,2	8	0,0	20,0	18,0	26,5	28,0	0,58	0,92	348	278
352	1	371,3	1	1,14	0,00	0,00	0,00	1129	0	822	0	241,5	8	0,0	19,0	17,0	24,0	27,0	0,32	0,68	338	286
353	1	369,0	1	1,88	0,00	0,00	0,00	1054	0	803	0	222,0	8	0,0	17,0	15,0	27,0	29,0	0,25	0,38	448	351
354	1	369,3	2	1,88	0,00	0,00	0,00	207	985	744	0	283,0	8	0,0	15,0	8,0	25,0	26,0	0,28	1,22	351	322
355	1	400,2	1	1,87	0,00	0,00	0,00	186	974	741	0	298,7	8	0,0	16,0	13,0	26,0	26,0	0,35	0,70	363	141
356	1	419,7	1	1,85	0,00	0,00	0,00	206	967	725	0	308,0	8	0,0	15,0	12,0	24,0	25,0	0,33	0,60	325	159
357	1	370,3	2	1,82	0,00	0,00	0,00	186	979	729	0	281,0	8	0,0	15,0	12,0	27,0	27,4	0,23	0,50	360	342
358	1	369,2	2	1,86	0,00	0,00	0,00	185	991	733	0	276,1	8	0,0	16,0	13,5	25,4	26,0	0,27	0,48	354	331
359	1	368,7	1	1,84	0,00	0,00	0,00	181	996	728	0	248,1	8	0,0	15,0	13,0	26,9	26,0	0,22	0,27	344	314
360	1	369,7	1	1,85	0,00	0,00	0,00	186	1008	670	0	247,2	8	0,0	16,0	14,0	28,0	29,0	0,32	0,65	350	309
361	1	369,5	1	1,85	0,00	0,00	0,00	186	1019	670	0	261,2	8	0,0	16,0	13,0	27,0	28,0	0,40	0,90	341	307
362	1	370,5	1	1,85	0,00	0,00	0,00	207	1085	588	0	250,2	8	0,0	15,0	13,0	25,0	26,0	0,33	0,93	355	302
363	1	448,8	2	2,72	0,00	0,00	0,00	169	866	352	357	192,8	8	0,0	19,0	16,0	25,0	28,0	0,37	0,42	347	289
364	1	395,3	2	1,93	2,00	0,00	0,00	0	1067	812	0	206,4	8	0,0	15,0	13,0	27,0	27,0	0,60	0,88	410	310
365	1	394,2	2	1,92	2,00	0,00	0,00	0	1037	861	0	292,7	8	0,0	16,0	12,0	26,3	26,5	0,30	0,52	340	341
366	1	420,8	1	1,91	2,00	0,00	0,00	0	1019	860	0	319,1	8	0,0	15,0	12,0	25,0	27,0	0,33	0,67	349	343
367	1	421,3	1	1,89	2,00	0,00	0,00	0	1096	809	0	313,2	8	0,0	18,0	14,0	25,0	26,0	0,43	0,80	408	331
368	1	380,2	1	2,35	0,00	0,00	0,00	281	943	334	335	220,0	9	0,0	20,0	8,0	26,1	27,3	0,48	0,70	342	346
369	1	380,0	1	2,30	0,00	0,00	0,00	183	951	382	386	206,4	9	0,0	23,0	20,0	27,0	29,0	0,43	0,55	404	378
370	1	382,7	1	2,29	0,00	0,00	0,00	196	923	384	385	195,5	9	0,0	23,0	19,0	26,3	27,0	0,52	0,58	347	304
371	1	378,8	1	2,27	0,00	0,00	0,00	193	933	386	385	204,0	9	0,0	24,0	18,0	25,2	27,0	0,52	1,50	347	310
372	1	381,8	1	1,89	0,00	0,00	0,00	193	924	386	392	217,5	9	0,0	23,0	19,0	25,5	27,0	0,42	0,47	333	316
373	1	381,5	2	1,91	0,00	0,00	0,00	193	756	545	0	197,3	9	0,0	23,0	19,0	26,5	28,0	0,60	0,63	363	367

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
374	1	379,0	1	1,96	0,00	0,00	0,00	192	757	553	0	194,6	9	0,0	20,0	17,0	26,5	29,0	0,47	0,53	372	343
375	1	380,7	1	2,16	0,00	0,00	0,00	217	892	392	395	200,9	9	0,0	19,5	15,0	25,0	28,0	1,38	1,52	353	315
376	1	380,3	1	2,15	0,00	0,00	0,00	203	900	389	394	205,8	9	0,0	20,0	17,0	26,0	27,5	1,32	1,42	386	307
377	1	381,5	2	1,99	0,00	0,00	0,00	188	922	391	396	239,2	9	0,0	19,5	17,0	25,3	27,4	0,53	0,58	446	347
378	1	380,7	1	2,00	0,00	0,00	0,00	188	904	392	395	232,5	9	0,0	22,0	20,0	26,0	26,3	0,78	0,83	427	365
379	1	382,0	1	2,02	0,00	0,00	0,00	197	912	392	393	205,3	9	0,0	19,0	16,0	26,0	28,1	0,48	0,55	352	330
380	1	379,2	2	2,00	0,00	0,00	0,00	193	899	391	393	203,9	9	0,0	20,0	18,0	25,4	27,0	0,72	0,75	442	351
381	1	378,7	2	1,98	0,00	0,00	0,00	186	894	417	394	199,6	9	0,0	20,0	18,0	25,3	27,5	0,75	0,80	368	355
382	1	382,2	2	1,99	0,00	0,00	0,00	198	901	424	389	196,4	9	0,0	20,5	18,0	24,6	26,0	0,32	0,35	499	407
383	1	380,0	2	1,95	1,00	0,00	0,00	189	901	391	394	238,8	9	0,0	21,0	19,0	25,5	28,0	0,70	0,72	347	339
384	1	383,0	2	1,93	1,00	0,00	0,00	194	898	390	395	230,1	9	0,0	22,0	19,0	27,0	28,4	0,35	0,38	354	343
385	1	382,8	1	2,32	0,00	0,00	0,00	193	954	398	386	216,5	9	0,0	21,0	18,0	29,8	29,5	0,35	0,43	346	326
386	1	390,3	1	2,16	0,00	0,00	0,00	204	951	383	385	213,7	9	0,0	19,0	18,0	29,0	30,0	0,25	0,42	399	312
387	1	420,7	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0	991	382	394	236,6	9	0,0	19,5	17,0	27,0	28,0	0,48	0,58	346	330
388	1	371,0	1	2,29	0,00	0,00	0,00	387	735	836	0	167,7	9	0,0	18,0	17,0	27,0	28,0	0,33	0,57	504	431
389	1	346,5	1	2,10	0,00	0,00	0,00	302	766	470	345	203,5	9	0,0	15,0	8,0	29,5	31,0	0,43	0,68	444	368
390	1	369,5	1	2,18	0,00	0,00	0,00	188	957	402	391	217,6	9	0,0	17,0	16,0	27,0	27,0	0,53	1,30	364	325
391	1	401,3	1	3,57	1,00	0,00	0,00	211	1057	769	0	208,7	9	0,0	25,0	23,0	26,0	27,0	0,35	0,57	407	338
392	1	375,5	1	2,33	0,00	0,00	0,00	393	713	414	414	189,0	9	0,0	18,0	14,0	27,0	29,0	0,38	0,80	353	349
393	1	375,0	1	2,29	0,00	0,00	0,00	202	870	428	426	163,3	9	0,0	20,0	15,0	27,0	28,0	0,32	0,73	486	422
394	1	376,3	1	2,29	0,00	0,00	0,00	204	867	427	429	179,2	9	0,0	19,0	16,0	27,0	28,0	0,33	0,63	342	345
395	1	371,3	2	1,86	0,00	0,00	0,00	196	1009	363	373	190,1	9	0,0	15,0	13,0	26,4	27,0	0,37	0,43	353	296
396	1	369,4	1	1,88	0,00	0,00	0,00	199	923	400	396	217,5	9	0,0	18,0	14,0	26,9	27,5	0,52	0,68	375	302
397	1	370,0	2	1,81	1,77	0,00	0,00	221	953	384	393	231,7	9	0,0	18,0	16,0	26,0	27,5	0,48	0,68	397	319
398	1	371,8	1	1,67	1,77	0,00	0,00	192	933	783	0	250,8	9	0,0	18,0	16,0	29,0	30,0	0,58	0,72	377	285
399	1	339,5	1	1,48	0,00	0,00	0,00	1100	0	474	484	270,1	9	0,0	20,0	16,0	26,0	27,0	0,38	0,65	351	255
400	1	370,2	1	2,30	0,00	0,00	0,00	183	925	382	386	200,3	9	0,0	20,0	18,0	26,0	27,0	0,22	0,27	406	321
401	1	371,0	1	2,23	0,00	0,00	0,00	188	954	385	391	206,2	9	0,0	20,0	16,0	27,0	28,0	0,35	0,40	349	317
402	1	400,8	1	3,18	1,00	0,00	0,00	0	1071	416	424	165,5	9	0,0	19,5	16,0	28,4	29,5	0,50	0,70	416	335
403	1	409,0	1	2,85	1,10	0,00	0,00	199	978	743	0	181,2	9	0,0	19,0	16,0	26,5	27,0	0,42	0,50	453	365
404	1	403,0	1	2,88	1,10	0,00	0,00	229	971	739	0	181,3	9	0,0	21,0	17,0	29,0	31,0	0,43	0,52	469	380
405	1	299,5	2	1,84	0,75	0,00	0,00	146	693	285	287	150,8	9	0,0	16,0	14,0	26,5	28,0	0,67	0,75	462	353
406	1	370,2	2	1,81	1,77	0,00	0,00	204	941	429	398	209,7	9	0,0	24,0	20,0	26,2	27,0	0,68	0,75	350	243
407	1	405,0	2	2,96	1,10	0,00	0,00	211	991	747	0	188,5	9	0,0	18,0	16,0	28,0	29,1	0,47	0,60	443	303
408	1	405,0	1	2,89	1,10	0,00	0,00	195	965	741	0	195,0	9	0,0	23,0	21,0	24,0	27,0	0,55	1,05	353	330
409	1	396,0	1	3,61	0,00	0,00	0,00	188	986	754	0	206,5	9	0,0	26,0	21,0	29,0	30,0	0,32	0,57	403	335
410	1	409,0	1	3,21	1,00	0,00	0,00	199	831	920	0	179,5	9	0,0	20,0	18,0	27,0	28,0	0,47	0,52	347	345
411	1	406,3	1	2,91	1,10	0,00	0,00	196	978	740	0	218,7	9	0,0	18,0	16,0	28,0	29,0	0,38	0,43	457	390
412	1	399,8	2	2,76	1,00	0,00	0,00	182	954	380	383	200,9	9	0,0	22,0	19,0	27,0	28,0	0,18	0,37	390	342
413	1	401,0	1	2,77	1,00	0,00	0,00	192	941	378	386	185,5	9	0,0	22,0	19,0	26,4	28,0	0,22	0,40	349	350
414	1	399,8	1	2,74	1,00	0,00	0,00	180	965	382	385	184,3	9	0,0	22,0	17,0	26,5	28,0	0,27	0,83	462	366
415	1	400,2	1	2,77	1,00	0,00	0,00	186	954	386	385	182,2	9	0,0	22,0	21,0	30,5	31,0	0,33	0,92	391	321
416	1	398,3	2	2,31	1,10	0,00	0,00	898	1046	0	0	249,7	10	0,0	23,0	21,0	27,0	28,0	0,37	0,58	349	358
417	1	371,0	2	1,83	1,10	0,00	0,00	642	1122	0	0	241,6	10	0,0	23,0	21,0	25,0	26,0	0,55	0,92	305	214
418	1	370,4	2	1,85	1,10	0,00	0,00	597	1128	0	0	219,3	10	0,0	22,0	21,0	26,0	26,5	0,65	1,05	293	234
419	1	372,0	2	1,80	1,10	0,00	0,00	629	1137	0	0	231,5	10	0,0	24,0	21,0	27,0	29,0	0,48	0,60	374	296
420	1	320,3	1	1,53	1,60	0,00	0,00	194	920	387	389	179,2	10	0,0	20,0	18,0	26,2	28,0	0,43	0,62	254	203
421	1	322,2	1	1,53	1,60	0,00	0,00	248	926	351	366	223,3	10	0,0	21,0	16,0	28,0	29,6	0,25	0,37	367	300
422	1	322,7	1	1,56	1,60	0,00	0,00	243	921	351	366	224,2	10	0,0	20,0	16,0	26,0	28,9	0,30	0,48	303	225
423	1	379,8	2	1,96	0,00	0,00	0,00	199	920	390	393	188,1	10	0,0	21,0	13,0	27,0	28,0	1,27	1,35	361	308
424	1	380,5	2	2,02	0,00	0,00	0,00	194	943	386	398	199,2	10	0,0	21,0	19,0	27,0	28,0	0,80	0,87	327	284
425	1	379,8	2	2,07	0,00	0,00	0,00	208	940	387	399	155,3	10	0,0	20,0	18,0	26,0	28,0	0,58	0,67	411	352
426	1	379,5	1	2,15	0,00	0,00	0,00	191	924	386	393	205,2	10	0,0	23,5	19,0	26,0	27,0	0,68	0,73	392	320
427	1	378,0	1	2,10	0,00	0,00	0,00	208	929	387	397	203,8	10	0,0	22,5	19,0	25,5	26,3	0,90	0,98	462	372

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
428	1	381,7	2	2,28	0,00	0,00	0,00	289	861	371	374	212,9	10	0,0	19,0	17,0	24,4	26,2	0,40	0,45	360	355
429	1	378,2	2	1,86	0,00	0,00	0,00	401	778	452	250	221,1	10	0,0	22,0	19,5	28,1	30,3	0,25	0,37	331	243
430	1	377,5	1	1,95	0,00	0,00	0,00	373	770	454	249	208,4	10	0,0	20,5	18,0	26,9	28,2	1,07	1,13	346	274
431	1	366,8	2	1,85	1,00	0,00	0,00	391	771	395	399	231,8	10	0,0	18,0	20,0	26,0	26,5	0,38	0,63	316	299
432	1	368,3	2	1,85	1,00	0,00	0,00	392	750	395	401	202,2	10	0,0	16,0	13,0	27,0	27,5	0,38	0,43	377	306
433	1	401,7	1	2,22	0,00	0,00	0,00	506	695	374	354	213,5	10	0,0	16,0	14,0	27,0	28,2	0,35	0,77	351	350
434	1	402,3	1	2,18	0,00	0,00	0,00	503	683	372	355	212,0	10	0,0	17,0	15,0	28,0	29,2	0,28	0,45	515	373
435	1	422,3	1	2,41	0,00	0,00	0,00	507	693	372	354	207,0	10	0,0	19,0	15,0	27,0	28,9	0,35	0,63	528	365
436	1	401,0	1	2,41	0,00	0,00	0,00	532	725	375	354	239,1	10	0,0	19,5	14,0	26,0	26,5	0,27	0,48	355	337
437	1	398,3	1	2,38	0,00	0,00	0,00	515	683	373	355	219,4	10	0,0	21,0	12,0	30,0	31,0	0,28	0,37	359	369
438	1	400,3	1	2,36	0,00	0,00	0,00	503	694	373	355	229,3	10	0,0	18,0	16,0	27,1	28,5	0,30	0,48	358	348
439	1	402,8	1	2,37	0,00	0,00	0,00	504	685	373	354	238,9	10	0,0	22,0	16,5	27,0	28,3	0,33	0,40	354	351
440	1	400,2	1	2,36	0,00	0,00	0,00	507	687	371	355	190,3	10	0,0	22,0	18,0	26,0	28,5	0,30	0,37	485	379
441	1	341,8	1	1,46	1,00	0,00	0,00	998	0	479	481	177,7	10	0,0	21,0	16,0	27,0	28,0	0,40	0,48	426	330
442	1	400,7	1	2,77	0,00	0,00	0,00	380	860	609	0	234,9	10	0,0	24,0	21,0	27,0	28,0	0,43	0,48	384	348
443	1	405,5	2	3,28	1,08	0,00	0,00	394	684	837	0	198,8	10	0,0	25,0	23,0	27,5	28,0	0,40	0,48	400	337
444	1	398,0	2	2,76	1,08	0,00	0,00	175	938	378	0	186,1	10	0,0	25,0	24,0	26,0	26,5	0,47	1,17	506	450
445	1	415,0	1	3,07	1,08	0,00	0,00	395	682	824	0	191,4	10	0,0	23,0	21,0	27,0	28,5	0,45	0,77	544	425
446	1	409,0	1	2,80	1,33	0,00	0,00	385	675	826	0	171,1	10	0,0	20,0	18,0	25,0	26,0	0,43	0,95	447	376
447	1	409,2	2	2,84	1,08	0,00	0,00	363	679	878	0	182,1	10	0,0	24,0	20,0	26,0	28,5	0,35	0,43	416	341
448	1	408,0	2	2,27	1,08	0,00	0,00	381	709	214	540	189,6	10	0,0	18,0	16,0	29,5	30,0	0,50	0,75	371	333
449	1	369,0	1	1,93	0,00	0,00	0,00	363	757	361	361	235,4	11	0,0	18,0	16,0	26,8	28,9	0,27	0,32	348	278
450	1	369,8	1	1,94	0,00	0,00	0,00	270	866	360	361	197,6	11	0,0	20,0	18,0	27,2	27,8	0,47	0,55	345	273
451	1	372,5	1	1,88	1,00	0,00	0,00	404	824	381	378	243,8	11	0,0	16,0	12,5	27,0	28,9	0,37	0,43	393	315
452	1	400,7	1	2,92	1,33	0,00	0,00	379	793	753	0	160,6	11	0,0	25,0	23,0	27,2	28,1	0,37	0,53	606	515
453	1	372,2	1	1,93	0,00	0,00	0,00	381	759	363	362	204,4	11	0,0	18,0	17,0	26,9	28,3	0,27	0,42	348	286
454	1	369,3	1	1,94	0,00	0,00	0,00	367	751	360	362	189,4	11	0,0	19,0	16,0	28,0	29,0	0,38	0,43	358	284
455	1	372,7	1	1,91	0,00	0,00	0,00	376	754	359	361	187,7	11	0,0	20,0	18,0	27,0	28,0	0,32	0,52	368	269
456	1	370,2	1	1,90	0,00	0,00	0,00	381	757	360	358	188,5	11	0,0	19,0	16,0	26,0	27,0	0,40	0,60	388	348
457	1	370,3	1	1,88	1,00	0,00	0,00	413	829	383	383	213,5	11	0,0	18,0	15,0	26,0	27,4	0,38	0,97	362	337
458	1	373,0	1	1,89	1,00	0,00	0,00	397	828	383	380	210,3	11	0,0	15,5	12,0	27,6	28,2	0,42	0,53	406	320
459	1	371,7	1	1,91	0,00	0,00	0,00	382	760	362	362	224,6	11	0,0	18,0	16,0	28,3	28,5	0,48	0,67	355	259
460	1	368,5	1	1,91	0,00	0,00	0,00	376	759	409	364	224,9	11	0,0	16,0	14,0	27,0	28,0	0,48	0,57	350	311
461	1	401,8	1	3,42	1,30	0,00	0,00	408	834	687	0	240,0	11	0,0	58,0	56,0	28,0	28,8	0,53	0,62	373	338
462	1	401,5	1	3,41	1,30	0,00	0,00	417	832	696	0	174,5	11	0,0	23,0	21,0	27,0	27,6	0,45	0,75	485	389
463	1	411,5	1	2,97	1,30	0,00	0,00	451	872	689	0	173,9	11	0,0	25,0	22,0	28,0	28,5	0,48	0,75	368	380
464	1	410,0	1	3,30	1,30	0,00	0,00	396	854	693	0	181,6	11	0,0	63,0	59,0	25,5	27,0	0,38	0,45	469	391
465	1	414,5	1	3,50	1,30	0,00	0,00	410	853	689	0	182,5	11	0,0	27,0	25,0	26,2	27,1	0,42	0,50	382	328
466	1	408,5	1	3,51	1,30	0,00	0,00	394	847	695	0	189,8	11	0,0	27,0	25,0	27,9	28,1	0,43	0,82	320	270
467	1	405,5	1	3,54	1,30	0,00	0,00	393	847	691	0	206,6	11	0,0	27,0	25,0	27,6	28,1	0,22	0,35	323	264
468	1	341,0	1	1,68	1,60	0,00	0,00	462	876	398	218	211,9	12	0,0	18,0	17,0	29,9	31,0	0,22	0,28	354	292
469	1	340,0	1	1,72	1,60	0,00	0,00	463	746	404	273	202,1	12	0,0	20,0	18,0	26,2	27,5	0,32	0,37	302	251
470	1	341,7	1	1,71	1,60	0,00	0,00	467	747	401	272	206,2	12	0,0	19,0	17,0	27,6	28,3	0,22	0,38	446	329
471	1	341,0	1	1,69	1,60	0,00	0,00	462	876	398	218	210,9	12	0,0	19,0	17,0	26,0	27,0	0,02	0,65	379	326
472	1	342,7	1	1,71	1,60	0,00	0,00	459	722	397	269	189,3	12	0,0	20,5	19,5	26,9	27,8	0,22	0,33	376	291
473	1	330,7	2	1,67	1,60	0,00	0,00	466	801	401	199	203,2	12	0,0	20,0	17,0	29,6	30,5	0,27	0,28	336	329
474	1	331,7	1	1,66	1,60	0,00	0,00	471	801	396	200	198,0	12	0,0	20,0	17,5	27,8	28,9	0,25	0,32	360	324
475	1	392,9	1	3,10	0,00	0,00	0,00	486	809	647	0	222,1	12	0,0	20,0	16,0	27,0	28,0	0,27	0,63	371	372
476	1	394,7	1	3,20	0,00	0,00	0,00	466	780	653	0	223,4	12	0,0	22,0	19,0	27,0	27,8	0,17	0,25	460	384
477	1	398,0	1	3,22	1,50	0,00	0,00	468	820	686	0	221,1	12	0,0	21,0	19,0	26,0	27,2	0,33	0,40	362	353
478	1	355,8	1	1,91	1,00	0,00	0,00	214	797	923	0	195,3	12	0,0	19,0	17,0	26,0	27,0	0,22	0,38	468	395
479	1	394,3	1	3,19	0,00	0,00	0,00	527	790	697	0	201,0	12	0,0	23,0	21,0	29,0	30,1	0,28	0,33	444	360
480	1	400,0	1	3,19	0,00	0,00	0,00	489	789	648	0	141,9	12	0,0	20,0	18,0	30,7	31,2	0,63	0,92	525	437
481	1	402,0	2	3,04	0,00	0,00	0,00	221	1103	588	0	211,0	12	0,0	55,0	50,0	29,6	30,2	0,30	0,38	471	406

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
482	1	395,0	1	3,02	0,00	0,00	0,00	182	1099	582	0	194,7	12	0,0	23,0	20,0	29,5	30,0	0,28	0,50	481	404
483	1	395,0	1	3,03	0,00	0,00	0,00	206	1099	587	0	218,0	12	0,0	23,0	20,0	29,5	30,0	0,37	0,42	538	448
484	1	353,7	1	1,77	1,00	0,00	0,00	176	844	541	270	200,2	12	0,0	19,5	16,0	28,0	29,0	0,33	0,57	522	488
485	1	416,0	1	3,11	1,30	0,00	0,00	360	752	769	0	193,0	12	0,0	24,0	22,0	24,4	26,0	0,35	0,83	376	291
486	1	398,9	1	2,86	0,00	0,00	0,00	201	1104	602	0	225,0	12	0,0	59,0	56,0	28,0	29,0	0,20	0,85	401	408
487	1	368,3	1	1,89	1,00	0,00	0,00	391	891	374	280	237,5	12	0,0	20,0	17,0	25,0	28,0	0,28	0,35	427	313
488	1	371,0	1	1,85	1,00	0,00	0,00	379	820	404	285	203,9	12	0,0	19,5	16,0	26,0	28,0	0,15	0,23	491	408
489	1	373,8	1	1,87	1,00	0,00	0,00	376	820	405	317	198,7	12	0,0	18,0	12,0	26,9	27,5	0,35	0,88	379	271
490	1	375,7	1	1,87	1,00	0,00	0,00	360	844	373	283	208,6	12	0,0	18,0	12,0	27,6	29,1	0,35	0,45	532	432
491	1	359,7	1	1,77	1,03	0,00	0,00	230	865	929	0	205,0	12	0,0	18,0	15,0	30,0	31,0	0,57	0,73	341	312
492	1	354,5	1	1,88	1,00	0,00	0,00	232	795	926	0	163,9	12	0,0	19,0	17,0	28,7	29,8	0,53	0,63	462	354
493	1	356,5	1	1,82	1,00	0,00	0,00	198	862	538	277	199,0	12	0,0	17,5	16,0	27,6	28,2	0,32	0,45	364	279
494	1	388,0	1	3,09	0,00	0,00	0,00	197	1114	584	0	162,0	12	0,0	22,0	20,0	30,0	30,7	0,53	0,73	446	367
495	1	393,8	1	3,08	0,00	0,00	0,00	205	1086	633	0	161,0	12	0,0	56,0	50,0	30,5	31,6	0,40	0,78	368	319
496	1	481,3	1	2,73	1,33	0,00	0,00	351	749	782	0	195,9	12	0,0	60,0	58,0	25,7	27,0	0,55	0,80	355	511
497	1	423,0	1	2,73	1,30	0,00	0,00	355	753	702	0	208,8	12	0,0	21,0	19,0	27,2	27,8	0,75	0,97	573	528
498	1	415,5	2	3,18	0,00	0,00	0,00	398	856	363	268	212,0	12	0,0	20,0	10,0	27,0	29,4	0,60	0,67	368	351
499	1	415,3	2	3,17	1,33	0,00	0,00	472	869	405	308	200,0	12	0,0	50,0	47,0	29,0	30,8	0,50	0,58	368	233
500	1	420,7	1	2,40	1,33	0,00	0,00	352	729	699	0	198,5	1	0,0	50,0	45,0	27,4	29,0	0,23	0,32	457	397
501	1	369,2	1	1,87	1,00	0,00	0,00	835	374	371	269	235,6	1	0,0	18,5	15,0	29,3	29,8	0,23	0,68	351	293
502	1	369,3	1	1,83	0,67	0,00	0,00	836	388	359	269	156,8	1	0,0	19,0	16,0	24,0	25,0	0,42	0,47	509	456
503	1	374,8	1	2,24	0,83	0,00	0,00	308	949	683	0	187,2	1	0,0	18,0	16,0	26,1	28,0	0,37	0,53	377	372
504	1	340,7	1	1,89	0,00	0,00	0,00	395	779	726	0	224,0	1	0,0	18,5	17,0	29,8	30,6	0,22	0,43	488	396
505	1	368,7	1	1,91	0,00	0,00	0,00	381	781	724	0	226,7	1	0,0	20,5	17,0	26,2	27,5	0,37	0,42	376	366
506	1	422,3	1	2,87	0,83	0,00	0,00	337	794	756	0	200,8	1	0,0	60,0	58,0	29,8	30,0	0,37	0,52	508	429
507	1	370,3	1	1,84	0,00	0,00	0,00	302	792	832	0	196,5	1	0,0	22,0	15,0	25,6	26,4	0,42	0,52	500	329
508	1	367,7	1	1,89	0,00	0,00	0,00	287	901	471	0	216,1	1	0,0	17,0	14,0	28,3	29,2	0,32	0,40	311	201
509	1	374,3	1	1,87	0,00	0,00	0,00	292	898	550	277	221,9	1	0,0	20,5	12,0	30,1	33,5	0,35	0,42	359	354
510	1	382,8	1	1,86	0,00	0,00	0,00	303	656	984	0	233,6	1	0,0	19,0	17,0	24,6	26,0	0,37	0,45	359	367
511	1	360,2	1	1,37	0,00	0,00	0,00	302	733	562	372	203,0	1	0,0	21,0	17,0	26,5	24,6	1,62	1,70	402	334
512	1	362,5	1	1,46	1,00	0,00	0,00	295	771	561	377	197,2	1	0,0	20,0	15,0	26,5	25,2	1,72	1,80	371	333
513	1	363,8	1	1,48	0,00	0,00	0,00	301	717	933	0	215,8	1	0,0	20,0	14,0	26,0	29,0	1,98	2,05	447	363
514	1	361,5	1	1,83	1,00	0,00	0,00	276	712	933	0	214,0	1	0,0	22,0	13,0	29,5	31,3	1,48	1,58	372	342
515	1	380,0	1	1,88	1,00	0,00	0,00	229	693	934	0	208,3	1	0,0	21,0	14,0	27,0	28,7	1,47	2,27	511	416
516	1	381,4	1	1,88	1,00	0,00	0,00	289	697	933	0	217,0	1	0,0	20,5	15,0	27,9	19,5	1,62	2,37	470	372
517	1	372,2	1	1,88	0,83	0,00	0,00	382	770	726	0	223,1	1	0,0	20,5	15,0	29,4	31,0	1,22	1,47	433	329
518	1	369,1	1	1,76	0,55	0,00	0,00	367	767	721	0	179,9	1	0,0	21,0	15,0	26,4	28,0	1,25	1,77	405	327
519	1	372,2	1	1,80	1,09	0,00	0,00	372	769	723	0	233,6	1	0,0	21,0	11,0	26,5	28,0	1,65	1,78	407	300
520	1	390,6	1	2,16	0,86	0,00	0,00	283	941	494	188	250,5	1	0,0	27,0	21,0	26,5	27,8	1,43	1,68	349	272
521	1	388,5	1	2,67	0,75	0,00	0,00	298	930	497	193	253,4	1	0,0	24,5	19,0	26,1	27,5	1,67	1,83	348	252
522	1	415,0	1	3,10	0,00	0,00	0,00	386	856	630	0	217,0	1	0,0	22,5	19,0	26,5	28,0	0,55	0,68	362	358
523	1	414,0	1	2,71	1,00	0,00	0,00	356	737	701	0	197,7	1	0,0	62,0	58,0	29,2	31,0	0,38	0,47	464	368
524	1	414,0	1	2,68	1,00	0,00	0,00	359	743	705	0	198,7	1	0,0	60,0	57,0	24,5	26,5	0,32	0,43	495	420
525	1	420,0	1	2,87	1,00	0,00	0,00	327	782	748	0	242,4	1	0,0	60,0	57,0	28,3	29,1	0,30	0,37	357	357
526	1	427,0	1	2,89	0,00	0,00	0,00	370	759	746	0	190,4	1	0,0	60,0	57,0	25,0	27,0	0,32	0,42	590	462
527	1	423,0	1	2,88	0,00	0,00	0,00	342	764	754	0	196,4	1	0,0	28,0	27,0	27,5	29,0	0,37	0,45	353	379
528	1	417,5	1	2,90	0,00	0,00	0,00	324	784	747	0	175,6	1	0,0	60,0	58,0	25,5	26,0	0,50	0,68	361	366
529	1	419,3	1	2,88	0,00	0,00	0,00	344	762	753	0	230,9	1	0,0	58,0	56,0	27,6	28,1	0,43	0,60	361	366
530	1	340,5	1	1,66	0,50	0,00	0,00	305	732	493	497	177,1	1	0,0	18,0	16,0	26,4	27,5	0,50	0,63	451	310
531	1	341,3	1	1,69	1,00	0,00	0,00	309	742	493	517	253,3	1	0,0	17,0	15,0	24,6	27,0	0,32	0,48	358	285
532	1	424,0	1	2,93	0,00	0,00	0,00	361	764	756	0	187,1	2	0,0	60,0	57,0	26,0	26,6	0,57	0,60	494	458
533	1	376,8	1	1,67	0,00	0,00	0,00	321	653	491	493	200,1	2	0,0	21,0	18,0	26,3	27,0	0,40	0,60	358	335
534	1	200,8	1	0,00	0,00	0,00	0,00	487	493	456	458	243,9	2	0,0	16,5	14,0	25,7	26,0	0,73	0,77	145	89
535	1	369,3	1	1,86	0,00	0,00	0,00	762	404	559	184	238,4	2	0,0	16,0	12,0	26,5	27,5	0,38	1,28	345	241

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
536	1	339,8	1	1,64	0,00	0,00	0,00	302	772	493	497	201,0	2	0,0	20,0	18,0	25,0	26,7	0,62	0,72	372	289
537	1	414,5	1	2,07	0,00	0,00	0,00	380	852	632	0	199,1	2	0,0	19,0	16,0	28,0	29,1	0,35	0,40	451	367
538	1	424,3	1	3,06	1,00	0,00	0,00	489	680	721	0	208,5	2	0,0	58,0	53,0	27,0	28,0	0,22	0,87	377	359
539	1	424,7	1	3,08	0,70	0,00	0,00	507	679	727	0	208,5	2	0,0	60,0	58,0	27,0	29,1	0,23	0,32	349	301
540	1	378,7	1	1,88	0,00	0,00	0,00	302	655	489	493	199,0	2	0,0	20,0	18,0	25,0	27,0	0,40	0,48	433	369
541	1	339,3	1	1,68	0,00	0,00	0,00	358	737	488	494	204,7	2	0,0	22,0	20,0	25,0	27,0	0,42	0,48	353	247
542	1	391,2	1	2,78	0,80	0,00	0,00	590	417	400	380	182,8	2	0,0	58,0	56,0	27,3	27,9	0,60	0,88	359	356
543	1	389,3	1	2,76	0,80	0,00	0,00	717	409	400	380	232,5	2	0,0	61,0	57,0	26,0	27,2	0,62	0,77	374	340
544	1	392,3	1	2,74	0,80	0,00	0,00	731	419	402	393	225,6	2	0,0	60,0	58,0	27,1	28,3	0,55	0,85	324	297
545	1	390,3	1	2,65	0,70	0,00	0,00	394	686	558	278	220,0	2	0,0	62,0	61,0	26,0	27,5	0,42	0,77	357	309
546	1	389,3	1	2,67	0,80	0,00	0,00	376	795	541	180	185,8	2	0,0	60,0	59,0	26,0	26,6	0,28	0,35	363	351
547	1	368,5	1	1,93	1,00	0,00	0,00	398	739	460	368	216,5	2	0,0	22,0	17,0	28,5	29,0	1,12	1,28	322	258
548	1	369,6	1	1,84	0,89	0,00	0,00	383	699	460	366	190,9	2	0,0	25,0	20,0	27,0	28,0	1,43	1,48	402	322
549	1	381,5	1	1,93	1,00	0,00	0,00	379	703	462	366	180,3	2	0,0	20,0	18,0	26,0	27,5	1,48	1,55	354	263
550	1	378,6	1	1,93	0,80	0,00	0,00	385	702	462	418	218,3	2	0,0	20,0	15,0	26,0	28,0	1,53	1,67	325	285
551	1	201,0	1	0,00	0,50	0,00	0,00	0	1107	868	198	222,4	2	0,0	22,0	6,5	26,5	26,9	1,40	1,70	205	31
552	1	199,7	1	0,00	0,30	0,00	0,00	0	1154	873	193	193,7	2	0,0	23,0	17,5	25,0	27,0	1,97	2,05	221	34
553	1	328,8	1	1,68	0,00	0,00	0,00	408	825	374	371	244,4	2	0,0	21,0	17,0	31,5	31,7	0,17	0,25	270	231
554	1	279,5	1	1,67	0,00	0,00	0,00	426	813	372	372	246,1	2	0,0	21,0	20,0	27,5	28,0	0,15	0,33	246	185
555	1	280,7	1	1,39	0,00	0,00	0,00	395	844	371	371	256,7	2	0,0	23,0	21,0	27,5	28,2	0,15	0,22	254	150
556	1	339,8	1	1,74	1,25	0,00	0,00	303	764	498	497	234,0	3	0,0	22,0	20,0	28,7	30,0	0,23	0,40	364	246
557	1	346,0	1	1,74	0,00	0,00	0,00	291	727	489	495	228,1	3	0,0	21,0	19,0	28,0	29,0	0,33	0,50	372	261
558	1	379,3	1	1,90	1,25	0,00	0,00	386	707	462	366	201,3	2	0,0	16,5	10,0	29,6	30,3	1,12	1,43	563	479
559	1	384,9	1	1,83	1,22	0,00	0,00	384	771	493	366	219,8	3	0,0	17,0	12,0	27,2	27,7	2,25	2,28	378	296
560	1	391,3	1	2,72	1,04	0,00	0,00	487	593	558	279	235,4	3	0,0	65,0	61,0	26,4	26,7	0,30	0,78	347	282
561	1	415,0	1	2,02	1,25	0,00	0,00	392	855	630	0	224,0	3	0,0	16,0	14,0	28,0	28,3	2,48	2,75	463	374
562	0	395,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	246,6	6	0,0	24,0	19,0	26,0	29,0	0,87	0,90	307	270
563	0	396,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	254,1	6	0,0	20,5	15,2	28,5	30,0	0,68	0,72	355	279
564	0	396,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	246,6	6	0,0	21,0	18,0	28,0	30,0	1,20	1,23	298	284
565	0	386,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	272,5	6	0,0	22,0	18,0	26,0	27,6	0,47	0,77	362	285
566	0	390,0	1	1,80	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	228,6	6	0,0	15,0	10,0	27,0	28,0	1,38	1,50	498	448
567	0	412,0	2	0,00	1,00	2,47	0,00	368	693	781	0	278,9	7	0,0	23,0	20,0	27,0	28,0	0,88	0,90	344	176
568	0	414,0	2	2,48	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	250,0	7	0,0	21,0	19,0	26,0	28,6	0,53	0,62	328	182
569	0	413,0	2	2,48	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	278,2	7	0,0	21,0	19,0	27,2	28,5	0,78	0,82	297	207
570	0	426,0	2	2,55	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	282,7	7	0,0	22,0	18,0	27,0	28,5	1,02	1,08	294	189
571	0	301,5	1	1,48	0,91	0,00	0,00	382	789	753	0	259,5	4	0,0	18,0	14,0	27,0	28,0	0,50	0,55	366	274
572	0	305,0	1	1,80	0,91	0,00	0,00	380	773	750	0	293,1	4	0,0	21,0	16,0	28,0	29,0	0,52	0,65	400	266
573	0	381,0	1	0,00	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	233,2	4	0,0	18,0	16,0	28,0	29,0	0,77	0,82	355	271
574	0	397,0	1	1,98	1,19	0,00	0,00	359	640	798	0	256,1	4	0,0	20,0	17,0	27,0	25,0	0,62	0,70	448	318
575	0	361,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	219,5	4	0,0	21,0	20,0	29,0	30,0	0,30	0,32	370	279
576	0	362,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	219,5	4	0,0	18,0	18,0	27,0	27,0	0,23	0,25	295	236
577	0	360,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	219,5	4	0,0	22,0	15,0	28,0	27,0	0,25	0,87	385	338
578	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	270,9	4	0,0	15,0	12,0	26,0	26,0	0,33	0,92	348	302
579	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	270,9	4	0,0	13,0	10,0	28,0	29,0	0,45	2,05	370	338
580	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	270,9	4	0,0	14,0	13,0	28,0	29,0	0,43	0,52	365	291
581	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	245,1	4	0,0	16,0	12,0	27,0	28,0	0,50	1,17	354	341
582	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	245,1	4	0,0	16,0	14,0	30,0	30,0	0,32	0,40	348	342
583	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	243,1	4	0,0	16,0	12,0	27,0	26,0	0,52	0,95	481	407
584	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	243,1	4	0,0	16,0	11,0	29,0	28,0	0,55	0,62	402	339
585	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	256,4	4	0,0	16,0	14,0	27,0	26,0	0,50	0,60	323	275
586	0	371,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	234,6	4	0,0	20,0	17,5	26,0	28,0	0,70	0,72	345	326
587	0	347,0	1	1,70	1,04	0,00	0,00	0	1061	404	402	268,2	4	0,0	23,0	20,0	27,0	26,0	0,42	0,45	294	224
588	0	361,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	240,2	4	0,0	20,0	18,0	29,5	30,0	0,50	0,57	361	289
589	0	361,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	249,7	4	0,0	20,0	17,0	25,5	26,0	0,67	0,93	427	317

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
590	0	346,0	1	1,70	1,04	0,00	0,00	0	1061	404	402	230,2	4	0,0	23,0	16,2	23,0	23,0	0,37	0,42	313	260
591	0	371,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	260,8	4	0,0	19,0	17,0	27,0	27,0	0,73	0,87	355	283
592	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	215,6	4	0,0	20,0	16,0	26,0	27,0	0,60	1,03	333	228
593	0	368,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	243,6	4	0,0	20,0	16,0	28,0	29,2	0,30	0,35	343	260
594	0	366,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	243,6	4	0,0	20,0	16,0	29,0	30,0	0,17	0,28	345	267
595	0	360,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	253,2	4	0,0	22,0	13,0	28,0	28,0	0,30	0,72	383	344
596	0	361,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	243,8	4	0,0	20,0	15,0	27,0	28,0	0,30	0,45	299	189
597	0	361,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	231,4	4	0,0	20,0	22,0	28,0	28,4	0,25	0,33	275	191
598	0	361,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	240,2	4	0,0	20,0	14,0	26,0	29,0	0,43	0,47	395	286
599	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	253,9	4	0,0	19,0	15,0	27,0	28,0	0,57	0,65	377	292
600	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	215,6	4	0,0	15,0	13,0	16,0	28,0	0,65	0,95	310	257
601	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	215,6	4	0,0	17,0	13,0	27,0	27,0	0,18	0,45	318	249
602	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	217,1	4	0,0	16,0	13,0	26,0	27,0	0,45	0,53	316	273
603	0	356,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	217,1	4	0,0	17,0	13,0	28,0	29,0	0,57	0,98	290	236
604	0	370,0	1	1,80	1,08	0,00	0,00	368	693	781	0	221,0	4	0,0	17,0	14,0	28,0	28,0	1,20	1,32	323	300
605	0	372,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	280,9	5	0,0	21,0	21,0	26,0	27,5	0,58	0,85	248	197
606	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	338,8	5	0,0	22,5	20,0	26,0	26,5	0,97	1,05	243	165
607	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	339,8	5	0,0	22,0	21,0	28,0	29,0	0,53	0,78	266	205
608	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	317,6	5	0,0	22,0	20,0	29,0	30,0	0,68	0,97	230	171
609	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	303,2	5	0,0	23,0	21,0	27,0	28,0	0,42	0,67	287	234
610	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	315,4	5	0,0	22,0	18,5	29,0	30,0	0,82	1,18	298	222
611	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	295,5	5	0,0	24,0	21,0	27,0	28,0	0,88	0,97	236	235
612	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	295,5	5	0,0	22,0	19,5	27,0	29,5	0,50	0,77	228	207
613	0	369,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	285,5	5	0,0	22,0	20,0	28,0	29,0	0,52	0,77	214	175
614	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	285,5	5	0,0	22,0	20,0	28,0	29,0	0,73	0,90	250	238
615	0	369,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	280,0	5	0,0	23,0	21,0	27,0	28,0	0,50	0,92	244	224
616	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	307,3	5	0,0	23,0	20,0	30,0	31,0	0,45	0,58	261	228
617	0	368,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	285,5	5	0,0	23,0	22,0	27,0	28,0	0,55	0,82	236	188
618	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	287,4	5	0,0	23,0	22,0	27,0	28,0	0,58	0,83	227	166
619	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	288,9	5	0,0	24,0	22,0	26,0	28,0	0,55	0,67	266	200
620	0	369,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	274,6	5	0,0	23,0	21,0	27,0	28,0	0,42	0,58	272	207
621	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	254,1	5	0,0	22,0	20,0	26,0	26,5	0,65	1,32	320	233
622	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	254,1	5	0,0	24,0	21,0	29,0	30,0	0,77	0,85	293	244
623	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	292,6	5	0,0	24,5	21,0	27,0	29,0	0,62	1,28	287	200
624	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	270,4	5	0,0	23,0	21,0	27,0	28,0	0,42	0,68	255	152
625	0	371,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	300,9	5	0,0	23,0	20,0	26,0	27,0	0,68	0,77	250	196
626	0	369,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	0	218,4	5	0,0	23,0	20,0	28,0	29,0	0,50	0,67	367	267
627	0	371,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	0	259,0	5	0,0	22,0	18,0	29,0	29,0	1,47	1,55	268	222
628	0	370,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	0	269,2	5	0,0	23,0	18,0	29,0	30,0	0,95	1,18	253	193
629	0	305,0	1	1,80	0,91	0,00	0,00	380	773	750	0	293,0	5	0,0	21,0	16,0	28,0	30,0	0,58	0,75	216	160
630	0	305,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	307,3	5	0,0	16,0	14,0	29,0	30,0	0,58	0,83	259	189
631	0	304,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	293,6	5	0,0	18,0	13,0	27,0	28,0	0,25	0,32	255	200
632	0	306,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	0	276,7	5	0,0	19,0	15,0	29,0	30,0	0,57	0,82	241	190
633	0	304,7	1	1,45	0,91	0,00	0,00	379	806	752	0	278,1	5	0,0	22,0	20,0	29,0	30,0	0,13	0,15	247	201
634	0	370,0	1	1,80	0,00	0,00	0,00	368	693	781	0	262,4	5	0,0	17,0	14,0	26,0	27,0	0,82	0,85	380	357
635	0	370,0	1	1,80	0,00	0,00	0,00	368	693	781	0	262,4	5	0,0	18,0	14,0	30,0	31,5	0,47	0,50	345	284
636	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	273,7	5	0,0	17,0	12,0	28,0	29,0	0,35	0,77	352	270
637	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	273,7	5	0,0	17,0	12,0	27,0	28,0	0,35	0,58	292	249
638	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	257,4	5	0,0	15,0	12,0	28,0	30,0	0,83	0,97	305	230
639	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	257,4	5	0,0	16,0	13,0	30,0	31,0	0,20	0,45	387	307
640	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	288,4	5	0,0	16,0	13,0	26,0	26,0	0,38	0,95	345	283
641	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	288,4	5	0,0	17,0	13,0	30,0	29,0	0,58	0,87	340	230
642	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	293,4	5	0,0	16,0	12,0	27,0	27,0	0,43	0,45	328	240
643	0	371,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	293,4	5	0,0	14,0	12,0	29,0	29,0	0,32	0,50	340	229

Nº Ensayo	Mód	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
644	0	370,0	1	1,80	0,00	0,00	0,00	368	693	781	0	257,6	5	0,0	18,0	16,0	28,0	28,0	0,60	0,67	401	384
645	0	370,0	1	1,80	0,00	0,00	0,00	368	693	781	0	270,4	5	0,0	19,0	16,0	29,0	30,0	0,58	0,72	339	333
646	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	285,3	5	0,0	19,0	15,0	27,0	28,0	0,62	2,23	317	254
647	0	368,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	235,8	5	0,0	16,0	15,0	30,0	29,0	0,65	0,68	344	280
648	0	370,0	1	2,22	0,00	0,00	0,00	364	742	720	0	235,8	5	0,0	18,0	15,0	27,0	28,0	0,58	0,60	344	291
649	0	370,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	426	275,1	5	0,0	15,0	13,0	29,0	30,0	0,62	1,03	345	285
650	0	370,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	426	309,6	5	0,0	15,0	13,0	27,0	27,0	0,20	0,62	366	272
651	0	371,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	426	309,6	5	0,0	13,0	9,0	26,0	27,0	0,72	0,78	359	320
652	0	370,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	426	266,0	5	0,0	13,0	11,0	26,0	27,0	0,18	0,30	403	317
653	0	373,0	1	2,22	1,10	0,00	0,00	364	742	720	426	266,0	5	0,0	14,0	9,0	27,0	28,0	0,68	1,12	395	324
654	0	372,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	295,6	6	2,2	23,0	21,0	29,0	29,0	1,15	1,40	247	184
655	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	258,7	6	2,2	23,0	20,0	27,0	27,5	0,97	1,22	277	216
656	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	266,6	6	20,0	23,0	21,0	25,0	26,4	0,72	1,05	293	219
657	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	278,3	6	20,0	22,0	20,0	26,0	26,0	0,48	0,82	281	226
658	0	371,0	1	1,85	1,00	0,00	0,00	497	1206	0	0	317,8	6	0,0	23,0	22,0	26,0	27,0	0,90	1,08	285	249
659	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	273,1	6	0,0	18,0	18,0	29,0	29,0	0,40	0,43	354	223
660	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	265,6	6	0,0	17,5	10,0	27,0	28,0	0,47	0,55	355	257
661	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	317,6	6	0,0	20,0	15,0	26,0	27,2	0,37	0,40	308	266
662	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	317,6	6	0,0	19,0	17,0	27,0	29,0	0,60	0,72	322	258
663	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	305,4	6	0,0	15,0	10,0	25,0	26,0	0,32	0,58	362	313
664	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	303,2	6	0,0	15,5	12,0	24,8	25,5	0,68	0,77	299	318
665	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	303,2	6	0,0	15,0	12,0	25,0	27,0	0,28	0,68	367	339
666	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	297,9	6	0,0	15,0	11,0	27,8	28,0	0,73	0,87	345	252
667	0	373,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	253,6	6	0,0	15,0	10,0	26,0	27,0	0,33	0,85	348	338
668	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	253,6	6	0,0	15,0	12,0	27,0	27,0	0,67	0,88	355	294
669	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	253,6	6	0,0	15,0	11,0	27,0	28,0	0,47	0,57	378	353
670	0	370,0	1	1,80	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	268,7	6	0,0	20,0	18,0	26,0	27,0	0,30	0,32	344	306
671	0	375,0	1	1,80	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	268,7	6	0,0	21,0	18,0	26,0	27,0	0,78	0,82	339	308
672	0	372,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	306,5	6	0,0	18,5	16,0	26,0	26,4	0,65	0,93	320	288
673	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	0	306,5	6	0,0	21,0	16,0	26,0	28,0	0,58	0,92	311	262
674	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	289,6	6	0,0	18,0	16,0	27,0	28,0	0,47	1,17	306	230
675	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	289,6	6	0,0	19,0	15,0	26,0	27,0	0,40	0,78	338	278
676	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	299,1	6	0,0	19,0	15,0	27,0	28,0	0,37	0,45	325	266
677	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	275,5	6	0,0	22,0	16,0	26,0	27,0	0,50	0,63	289	226
678	0	371,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	364	742	720	426	275,5	6	0,0	22,0	15,0	26,0	27,3	0,37	0,38	345	264
679	0	369,0	1	1,80	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	228,6	6	0,0	19,0	15,0	29,0	29,5	0,67	1,42	330	250
680	0	371,0	1	1,80	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	228,6	6	0,0	19,0	16,0	26,0	26,0	0,25	0,43	304	241
681	0	387,0	1	2,30	1,00	0,00	0,00	411	728	653	0	268,7	6	0,0	21,5	14,0	29,6	31,0	0,27	0,52	381	267
682	0	370,0	1	1,85	1,12	0,00	0,00	497	1206	0	0	282,2	7	0,0	24,0	23,0	27,0	26,0	0,43	0,85	308	234
683	0	369,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	285,4	7	0,0	24,0	22,0	26,0	27,1	0,50	0,75	263	232
684	0	371,0	1	1,85	1,12	0,00	0,00	497	1206	0	0	302,2	7	23,3	24,0	22,0	24,0	26,0	0,38	1,55	251	208
685	0	391,0	1	1,95	1,17	0,00	0,00	497	1206	0	0	302,2	7	0,0	22,0	22,0	24,3	26,0	1,23	1,48	316	254
686	0	370,0	1	1,55	1,12	0,00	0,00	497	1206	0	0	312,4	7	0,0	24,0	21,0	27,0	29,0	0,45	0,62	280	227
687	0	371,0	1	1,85	1,12	0,00	0,00	497	1206	0	0	331,3	7	0,0	23,5	22,0	26,3	27,0	0,47	1,13	242	189
688	0	373,0	1	1,87	1,12	0,00	0,00	497	1206	0	0	268,2	7	23,3	24,0	23,0	26,0	27,0	0,72	0,72	245	211
689	0	371,0	1	1,85	1,12	0,00	0,00	497	1206	0	0	332,5	7	23,3	23,0	21,0	27,0	28,0	0,40	0,63	272	198
690	0	371,0	1	2,22	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	253,6	7	0,0	21,5	18,0	26,0	27,0	0,70	0,78	359	301
691	0	373,0	1	2,23	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	253,6	7	0,0	20,0	16,0	26,0	27,0	0,78	0,98	404	326
692	0	369,0	1	1,85	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	278,9	7	0,0	20,0	16,5	25,0	26,0	0,68	0,83	316	276
693	0	371,0	1	2,23	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	269,8	7	0,0	16,0	13,0	28,0	28,0	0,23	0,33	337	254
694	0	371,0	1	2,23	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	263,9	7	0,0	15,0	13,0	26,0	27,0	0,23	0,37	429	380
695	0	371,0	1	2,22	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	274,3	7	0,0	17,5	8,0	26,8	27,4	0,40	1,02	419	383
696	0	372,0	1	2,22	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	274,3	7	0,0	16,5	15,0	27,2	28,0	0,42	0,52	349	289
697	0	371,0	1	2,22	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	274,3	7	0,0	18,0	16,0	27,0	27,0	0,20	0,32	356	292

Nº Ensayo	MóD	Cem	Tipo Cem	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Agua	Mes	Fibra	CA1	CA2	Temp1	Temp2	t1	t2	fc28	fc7
698	0	370,0	1	2,22	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	263,9	7	0,0	13,0	26,0	26,0	27,0	0,22	0,33	377	328
699	0	371,0	1	2,23	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	257,0	7	0,0	18,0	16,5	27,0	27,0	0,52	0,57	344	316
700	0	370,0	1	2,22	0,18	0,00	0,00	368	693	781	0	302,2	7	0,0	18,0	15,5	26,5	27,0	0,23	0,32	342	276
701	0	370,0	1	2,22	1,00	0,00	0,00	368	693	781	0	282,7	7	0,0	20,0	18,0	28,0	29,0	0,37	0,43	323	253
702	0	370,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	300,7	8	0,0	23,5	21,5	26,5	27,3	0,43	0,57	265	215
703	0	374,0	2	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	266,7	8	0,0	23,0	21,0	26,0	27,0	0,50	0,92	339	241
704	0	369,0	2	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	224,6	8	0,0	24,0	22,0	27,0	29,0	0,50	0,75	314	246
705	0	374,0	1	1,85	1,10	0,00	0,00	497	1206	0	0	266,7	8	0,0	20,0	17,5	26,0	26,5	0,77	0,87	299	219
706	0	346,0	1	1,70	1,04	0,00	0,00	0	1061	404	402	223,2	8	0,0	19,0	17,0	25,0	26,0	0,22	0,42	322	244
707	0	387,0	1	2,30	2,30	0,00	0,00	411	728	653	0	246,0	9	0,0	25,0	23,0	26,0	27,3	0,72	1,33	416	304
708	0	269,0	1	0,00	1,25	0,00	0,00	0	1093	828	0	245,6	2	0,0	22,0	19,0	27,7	28,0	1,05	1,15	266	61
709	0	394,0	1	2,90	4,00	0,00	0,00	375	757	720	0	231,6	3	0,0	16,0	14,0	28,0	28,3	1,50	1,77	464	359