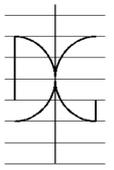




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

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

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

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

AUTOR/A: Ora Bullon, Hugo

Tutor/a: Navarro Ferrer, Ferrán

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

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

Alumno: Hugo Ora Bullón

Tutor: Ferran Navarro Ferrer

VALENCIA JULIO 2023

A Lissette, Alessandra y Piero.

RESUMEN

Cuando queremos asegurar las características de un hormigón de buena calidad debemos asegurarnos de controlar características que deben cumplirse en estado fresco y en estado endurecido; debemos controlar que los materiales no tengan contaminación y sean resistentes a la abrasión; debemos controlar un buen mezclado que garantice la uniformidad de la mezcla; controlar un buen transporte que pueda mantener las propiedades del hormigón fresco durante el trayecto desde la planta de mezclado a obra y sobre todo debemos controlar la adecuada colocación que asegure la ausencia de defectos superficiales o internos de la matriz del elemento hormigonado. En resumen, debemos ser capaces de controlar las innumerables variables que tienen más o menor relación con el elemento de hormigón resultante.

En este estudio nos enfocaremos en el análisis de las variables que controlan la consistencia o asentamiento que debiera tener un hormigón de buena calidad en estado fresco. Analizaremos la manera en que se pierde consistencia o asentamiento en el hormigón por ser un requerimiento importante en construcción y en actividades de industria del mundo actual como son las operaciones de hormigón premezclado o situaciones en las que necesitamos que el hormigón mantenga su consistencia durante toda la operación de colocación.

En este estudio nos concentraremos en analizar las variables que influyen en la consistencia o asentamiento de una mezcla de hormigón normal y además intentaremos predecir este asentamiento con herramientas estadísticas clásicas y modernas como son las redes neuronales artificiales. Estas predicciones nos permitirán hacer recomendaciones útiles para las operaciones de transporte y colocación del hormigón.

Para realizar la predicción de las características de consistencia o asentamiento de un hormigón en estado fresco construiremos una base de datos, los cuales han sido extraídos de artículos científicos con data corroborada de consistencia o asentamiento y sobre todo de los materiales con las que fueron realizadas estas mezclas. Con la data recolectada haremos un análisis estadístico convencional mediante métodos de regresión lineal simple y regresión lineal múltiple aditiva de tal manera de verificar la relación entre variables y resultados; posteriormente complementaremos este análisis con un modelo basado en redes neuronales artificiales que nos permita corroborar o desmentir lo que la estadística tradicional nos muestre. Para la construcción del modelo basado en redes neuronales artificiales utilizaremos herramientas computacionales conocidas en el mercado como son el MATLAB© de la empresa MathWorks.

Palabras clave: Modelos predictivos, Consistencia del hormigón, pérdida de asentamiento, redes neuronales, inteligencia artificial.

ABSTRACT

When we want to ensure the characteristics of good quality concrete, we must ensure that we have control of the characteristics in the fresh state and in the hardened state; we must control that the materials that they do not have contamination and are resistant to abrasion; we must control a Good mixing that guarantees the uniformity of the mixture; Control a good transport that can maintain the properties of the fresh concrete during the journey from the mixing plant to the construction site and, above all, we must control the proper placement that ensures the absence of superficial or internal defects in the matrix of the concreted element. In summary, we must be able to control the innumerable variables that have relationship with the resulting concrete element. In this paper we will focus on the analysis of the variables that control the consistency or settlement that good quality concrete should have in its fresh state. We will analyze the way in which consistency or settlement in concrete is lost as it is an important requirement in construction and in industrial activities in today's world, such as ready-mix concrete operations or situations in which we need the concrete to maintain its consistency throughout the placement operation.

In this paper we will focus on analyzing the variables that influence the consistency or settlement of a normal concrete mix and we will also try to predict this settlement with classical and modern statistical tools such as artificial neural networks. These predictions will allow us to make useful recommendations for concrete transport and placement operations.

To predict the characteristics of consistency or settlement of concrete in a fresh state, we will build a database, which have been extracted from scientific articles with corroborated data on consistency and, above all, from the materials with which these were made. With the data collected, we will carry out a conventional statistical analysis using simple linear regression and additive multiple linear regression methods to verify the relationship between variables and results; later we will complement this analysis

with a model based on artificial neural networks that allows us to corroborate or deny what traditional statistics show us. For the construction of the model based on artificial neural networks we will use computational tools known in the market such as MATLAB® from the company MathWorks.

Keywords: Predictive models, Consistency of the concrete, Slump loss, Neural networks, Artificial intelligence.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo de fin de máster no hubiera sido posible sin la guía y apoyo del ingeniero Ferrán Navarro Ferrer.

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
LISTA DE TABLAS	9
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE GRÁFICAS	13
1 Introducción	16
1.1 Objetivos	16
1.2 Metodología y estructura de la tesis	17
2 Estado del arte	18
2.1 ¿qué es el hormigón?	18
2.2 Naturaleza del hormigón	20
2.3 Trabajabilidad y consistencia en el hormigón	21
2.3.1 Trabajabilidad, consistencia y fluidez. Fundamentos teóricos	22
2.3.2 Asentamiento del hormigón. ¿cómo se mide?	22
2.3.3 Consideraciones estadísticas en el muestreo y ensayo de la consistencia del hormigón.	24
2.3.4 Factores que influyen la consistencia en el hormigón	26
2.3.4.1 Tiempo de fragua y consistencia.	26
2.3.4.2 Resistencia y consistencia.	26
2.3.4.3 Cementos y consistencia.	27
2.4 Redes neuronales artificiales. Fundamentos teóricos.	27
2.4.1 Fundamentos teóricos.	27
2.4.2 Tipos de redes neuronales y su funcionamiento.	29
2.4.3 Definición del número de neuronas en la capa oculta.	31
2.4.4 Aprendizaje y sobre aprendizaje de la red neuronal	32
2.4.5 Datos de entrenamiento, validación y test. Estandarización de los datos.	32
2.4.6 Evaluación del desempeño	33
3 Base de datos obtenida	34
4 Aplicación de modelos estadísticos clásicos. Análisis y discusión.	38

4.1 Regresión lineal simple	38
4.2 Regresión lineal múltiple	46
4.2.1 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad de cemento	46
4.2.2 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad de cemento y la relación agua cemento.	48
4.2.3 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad de cemento, la relación agua cemento y un aditivo inclusor de aire.	50
4.2.4 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad de cemento, la relación agua cemento, un aditivo inclusor de aire y la temperatura del hormigón	52
4.2.5 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad de cemento, la relación agua cemento, un aditivo inclusor de aire, la temperatura del hormigón y el uso de agregados reciclados.	53
4.2.6 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad de cemento, la relación agua cemento, un aditivo inclusor de aire, la temperatura del hormigón, el uso de agregados reciclados y la cantidad de agua	55
4.2.7 Consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, superplastificante, la cantidad de cemento, la relación agua cemento, un inclusor de aire, la temperatura del hormigón, el uso de agregados reciclados, la cantidad de agua y el total de agregado.	57
4.2.8. Consistencia Explicada Por El Tipo De Cemento, Aditivo Reductor De Agua, Aditivo Superplastificante, La Cantidad De Cemento, La Relación Agua Cemento, Un Aditivo Inclusor De Aire, La Temperatura Del Hormigón, El Uso De Agregados Reciclados Y La Cantidad De Agua	59
4.2.9. consistencia explicada por el tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, la cantidad	

de cemento, la relación agua cemento, un aditivo inclusor de aire, la temperatura del hormigón, el uso de agregados reciclados, la cantidad de agua y el total de agregado.

4.3 Discusión de resultados de los modelos estadísticos clásicos.	63
5 Modelos de redes neuronales artificiales aplicadas a la determinación de la variable consistencia.	64
5.1 Construcción de las redes neuronales artificiales	65
5.2 Resumen de los resultados de las redes neuronales artificiales	86
6 Conclusiones del estudio y futuras líneas de investigación	88
6.1 Conclusiones generales	88
6.2 Conclusiones específicas	88
6.3 Futuras líneas de investigación	89
7 Bibliografía	91
8 Anexos	93
8.1 Base de datos utilizada para el análisis por estadística simple y la construcción de RNA.	
8.2 Standard Test Method for Slump of Hydraulic – Cement Concrete.	
8.3 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.	

Lista de tablas:

1. Tabla 1.1: Fuentes de variabilidad en la resistencia a compresión de un hormigón normal. (Pasquel, 1992).
2. Tabla 2.1: Tipos de conexión y aprendizaje de las redes neuronales artificiales (Yacha 2022)
3. Tabla 2.2: Fórmulas matemáticas para el cálculo del número mínimo de neuronas en la capa oculta (Ferrer 2012)
4. Tabla 3.1: Lista de variables predictoras consideradas en este estudio.
5. Tabla 3.2: Variable objetivo considerada en este estudio.
6. Tabla 4.1: Resumen del modelo de regresión para las variables tipo de cemento y aditivo reductor de agua.
7. Tabla 4.2: Coeficientes de la ecuación de regresión que considera a las variables tipo de cemento y aditivo reductor de agua.
8. Tabla 4.3: Coeficientes de la ecuación de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivos superplastificante.
9. Tabla 4.4: Resumen del modelo de regresión para las variables que representan tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivo superplastificante.
10. Tabla 4.5: Resumen del modelo de regresión para las variables que consideran tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante y la cantidad de cemento.
11. Tabla 4.6: Resumen del modelo de regresión que incluye las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua reductivo superplastificante la cantidad de cemento y la relación agua cemento.
12. Tabla 4.7: Resumen del modelo de regresión se considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento y aditivo inclusor de aire.
13. Tabla 4.8: Resumen del modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire y temperatura del hormigón.
14. Tabla 4.9: Resumen del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón y uso de agregados reciclados
15. Tabla 4.10: Resumen del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos impulsor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua.
16. Tabla 4.11: Resumen del modelo que considera variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados cantidad de agua y el total de agregado.

17. Tabla 4.12: Valores del coeficiente de Pearson (R^2) para los diferentes modelos de regresión simple ejecutados.
18. Tabla 4.13: Ecuaciones de correlación para los modelos de regresión lineal múltiple.
19. Tabla 5.1: Valores de R para la red neuronal artificial de 3 capas con 06 neuronas en la primera capa y una neurona en la capa de salida.
20. Tabla 5.2: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial de 3 capas con 06 neuronas en la primera capa y una neurona en la capa de salida.
21. Tabla 5.3: Valores de R para la red neuronal artificial de 3 capas, 12 neuronas en la primera capa (12 variables de entrada), una capa oculta con diferente número de neuronas y una neurona en la capa de salida.
22. Tabla 5.4: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la RNA 1 de 3 capas con 12 neuronas en la primera capa y una neurona en la capa de salida.
23. Tabla 5.5: Redes neuronales propuestas para la obtención de la variable objetivo de consistencia inmediatamente después de ejecutar la mezcla, "00".
24. Tabla 5.6: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 2.
25. Tabla 5.7: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 3.
26. Tabla 5.8: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 4.
27. Tabla 5.9: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 5.
28. Tabla 5.10: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 6.
29. Tabla 5.11: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 7.
30. Tabla 5.12: Redes neuronales propuestas para la obtención de la variable objetivo agua (W).
31. Tabla 5.13: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 8.
32. Tabla 5.14: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 9.
33. Tabla 5.15: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 10.
34. Tabla 5.16: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 11.
35. Tabla 5.17: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 12.

36. Tabla 5.18: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 13.

37. Tabla 5.19: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 14.

38. Tabla 2.20: Redes neuronales propuestas para variable objetivo consistencia en el tiempo cero.

39. Tabla 5.21: Redes neuronales propuestas para variable objetivo cantidad de agua en la mezcla.

Lista de Figuras:

1. Figura 2.1: Variación de las proporciones usadas en hormigón en volumen absoluto. Figura tomada del libro Diseño y Control de Mezclas de Hormigón.
2. Figura 2.2: Tiempo de inicio y fin de fraguado para una mezcla de concreto en diferentes temperaturas (Burg 1996)
3. Figura 2.3: Ensayo de Asentamiento. ASTM C 143 / UNE – EN 12350 – 2
4. Figura 2.4: Curva de regresión y límites de confianza para resistencia a compresión.
5. Figura 2.5: Funcionamiento de una red neuronal artificial k (Navarro y Ferrer 2016)
6. Figura 2.6: Tipología de funciones de transferencia
7. Figura 5.1: Esquema de la red neuronal artificial de 3 capas (MATLAB ®)
8. Figura 5.2: Información presentada por MATLAB® en la ejecución de la red neuronal artificial.

Lista de Gráficas:

1. Gráfica 4.1: Gráfica de línea ajustada para la variable tipo de cemento.
2. Grafica 4.2: Gráfica de línea ajustada para la variable aditivo reductor de agua.
3. Grafica 4.3: Gráfica de línea ajustada para la variable aditivo superplastificante.
4. Grafica 4.4: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de cemento.
5. Grafica 4.5: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agua en la mezcla de hormigón en estado fresco.
6. Grafica 4.6: Gráfica de línea ajustada para la variable relación agua cemento.
7. Grafica 4.7: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de aditivo inclusor de aire.
8. Grafica 4.8: Gráfica de línea ajustada para la variable temperatura del hormigón.
9. Grafica 4.9: Gráfica de línea ajustada para la variable agregado reciclado.
10. Grafica 4.10: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agregado fino.
11. Grafica 4.11: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agregado grueso
12. Grafica 4.12: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agregado total.
13. Gráfica 4.13: Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados de las variables tipo de cemento y aditivo reductor de agua.
14. Grafica 4.14: Gráfica de probabilidad normal entre residuos y porcentaje para las variables tipo de cemento y reductor de agua.
15. Grafica 4.15: Diagrama de Pareto que representa los efectos estandarizados para el modelo de regresión que considera a las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivo superplastificante.
16. Gráfica 4.16: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y el porcentaje para las variables que representan tipo de cemento, aditivo reductor de agua y aditivos superplastificante.
17. Gráfica 4.17: Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados para el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante y la cantidad de cemento.
18. Gráfica 4.18: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje para el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante y la cantidad de cemento.
19. Gráfica 4.19: Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados para el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento y relación agua cemento.

20. Gráfica 4.20: gráfica de probabilidad normal para el residuo y su porcentaje en el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento y relación agua cemento.
21. Gráfica 4.21: Diagrama de Pareto de defectos estandarizados del modelo de regresión que considera tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento y aditivo inclusor de aire.
22. Gráfica 4.22: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y el porcentaje del modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento y aditivo inclusor de aire
23. Gráfica 4.23: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire y temperatura del hormigón.
24. Gráfica 4.24: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje del modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire y temperatura del hormigón.
25. Gráfica 4.25: Diagrama de Pareto del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón y uso de agregados reciclados.
26. Gráfica 4.26: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su respectivo porcentaje para el modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos e inclusor de aire temperatura del hormigón y uso de agregados reciclados.
27. Gráfica 4.27: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos inclusores de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua.
28. Gráfica 4.28: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje respectivo para el modelo que consideran las variables tipo de cemento o aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo o inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua.
29. Gráfica 4.29: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos e inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados, cantidad de agua y agregado total.
30. Gráfica 4.30: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje respectivo para el modelo que consideran las variables tipo de cemento o aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo o inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados, cantidad de agua y cantidad de agregado total.

31. Gráfica 5.1: Ajuste de RNA con 6 variables y 3 capas para la variable "00"
32. Gráfica 5.2: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 1
33. Gráfica 5.3: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 2
34. Gráfica 5.4: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 3
35. Gráfica 5.5: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 4
36. Gráfica 5.6: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 5
37. Gráfica 5.7: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 6
38. Gráfica 5.8: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 7
39. Gráfica 5.9: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 8
40. Gráfica 5.10: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 9
41. Figura 5.11: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 10
42. Gráfica 5.12: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 11
43. Gráfica 5.13: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 12
44. Gráfica 5.13: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 12
45. Figura 5.14: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 13.
46. Gráfica 5.15: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 14.

1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que el hormigón es el material más utilizado en el mundo para todo tipo de construcciones y edificaciones alrededor del globo, sin embargo, se conoce también que esto se debe a lo asequible que puede resultar su manufactura. El hormigón y más específicamente el hormigón normal, de entre 20 y 30 mega pascales de resistencia a compresión, es utilizado en todo el mundo para todo tipo de construcción que por lo general se destina a viviendas y obras de infraestructura.

Es importante reconocer que dada la gran cantidad de variables que intervienen en la fabricación del hormigón el estudio de cada una de estas variables debe estar relacionado con “todas” las otras, sin embargo, esto no es posible desde un punto de vista práctico por lo que, en la vida real se toman variables “importantes” para determinar su condicionamiento a la performance final del hormigón que estemos preparando.

1.1. OBJETIVOS

Si bien es cierto la manufactura del hormigón es un proceso asequible para la mayoría de las personas es imperativo que a nivel ingenieril se tenga en cuenta que la buena calidad de un hormigón depende de muchas variables en cada una de las etapas en las que el hormigón debe finalmente servir para construir elementos estructurales y no estructurales adecuados.

Para definir la buena calidad de un hormigón se debe tener en mente características en cada uno de los estados por los que un hormigón atraviesa hasta su colocación definitiva en él encofrado. Inicialmente un hormigón de buena calidad debiera tener insumos con características suficientes para cumplir la normativa nacional e internacional, debiera tener además un proceso de cuantificación de estos insumos y su posterior mezclado que garantice uniformidad, posteriormente deberá ser trasladado en condiciones que garanticen sus características en estado fresco y posteriormente deberá ser colocado de una manera que no se cause alteraciones importantes en esta mezcla como podría ser la segregación. Es evidente entonces que la manufactura de un hormigón de buena calidad está condicionada a un sinnúmero de variables y que en la mayoría de los casos de producción a nivel mundial no se tiene en cuenta.

Durante mucho tiempo se asoció la buena calidad del hormigón con la capacidad de éste para desarrollar resistencias en el estado endurecido 28 días después, Sin embargo, en la actualidad se considera un hormigón de buena calidad aquel que además de obtener la resistencia requerida pueda tener una adecuada durabilidad y una facilidad perceptible en su colocación.

La tabla 1.1 muestra una lista de las variables que condicionan la resistencia del hormigón. En esta tabla podemos apreciar que la manufactura del hormigón está condicionada no solo por las variaciones en las propiedades del hormigón mismo si no incluso por condicionantes en los métodos de prueba y análisis a los que esté sometido este material, Así pues los cambios en la relación agua cemento, la variación en los requerimientos de agua de mezcla, las variaciones en las características y proporciones de los ingredientes, las variaciones ocasionadas por el transporte y colocación y compactación y las variaciones en la temperatura y el curado van a influir de una manera tan relevante como los procedimientos de muestreo inadecuados, las dispersiones debidas a las formas de manipuleo, la mala calidad de los moldes para los cilindros de

prueba, los defectos en el curado de estas muestras y finalmente y menos analizados unos procedimientos de ensayo deficientes.

DEBIDO A VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO	DEBIDO A DEFICIENCIAS EN LOS METODOS DE PRUEBA
<ol style="list-style-type: none"> 1) Cambios en la relación Agua/Cemento <ol style="list-style-type: none"> a) Control deficiente de la cantidad de agua. b) Variación excesiva de humedad en los agregados. c) Agua adicional al pie de obra. 2) Variación en los requerimientos de agua de mezcla. <ol style="list-style-type: none"> a) Gradación de los agregados, absorción y forma. b) Características del Cemento y Aditivos. c) Contenido de aire. d) Tiempo de suministro y temperatura. 3) Variaciones en las características y proporciones de los ingredientes. <ol style="list-style-type: none"> a) Agregados. b) Cemento. c) Puzolanas. d) Aditivos. 4) Variaciones ocasionadas por el transporte, colocación y compactación. 5) Variaciones en la temperatura y curado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Procedimientos de muestreo inadecuados. 2) Dispersiones debidas a las formas de preparación manipuleo y curado de cilindros de prueba. 3) Mala calidad de los molde para cilindros de prueba. 4) Defectos de curado : <ol style="list-style-type: none"> a) Variaciones de temperatura. b) Humedad Variable. c) Demoras en el transporte de los cilindros al laboratorio. 5) Procedimientos de ensayo deficientes. <ol style="list-style-type: none"> a) En el refrendado (capping) de los cilindros. b) En el ensayo de compresión.

Tabla 1.1: Fuentes de variabilidad en la resistencia a compresión de un hormigón normal. (Pasquel, 1992)

Así pues, si obtener la resistencia en un hormigón depende de tal cantidad de variables, entonces asegurar la durabilidad y características de buena colocación dependerán de muchas más condiciones y variables. En este trabajo tendremos como objetivo principal tratar de relacionar las variables que condicionen la consistencia del hormigón en estado fresco.

Este estudio tendrá como objetivos específicos los 4 puntos siguientes:

- Analizar las variables condicionantes de una consistencia adecuada en un hormigón en estado fresco.
- Analizar mediante estadística clásica la relación entre variables y la consistencia obtenida en un hormigón luego de ser mezclado.
- Analizar mediante la aplicación de redes neuronales la relación existente entre variables y la consistencia obtenida en un hormigón luego de ser mezclado.
- Proponer y evidenciar que la utilización de procedimientos de redes neuronales artificiales mejora la predicción de la consistencia obtenida en un hormigón luego de ser mezclado.

1.2. METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo Se estructura en capítulos y cada 1 de ellos desarrollará un tema específico. Así pues:

Capítulo 1: En este capítulo se hará una descripción de los objetivos y de la metodología utilizada para desarrollar la tesis y su estructura.

Capítulo 2: En este capítulo se abordará el estado del arte o del conocimiento respecto a las características de un hormigón de calidad y las relaciones que hay entre las condiciones de entrada como la mezcla, selección de materiales, calidad de estos y la consistencia obtenida en la mezcla en estado fresco. Se describirán también las redes neuronales, sus fundamentos teóricos, cómo definir el número de neuronas por capa, evitar el sobre aprendizaje, el entrenamiento de la red y la evaluación del desempeño.

Capítulo 3: En este capítulo se mostrará y detallará la base de datos recolectada para el análisis estadístico y posteriormente con las redes neuronales artificiales construidas se comprobará si es posible obtener una mejor relación entre las variables de entrada y las variables de salida.

Capítulo 4: En este capítulo se llevarán a cabo predicciones de la variable consistencia mediante estadística clásica. Se construirán modelos predictivos de la consistencia del hormigón con la metodología de regresión simple y posteriormente con regresión múltiple aditiva.

Capítulo 5: En este capítulo se utilizarán las redes neuronales artificiales para analizar la relación entre las variables de entrada, relación agua cemento, cantidad de agregado grueso, cantidad de agregado fino, cantidad de cemento, entre otras y la variable de salida, es decir, consistencia de la mezcla de hormigón en estado fresco. Incluiremos también un análisis adicional considerando a la variable consistencia como predictora y a la variable cantidad de agua en la mezcla como de salida y evaluaremos los resultados. Para la realización de estos análisis se utilizará el software Matlab® de la empresa MathWorks en su versión 2023.

Capítulo 6: En este capítulo se mencionan las conclusiones obtenidas en el estudio. Se hace una lista de las conclusiones específicas y se recomiendan futuras líneas de investigación respecto del tema desarrollado en el estudio.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. ¿Qué es el hormigón?

Básicamente el hormigón es la combinación de componentes como los agregados, el cemento y agua; estos dos últimos generan lo que conocemos como pasta, que está compuesta por cemento Portland y agua, y en tiempos más modernos de algunas sustancias llamadas adiciones. La función principal de la pasta es envolver a los agregados dándoles cohesión y a la vez permita tener uniformidad en la mezcla cuando el hormigón haya endurecido.

La figura 1 muestra de forma comparativa las proporciones de sus insumos en cuatro mezclas con aire incluido y sin aire incluido. Cada una de estas mezclas tendrá características diferentes en sus estados fresco y endurecido, Así pues, las mezclas con mayor cantidad de pasta serán las más fluidas y por el contrario las que contengan menor cantidad de pasta serán las de menor consistencia. En esta figura también se muestra que las proporciones de cemento agua y aire son las menores incluso menos de un 20% de la mezcla total para algunos tipos de hormigón y que por el contrario son

los agregados o áridos los que mayor presencia proporcional tienen en cada una de estas mezclas. Se verá en líneas siguientes como cada una de estas proporciones será clave para definir las características propias obtenidas por los hormigones en la etapa de estado endurecido.

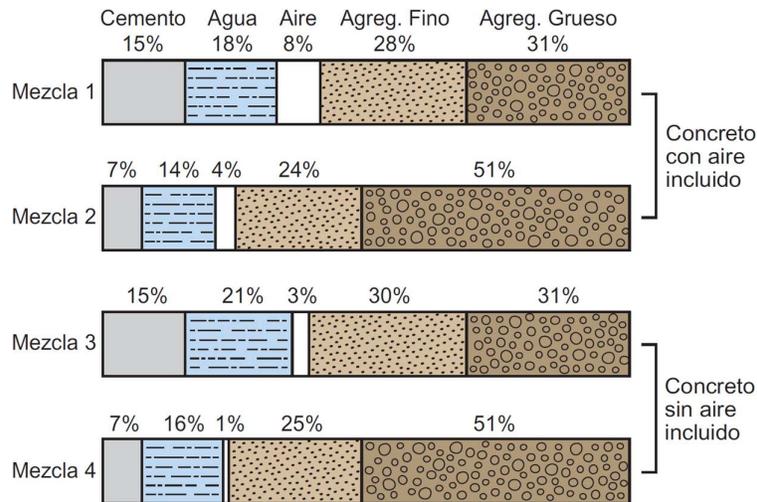


Figura 2.1: Variación de las proporciones usadas en hormigón en volumen absoluto.
 Figura tomada del libro Diseño y Control de Mezclas de Hormigón.

Por lo general los agregados, o áridos como también se les conoce, pueden dividirse en dos grandes grupos, los llamados finos caracterizados por la arena y los agregados gruesos, en donde podemos incluir a las gravas o cantos naturales. Los agregados finos son los que van desde la malla normalizada, según ASTM número cuatro (abertura de tamiz 4.75 mm) a menos, mientras que los agregados gruesos son los que están desde la malla número cuatro hasta la malla de tamaño 3 pulgadas dependiendo de la normativa en la que se esté definiendo esta granulometría.

Por otro lado, cuando hablamos de pasta nos estamos refiriendo a la combinación de Cementos y adiciones que se mezclan con agua, y que además por el proceso de mezclado burbujas de aire que quedan atrapadas en la mezcla por el propio por el propio proceso de amasado; esta pasta generalmente constituye entre un 25% al 40% del volumen absoluto del hormigón.

Por otro lado, los agregados constituyen del 60 al 75% del volumen de la mezcla de hormigón siendo su selección muy importante; estos componentes deben tener características como una resistencia mecánica adecuada, resistencia a las condiciones de abrasión, al intemperismo y a ataques de contaminantes químicos.

Es importante tener en cuenta que el hormigón recién amasado debe ser de contextura plástica o semifluido pues deberá tener la capacidad de moldearse al recipiente en el que se le coloque. Esta plasticidad y consistencia son fundamentales a la hora de darle el acabado que vamos a tener en el elemento que estamos hormigonando.

En esta sección nos vamos a ocupar en describir el estado del arte del hormigón en estado fresco y específicamente de su consistencia.

2.2. NATURALEZA DEL HORMIGÓN

Es bien sabido que el hormigón ha sido aprovechado por el hombre desde tiempos muy antiguos. La facilidad con la que se pueden obtener elementos estructurales resistentes y económicamente viables, hacen que este material haya sido utilizado y siga siendo utilizado hasta la actualidad. Las principales características que hacen del hormigón un material de construcción viable son su facilidad de manufactura y la economía de sus materiales; en efecto, si consideramos que para hacer hormigón, solamente necesitamos un cementante de naturaleza hidráulica y agregados mezclados con una cantidad de agua suficiente para hidratar a aquel cementante, es fácil entender el porqué de su extendida utilización a nivel mundial.

Los hormigones modernos incluyen dentro de sus componentes adiciones y aditivos sofisticados que hacen tener a este material características de resistencia y de durabilidad muy apreciadas. La resistencia le permite al hormigón ser capaz de soportar cargas estructurales altas de compresión en situaciones adversas como sismos y viento; mientras que la durabilidad permite que el hormigón mantenga las mismas características durante toda su vida útil.

La Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, ASTM, define al hormigón como un material compuesto consistente de un medio vinculante en el que se encuentran partículas adheridas o fragmentos de agregado o árido; para el caso del hormigón convencional el material aglutinante se forma a partir de una mezcla de cemento hidráulico y agua.

El cemento hidráulico más difundido a nivel mundial es el cemento Portland; el cual consiste en silicatos hidratados de calcio usualmente con un pequeño porcentaje de sulfato de calcio que controla las ratios de la reacción entre el cemento y el agua.

La sociedad estadounidense para pruebas y materiales define a los agregados como el material granular como la arena grava o piedra triturada usadas en mezclas cementicias para formar hormigón de cemento hidráulico o mortero. Para hormigones convencionales el porcentaje de los agregados en la mezcla de hormigón está en el margen de 60% al 70%. El volumen restante está conformado inicialmente por una matriz de cemento, es decir, pasta y que con el pasar del tiempo y de la reacción química entre los cementantes y el agua va endureciendo y ganando la tan preciada resistencia que es la característica más valorada en el hormigón.

Otro aspecto fundamental que debe mencionarse cuando se habla de la naturaleza del hormigón es el proceso de hidratación del cemento o cementante. Este proceso consiste en la reacción química del cemento o cementante con el agua presente en la mezcla, sin esta reacción, el hormigón sencillamente no existiría. Conocer la naturaleza y forma en que las moléculas de cemento y de agua reaccionan entre sí ayudará a entender mejor la relación que existe entre estos componentes y la característica de consistencia del hormigón en estado fresco.

Es conveniente dividir el proceso de hidratación del cemento en 3 períodos, el primero que se lleva a cabo en las primeras 3 horas, un segundo periodo que va hasta las 24 horas y un tercer período, posterior a las 24 horas de haber sido mezclado y en donde la mezcla empieza a ganar resistencia.

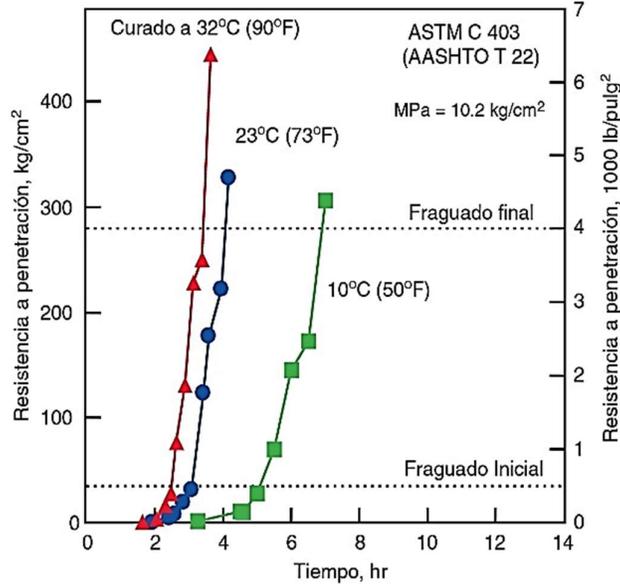


Figura 2.2: Tiempo de inicio y fin de fraguado para una mezcla de concreto en diferentes temperaturas (Burg 1996)

Según lo mencionado por la ASTM tan pronto el agua reacciona con el cemento se forma un gel sobre las moléculas de cemento caracterizadas por ser de forma amorfa y de consistencia coloidal, con mucha presencia de aluminio y sílice, pero conteniendo cantidades significativas de calcio y sulfato. Posteriormente, alrededor de los 10 primeros minutos cantidades de tri sulfato de aluminio ferrito de calcio hidratado empiezan a formarse. Estos compuestos empiezan a formarse y se muestran en la parte exterior de las capas del gel formado.

Durante el segundo período de hidratación del cemento o cementante, aproximadamente un 30% reacciona químicamente y forma rápidamente silicato de calcio hidratado e hidróxido de calcio; este proceso es acompañado de una liberación de calor importante. El hidróxido de calcio forma cristales masivos en la interfase cemento agua mientras que el silicato de calcio hidratado forma una delgada capa alrededor de los granos de cemento. Luego de este proceso y alrededor de la hora 12 se desprende la mayor cantidad de calor completándose el proceso de fraguado en el hormigón. Luego de las 24 horas y como tercer período el hormigón empieza a ganar resistencia incluso después de los 28 días en los que se realizan las pruebas normativas de compresión.

2.3. TRABAJABILIDAD Y CONSISTENCIA EN EL HORMIGÓN

En esta sección intentaremos explicar cuál es la diferencia entre trabajabilidad y consistencia en el hormigón. Se debe tener presente que cada uno de estos términos representan conceptos diferentes. Por una parte, la trabajabilidad debe entenderse como la facilidad que tiene el hormigón para ser trasladado, y colocado sobre o dentro

del encofrado; esta facilidad puede estar o no relacionada con cuán fluido es el hormigón.

2.3.1. TRABAJABILIDAD, CONSISTENCIA Y FLUIDEZ. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Cuando hablamos de consistencia en el hormigón, hablamos de cuán fluido es este y se presenta cuando el hormigón aún está en estado fresco. Esta consistencia es un parámetro medible a través de ensayos, como el conocido, cono de Abrams o cuando tiene mucha fluides o consistencia, el ensayo de la mesa vibratoria.

Por otro lado, un hormigón recién mezclado debe ser plástico o semifluido generalmente capaz de ser moldeado a mano o con elementos mecánicos y con la posibilidad de ser vertido a un encofrado y acomodarse a la forma de este con relativa facilidad. En esta mezcla de hormigón los granos de arena y grava son envueltos y sostenidos por la pasta de cemento o cementante siendo cohesionados y evitando posibilidad de segregación, es decir posibilidad de separarse de la matriz de la mesa. (Pasquel Carbajal, 1998)

Es importante considerar que una mezcla de hormigón fresco debe ser de mezclado uniforme en el que sus componentes estén repartidos de una forma proporcional al espacio que contiene la mezcla y que de esta manera facilite el acomodo entre la pasta y los agregados; Esta uniformidad debe mantenerse en la mezcla durante los procesos de traslado y colocación del hormigón en el encofrado final.

La trabajabilidad en un hormigón se define como la facilidad de colocación, consolidación y posibilidad de dar acabado a la mezcla de concreto fresco que se coloca y además que posea la capacidad de evitar la segregación de sus componentes con una adecuada cohesión. La trabajabilidad está relacionada directamente con la facilidad de los procesos de colocación del hormigón en obra sean estos manuales o industrializados pues para cada uno de ellos la trabajabilidad que deba tener el hormigón tendrá características diferentes. Actualmente la trabajabilidad puede modificarse con la ayuda de aditivos químicos, que son sustancias que generalmente en estado líquido facilitan la consistencia y fluidez del hormigón en las tareas de colocación.

Las principales características relacionadas con la trabajabilidad incluyen la consistencia, la posible segregación, la facilidad de bombeo, la movilidad de la mezcla, la exudación y la facilidad de acabado, todas ellas características importantes al momento de la construcción de los elementos de hormigón. (Pasquel Carbajal, 1998)

Finalmente debe considerarse que cuando hablamos de hormigón fresco estamos hablando de que aún no se ha producido la completa hidratación del cemento y es posible la adición de aditivos químicos que actualmente se utilizan para modificar algunas características del hormigón, en estado fresco o en estado endurecido.

2.3.2. ASENTAMIENTO DEL HORMIGÓN. ¿CÓMO SE MIDE?

Si bien es cierto la consistencia es considerada un buen parámetro para medir la trabajabilidad se debe tener claro que son conceptos diferentes. Así pues, un hormigón cuya mezcla es de consistencia muy fluida podría No ser adecuado para trabajar en elementos masivos. Por otro lado, una mezcla de hormigón de consistencia seca podría

ser muy trabajable para aplicaciones de hormigón en represas o donde el escurrimiento o asentamiento del hormigón deban ser mínimos.

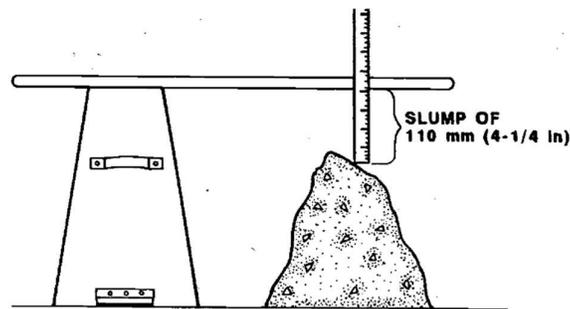


Fig. 1—Slump test.

Figura 2.3: Ensayo de Asentamiento. ASTM C 143 / UNE – EN 12350 – 2

La consistencia en el hormigón puede medirse con varios ensayos, sin embargo, el ensayo más conocido es a través de un ensayo creado por el profesor Abrams en 1929 y que consiste en el moldeo de una cantidad de hormigón a través de un cono y que midiendo el asentamiento producido se obtiene una medida en unidades de longitud entre el borde superior del cono y el punto medio de la superficie del hormigón asentado. La norma correspondiente a este ensayo está dada por los documentos ASTM C 143 y UNE – EN 12350 – 2.

TABLE 1 Precision

Slump and Type Index	Standard Deviation (1s) ^A		Acceptable Range of Two Results (d2s) ^A	
	in.	[mm]	in.	[mm]
<i>Single-Operator Precision:</i>				
Slump 1.2 in. [30 mm]	0.23	[6]	0.65	[17]
Slump 3.4 in. [85 mm]	0.38	[9]	1.07	[25]
Slump 6.5 in. [160 mm]	0.40	[10]	1.13	[28]
<i>Multilaboratory Precision:</i>				
Slump 1.2 in. [30 mm]	0.29	[7]	0.82	[20]
Slump 3.4 in. [85 mm]	0.39	[10]	1.10	[28]
Slump 6.5 in. [160 mm]	0.53	[13]	1.50	[37]

^A These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C670.

Tabla 2.1: Precisión en la realización del ensayo de asentamiento. ASTM C 143 Pag. 03

Este ensayo no es adecuado para hormigones de mucha consistencia es decir muy fluidos y también de hormigones de consistencia seca, es decir sin asentamiento; está

diseñado para la medición de la consistencia en hormigones denominados normales, es decir con asentamientos entre los 10 y 210 milímetros.

La tabla 2.1 muestra las recomendaciones de la norma ASTM C 143 para las mediciones del asentamiento en laboratorio y en campo; Nótese que la precisión se va perdiendo a medida que el asentamiento es mayor, así por ejemplo para mediciones de asentamiento de 85 y 160 mm tendremos un rango aceptable en los resultados con márgenes de precisión de 28 y 37 mm respectivamente.

2.3.3. CONSIDERACIONES ESTADÍSTICAS EN EL MUESTREO Y ENSAYO DE LA CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN.

Como ya se ha mencionado líneas arriba las variables que condicionan la consistencia en una mezcla de hormigón fresco son innumerables; por esa razón instituciones como la American Society of Testing Materials (ASTM) a través de su capítulo SPT 169 ha incluido los métodos estadísticos desde 1956 para analizar la relación y dependencia entre estas numerosas variables y la consistencia obtenida en la mezcla de hormigón. En la publicación con título "Size and Number of Samples and Statistical Consideration in Sampling" de autor Gordon W. A. publicada por primera vez en 1956 ya se hacían recomendaciones para el uso de métodos estadísticos. En años posteriores se han publicado hasta tres actualizaciones que incluyen consideraciones de obra y de material.

En la actualidad el uso de métodos estadísticos para evaluar la data obtenida en las operaciones de mezclado transporte y colocación de hormigón son una práctica recurrente. El uso de criterios de aceptación basados en la probabilidad y las estadísticas es aceptado no solamente en la industria del concreto si no en industrias de manufactura de hormigón prefabricado y mezclado in situ.

Desde la década de 1940 y en adelante, autores como Walker insistieron en el uso de los métodos estadísticos para análisis de las características de hormigón. Walker en su publicación de título "Application of Theory of Probability to Design of concrete for Strength" de 1944 ya incluía los principios estadísticos para el análisis de agregados y áridos e incluirlos en el diseño de mezclas de hormigón.

Si las características del hormigón o de un material que será usado para mezclar hormigón serán determinadas por probabilidad es imprescindible tener un plan de muestreo que permita desarrollar una trazabilidad adecuada de los resultados de estos muestreos. Dos tipos de riesgo son considerados para la aceptación de los planes de muestreo mencionados, en primer lugar, el error de tipo Alfa (α) y el valor de tipo Beta (β).

Estos riesgos son los conocidos como los riesgos del comprador en el caso del riesgo Alfa y los riesgos del vendedor en el caso del riesgo Beta y que permiten analizar resultados de ensayos de hormigón bajo un marco aceptable de seguridad en la aceptación de aquellos resultados. Consecuencia de este análisis se elaborarán gráficos de aceptación que nos permitan ejecutar los controles de calidad al hormigón preparado. La mayoría de los planes diseñados para el control de hormigón y de materiales insumo de hormigón están basadas en la inspección por variables. La inspección por variables está completa cuando se realizan mediciones de características seleccionadas del material en estudio o del insumo deseado para su comparación estadística posterior. Las mediciones obtenidas son utilizadas para

calcular parámetros estadísticos fundamentales necesarios para la caracterización de las propiedades requeridas en el hormigón en estudio.

Los parámetros estadísticos más utilizados para el análisis de valores de características y propiedades del hormigón son la media aritmética y la desviación estándar. Estos parámetros pueden dar un criterio mínimo de aceptación pues si la media aritmética de un valor de alguna propiedad o característica fundamental del hormigón es mayor a lo requerido indicará que por lo menos la mitad del material que tengamos cumple con la condición solicitada. La media aritmética sin embargo no es capaz de medir si los valores analizados son cercanos o por el contrario son lejanos a la media obtenida; esta característica es medida por la desviación estándar. Esto último es muy importante dado que en operaciones de mezclado transporte y colocación de hormigón la variabilidad es un parámetro que suele medirse con frecuencia (Pasquel Carbajal, 1998).

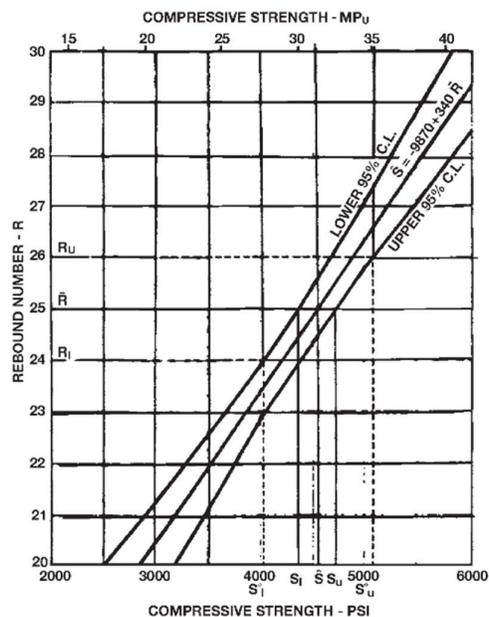


Figura 2.4: Curva de regresión y límites de confianza para resistencia a compresión.

Otra metodología muy utilizada en el análisis estadístico de propiedades importantes en el hormigón es la que nos permite evaluar la correlación o dependencia entre dos variables; una dependiente y otra independiente. En este caso se nos permitirá saber, por ejemplo, si la adición de más agua en una mezcla permite una mayor consistencia o todo lo contrario. A esta herramienta se le conoce como líneas de regresión. Esta metodología es muy útil en situaciones en las que es necesario calibrar instrumentos de medición.

En la metodología de las líneas de regresión son importantes los parámetros o coeficientes de correlación, (r y r^2) que son una medida de la dependencia entre la variable independiente y la dependiente. Las correlaciones entre variables pueden ser lineales o polinómica de grado dos, tres, etcétera.

2.3.4. FACTORES QUE INFLUENCIAN LA CONSISTENCIA EN EL HORMIGÓN

La consistencia en el hormigón está determinada por diferentes factores como los insumos, la forma de mezclado, la relación entre el material cementante y la cantidad de agua agregada a la mezcla o materiales.

Como ya se ha mencionado anteriormente es importante tener clara la diferencia entre consistencia y trabajabilidad; de acuerdo con las recomendaciones del capítulo 125 del American concrete Institute (ACI 125) la plasticidad y consistencia a menudo son utilizados para indicar trabajabilidad, sin embargo, consistencia hace referencia a humedad en el hormigón y es medido a través del ensayo de asentamiento, Así pues, cuanta más humedad contenga la mezcla de hormigón tendrá menos consistencia a tal punto que podría presentar el fenómeno de segregación y por supuesto no ser trabajable. Por el contrario, si una mezcla es muy seca posiblemente será más difícil colocarla en el encofrado y la separación de sus partículas pueden ocurrir por falta de cohesión en la pasta.

2.3.4.1. TIEMPO DE FRAGUA Y CONSISTENCIA.

El tiempo de fragua y la consistencia son parámetros que no están relacionados directamente; así pues, un hormigón de poca consistencia podría tener un tiempo de fragua de muchas horas y un hormigón de mucha consistencia tener un tiempo de fragua corto.

Es importante también reconocer que el tiempo de fraguado en el hormigón corresponde a la culminación del proceso de hidratación de todas las moléculas de cemento incluidas en la mezcla de hormigón, es un proceso químico que durará el tiempo en que se desarrollen estas reacciones químicas entre el agua y el cementante. Esto quiere decir que a pesar de una consistencia muy fluida en hormigón podría no llegar a fraguar si es que no existe la posibilidad de que las moléculas de cemento y agua se unan.

Lo mencionado sucede específicamente cuando se utilizan aditivos reductores de agua o súper plastificantes en los que los principios químicos activos evitan esta reacción.

2.3.4.2. RESISTENCIA Y CONSISTENCIA.

Antiguamente, en el que la consistencia del hormigón dependía solamente de la cantidad de agua agregada en la mezcla, existía la percepción de que la resistencia que alcanzaba el hormigón estaba relacionada con la consistencia de este, Así pues cuanto mayor era la consistencia del hormigón se suponía que éste tenía o alcanzaría menos resistencia en su estado endurecido, sin embargo esta percepción partía de la idea que la consistencia del hormigón solo dependía de agua que se incluía en la mezcla.

En la actualidad esa percepción ha cambiado porque que la consistencia es independiente de cuánta agua agreguemos a la mezcla, sobre todo cuando usamos aditivos químicos. Actualmente se sabe que los factores que regulan la resistencia en el hormigón en estado endurecido y la consistencia no son parámetros que puedan relacionarse directamente. (Lamond & Pielert, 2006)

2.3.4.3. CEMENTOS Y CONSISTENCIA.

En la mayoría de las situaciones, las mezclas de hormigón ligeras, es decir con menos cantidad de cemento, tienden a producir hormigones de consistencia seca y de poca trabajabilidad, por el contrario, mezclas ricas en material cementante producen mezclas más trabajables y de mayor consistencia. Un incremento en la fineza de las partículas de cemento incrementa la cohesión de la mezcla de concreto y la posibilidad de que éste pueda hidratarse de forma temprana (Lamond & Pielert, 2006).

2.4. REDES NEURONALES ARTIFICIALES. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Las redes neuronales artificiales (RNA) son herramientas informáticas que tratan de emular el desempeño del cerebro humano, caracterizándose por “aprender” a través de la “experiencia” y de la utilización de datos del conocimiento genético.

Las redes neuronales presentan muchas ventajas, entre las que están, sintetizar algoritmos a través de un proceso de aprendizaje con data experimental y trabajar con problemas no lineales. Sin embargo, es necesario saber que pueden fallar durante el proceso si es que la data no tiene características de independencia y normalidad. Las redes neuronales artificiales se aplican en muchos problemas de reconocimiento de patrones y de aproximación de funciones debido a sus características de flexibilidad y facilidad de su uso.

Las redes neuronales han sido aplicadas de forma completa y satisfactoria prediciendo variables en diferentes circunstancias y áreas del conocimiento como la psicología, medicina, ingeniería, biología, presentando ventajas comparativas con la estadística clásica (Ortiz 2019).

2.4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Las redes neuronales artificiales (RNA) son herramientas computacionales que ayudan a entender, caracterizar, definir y detectar relaciones complejas y no lineales entre variables. Pueden considerarse como modelos de cálculo que pueden “aprender” y desarrollar tareas cognitivas en base a complejos y muy eficientes algoritmos (Ortiz 2019).

Las RNA están formadas por neuronas artificiales interconectadas entre sí distribuidas en elementos llamados capas, esta distribución será característica de cada red. Las primeras capas tienen como función albergar las variables de entrada; que son las variables con las que se intenta predecir a través de las neuronas ubicadas en las capas intermedias, conocidas también como capas ocultas y que a través de diferentes metodologías matemáticas dan un resultado que se muestra en las capas de salida.

Con respecto a la tecnología del hormigón se ha desarrollado recientemente investigaciones que utilizan las redes neuronales artificiales para analizar resultados de ensayos de durabilidad relacionados con el diseño de mezcla, sin embargo son utilizadas en su mayoría para el cálculo de la resistencia que el hormigón desarrollará posteriormente (Carrasco 2020).

Las RNA están basadas matemáticamente en el teorema de Kolmogorov el cual afirma que, a partir de tres capas, de entrada, oculta y de salida, se puede aproximar hasta el

nivel deseado cualquier función continua en un intervalo haciendo de la red una “apropiadora” de funciones (Ortiz 2019).

Hay estudios que demuestran que la utilización de redes neuronales de más de una capa oculta podría aproximar relaciones que impliquen funciones discontinuas y más complejas (Rzempoluck 1998).

El algoritmo con el que una neurona transforma los valores de entrada a un valor de salida consiste en la utilización de una función de propagación, una función de activación y una función de transferencia. La función de propagación más común es la que consiste en el sumatorio de todas las entradas multiplicada por los pesos de las conexiones más un valor de sesgo o “bias” como se muestra a continuación (Ortiz 2019).

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

Según Navarro Ferrer cada neurona o nodo se denomina j y es asociada a una variable (xj) con una conexión propia(i,j) a la que se le asocia un peso wi,j según el esquema siguiente:

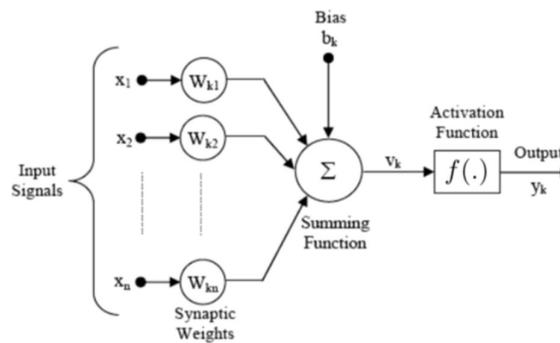


Figura 2.5: Funcionamiento de una red neuronal artificial k (Navarro y Ferrer 2016)

La función de activación pertenece a la activación de salida de la neurona debido a que las neuronas podrían estar activas o inactivas y la neurona podría o no existir. (Match 2001). Estas funciones de transferencia suelen aplicarse al resultado de la función de propagación y comúnmente equivalen a una función de salida acotada. Las principales funciones de transferencia son la lineal escalón o signo, mixta o lineal tramo, gaussiana, sigmoidea, etcétera. (Bruno 2019)

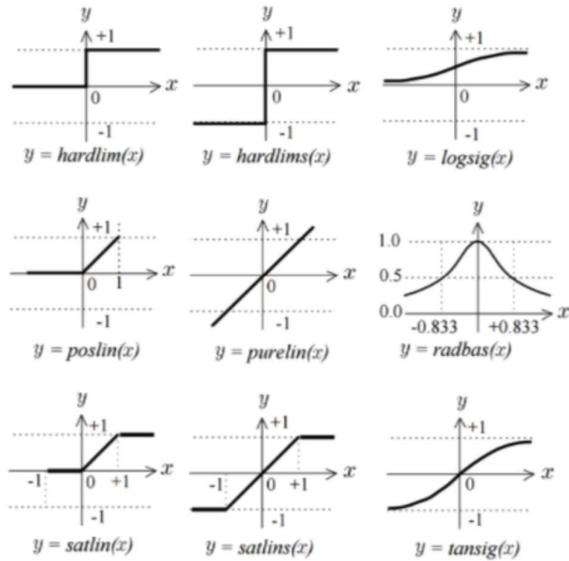


Figura 5.61: Tipología de funciones de transferencia.

Figura 2.6: Tipología de funciones de transferencia

2.4.2. TIPOS DE REDES NEURONALES Y SU FUNCIONAMIENTO.

En la actualidad existen diferentes tipos de redes neuronales artificiales y que se describen en la literatura; Las más conocidas son las redes de tipo Spiking, Feedforward, Las periódicas o recurrentes, las funcionales de base radial y las redes de Kohonen auto organizadas (Yacha 2022).

Las redes neuronales artificiales se pueden clasificar siguiendo la forma de conexión y la forma de aprendizaje que utilicen, normalmente se puede decidir entre redes del tipo Feedforward y las redes neuronales recurrentes. Estos dos tipos de redes se muestran en la tabla 2.1.

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

Tabla 2.1: Tipos de conexión y aprendizaje de las redes neuronales artificiales (Yacha 2022)

A las redes neuronales artificiales también se les puede clasificar según el número de capas empleadas, esta clasificación no es común, pero también se considera válida. Según esta clasificación las redes neuronales pueden ser monocapa o multicapa.

Las redes neuronales monocapa son el tipo más sencillo de red neuronal y se compone de una sola capa y la función se realiza a través de una capa de entrada y una capa de salida.

Por otro lado, en las redes neuronales multicapa a diferencia de las monocapa, existe un conjunto de capas intermedias entre la capa de entrada y salida llamadas capas ocultas en el que se realiza el proceso de transferencia hacia las capas de salida.

En el presente estudio se ejecutarán redes neuronales de propagación hacia adelante y con un aprendizaje supervisado por lo que de ahora en adelante nos concentraremos en ese tipo de redes. Estas redes tendrán conexiones tipo feedforward que equivale a un proceso computacional en paralelo donde varias neuronas están interconectadas masivamente con la capa anterior adquiriendo la información necesaria para transmitirla posteriormente a la capa siguiente donde finalmente llega la información.

La función de activación que utilizaremos será la mostrada a continuación:

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

Donde Y es el vector salida de cada una de las neuronas de una capa dada, W es la matriz que contiene los pesos sinápticos o de importancia para cada una de las M salidas para todas las N neuronas siendo x el vector que contiene las entradas, N Es el vector que contiene los sesgos (bias) y f la función de activación (Ortiz 2019)

2.4.3. DEFINICIÓN DEL NÚMERO DE NEURONAS EN LA CAPA OCULTA.

En este trabajo utilizaremos una red neuronal artificial de una sola capa oculta que según Lidman, en 1987 es capaz de resolver problemas arbitrariamente complejos siempre y cuando podamos tener un mínimo de neuronas.

Diversos autores han propuesto fórmulas matemáticas para calcular el número mínimo de neuronas en la capa oculta, estas fórmulas matemáticas consideran a los parámetros n y m , siendo n el número de neuronas en la capa de entrada es decir las variables de entrada y m el número de neuronas de la capa de salida, es decir las variables de salida por lo que de este modo se define un número mínimo k de neuronas en la capa oculta.

La tabla 2.2 muestra un resumen de diversas fórmulas matemáticas propuestas por diversos autores para el cálculo de las neuronas mínimas de la capa oculta.

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

Tabla 2.2: Fórmulas matemáticas para el cálculo del número mínimo de neuronas en la capa oculta (Navarro Ferrer 2016)

En este trabajo utilizaremos la metodología de calcular el coeficiente de correlación para diferentes valores de la variable k y escoger el que tenga el mayor coeficiente de correlación R .

2.4.4. APRENDIZAJE Y SOBREALPRENDIZAJE DE LA RED NEURONAL

El objetivo del aprendizaje o entrenamiento de la red neuronal es que esta sea capaz de reproducir el valor buscado mediante la minimización de una función de costo o error; la función de coste o error más utilizada es la de promedio de errores al cuadrado con sus siglas MSE (Navarro Ferrer 2016).

Dentro de los tipos de métodos de ajuste existen los de algoritmo de tipo gradiente y algoritmos de tipo genéticos; la diferencia entre ellos radica en que el primero el mínimo encontrado puede ser local mientras que en el segundo se considera una búsqueda multidireccional en base a un algoritmo aleatorio, por lo que a diferencia del algoritmo de tipo gradiente podría quedarse con una solución local siendo esta poco efectiva.

El algoritmo de aprendizaje más empleado en la ingeniería es el backpropagation que es la generalización de los procedimientos de mínimos cuadrados que funcionan para redes que tienen capas ocultas normalmente entre la capa de entrada y las capas de salida.

Es importante tener en consideración que una red neuronal artificial podría tener el problema del sobre aprendizaje que significa que la red perderá generalización es decir solo funcionará para los datos que se han tenido en cuenta para crearla. Para evitar este sobre sobre aprendizaje podríamos buscar más datos o reducir el tamaño de la red es decir disminuir el número de parámetros que estamos buscando. Este proceso generalmente es de prueba y error y exigirá del investigador criterios previos de relación entre las variables para que con el análisis de los resultados se puedan descartar a aquellos que no tengan coherencia.

2.4.5. DATOS DE ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y TEST. ESTANDARIZACIÓN DE LOS DATOS.

Para que la red neuronal artificial sea capaz de tener resultados generalizados controlar el aprendizaje y predecir resultados coherentes es importante dividir los datos que se tengan en 3 grupos, es decir, datos para entrenamiento, datos para validación y datos para corroborar o testear los resultados una vez finalizado el entrenamiento.

Una vez definidos los tres grupos que utilizaremos para entrenar la red debemos escoger una metodología que nos permita evitar el sobre aprendizaje. Entre estas técnicas se pueden mencionar a las técnicas early stopping, el principio de parsimonia o navaja de ockham y a las redes podadas.

La metodología del early stopping consiste en ir comparando los errores que se obtienen con los datos de entrenamiento y validación en el proceso iterativo de optimización de tal manera que si el error de los datos de validación aumenta y el error de los datos de entrenamiento disminuye el proceso de optimización se detiene.

Por otro lado, el principio de parsimonia o navaja de Ockham menciona que para dos redes neuronales artificiales similares, la correcta será la que tenga explicación más simple. La técnica se basa en ir agregando un sumatorio ponderado de la red en función del error y considerar correcta a la red neuronal aquella que tenga el peso de menor valor (Navarro Ferrer 2016).

Las redes neuronales artificiales del tipo podadas conocidas en inglés como Pruned neural networks ejecutan una eliminación de neuronas en base a observar una menor cantidad de parámetros. Por lo general las redes neuronales artificiales podadas se utilizan desconectando neuronas que contienen variables de entrada y que son o redundantes o poco relevantes.

Finalmente es necesario comentar que para que una red neuronal artificial tenga un proceso de aprendizaje mejor pueden estandarizarse los datos de entrada y salida y esto se puede lograr a través de un proceso que induzca a los datos de entrada y salida a que encuentren un rango determinado.

2.4.6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

Las redes neuronales artificiales son procesos que pueden ser objeto de evaluación en su desempeño y esto se logrará a través de diversas técnicas como las que utilizaremos en este trabajo.

Para evaluar el desempeño de nuestras redes neuronales utilizaremos los parámetros conocidos como promedio de los errores al cuadrado (MSE), Error relativo promedio (MER), el promedio de los errores al cuadrado (RMSE) y el factor de correlación al cuadrado recomendado por Navarro Ferrer 2016.

3. BASE DE DATOS OBTENIDA

La construcción de una base de datos suficiente para la realización de los modelos estadísticos y de redes neuronales artificiales era el primer paso para poder analizar las relaciones que podrían existir entre la consistencia o asentamiento a un determinado tiempo con las variables que llamaremos “predictoras”; que en este caso las más importantes serán el tipo de cemento y la cantidad de cemento, cantidad de aditivo plastificante cantidad de aditivo superplastificante temperatura de mezclado y tipo de agregado.

Para este estudio se han obtenido los resultados de consistencia y asentamiento de 1006 ensayos, la mayoría de ellos obtenidos mediante el ensayo del cono de Abraham y otros a través del ensayo con la mesa de sacudidas, inmediatamente después de haber terminado de mezclar y luego a cinco, diez, quince, treinta, sesenta, noventa y 120 minutos. Los ensayos han sido recopilados de artículos científicos de autores diversos y de diferentes objetivos de estudio. Nos hemos concentrado en aquellos que tenían datos de consistencia o asentamiento.

VARIABLE PREDICTORA	DESCRIPCIÓN	ABREVIATURA
Tipo de Cementante	Tipo de cementante utilizado en la mezcla. Puede ser cemento Portland, adición o una combinación de ellos.	TipCemento
Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo reductor de agua agregado a la mezcla en estudio. No se asume diferencia en el principio activo del aditivo.	RedAgua
Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante agregado a la mezcla. Principalmente a base de policarboxilato.	Superplast
Cantidad de cementante (kg/m ³)	Cantidad de material cementante agregado a la mezcla.	CantCemento
Relación agua / cementante	Relación agua cementante en la mezcla.	a/c
Aditivo inclusor de aire (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo inclusor de aire.	IncAire
Temperatura Mezclado	Temperatura en la que se ha realizado el mezclado.	T
Agregado Reciclado	El agregado que se ha utilizado en la mezcla es de origen natural o reciclado.	AgregRec
Cantidad de Agua	Es la cantidad de agua incluida en la mezcla	W
Agregado fino	Cantidad de agregado fino incluida en la mezcla	Fino
Agregado grueso	Cantidad de agregado grueso incluida en la mezcla	Grueso
Agregado total	Cantidad de agregado incluido en la mezcla. Suma de agregado fino y agregado grueso	AgregTotal

Tabla 3.1: Lista de variables predictoras consideradas en este estudio.

VARIABLE OBJETIVO	DESCRIPCIÓN	ABREVIATURA
Asentamiento inmediato luego de mezcla	Ensayo de asentamiento realizado inmediatamente acabado el proceso de mezclado.	0

Tabla 3.2: Variable objetivo considerada en este estudio.

La tabla 3.1 muestra las variables “predictoras” que utilizaremos en este estudio con el objetivo de analizar y predecir el asentamiento y consistencia a un determinado tiempo.

La 3.2 muestra la variable “objetivo” para este estudio. En esta lista podemos apreciar diferentes resultados de asentamiento y consistencia a diferentes tiempos.

La lista completa de resultados de cada ensayo conseguido de los artículos científicos se muestra en el anexo A.

La base de datos se ha construido en base a 20 artículos científicos y una publicación académica. Los artículos científicos estuvieron relacionados con el estudio de la resistencia a compresión del hormigón, el efecto de los materiales ultrafino en la resistencia y trabajabilidad del hormigón, el uso de adiciones de humo de sílice para mejorar las características resistentes del hormigón entre otras.

En el primer artículo “Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder” Colling y Sanjayan presentan los resultados de una investigación sobre los efectos de los materiales ultrafinos en la trabajabilidad y el desarrollo de resistencia en el hormigón que contiene escoria activada por álcali (AAS) como material aglutinante. Su estudio encontró que el reemplazo parcial de la escoria con cenizas volantes ultrafinas mejora la trabajabilidad; a pesar de que el desarrollo de la resistencia es similar al cemento portland tipo I.

En el artículo “Use of Blended Silica Fume Cement in Commercial Concrete Mixtures” los autores Khayat, Vachon y Lanctot mencionan que como el uso de cemento mezclado con humo de sílice e integrado en el hormigón comercial aumenta las posibilidades de uso de este material en la construcción y es importante evaluar la influencia de tales tipos de cemento en las características importantes de hormigón fresco y endurecido. El objetivo de esta publicación es proporcionar datos sobre varias características importantes del hormigón mezclado con el cemento que contiene estas adiciones, es decir un cemento de humo de sílice, y comparar los resultados obtenidos con mezclas similares que contengan Cementos estandarizados de tipo portland fabricados en Canada como son CSA Tipo 10 y Tipo 20 (similares a Cementos ASTM C 150 Tipo I y Tipo II). Veintiséis mezclas utilizadas en la construcción y la industria en el este de Canadá de las cuales la mitad tenían aditivos inclusores de aire con relaciones agua cementantes de 0,33 a 0,59. La mitad restante no tenían inclusión de aditivos inclusores de aire con relaciones de agua cemento desde 0,45 a 0,69. Las mezclas fueron ensayadas en cuanto a consistencia, aire contenido, sangrado externo, tiempo de fraguado, aumento de temperatura, desarrollo de la resistencia a la compresión, permeabilidad rápida a los iones de cloruro, sistema de vacío de aire, durabilidad de congelación y descongelación y resistencia a la incrustación. Comparado con hormigones de similar naturaleza que contienen cementos Tipo 10 y Tipo 20, se encontró que el

uso de cemento de humo de sílice mezclado aumentó cohesión y resistencia, reduce la permeabilidad y mejora la descamación resistencia.

En el artículo “Slump Loss of Concrete Based on RCA and Prepared by Specific Mixing Approach” los autores Sičáková, Urbán y Kováč escribieron respecto a que el hormigón es un material dinámico y su consistencia cambia con el tiempo, teniendo impacto en los procesos tecnológicos y de trabajo en el sitio de obra y esta característica se muestra a través de la pérdida de asentamiento o de consistencia de la mezcla.

Para escribir su artículo se probaron dos tipos de aditivos y adiciones, cenizas volantes y polvo de concreto reciclado; los que fueron probados para encontrar su potencial en el mejoramiento del rendimiento de los agregados reciclados de hormigón.

En el artículo “On Workability and Pumpability of Superplasticized Concrete Experience in Japan” los autores Kasami, Ikeda y Yamane evalúan el desempeño de un superplastificante que les permite tener obtener un hormigón con mayor consistencia. Obtienen además mejorar el desempeño en hormigones bombeables, obteniendo una reducción en la resistencia de arrastre de la bomba entre un 5% y 20%.

En el estudio “Experiences in the Use Of Superplasticizers in England” el autor Hewlett empieza a experimentar con aditivos fabricados en Inglaterra los cuales mejoran sustancialmente la trabajabilidad y consistencia de los hormigones preparados.

En el estudio “Water Reduction, Slump Loss and Entrained Air – Void Systems as Influenced by Superplastizicers los autores Perenchio, Whiting y Kantro presentaron su experimentación con el uso de aditivos reductores de agua y superplastificantes que les permitieron obtener hormigones con mayores resistencias a compresión, más cohesivos y de apariencia más uniforme. Sin embargo, también experimentaron con aditivos inclusores de agua, los cuales tuvieron como consecuencia una disminución de la resistencia característica comparada con aquella de hormigones sin aditivo inclusor de aire.

En el estudio “Factor Influencing Slump Loss in Flowing Concrete” el autor Mailvaganam encontró los primeros indicios de la relación que tiene la pérdida de consistencia de hormigones superplastificados debido a variables como temperatura, consistencia inicial, cantidad y tipo de cemento y sobre todo con diferentes tipos de aditivo reductores de agua.

En el estudio “Blending of Acrylic Superplasticizer With Naphtalene, melamine o Lignosulfonate – Based Polymers los autores Coppola, Erali, Trolí y Collepardi experimentaron con diversas sustancias como principios activos para el desarrollo de aditivos reductores de agua y superplastificantes.

En el estudio “Workability and Compressive Strength Properties of Normal Weight Concrete Using High Dosaje of Fly Ash as Cemnt Replastmen” los autores Shaikuthali, Mannan, Thannon, Teo, Ahmadi e Ismail experimentan la pérdida de consistencia en hormigones con contenido de ceniza volante.

En el estudio “Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete” los autores Salem, Alsadey y Johari encuentran relación

entre las mezclas que contienen aditivo superplastificante y propiedades del hormigón como la consistencia y la resistencia a compresión.

En el estudio “High-performance carboxylate superplasticizers for concretes: Interplay between the polymerization temperature and properties” los autores Tajbakhshian, Reza, Hassan, Najafi, Ali, Ayoubi y Hassanpour empiezan a experimentar con super plastificantes en base a policarboxilato y a ácido maleico. Encontraron un mejor desempeño en el uso de aditivos a base de policarboxilatos.

En el estudio “Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete” los autores Younis, Ebead, Suraneni y Nanni experimentaron con hormigones mezclados con agua de mar, en el que las grandes cantidades de iones cloruro hicieron de la durabilidad un parámetro difícil de conseguir por lo que recomendaron evitar este uso de hormigones en condiciones estructurales.

En el estudio “Concrete Slump Loss” publicado por el American Concrete Institute el autor Previte empieza a describir los efectos en el hormigón de la pérdida de consistencia. Encontraron además que el slump

En el estudio “Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete” los autores Salem, Alsadey y Johari analizaron la influencia de las dosis de superplastificante en relación con la cantidad de cemento. Se ejecutaron ensayos para determinar y cuantificar los efectos de estos superplastificantes sobre el desempeño del hormigón. Los principales ensayos considerados fueron el ensayo de asentamiento, mesa de flujo y resistencia a la compresión obteniéndose resultados que respaldaban un mejor desempeño respecto a la trabajabilidad y un mejor y mayor desarrollo de resistencia.

En el estudio “Low Slump Loss Superplasticized concrete” los autores Collepari, Corradi y Valente analizaron la influencia de aditivos superplastificantes con base en polímeros naftaleno sulfonados en las características del hormigón y principalmente en la pérdida de asentamiento, encontrando que la presencia de este aditivo en la mezcla retardaba la hidratación de los silicatos cálcicos presentes en el cemento, prolongando el tiempo de fragua y ayudando a mantener la consistencia en el tiempo.

En el estudio “Control of slump loss in superplasticized concrete” los autores Ramachandran, Beaudoin y Shihua analizaron los efectos de aditivos superplastificantes de base formaldeído melamine sulfonado para el control de la pérdida de asentamiento y el retraso en el fraguado en los hormigones con este aditivo en sus mezclas.

En el estudio “Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates” los autores Tangchirapat, Rattanashotinunt, Buranasing y Jaturapitakkul analizaron los efectos de la finura y del reemplazo de parte del cemento por este material. Investigaron también el uso de agregado reciclado de hormigón. Se logró demostrar que la combinación de agregado reciclado y ceniza volante brindaba ventajas en cuanto a la resistencia y durabilidad.

En el estudio “Prediction of Strength and Slump of Rice Husk Ash Incorporated High Performance Concrete” los autores Islam, Mohd y Jamil construyeron modelos estadísticos para predecir el desempeño de un hormigón con ceniza volante. Las características analizadas fueron la resistencia y la pérdida de slump.

En el estudio “Investigation of Fly Ash Concrete by Slump Cone and Compaction Factor Test” los autores Manhajan, Mahadik y Bhagat estudiaron los efectos de la ceniza volante sobre la resistencia del hormigón, su consistencia y características de compactación.

En el estudio “Estimating the Optimal Mixture Design of Concrete Pavements Using a Numerical Method and Meta heuristic Algorithms” los autores Shirzadi, Naseri y Etebari construyeron un modelo de optimización para el diseño de mezcla de hormigones usados para pavimentos a través de algoritmos metaheurísticos.

Finalmente, en el estudio “Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador” el autor Carrasco Avendaño utiliza estadística clásica y métodos de redes neuronales abiertas para la predicción de estos valores.

4. APLICACIÓN DE MODELOS ESTADÍSTICOS CLÁSICOS. ANALISIS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo nos encargaremos de realizar un análisis estadístico con modelos clásicos de predicción y analizaremos la dependencia que tiene la consistencia del hormigón en estado fresco frente a las variables que hemos definido anteriormente. En este análisis realizaremos en primer lugar una regresión lineal simple que nos permita identificar cuál es la dependencia de la consistencia del hormigón al tiempo cero es decir al tiempo luego de haber finalizado el mezclado del hormigón. Posteriormente haremos una regresión múltiple del tipo lineal para relacionar esta consistencia en el tiempo cero con las demás variables definidas.

El objetivo de este capítulo es tener cuantificado a través del parámetro coeficiente de Pearson r^2 también denominado coeficiente de determinación que tanto puede explicar o qué tanto están relacionadas las variables con la consistencia que deseamos predecir.

Para la ejecución de este análisis utilizaremos un software conocido en el mercado y que nos va a permitir trabajar cómodamente con la cantidad de variables y de datos recolectados. Este software es MINITAB Versión 21.1.1 Edición 64 bits

Con este programa informático trataremos de explicar en una primera etapa cada relación de forma independiente de la variable objetivo que en este caso será la consistencia en un primer momento, que es el momento en el que hemos terminado de ejecutar el mezclado del hormigón. Según Navarro Ferrer 2016 es posible explicar un mayor porcentaje de la variabilidad aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva incluyendo en cada paso una variable predictora adicional; este análisis lo ejecutaremos posteriormente a la regresión lineal.

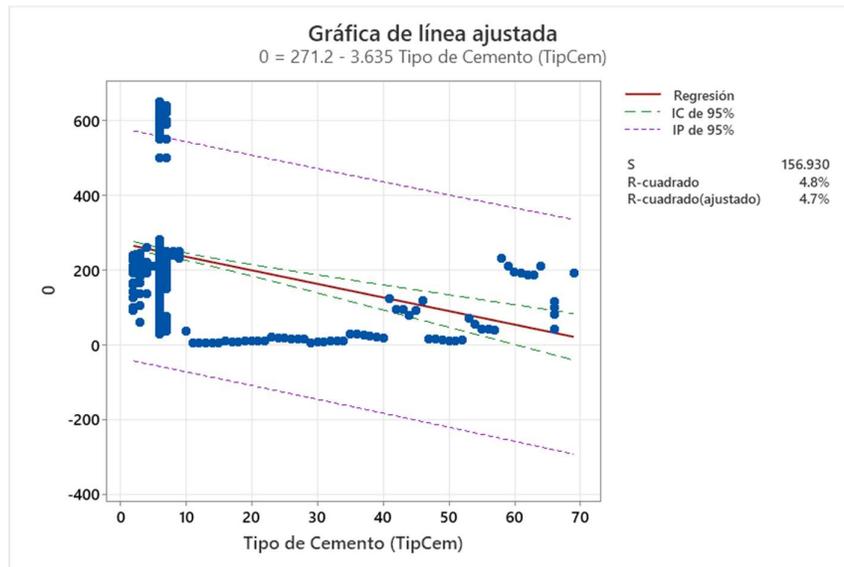
4.1. REGRESION LINEAL SIMPLE

Como ya lo hemos mencionado a continuación presentaremos el análisis estadístico de cada una de las variables predictoras para con la consistencia o asentamiento, inmediatamente después de hacer el mezclado del hormigón.

El análisis estadístico que haremos para cada una de las variables predictoras se hará considerando un término independiente o constante, de tal manera de poder analizar el

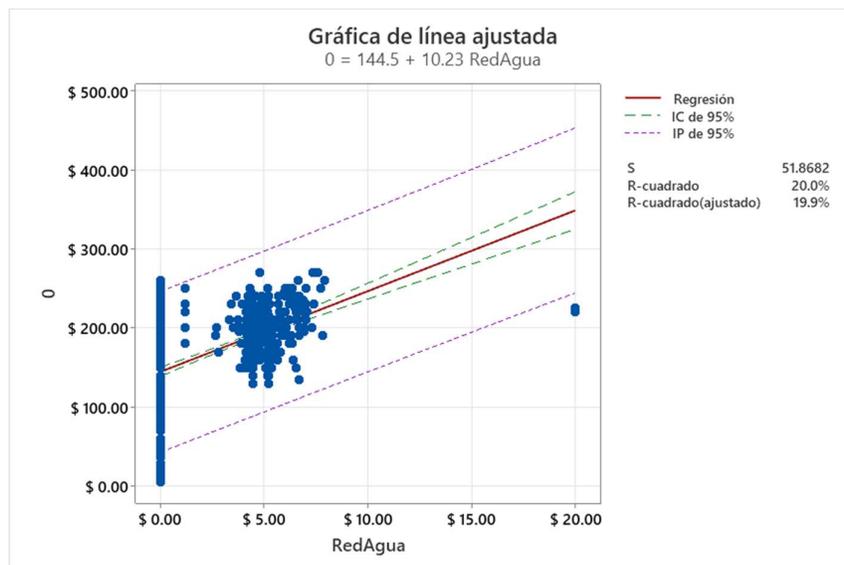
R² ajustado; existe la posibilidad de hacer el análisis sin el término constante sin embargo no podremos hacer la comparación con el R² ajustado.

El análisis de regresión simple se ejecutará con las 12 variables presentadas previamente de tal manera que se pueda apreciar de forma gráfica la dependencia de la variable consistencia en el tiempo cero con la variable en estudio.



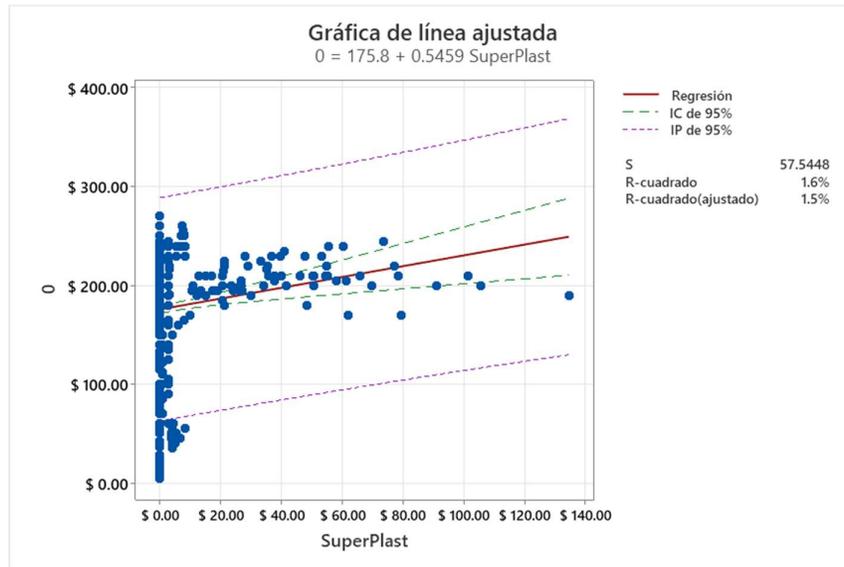
Gráfica 4.1: Gráfica de línea ajustada para la variable tipo de cemento.

La Gráfica 4.1 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el hormigón De Estado fresco y la variable que representa el tipo de cemento utilizado. Como se puede apreciar esta correlación está cuantificada en el 4.7%.



Gráfica 4.2: Gráfica de línea ajustada para la variable aditivo reductor de agua.

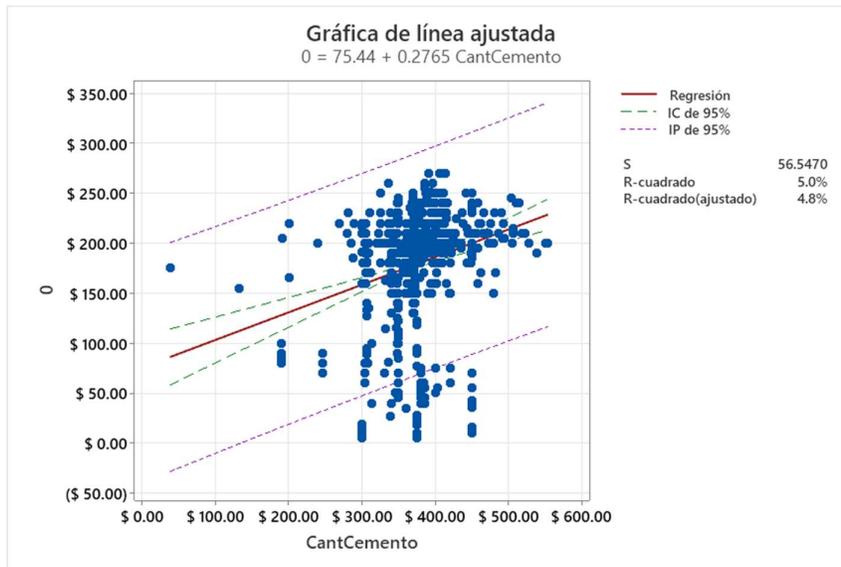
La grafica 4.2 muestra la correlación entre el aditivo reductor de agua y la variable dependiente consistencia en el tiempo cero. Como se puede apreciar está correlación tiene un porcentaje OR cuadrado de 19.9% la que corresponde a un valor bajo. Si bien es cierto en la práctica profesional se tiene la idea que la inclusión de un aditivo reductor de agua puede ayudar a mejorar la consistencia de un hormigón fresco la correlación que existe entre ambas variables no es representativa.



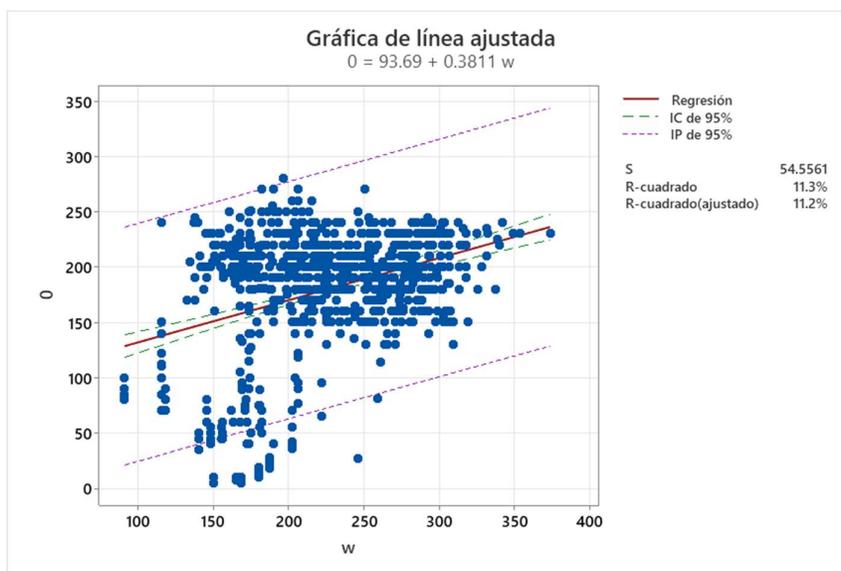
Grafica 4.3: Gráfica de línea ajustada para la variable aditivo superplastificante.

La Grafica 4.3 muestra la correlación entre el aditivo superplastificante agregado a la mezcla y la variable dependiente consistencia del hormigón y el tiempo cero, la figura también muestra que esa correlación se cuantifica a través del coeficiente de pearson con un valor mucho más bajo que el aditivo reductor de agua. En este caso la correlación se cuantifica con un 1.5% que podríamos considerar como irrelevante.

La Grafica 4.4 muestra la correlación entre la cantidad de cemento y la variable dependiente consistencia del hormigón en el tiempo cero y se puede apreciar que la influencia que tiene la variable cantidad de cemento en el análisis estadístico se cuantifica como un 4.8%, qué es sustancialmente menor que la variable que representa al contenido de aditivo reductor de agua. Esto podría explicar en por qué es más importante para una mezcla de hormigón fresco el aditivo incluido en ella más que la cantidad de cemento. Es importante mencionar que la cantidad de cemento es completamente independiente del tipo de este.

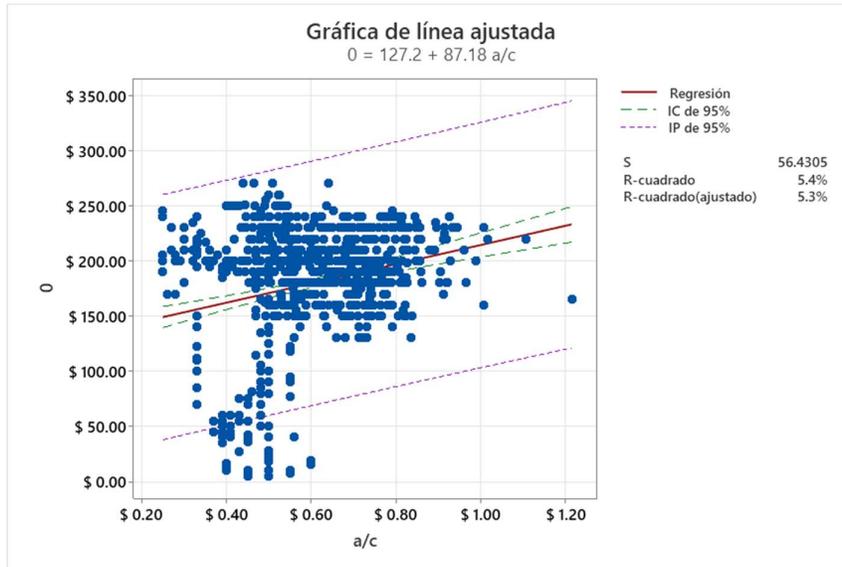


Grafica 4.4: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de cemento.



Grafica 4.5: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agua en la mezcla de hormigón en estado fresco.

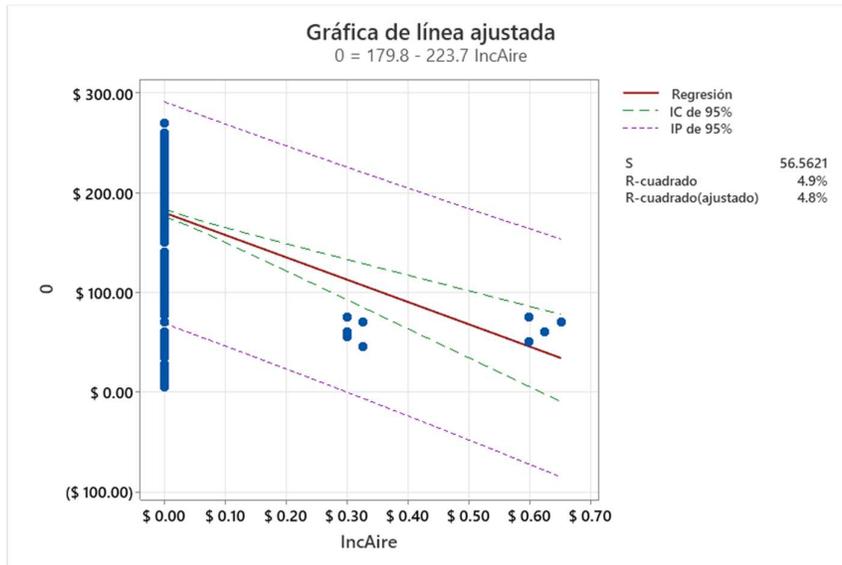
La Grafica 4.5 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el hormigón en estado fresco y la variable agua; esta correlación tiene un valor cuantificable en 11.2% que se percibe como un valor considerablemente bajo teniendo en cuenta que experimentalmente la cantidad de agua en una mezcla de hormigón es relevante.



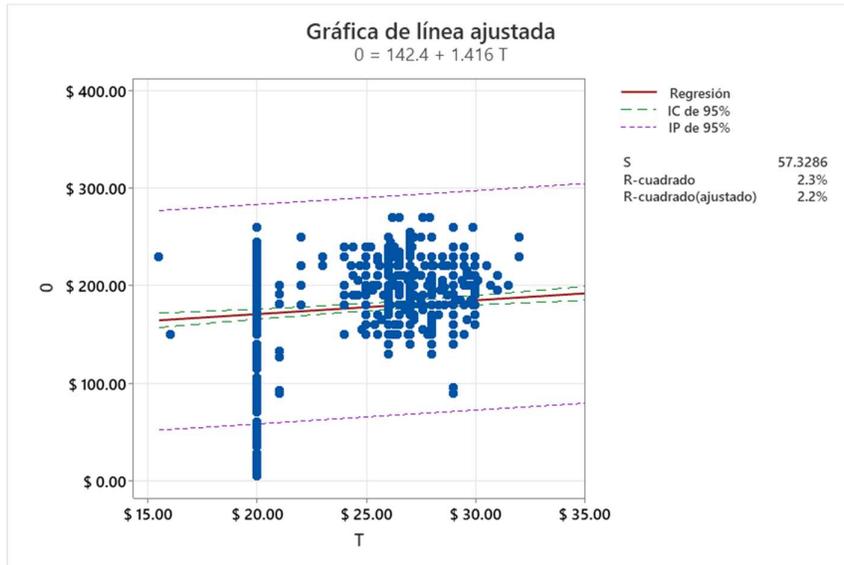
Grafica 4.6: Gráfica de línea ajustada para la variable relación agua cemento.

La Grafica 4.6 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el hormigón en estado fresco y la variable relación agua cemento. Esta correlación tiene un valor de 5.3%.

La Grafica 4.7 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el hormigón en estado fresco y la variable que representa la cantidad de aditivo inclusor de aire en la mezcla de hormigón fresco; esta correlación se cuantifica en 4.8%. Es preciso anotar que es conocido el efecto plastificante que generan las burbujas de aire incluido en mezclas de hormigón fresco a consecuencia de la inscripción del aditivo inclusor de aire.

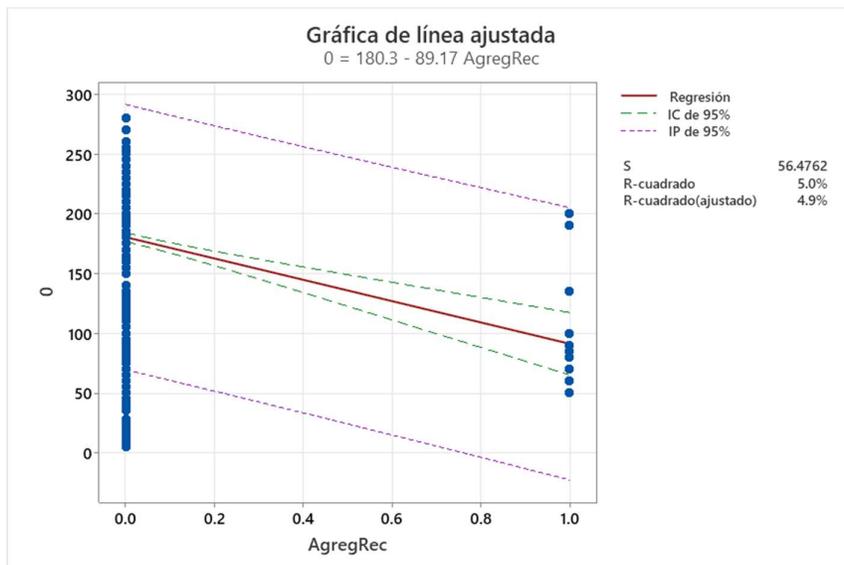


Grafica 4.7: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de aditivo inclusor de aire.



Grafica 4.8: Gráfica de línea ajustada para la variable temperatura del hormigón.

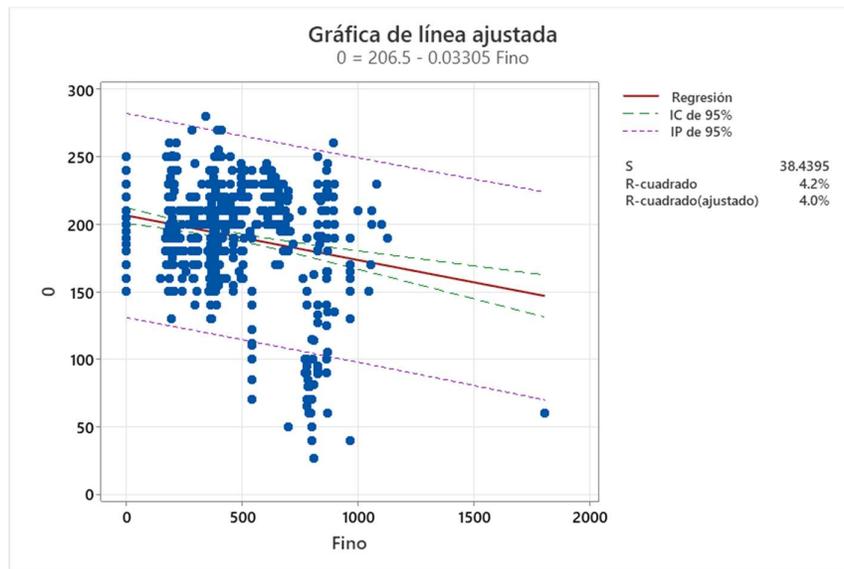
La Grafica 4.8 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el tiempo cero del hormigón en estado fresco y la temperatura del hormigón en el momento inmediatamente después de haber sido ejecutada la mezcla. Esta correlación tiene un valor de 2.2%.



Grafica 4.9: Gráfica de línea ajustada para la variable agregado reciclado.

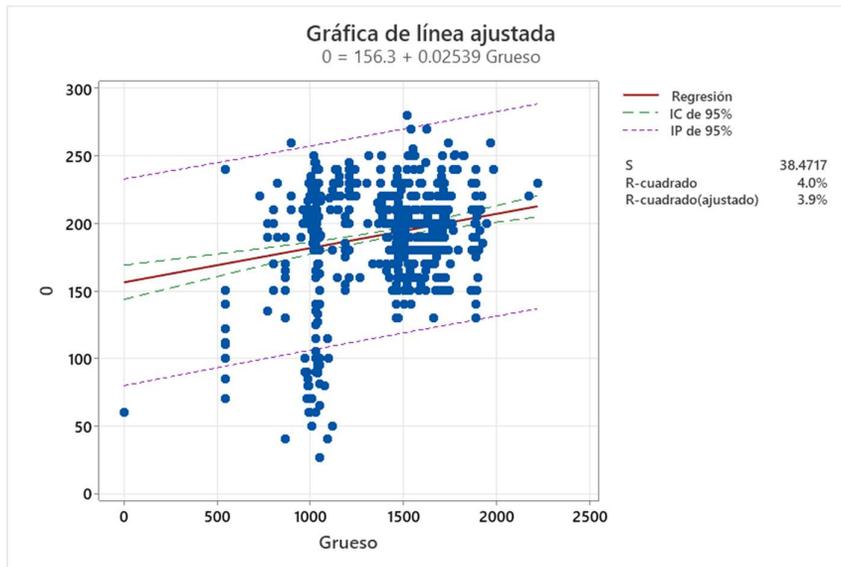
La Grafica 4.9 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el tiempo cero del hormigón en estado fresco y la variable que representa el agregado reciclado incluido en el hormigón. Esta correlación tiene un valor de 4.9%.

La Grafica 4.10 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el tiempo cero de la mezcla de hormigón en estado fresco y la variable que representa la cantidad de agregado fino incluida en la mezcla de hormigón en estado fresco. Esta correlación tiene un valor nominal de 4% que es similar a la correlación con la cantidad de cemento mostrada en gráficos anteriores.



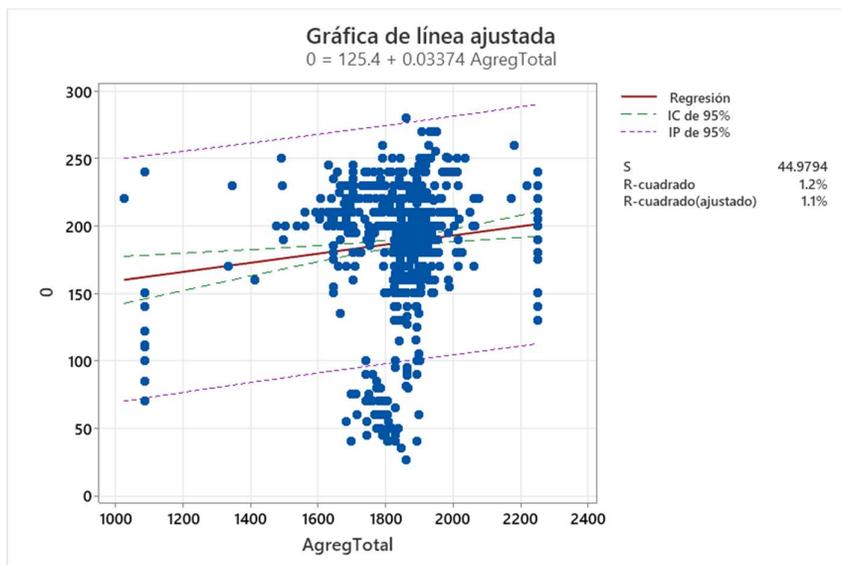
Grafica 4.10: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agregado fino.

La Grafica 4.11 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el tiempo cero De la mezcla de hormigón en estado fresco y la variable que representa la cantidad de agregado grueso presente en la mezcla. Esta correlación se cuantifica con un valor de 3.9%.



Grafica 4.11: gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agregado grueso.

La Grafica 4.12 muestra la correlación entre la variable dependiente consistencia en el tiempo cero de la mezcla de hormigón en estado fresco y la variable que representa la cantidad de agregado total presente en la Mezcla. Es importante mencionar que la variable que representa la cantidad de agregado total en la mezcla incluye agregado fino y agregado grueso. El coeficiente de determinación tiene un valor de 1.1%.



Grafica 4.12: Gráfica de línea ajustada para la variable cantidad de agregado total.

4.2. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Para poder explicar la relación que existe entre variables predictivas y variables dependientes se ejecutó un análisis de regresión lineal múltiple con las 12 variables consideradas en el estudio.

Construiremos un modelo de predicción tomando en cuenta la influencia que cada una de ellas tiene sobre la variable dependiente, en este caso la consistencia luego de terminar de mezclar o en el que llamaremos, el tiempo cero.

Empezaremos con el análisis con dos variables y en la medida de lo posible continuaremos adicionando variables en la construcción del modelo.

4.2.1. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO Y LA INCLUSIÓN DE ADITIVO INCLUSOR DE AIRE

La ecuación a continuación representa la ecuación de regresión entre las variables predictoras tipo de cemento y aditivo reductor de agua Y la variable dependiente consistencia o asentamiento en el tiempo inmediatamente después de terminar la acción de mezclado del hormigón. En esta ecuación se puede apreciar la existencia de un sumando constante y de sumandos constituidos por un coeficiente que multiplica a cada una de las variables predictoras.

$$0 = 164.64 - 1.596 \text{ TipCemento} + 8.310 \text{ RedAgua}$$

La tabla 4.1 presenta el resumen del modelo de regresión para estas dos variables predictores; como se puede apreciar se obtienen valores de 26.81% para el coeficiente de correlación.

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
49.2190	27.93%	27.76%	26.81%	49.5119	26.81%

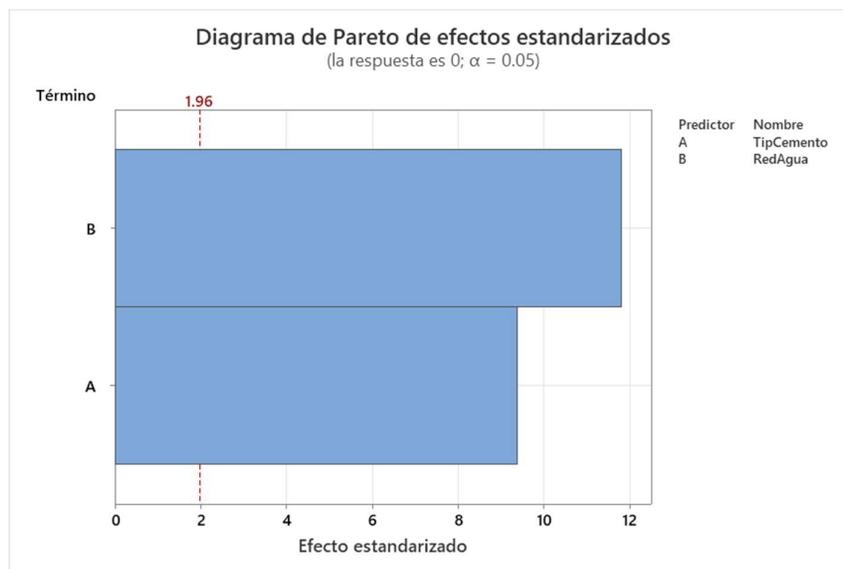
Tabla 4.1: Resumen del modelo de regresión para las variables tipo de cemento y aditivo reductor de agua.

La tabla 4.2 muestra los coeficientes independientes, de la variable tipo de cemento y del aditivo reductor de agua; también muestra el error estándar de este coeficiente que calcula la variabilidad entre los estimados del coeficiente que se calcularía si las muestras se tomarán de la misma población una y otra vez. La tabla también muestra el valor de T que cuantifica que tan relacionado está el coeficiente con su error estándar. En este caso podemos apreciar que los valores de t son significativamente diferentes de cero por lo que estadísticamente se espera de que los valores de p sean menores de 0.05.

<u>Término</u>	<u>Coef</u>	<u>EE del coef.</u>	<u>Valor T</u>	<u>Valor p</u>	<u>FIV</u>
Constante	164.64		3.54	46.54	0.000
TipCemento	-1.596		0.170	-9.37	0.000 1.10
RedAgua	8.310		0.704	11.80	0.000 1.10

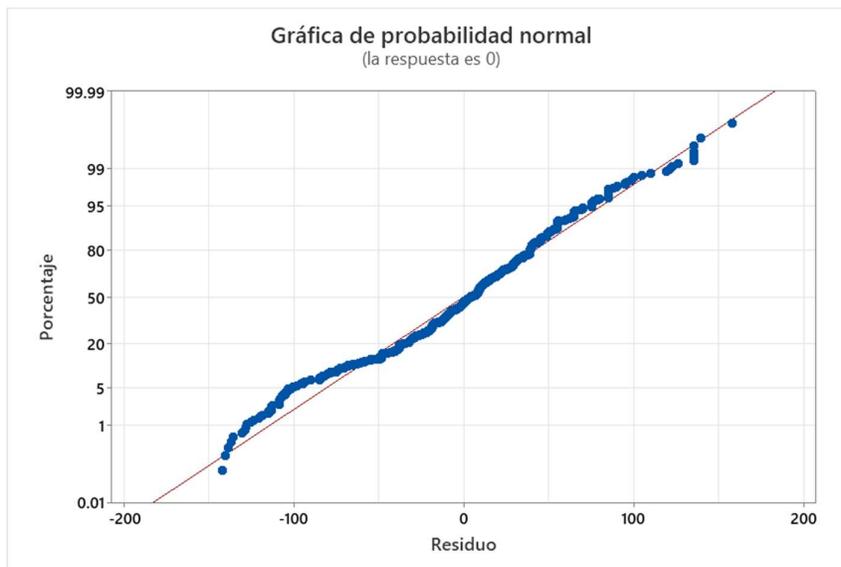
Tabla 4.2: Coeficientes de la ecuación de regresión que considera a las variables tipo de cemento y aditivo reductor de agua.

La gráfica 4.13 muestra el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados del modelo mostrando que ambas variables son estadísticamente significativas, así pues el tipo de cemento y el aditivo reductor de agua para el modelo construido son relevantes para obtener el valor de la consistencia inmediatamente después de terminar de mezclar.



Gráfica 4.13: Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados de las variables tipo de cemento y aditivo reductor de agua.

La gráfica 4.14 muestra la distribución de los residuos en el modelo en estudio y se observa que en general los datos se ajustan y se distribuyen de una manera normal.



Grafica 4.14: Gráfica de probabilidad normal entre residuos y porcentaje para las variables tipo de cemento y reductor de agua.

4.2.2. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADICION DE ADITIVO REDUCTOR DE AGUA Y UN ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE:

A continuación, se muestra la ecuación de regresión del modelo propuesto considerando las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivos superplastificante. Se aprecia en la ecuación y en la tabla 4.3 que las variables están medianamente correlacionadas, esto último en particular por los valores de 1.14, 1.29 y 1.17F del parámetro FIV.

$$0 = 149.21 - 1.398 \text{ TipCemento} + 10.886 \text{ RedAgua} + 1.209 \text{ Superplast}$$

<u>Término</u>	<u>Coef</u>	<u>EE del coef.</u>	<u>Valor T</u>	<u>Valor p</u>	<u>FIV</u>
Constante	149.21	3.81	39.16	0.000	
TipCemento	-1.398	0.167	-8.37	0.000	1.14
RedAgua	10.886	0.733	14.86	0.000	1.29
Superplast	1.209	0.132	9.18	0.000	1.17

Tabla 4.3: Coeficientes de la ecuación de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivos superplastificante.

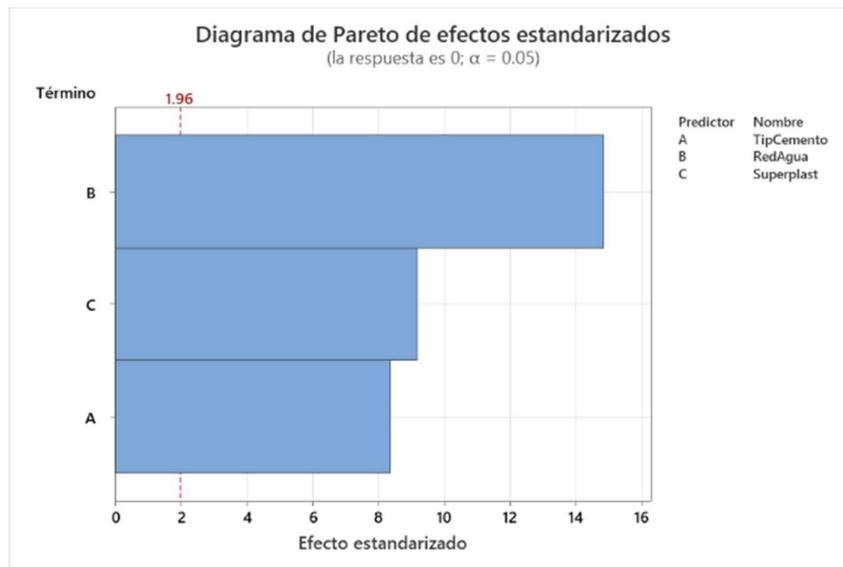
La tabla 4.3 muestra los coeficientes de la ecuación de regresión y de acuerdo con el coeficiente FIV se puede deducir que las variables tipo de cemento aditivo reductor de

agua y aditivos superplastificante están medianamente relacionados con la variable consistencia de la mezcla de hormigón en estado fresco.

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
46.5097	35.74%	35.51%	34.17%	47.0532	33.91%

Tabla 4.4: resumen del modelo de regresión para las variables que representan tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivo superplastificante.

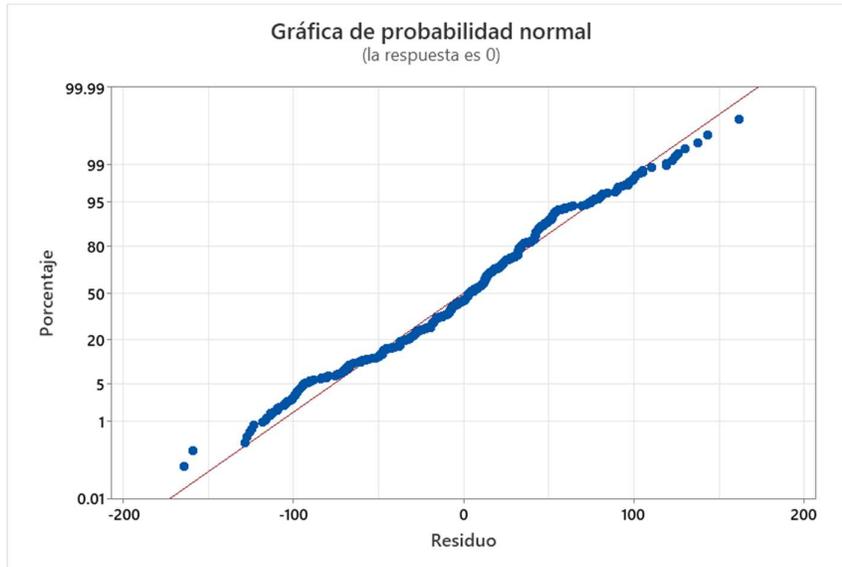
La tabla 4.4 muestra el resumen del modelo de regresión para el caso en análisis mostrando un valor de 35.51% para el parámetro r al cuadrado.



Grafica 4.15: Diagrama de Pareto que representa los efectos estandarizados para el modelo de regresión que considera a las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivo superplastificante.

La gráfica 4.15 muestra el diagrama de Pareto para el modelo en estudio y muestra que las 3 variables incluidas en el modelo, tipo de cemento aditivo reductor de agua y aditivos superplastificante son estadísticamente representativos; esto implica que cualquier variación en sus cantidades tendrá una repercusión en el valor cuantitativo de la variable consistencia del hormigón en estado fresco.

Por otro lado la gráfica de probabilidad normal 4.16 muestra que los residuos se distribuyen de una manera prácticamente normal.



Gráfica 4.16: Gráfica de probabilidad normal entre el residuo y el porcentaje para las variables que representan tipo de cemento, aditivo reductor de agua y aditivos superplastificante.

4.2.3. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO

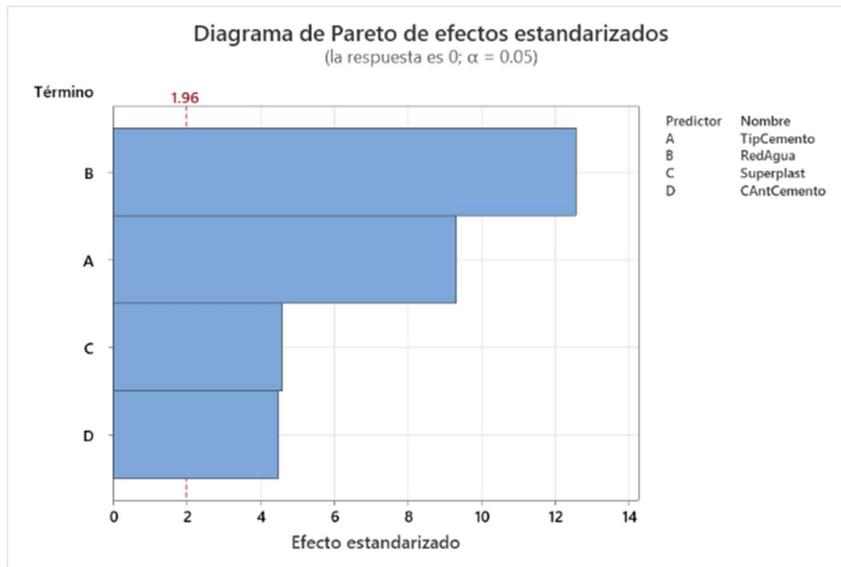
La ecuación siguiente muestra la relación que hay entre las variables predictoras tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante y cantidad de cemento en la variable dependiente consistencia en el hormigón en estado fresco.

$$0 = 79.5 - 1.588 \text{ TipCemento} + 9.689 \text{ RedAgua} + 0.758 \text{ Superplast} + 0.2060 \text{ CAntCemento}$$

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
45.9728	37.30%	36.99%	35.48%	46.5491	35.32%

Tabla 4.5: Resumen del modelo de regresión para las variables que consideran tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante y la cantidad de cemento.

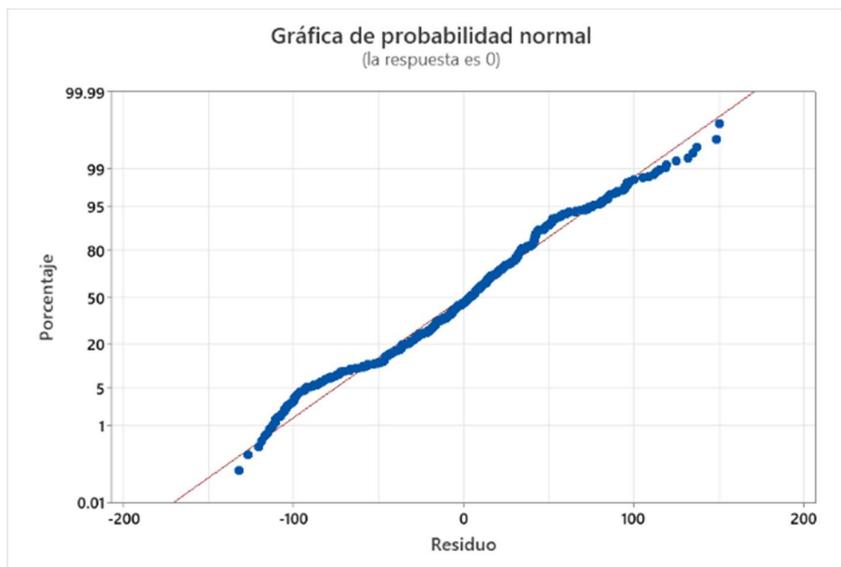
La tabla 4.5 muestra el resumen del modelo de regresión con las variables predictoras mostrando un valor del parámetro de piensor al cuadrado de 36.99%.



Gráfica 4.17: Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados para el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante y la cantidad de cemento.

En la gráfica 4.17 se muestra el diagrama de Pareto para las variables analizadas en este modelo y en el que las cuatro son estadísticamente representativas pues sus valores son mayores al valor de referencia de 1.96. Esto implica que cualquier modificación en sus cantidades repercutirán en el valor cuantitativo de la variable objetivo es decir en la consistencia del hormigón en estado fresco.

La gráfica 4.18 muestra Que los residuos se distribuyen de una manera aproximadamente normal.



Gráfica 4.18: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje para el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante y la cantidad de cemento.

4.2.4. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO Y LA RELACIÓN AGUA CEMENTO.

La ecuación siguiente muestra la correlación existente entre las variables predictores tipo de cemento aditivo reductor de agua, aditivos superplastificantes, cantidad de cemento y relación agua cemento y se observa cómo se mencionará a continuación un mayor valor cuantitativo del parámetro de Pierson.

$$0 = 4.1 - 1.562 \text{ TipCemento} + 7.451 \text{ RedAgua} + 0.929 \text{ Superplast} + 0.2943 \text{ CAntCemento} + 81.9 \text{ a/c}$$

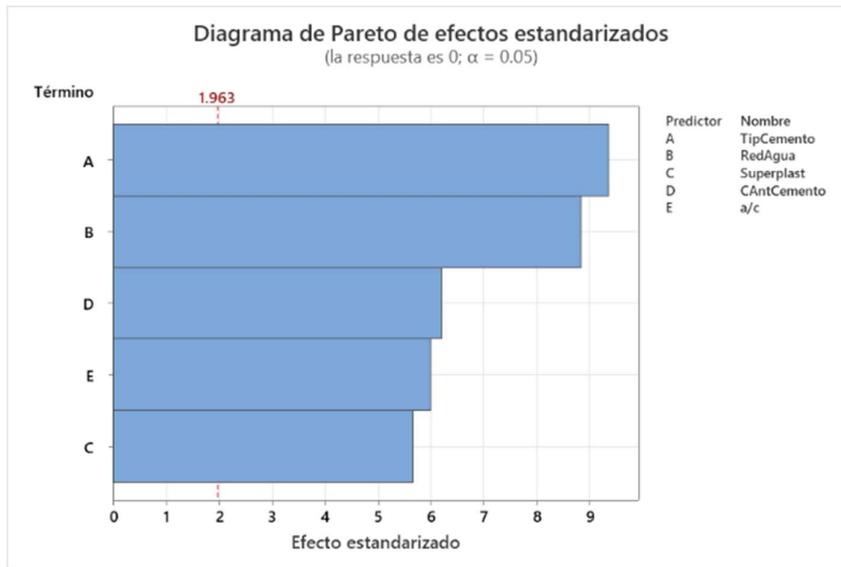
La tabla 4.6 muestra que para este modelo el valor del parámetro de Pearson alcanza el valor de 39.59% lo que implica una mejora cuantitativa, aunque mínima, respecto del modelo anterior.

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
45.0131	39.96%	39.59%	38.14%	45.5151	38.16%

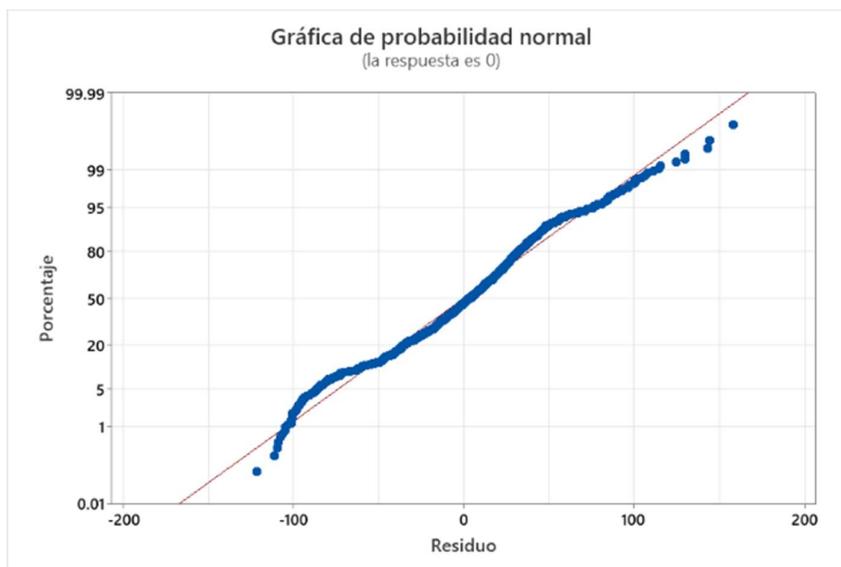
Tabla 4.6: resumen del modelo de regresión que incluye las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua reductivo superplastificante la cantidad de cemento y la relación agua cemento.

La gráfica 4.19 muestra el diagrama de Pareto que incluye las 5 variables predictores del modelo; todas ellas estadísticamente significativas y por lo tanto relevantes en la predicción del valor de la consistencia del hormigón en estado fresco.

La gráfica de probabilidad normal 4.20 muestra una distribución prácticamente normal de los residuos, aunque con unos valores ligeramente atípicos en la gata utilizada para el cálculo de la predicción.



Gráfica 4.19: diagrama de Pareto de los efectos estandarizados para el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento y relación agua cemento.



Gráfica 4.20: gráfica de probabilidad normal para el residuo y su porcentaje en el modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento y relación agua cemento.

4.2.5. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO, LA RELACIÓN AGUA CEMENTO Y UN ADITIVO INCLUSOR DE AIRE.

En la gráfica siguiente se muestra la ecuación de correlación de las variables predictores tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento

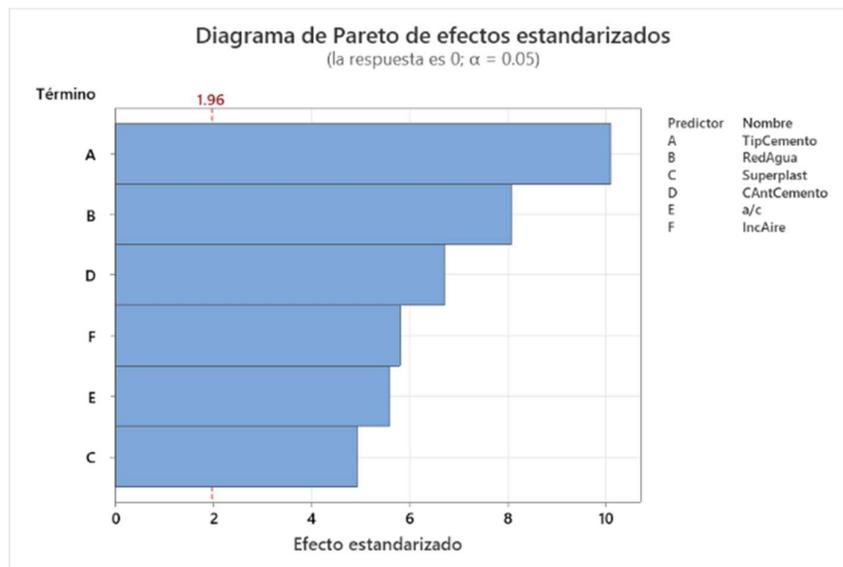
relación agua cemento e inductor de aire con la variable dependiente consistencia del hormigón en estado fresco.

$$0 = 5.9 - 1.663 \text{ TipCemento} + 6.744 \text{ RedAgua} + 0.800 \text{ Superplast} + 0.3125 \text{ CAntCemento} + 75.4 \text{ a/c} - 159.7 \text{ IncAire}$$

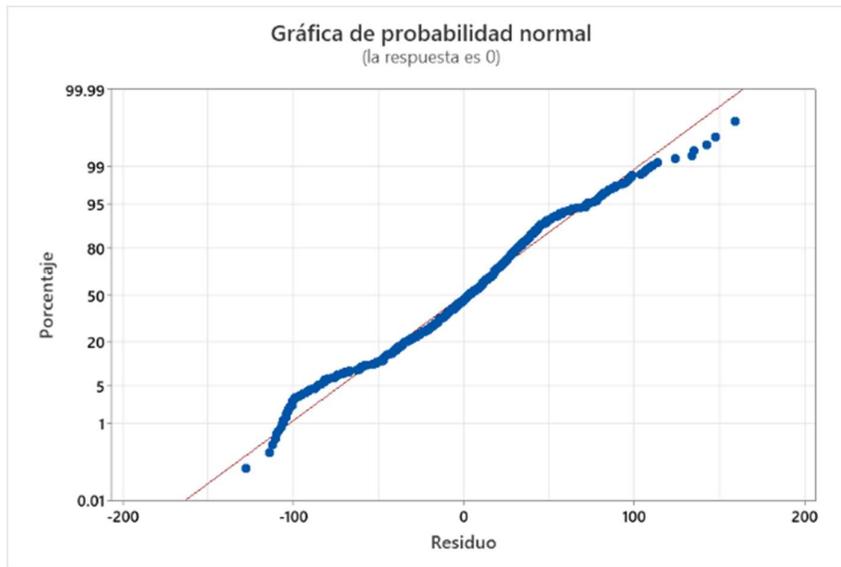
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
44.1281	42.37%	41.94%	40.56%	44.5953	40.63%

Tabla 4.7: resumen del modelo de regresión se considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento y aditivo inductor de aire.

En la tabla 4.7 se muestra un resumen del modelo y en el que se obtiene un valor del parámetro de pearson de 41,94% por lo que la variable dependiente consistencia se explicaría en ese porcentaje con las variables predictoras.



Gráfica 4.21: Diagrama de Pareto de defectos estandarizados del modelo de regresión que considera tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento y aditivo inductor de aire.



Gráfica 4.22: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y el porcentaje del modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento y aditivo incluso de aire

La gráfica 4.21 muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el modelo en análisis observándose que todas las variables predictoras son estadísticamente significativas por lo que cualquier variación en sus valores puede repercutir en el valor de la variable dependiente.

La gráfica 4.22 muestra que los residuos en el modelo tienden a la distribución de probabilidad normal con algunos valores atípicos.

4.2.6. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO, LA RELACIÓN AGUA CEMENTO, UN ADITIVO INCLUSOR DE AIRE Y LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN

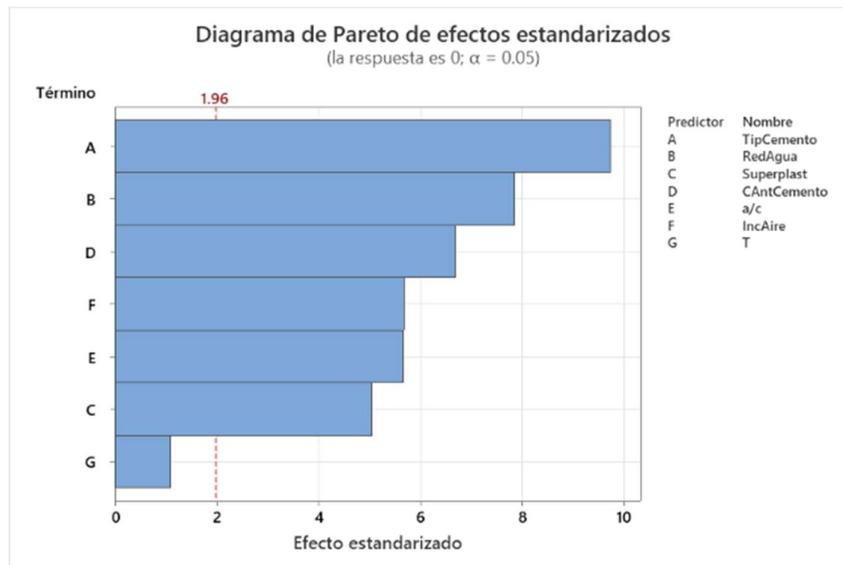
A continuación, se muestra la ecuación del modelo de regresión que considera las variables predictoras y la variable dependiente consistencia en el hormigón en estado fresco. Como puede apreciarse en la ecuación y en la tabla 4.8 la ecuación permite explicar el 41.95% de la variable dependiente consistencia.

$$0 = -1.6 - 1.630 \text{ TipCemento} + 6.620 \text{ RedAgua} + 0.833 \text{ Superplast} + 0.3112 \text{ CAntCemento} + 76.3 \text{ a/c} - 156.9 \text{ IncAire} + 0.292 \text{ T}$$

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
44.1233	42.45%	41.95%	40.42%	44.6560	40.47%

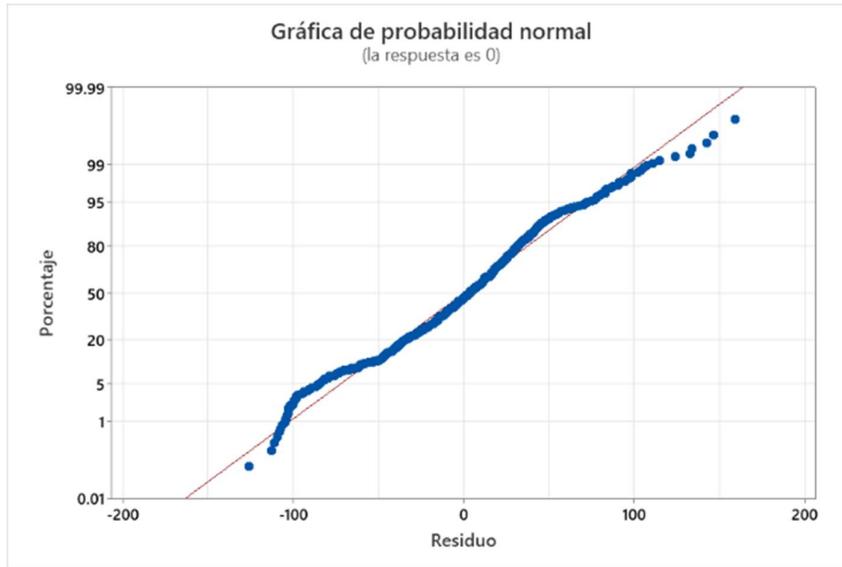
Tabla 4.8: resumen del modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire y temperatura del hormigón.

Se puede apreciar en la gráfica 4.23 que la variable predictora tiempo (T) resulta ser no significativa estadísticamente pues el valor que tiene en el diagrama de Pareto es menor a 1.96 considerado para mostrar las variables estadísticamente significativas.



Gráfica 4.23: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire y temperatura del hormigón.

En la gráfica de probabilidad normal 4.24 es posible apreciar que los residuos tienden a estar prácticamente distribuidos de una forma normal con algunos valores atípicos. Esta forma de distribución ha sido característica en los modelos de regresión planteados para estas variables predictor horas y la variable dependiente Consistencia.



Gráfica 4.24: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje del modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo incluso de aire y temperatura del hormigón

4.2.7. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO, LA RELACIÓN AGUA CEMENTO, UN ADITIVO INCLUSOR DE AIRE, LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN Y EL USO DE AGREGADOS RECICLADOS.

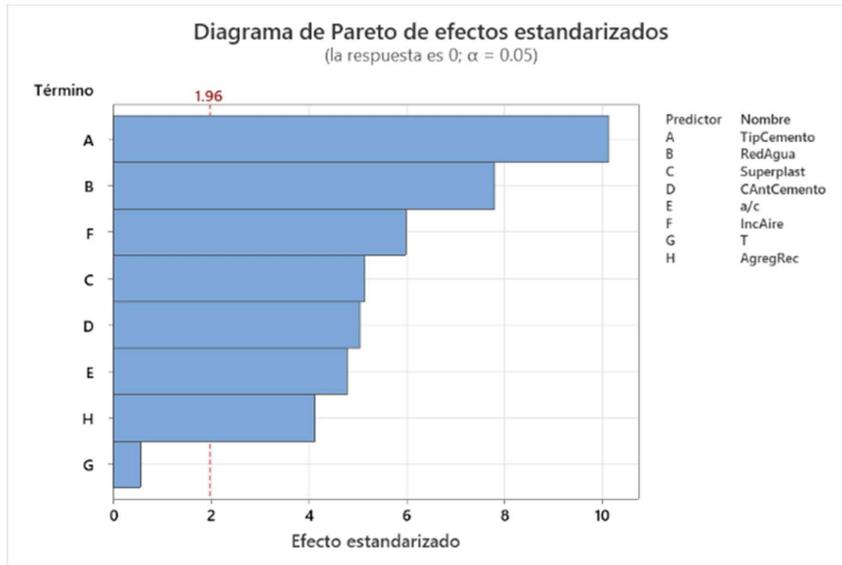
A continuación se muestra la ecuación de regresión para el modelo que incluye las variables predictoras tipo de cemento, aditivo reductor de agua, aditivo superplastificante, cantidad de cemento, relación agua cemento, aditivo inclusor de aire, temperatura del hormigón y agregado reciclado y la variable dependiente consistencia, que junto con la tabla 4.9 muestran que la ecuación puede explicar el 43,09% de la variabilidad de la consistencia del hormigón en estado fresco.

$$0 = 34.5 - 1.684 \text{ TipCemento} + 6.522 \text{ RedAgua} + 0.841 \text{ Superplast} + 0.2464 \text{ CAntCemento} + 65.3 \text{ a/c} - 164.0 \text{ IncAire} + 0.152 \text{ T} - 51.9 \text{ AgregRec}$$

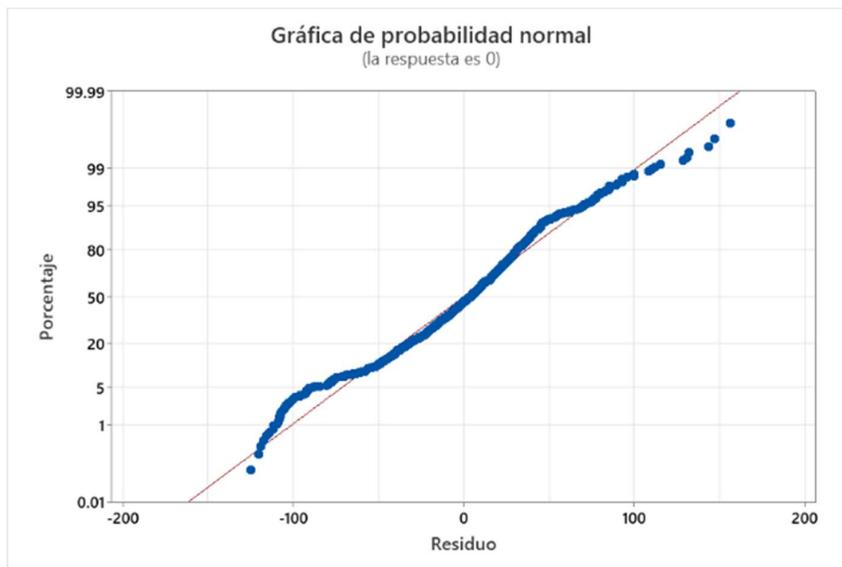
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
43.6896	43.65%	43.09%	41.53%	44.2375	41.58%

Tabla 4.9: resumen del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón y uso de agregados reciclados

La gráfica 4.25 muestra el diagrama de Pareto de las variables predictoras consideradas y a diferencia del modelo anterior se aprecia que la variable predictoras tiempo del hormigón ha pasado a ser estadísticamente significativa y más bien la variable cantidad de agregado reciclado se considera que es estadísticamente no significativa.



Gráfica 4.25: Diagrama de Pareto del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón y uso de agregados reciclados.



Gráfica 4.26: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su respectivo porcentaje para el modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivos superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos e inclusor de aire temperatura del hormigón y uso de agregados reciclados

La gráfica 4.26 de probabilidad normal muestra una distribución del residuo prácticamente normal con valores atípicos en el modelo propuesto.

4.2.8. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO, LA RELACIÓN AGUA CEMENTO, UN ADITIVO INCLUSOR DE AIRE, LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN, EL USO DE AGREGADOS RECICLADOS Y LA CANTIDAD DE AGUA

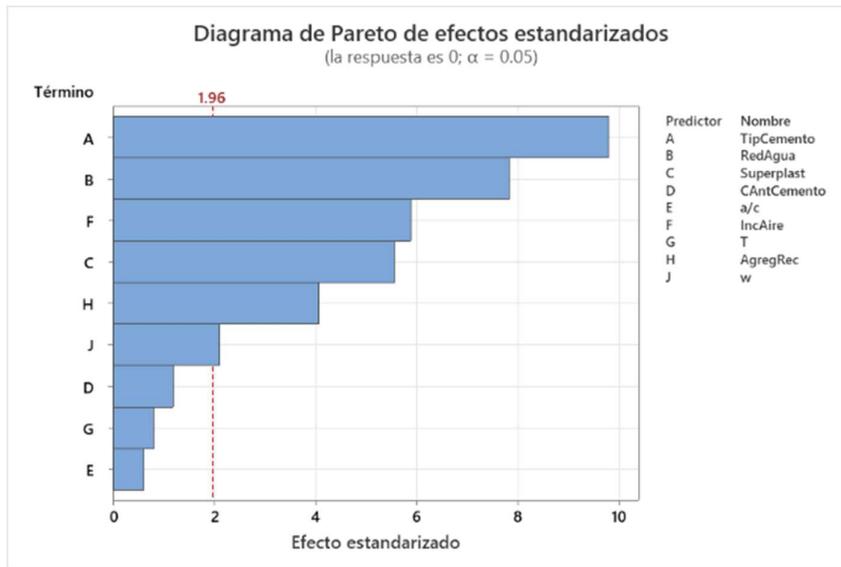
La ecuación a continuación muestra el modelo de regresión construido con variables predictores tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante, cantidad de cemento, relación agua cemento, aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua; junto con la tabla 4.10 muestra que esta ecuación es capaz de explicar la variabilidad de la consistencia del hormigón en estado fresco en un 43.33%.

$$0 = 80.4 - 1.639 \text{ TipCemento} + 6.535 \text{ RedAgua} + 0.969 \text{ Superplast} + 0.1006 \text{ CAntCemento} - 28.5 \text{ a/c} - 161.2 \text{ IncAire} + 0.217 \text{ T} - 51.0 \text{ AgregRec} + 0.279 \text{ w}$$

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
43.5955	43.96%	43.33%	41.51%	44.2364	41.58%

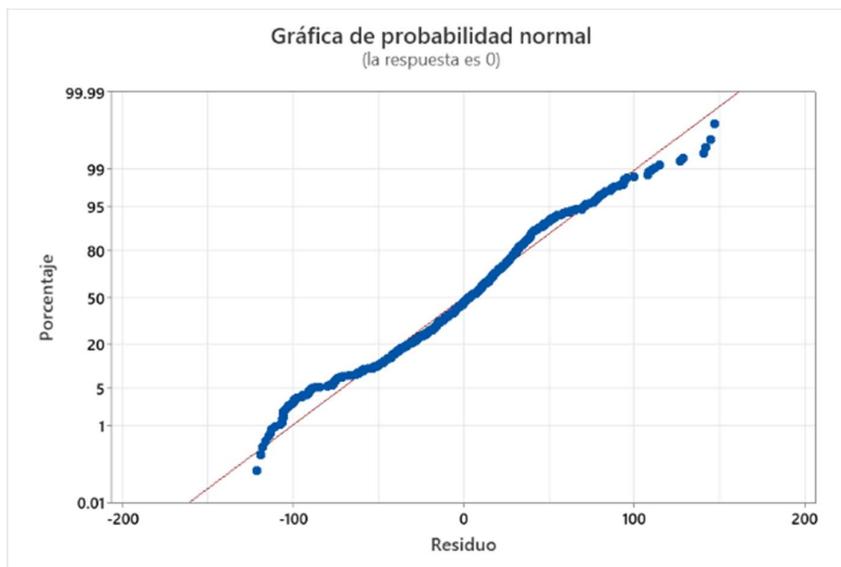
Tabla 4.10: Resumen del modelo de regresión que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos impulsor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua.

La gráfica 4.27 muestra el diagrama de Pareto en donde es posible observar que las variables cantidad de cemento, temperatura del hormigón y sobre todo relación agua cemento son estadísticamente no representativas. Es interesante notar que con la inclusión de la variable predictor la cantidad de agua estas 3 variables pasaron del Estado estadísticamente significativo al no significativo.



Gráfica 4.27: diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos inclusores de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua.

La gráfica 4.28 muestra una distribución prácticamente normal con valores atípicos en el modelo planteado.



Gráfica 4.28: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje respectivo para el modelo que consideran las variables tipo de cemento o aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo o inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados y cantidad de agua.

4.2.9. CONSISTENCIA EXPLICADA POR EL TIPO DE CEMENTO, ADITIVO REDUCTOR DE AGUA, ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE, LA CANTIDAD DE CEMENTO, LA RELACIÓN AGUA CEMENTO, UN ADITIVO INCLUSOR DE AIRE, LA TEMPERATURA DEL HORMIGÓN, EL USO DE AGREGADOS RECICLADOS, LA CANTIDAD DE AGUA Y EL TOTAL DE AGREGADO.

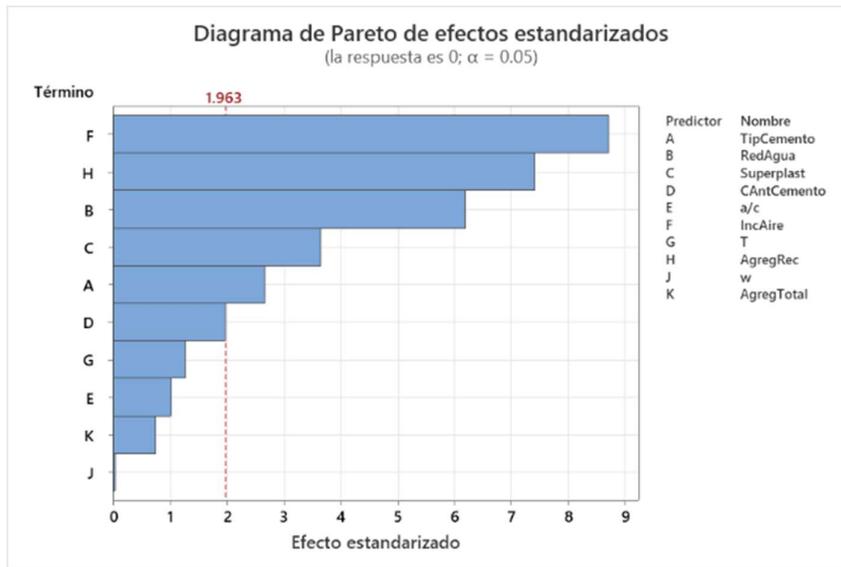
A continuación se muestra la ecuación de regresión del modelo que considera las variables predictoras tipo de cemento aditivo, reductor de agua aditivo superplastificante, cantidad de cemento, relación agua cemento, aditivo inclusor de aire, temperatura del hormigón, cantidad de agregado reciclado, cantidad de agua y ha agregado total y junto con la tabla 4.11 es posible apreciar que la ecuación explica el 34.86% de la variabilidad de la variable dependiente consistencia del hormigón en estado fresco siendo un valor considerablemente menor al modelo anterior.

$$0 = 88.3 - 0.565 \text{ TipCemento} + 4.530 \text{ RedAgua} + 0.585 \text{ Superplast} + 0.1500 \text{ CAntCemento} + 41.4 \text{ a/c} - 200.3 \text{ IncAire} - 0.340 \text{ T} - 79.4 \text{ AgregRec} - 0.004 \text{ w} + 0.0086 \text{ AgregTotal}$$

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de 100 pliegues	R-cuadrado de 100 pliegues
36.2184	35.72%	34.86%	33.01%	36.6736	33.12%

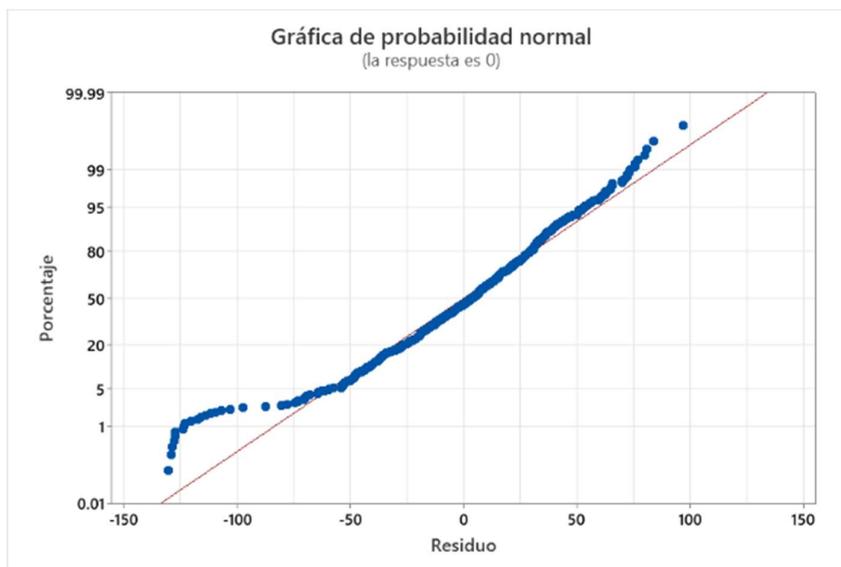
Tabla 4.11: resumen del modelo que considera variables tipo de cemento aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo inclusor de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados cantidad de agua y el total de agregado

La gráfica 4.29 muestra el diagrama de Pareto para el modelo presentado en el que se observa que las variables productoras cantidad de cemento, temperatura del hormigón relación agua cemento, cantidad total de agregado y cantidad de agua son estadísticamente no significativas con lo que las variables inclusor de aire, agregado reciclado, cantidad de aditivos reductor de agua cantidad de aditivo superplastificante u tipo de cemento son los que mayor significancia estadística poseen para el modelo presentado. Esto es especialmente importante porque muestra que las variables productoras están relacionadas en su efecto unas con otras.



Gráfica 4.29: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para el modelo que considera las variables tipo de cemento aditivo reductor de agua superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivos inclusores de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados, cantidad de agua y agregado total.

La gráfica 4.30 muestra la distribución de probabilidad normal del modelo presentado siendo está prácticamente normal con valores atípicos más abajo del 5 y más arriba del 95%.



Gráfica 4.30: gráfica de probabilidad normal entre el residuo y su porcentaje respectivo para el modelo que consideran las variables tipo de cemento o aditivo reductor de agua aditivo superplastificante cantidad de cemento relación agua cemento aditivo o incluso de aire temperatura del hormigón uso de agregados reciclados, cantidad de agua y cantidad de agregado total.

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS ESTADÍSTICOS CLÁSICOS.

La primera herramienta que se utilizó para poder explicar los parámetros o características que influían en las consistencia o asentamiento del hormigón fue la estadística clásica a través de modelos de regresión simple y que se ejecutaron en este trabajo con cada una de las variables presentadas. Se construyeron modelos tomando en cuenta la presencia de cada variable en el estudio con relacionándola directamente con la variable dependiente consistencia y si bien es cierto todas ellas son importantes ninguna de ellas obtuvo un valor de correlación mayor a casi el 20%.

Las variables mejor correlacionadas con la variable consistencia fueron las que representan la cantidad de aditivo reductor de agua en la mezcla y la cantidad propiamente dicha de agua en la mesa de hormigón fresco. La primera de ellas cantidad de aditivo reductor de agua, alcanzó una correlación de 19.9% siendo la mayor de todas las variables analizadas sin embargo este valor no es definitivo. Por otro lado la cantidad de agua en la mezcla obtuvo un valor de 11.2% confirmando la importancia que tiene este componente en la consistencia de la mezcla, sin embargo, la correlación con la variable en estudio es particularmente baja.

Variable	TipCemento	RedAgua	SuperPlast	CantCemento	a/c	IncAire
00	4.7%	19.9%	1.5%	4.8%	5.3%	4.8%
Variable	T	AgregRec	W	Fino	Grueso	AgregTotal
00	2.2%	4.9%	11.2%	4.0%	3.9%	1.1%

Tabla 4.12: Valores del coeficiente de Pearson (R2) para los diferentes modelos de regresión simple ejecutados.

La tabla 4.12 muestra los valores de R2 para cada una de las variables analizadas y como puede apreciarse ninguna de ellas es particularmente alta, incluso en los casos del contenido de agregado total y del aditivo superplastificante son prácticamente irrelevantes al momento de explicar estadísticamente la variabilidad de la variable consistencia.

En base a los resultados observados de los coeficientes de determinación R2 se intenta aumentar el porcentaje de variabilidad explicada mediante la aplicación de un modelo de regresión múltiple aditiva que pueda aumentar los valores de los coeficientes de determinación.

	ECUACION DE REGRESIÓN	R ²
01	0 = 164.64 - 1.596 TipCemento + 8.310 RedAgua	27.76%
02	0 = 149.21 - 1.398 TipCemento + 10.886 RedAgua + 1.209 Superplast	35.51%
03	0 = 79.5 - 1.588 TipCemento + 9.689 RedAgua + 0.758 Superplast + 0.2060 CAntCemento	36.99%
04	0 = 4.1 - 1.562 TipCemento + 7.451 RedAgua + 0.929 Superplast + 0.2943 CAntCemento + 81.9 a/c	39.59%
05	0 = 5.9 - 1.663 TipCemento + 6.744 RedAgua + 0.800 Superplast + 0.3125 CAntCemento + 75.4 a/c - 159.7 IncAire	41.94%
06	0 = -1.6 - 1.630 TipCemento + 6.620 RedAgua + 0.833 Superplast + 0.3112 CAntCemento+ 76.3 a/c - 156.9 IncAire + 0.292 T	41.95%
07	0 = 34.5 - 1.684 TipCemento + 6.522 RedAgua + 0.841 Superplast + 0.2464 CAntCemento+ 65.3 a/c - 164.0 IncAire + 0.152 T - 51.9 AgregRec	43.09%
08	0 = 80.4 - 1.639 TipCemento + 6.535 RedAgua + 0.969 Superplast + 0.1006 CAntCemento- 28.5 a/c - 161.2 IncAire + 0.217 T - 51.0 AgregRec + 0.279 w	43.33%
09	0 = 88.3 - 0.565 TipCemento + 4.530 RedAgua + 0.585 Superplast + 0.1500 CAntCemento+ 41.4 a/c - 200.3 IncAire - 0.340 T - 79.4 AgregRec - 0.004 w + 0.0086 AgregTotal	34.86%

Tabla 4.13: Ecuaciones de correlación para los modelos de regresión lineal múltiple.

El modelo de regresión múltiple aditiva se inició tomando las dos primeras variables, tipo de cemento y cantidad de aditivo reductor de agua obteniendo un valor de coeficiente de determinación del 28%, que era sustancialmente mayor que el coeficiente de determinación obtenido en el modelo de mejor ajuste de regresión simple. A continuación, se fueron agregando variables independientes con la intención de construir modelos que pudieran aumentar el valor de este coeficiente de determinación se agregaron cantidad de cemento relación agua cemento cantidad de aditivo incluso de aire temperatura del hormigón cantidad de agua y agregado total obteniéndose valores del coeficiente de determinación de hasta un 43.33%. Estos valores se muestran en la tabla 4.13.

Es importante mencionar que la simple adición de variables independientes al modelo de regresión lineal múltiple no asegura que el coeficiente de determinación aumente y esto se aprecia cuando en el modelo 08 se incluyó la variable agregado total y el coeficiente de determinación disminuyó de 43.33% al 34.86%.

5. MODELOS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES APLICADAS A LA DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE CONSISTENCIA.

En este trabajo incluiremos el análisis mediante redes neuronales artificiales para la predicción de la consistencia en el hormigón en estado fresco. Esta metodología está muy desarrollada actualmente, pues permite construir modelos de predicción con niveles muy altos de aproximación. A diferencia del análisis mediante estadística clásica, con la construcción de modelos con redes neuronales artificiales es posible alcanzar un coeficiente R² mucho mayor, es decir, se obtienen niveles de explicación de la variable dependiente por las variables independientes más cercanos a la unidad.

En las líneas siguientes explicaremos cómo construimos las redes neuronales artificiales que no sirvieron para construir el modelo de predicción de la consistencia del hormigón fresco con las variables descritas anteriormente.

Para la construcción de los modelos de predicción se ha utilizado la versión 2023 del software MATLAB R2023a que ha permitido ejecutar el algoritmo indicado y descrito en las siguientes líneas.

5.1. CONSTRUCCIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

En la construcción del modelo de predicción utilizaremos una red neuronal artificial de tipo FEEDFORWARD complementada con un algoritmo de Levenberg – Marquardt que en el software MATLAB viene definido por el comando de función de entrenamiento “trainlm”. Este algoritmo es el más adecuado debido a que presenta ventajas con respecto al algoritmo conocido con el nombre de “backpropagation” (Navarro Ferrer 2016).

Para evitar el problema del sobre aprendizaje se utilizará la metodología de la división de los datos analizados para el entrenamiento, la validación y la verificación conocida también como K-Fold Cross Validation con K=3 (Navarro Ferrer 2016). El porcentaje que le corresponde a cada grupo será del 80%, 10% y 10% respectivamente (Aguilar y otros 2019). Esto permitirá un adecuado control sobre la ejecución del algoritmo evitando que se generen problemas con las ecuaciones obtenidas.

En este trabajo configuraremos la red neuronal artificial con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Un esquema de la forma que tendrán las RNA construidas para este trabajo se muestran en la figura 5.1.

Por otro lado, el número de neuronas en la capa de entrada será igual al número de variables con las que quiera construir el modelo de predicción, por lo que en este trabajo el número de neuronas en la capa de entrada variará dependiendo del número de variables que se considerarán en cada caso.

Preliminarmente se tomarán 6 variables de entrada y posteriormente 12 variables como neuronas en la capa de entrada; el numero de neuronas en la capa oculta irá variando, dependiendo del numero de variables que utilice como predictoras.

Luego haremos un análisis intercambiando variables de entrada y de salida para analizar la dependencia de unas y otras entre si.

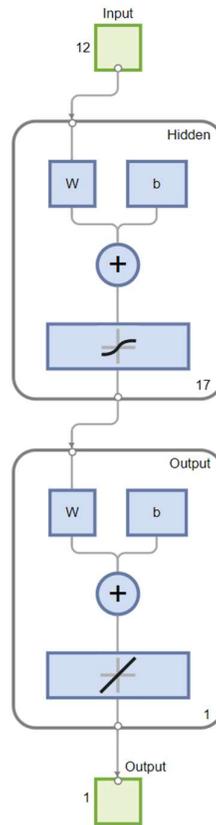


Figura 5.1: Esquema de la red neuronal artificial de 3 capas (MATLAB ®)

La tabla 5.1 muestra el mejor valor del coeficiente R luego de ejecutar la RNA creada con 6 variables de entrada y como se puede apreciar, se ha llegado a un coeficiente R mayor a 0.87 con 13 neuronas.

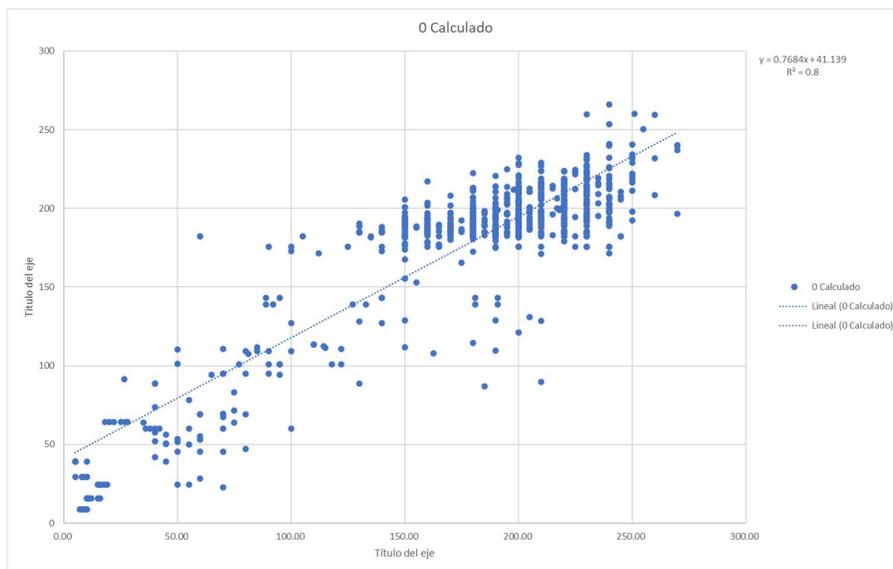
# Neuronas	R
5	0.8183
10	0.8403
13	0.8736
15	0.8552
20	0.8292

Tabla 5.1: Valores de R para la red neuronal artificial de 3 capas con 06 neuronas en la primera capa y una neurona en la capa de salida.

Luego se ejecutó la RNA con 13 neuronas 9 veces, siguiendo las recomendaciones y metodología de Paya – Zaforteza y Col (2010) basada en la teoría del valor extremo. Los resultados se muestran en la tabla 5.2.

RED 01 (6 VARIABLES)			
R	MSE	RMSE	PSE
0.8433	0.2885	0.2885	0.3724
0.8837	0.2189	0.2189	0.2825
0.8882	0.2111	0.2111	0.2725
0.8467	0.2825	0.2825	0.8960
0.8874	0.2126	0.2126	0.2744
0.8866	0.2137	0.2137	0.2758
0.8696	0.2441	0.2441	0.3151
0.8866	0.2137	0.2137	0.2758
0.8696	0.2441	0.2441	0.3151

Tabla 5.2: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial de 3 capas con 06 neuronas en la primera capa y una neurona en la capa de salida.



Gráfica 5.1: Ajuste de RNA con 6 variables y 3 capas para la variable “00”

Como análisis preliminar se ejecutó el ajuste de la red neuronal con 6 variables y 13 neuronas en la capa oculta obteniéndose un coeficiente de determinación de 0.8736 con lo que asegurábamos mejor predicción para la variable consistencia del hormigón en estado fresco. Así pues, con la intención de mejorar los niveles de predicción se incluyeron las 12 variables en total que la base de datos tenía a disposición ejecutándose nuevamente el análisis de cuál era la mejor cantidad de neuronas en la capa oculta.

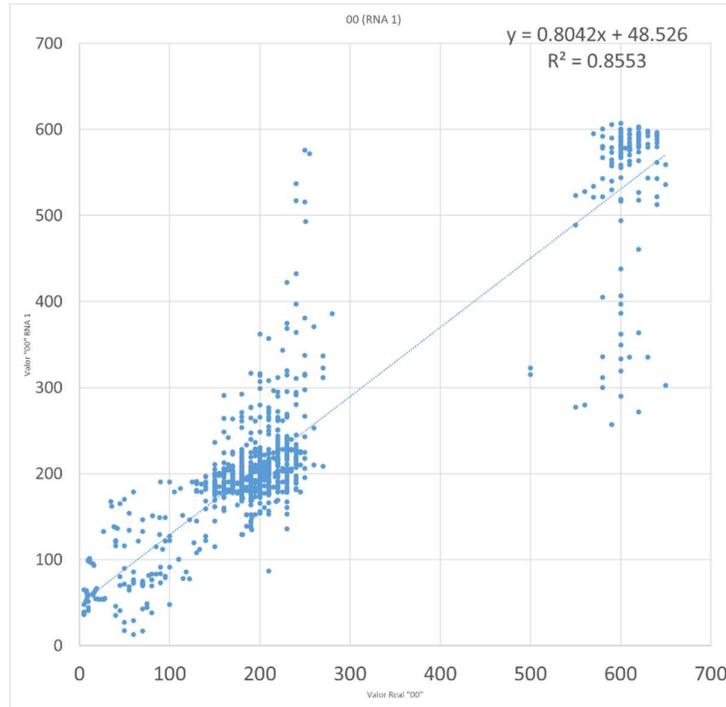
La tabla 5.3 muestra la ejecución del análisis para el mejor número de neuronas en la capa oculta con 12 variables a realizar en este trabajo obteniéndose un promedio de 6 neuronas por capa oculta.

# Neuronas Capa Oculta	R
1	0.7815
3	0.8008
4	0.8146
5	0.8538
6	0.8623
8	0.8292
10	0.8476
17	0.8019

Tabla 5.3: Valores de R para la red neuronal artificial de 3 capas, 12 neuronas en la primera capa (12 variables de entrada) , una capa oculta con diferente número de neuronas y una neurona en la capa de salida.

RED 01 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
50	0.8674	0.2516	0.2516	0.3144
88	0.8870	0.2142	0.2142	0.2677
53	0.8990	0.1925	0.1925	0.2405
59	0.7833	0.6476	0.6476	0.8093
38	0.8812	0.2241	0.2241	0.2801
62	0.8421	0.3016	0.3016	0.3769
33	0.8993	0.1913	0.1913	0.2390
64	0.8437	0.2920	0.2920	0.3649
31	0.5850	0.2640	0.2640	0.3300

Tabla 5.4: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la RNA 1 de 3 capas con 12 neuronas en la primera capa y una neurona en la capa de salida



Gráfica 5.2: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 1

Como ya se ha mencionado anteriormente se ha utilizado el software MATLAB para la ejecución de cada una de las redes neuronales artificiales y en las que se ha registrado los resultados de los parámetros R, error cuadrático medio (Mean Square Error, MSE), error cuadrático medio relativo a la varianza (Root Mean Squared Error RMSE) y del error cuadrático previsto (Predicted Squared Error PSE).

$$MSE = \text{mean}((astd - tstd)^2)$$

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

$$PSE = MSE * (1 + 2 * \frac{NPar}{(N - NPar)})$$

La figura 5.2 muestra las características del proceso de cálculo de MATLAB en la red neuronal artificial creada. Como se puede apreciar se muestran las interacciones realizadas, el tiempo de cálculo y las características del algoritmo de aprendizaje.

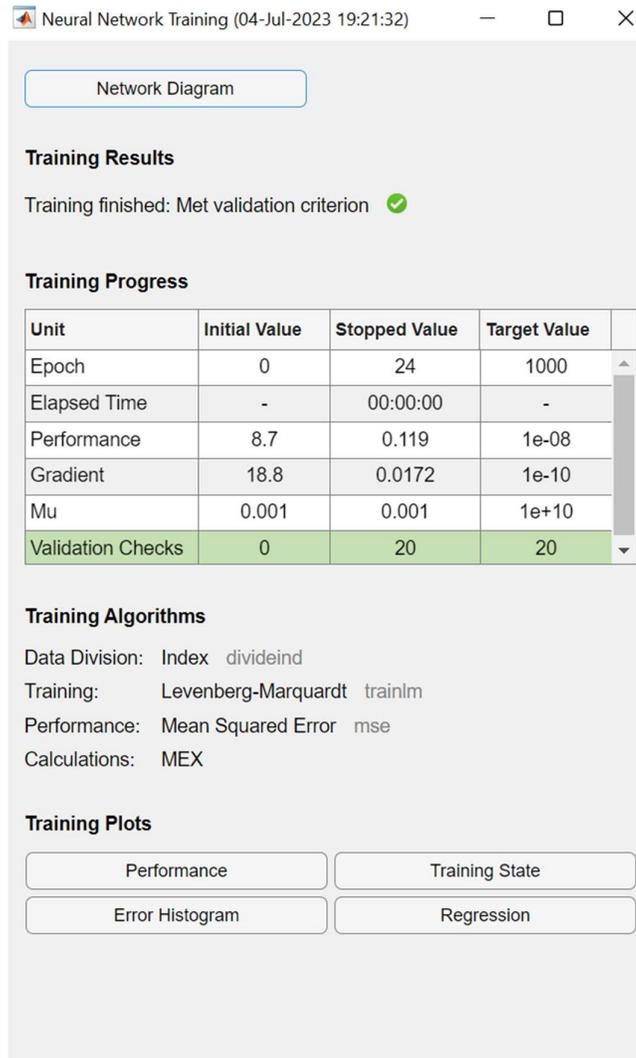


Figura 5.2: Información presentada por MATLAB® en la ejecución de la red neuronal artificial.

Con la intención de analizar la dependencia de la variable consistencia respecto a las variables predictoras extraídas de la base de datos se han construido varias redes neuronales artificiales que se muestran en la tabla 5.5. En esta tabla 5.5 se muestra el resumen de las redes neuronales propuestas, para analizar diferentes casos de dependencia entre la consistencia o asentamiento y las diferentes variables predictoras.

	REDES NEURONALES PROPUESTAS PARA VARIABLE OBJETIVO "00"						
VARIABLE PREDICTORA	1	2	3	4	5	6	7
TipCemento	X	X		X			X
RedAgua	X	X	X	X	X	X	X
SuperPlast	X	X	X	X	X	X	X
CantCemento	X	X	X	X	X	X	X
a/c	X	X	X	X	X	X	X
IncAire	X	X	X				
T	X	X	X				
AgregRec	X	X					
W	X	X		X	X	X	
Fino	X					X	
Grueso	X						X
AgregTotal	X	X		X	X		
VARIABLE OBJETIVO	00	00	00	00	00	00	00

Tabla 5.5: Redes neuronales propuestas para la obtención de la variable objetivo de consistencia inmediatamente después de ejecutar la mezcla, "00".

La red neuronal artificial 1 se construyó incluyendo las 12 variables predictoras extraídas de la base de datos y que incluyen al tipo de cemento, a la cantidad de aditivo reductor de agua, a la cantidad de aditivo superplastificante, cantidad de cemento, relación agua cemento, aditivo inclusor de aire, temperatura del hormigón, cantidad de agregado reciclado utilizado, cantidad de agua, cantidad de agregado fino cantidad de agregado grueso y cantidad total de agregado presente en la mezcla, este análisis produjo un modelo que pudo explicar, mediante el coeficiente de determinación obtenido en el ajuste, en 85.5% la dependencia de la variable consistencia con las variables predictoras. Este valor es prácticamente el doble de lo que se obtuvo con el mejor resultado obtenido en el análisis realizado con estadística clásica mediante el método de regresión múltiple aditiva.

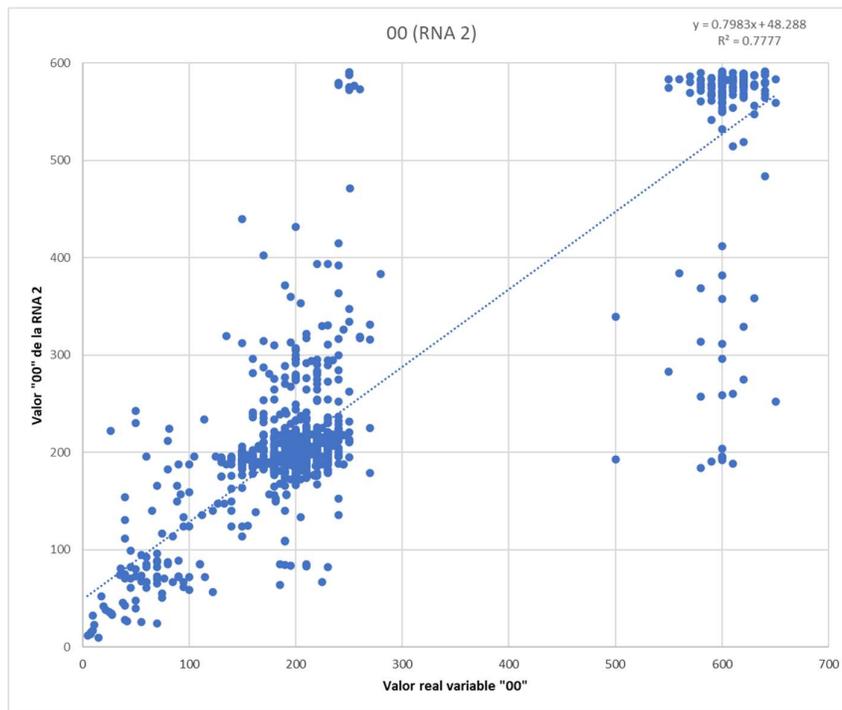
La mayor influencia en la consistencia del hormigón fresco se da en la pasta por lo que se construyó una red neuronal artificial número 2 en el que solamente se consideró al agregado total como variable predictora de los agregados. Con esta red neuronal artificial se ejecutó nuevamente el análisis obteniéndose un coeficiente de

determinación de 77% que es un valor comparativamente bajo al obtenido con las 12 variables incluidas en la anterior.

RED 2 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
44	0.8580	0.2795	0.2795	0.3325
32	0.8670	0.2481	0.2481	0.2951
99	0.8407	0.3023	0.3023	0.3596
60	0.8716	0.2683	0.2683	0.3192
66	0.8930	0.2073	0.2073	0.2465
51	0.8954	0.1984	0.1984	0.2360
42	0.8273	0.3906	0.3906	0.4646
31	0.7677	0.2347	0.2347	0.2792
27	0.8635	0.2564	0.2564	0.3050

Tabla 5.6: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 2.

La red neuronal número 3 se construyó extrayendo las variables tipo de cemento, cantidad de agregados reciclados, cantidad de agua, cantidad de agregado fino, grueso y agregado total obteniéndose un valor de coeficiente de determinación en el ajuste de 81.49% que es un valor mucho mayor al obtenido en la red neuronal 2. Esto puede deberse a la no participación de los agregados en la mezcla.

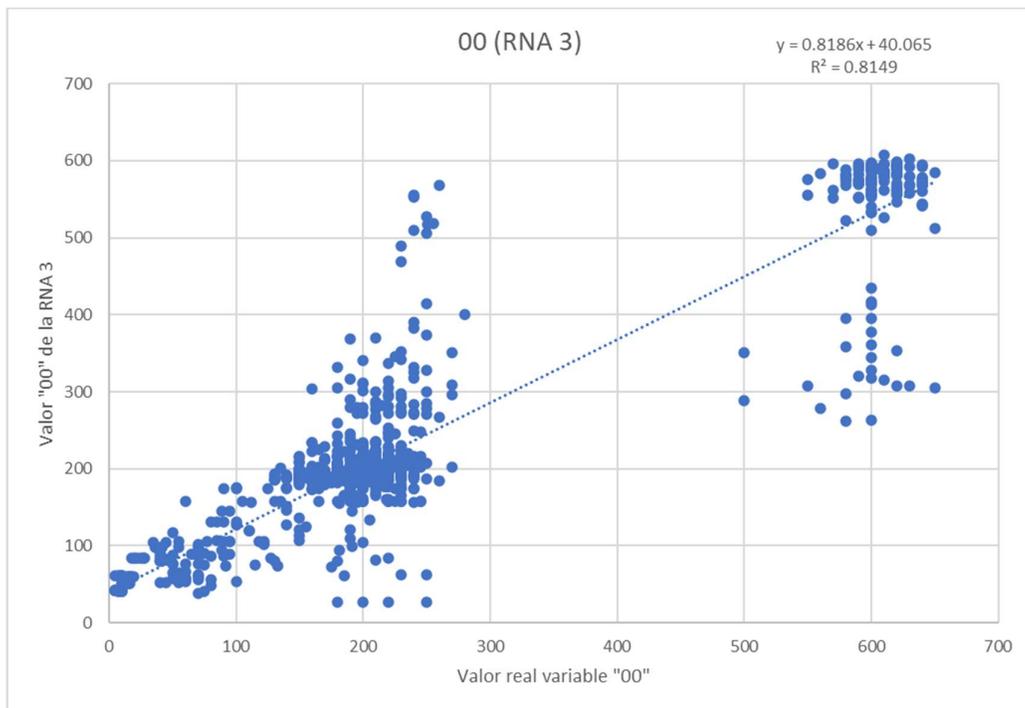


Gráfica 5.3: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 2

RED 3 (12 VARIABLES)				
# Iteraciones	R	MSE	RMSE	PSE
30	0.8680	0.2482	0.2482	0.3102
52	0.8085	0.4141	0.4141	0.5175
25	0.8251	0.3313	0.3313	0.4140
83	0.7712	0.4840	0.4840	0.6048
134	0.8248	0.3804	0.3804	0.4754
60	0.8609	0.2857	0.2857	0.3570
28	0.6818	0.8666	0.8666	1.0830
39	0.8159	0.3747	0.3747	0.4683
29	0.8420	0.3000	0.3000	0.3749

Tabla 5.7: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 3.

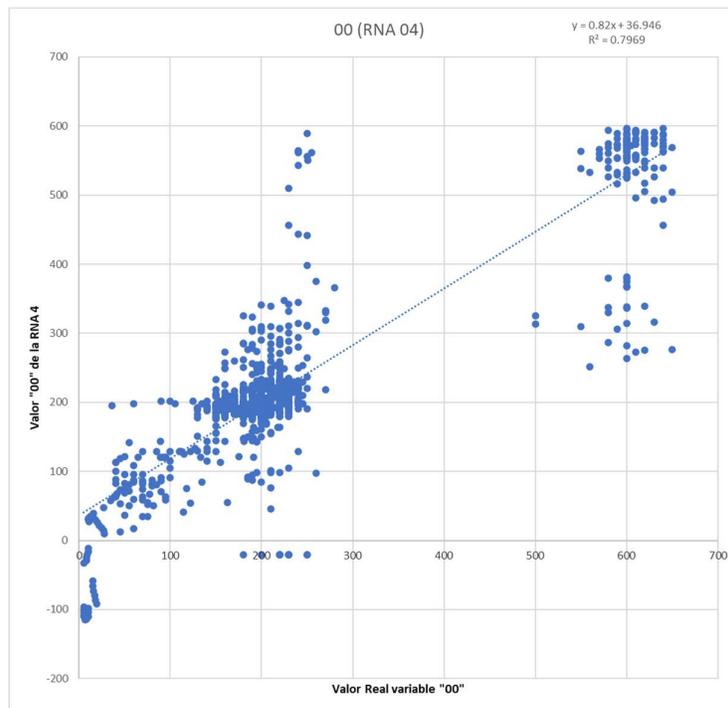
La red neuronal número cuatro extrajo del modelo a las variables cantidad de aditivo inclusor de aire, temperatura del hormigón, cantidad de agregado reciclado, fino y grueso obteniéndose un valor del coeficiente de determinación de 79.69% que es un valor comparativamente más bajo con el modelo que incluye las 12 variables consideradas.



Gráfica 5.4: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 3

RED 4 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
29	0.8192	0.4032	0.4032	0.5059
30	0.8650	0.2527	0.2527	0.3171
24	0.8534	0.2715	0.2715	0.3407
41	0.8604	0.2745	0.2745	0.3445
32	0.8973	0.1957	0.1957	0.2456
42	0.8525	0.3264	0.3264	0.4096
36	0.8414	0.3202	0.3202	0.4018
35	0.7293	0.5371	0.5371	0.6740
52	0.8985	0.2065	0.2065	0.2592

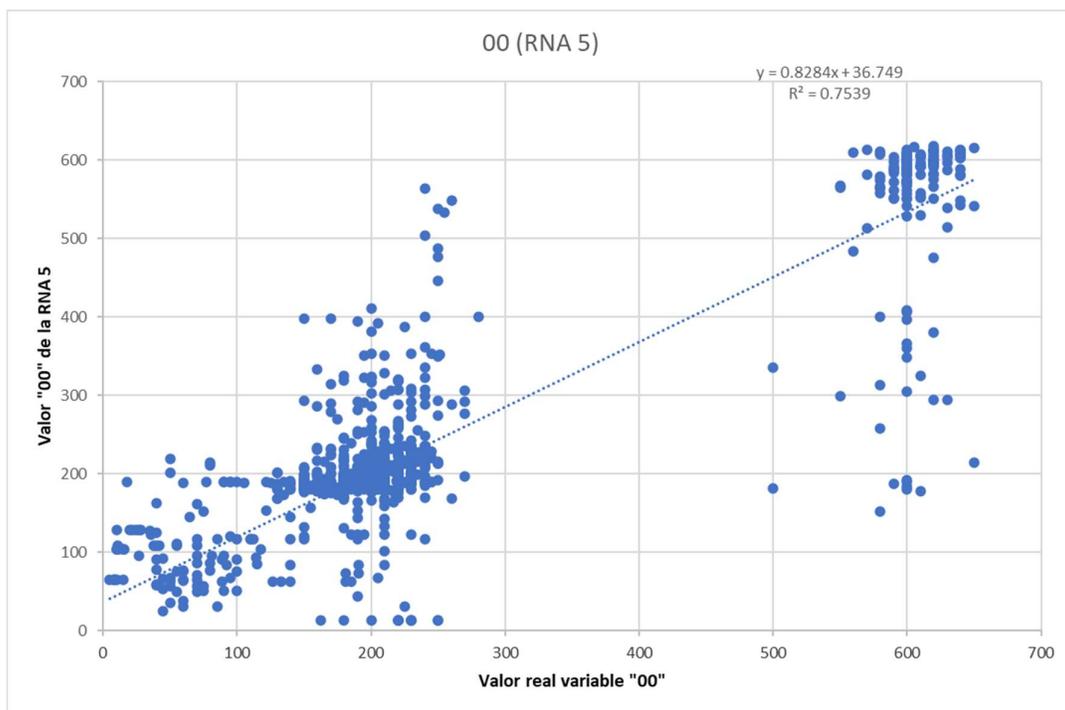
Tabla 5.8: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 4.



Gráfica 5.5: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 4

RED 5 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
42	0.7694	0.4738	0.4738	0.6070
46	0.6757	1.4183	1.4183	1.8169
31	0.8877	0.2125	0.2125	0.2722
47	0.7818	0.7386	0.7386	0.9461
73	0.9167	0.1623	0.1623	0.2080
46	0.8361	0.3209	0.3209	0.4110
45	0.8272	0.3242	0.3242	0.4153
50	0.7615	0.7614	0.7614	0.9754
47	0.5596	1.0224	1.0224	1.3098

Tabla 5.9: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 5.

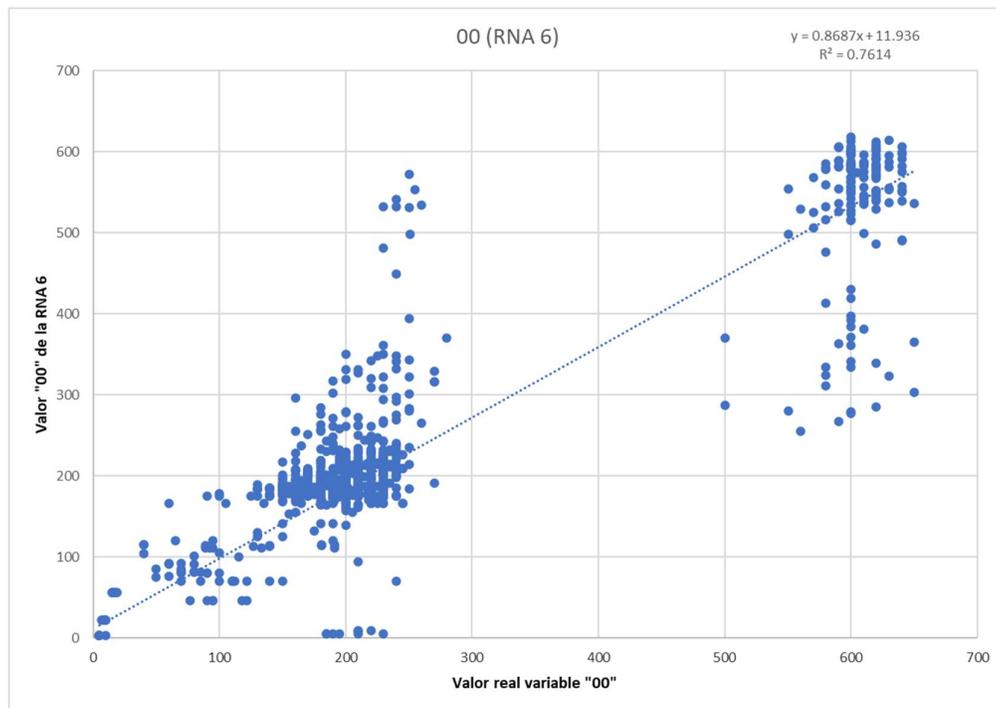


Gráfica 5.6: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 5

Con la intención de analizar la dependencia de la variable consistencia con insumos incluidos principalmente en la pasta del hormigón se consideró construir una red neuronal que incluyera a los aditivos reductor de agua y superplastificante, a la cantidad de cemento, a la relación agua cemento, a la cantidad de agua y al agregado total obteniéndose un coeficiente de determinación de 76.14% que es un valor comparativamente más bajo con los obtenidos en redes neuronales previas. Esto se muestra en la gráfica 5.7 de la red neuronal 6.

RED 06 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
45	0.5960	1.0057	1.0057	1.2884
35	0.7623	0.4589	0.4589	0.5878
53	0.8607	0.2891	0.2891	0.3703
58	0.6866	0.6243	0.6243	0.7997
45	0.7187	0.5723	0.5723	0.7332
31	0.6354	2.3287	2.3287	2.9832
37	0.8002	0.6001	0.6001	0.7688
36	0.7650	1.0332	1.0332	1.3237
24	0.7702	0.5301	0.5301	0.6791

Tabla 5.10: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 6.

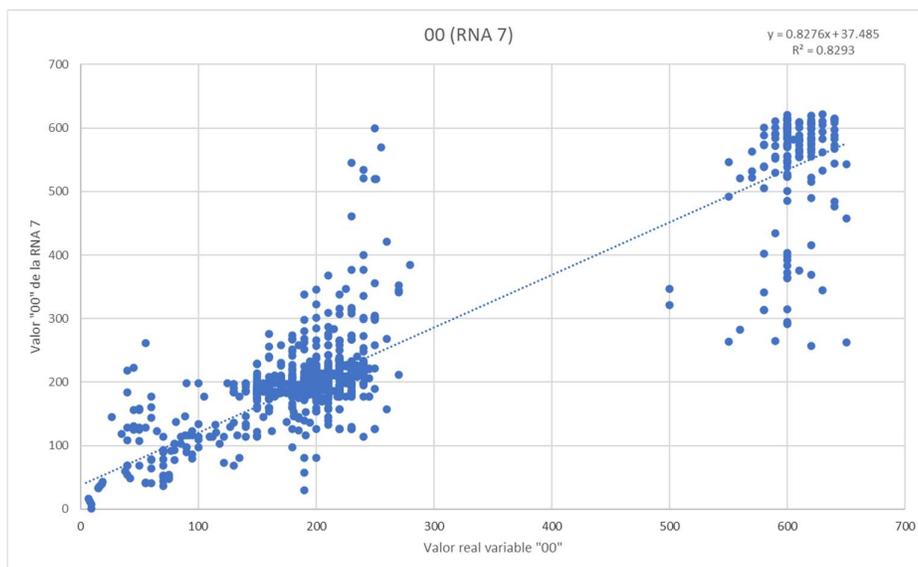


Gráfica 5.7: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 6

Con la intención de corroborar que tan influyente eran los agregados grueso o fino se construyó la red neuronal 7, en la que se extrajeron las variables de aditivo incluso de aire, temperatura, cantidad de agregado reciclado y fino y cantidad de agua y el modelo proporcionó un valor de coeficiente de determinación de 82.93%. Este análisis puede observarse en la tabla 5.11 y en la gráfica 5.8

RED 7 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
30	0.8571	0.2660	0.2660	0.3407
32	0.7343	0.8836	0.8836	1.1320
43	0.6220	0.7800	0.7800	0.9993
72	0.9038	0.1847	0.1847	0.2366
27	0.6816	1.5792	1.5792	2.0230
38	0.8361	0.3115	0.3115	0.3990
40	0.8307	0.4545	0.4545	0.5822
63	0.3968	1.5292	1.5292	1.9590
37	0.8236	0.4376	0.4376	0.5606

Tabla 5.11: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 7.



Gráfica 5.8: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 7

Dado que los coeficientes de determinación en las redes neuronales construidas previamente habían dado valores relativamente bajos, se quiso utilizar el método de redes neuronales artificiales, pero cambiando la variable dependiente; en ese sentido se incluyó dentro de las variables predictoras a la consistencia en el tiempo cero y se consideró a la variable cantidad de agua en la mezcla como variable dependiente, es decir se asumió que la consistencia estaba definida como variable de entrada y se quiso relacionar estas 12 variables con la variable dependiente agua total en la mezcla.

	REDES NEURONALES PROPUESTAS PARA VARIABLE OBJETIVO "W"						
VARIABLE PREDICTORA	8	9	10	11	12	13	14
TipCemento	X	X	X	X		X	X
RedAgua	X	X	X	X	X	X	X
SuperPlast	X	X	X	X	X		X
CantCemento	X	X	X	X	X	X	X
a/c	X	X	X	X	X	X	X
IncAire	X	X	X	X			
T	X	X	X				
AgregRec	X	X					
Fino	X				X	X	
Grueso	X					X	
AgregTotal	X	X	X				X
00	X	X	X	X	X	X	X
VARIABLE OBJETIVO	W	W	W	W	W	W	W

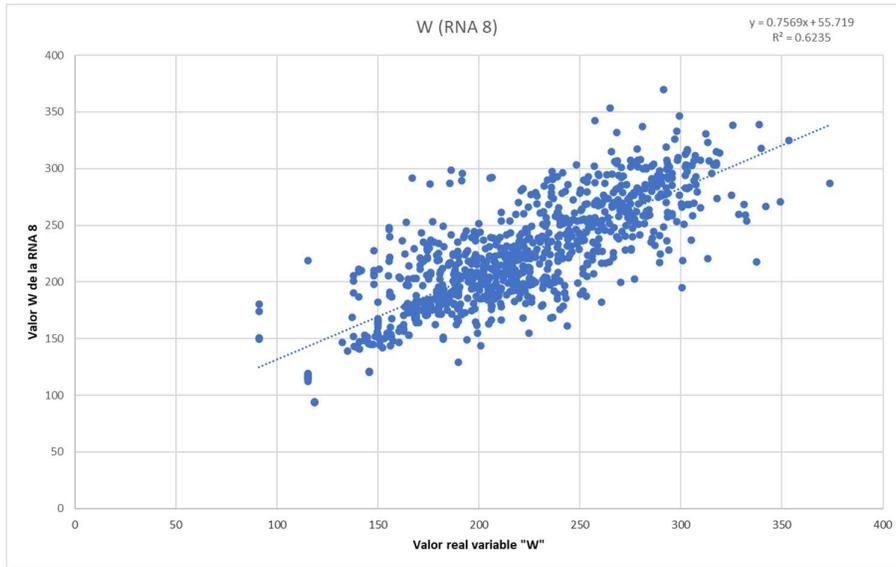
Tabla 5.12: Redes neuronales propuestas para la obtención de la variable objetivo agua (W).

Se construyeron 7 redes neuronales más y se analizaron los resultados de coeficiente de determinación para las redes construidas obteniéndose en general valores del coeficiente de determinación mucho mayores.

En la red neuronal artificial número 8 se consideraron 12 variables predictoras y una variable dependiente que en este caso sería la cantidad de agua en la mezcla, obteniéndose un coeficiente de determinación de 62,35%.

RED 8 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
144	0.8378	0.3628	0.3628	0.4706
48	0.9233	0.1627	0.1627	0.2111
56	0.8656	0.9108	0.9108	1.1814
92	0.9033	0.2712	0.2712	0.3517
41	0.7108	0.6992	0.6992	0.9070
34	0.9736	0.0537	0.0537	0.0697
38	0.9141	0.1809	0.1809	0.2347
51	0.7101	1.2207	1.2207	1.5833
70	0.7898	0.5366	0.5366	0.6960

Tabla 5.13: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 8.

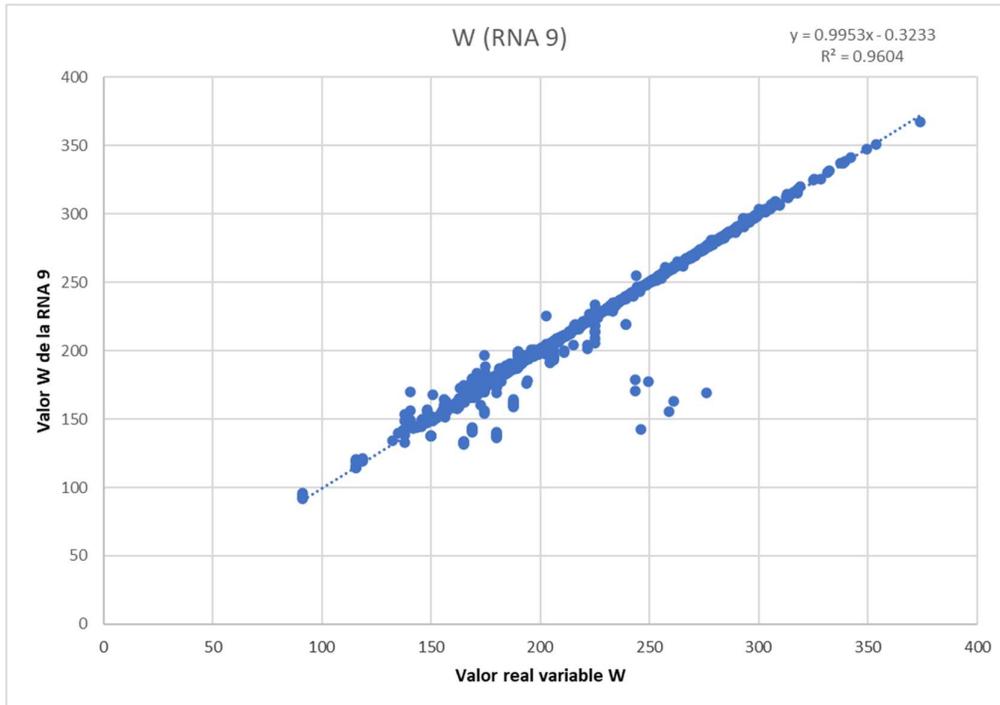


Gráfica 5.9: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 8

Con la intención de corroborar el efecto de las variables dependientes agregado fino y agregado grueso dentro del modelo se extrajeron estas variables y solamente se incluyó la variable agregado total construyéndose la red neuronal artificial número 9 en la que se obtuvo un coeficiente de determinación del 96.04% en el ajuste que es mucho mayor a lo obtenido hasta el momento. (Figura 5.10)

RED 9 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
28	0.9227	0.1575	0.1575	0.1985
29	0.9769	0.0467	0.0467	0.0588
47	0.8666	0.2793	0.2793	0.3519
58	0.8478	0.4891	0.4891	0.6163
39	0.9045	0.1996	0.1996	0.2515
42	0.9767	0.0479	0.0479	0.6040
60	0.8932	0.2744	0.2744	0.3457
45	0.7952	0.8032	0.8032	1.0120
117	0.8717	0.3175	0.3175	0.4001

Tabla 5.14: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 9.



Gráfica 5.10: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 9

El buen resultado de la red neuronal número 9 indicaba que era suficiente considerar la cantidad de agregado total en el modelo y adicionalmente decidimos extraer la variable que representaba la cantidad de agregado reciclado construyendo una nueva red neuronal artificial. En esta nueva red neuronal artificial se obtuvo un coeficiente de determinación del 92.54% mostrando que la consideración de la variable agregado reciclado ayudaba a explicar mejor la dependencia de la variable cantidad de agua en la mezcla de hormigón fresco.

Los resultados de la red neuronal número 10 se muestran en la tabla 5.15 y en la gráfica 5.11.

RED 10 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
44	0.9158	0.1757	0.1757	0.2171
53	0.8787	0.2884	0.2884	0.3574
44	0.8434	0.3570	0.3570	0.4425
63	0.9380	0.1306	0.1306	0.1619
29	0.8092	0.4230	0.4230	0.5243
71	0.7711	0.6767	0.6767	0.8387
36	0.9581	0.0836	0.0836	0.1036
34	0.8499	0.3414	0.3414	0.4235
26	0.9636	0.0716	0.0716	0.0887

Tabla 5.15: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 10.

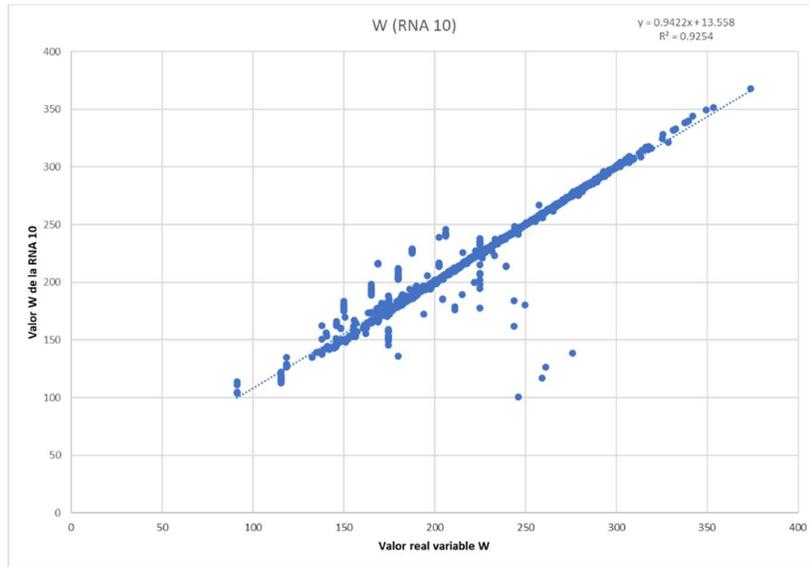
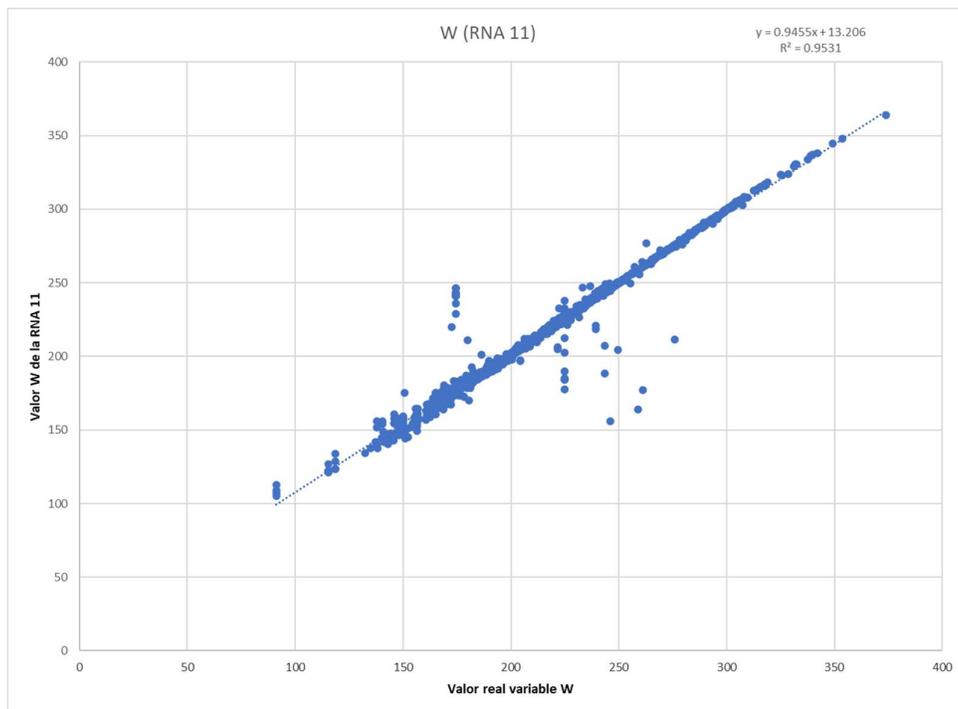


Figura 5.11: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 10

Las redes neuronales 11 y 12 consideraron extraer las variables temperatura, agregado reciclado agregado, fino, grueso y total para corroborar los resultados del coeficiente de determinación en la influencia de estas variables en el contenido de agua total de la mezcla. La red neuronal artificial 11 obtuvo un valor de coeficiente de determinación de 95.31% mientras que la red neuronal 12 obtuvo un valor de coeficiente de determinación 84.75% que muestra que las variables de este tipo de cemento y temperatura del hormigón son importantes a la hora de predecir los valores de la cantidad de agua total en la mezcla. Los resultados se muestran en las tablas 5.16 y 5.17 mientras que los ajustes de cada modelo se muestran en las figuras 5.12 y 5.13

RED 11 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
141	0.4758	2.7682	2.7682	3.4738
44	0.9279	0.1554	0.1554	0.1950
25	0.9696	0.0616	0.0616	0.0773
32	0.9699	0.0596	0.0596	0.0749
69	0.9273	0.1589	0.1589	0.1995
49	0.9623	0.0781	0.0781	0.0980
23	0.9379	0.1339	0.1339	0.1680
23	0.9490	0.1019	0.1019	0.1278
45	0.9288	0.1465	0.1465	0.1838

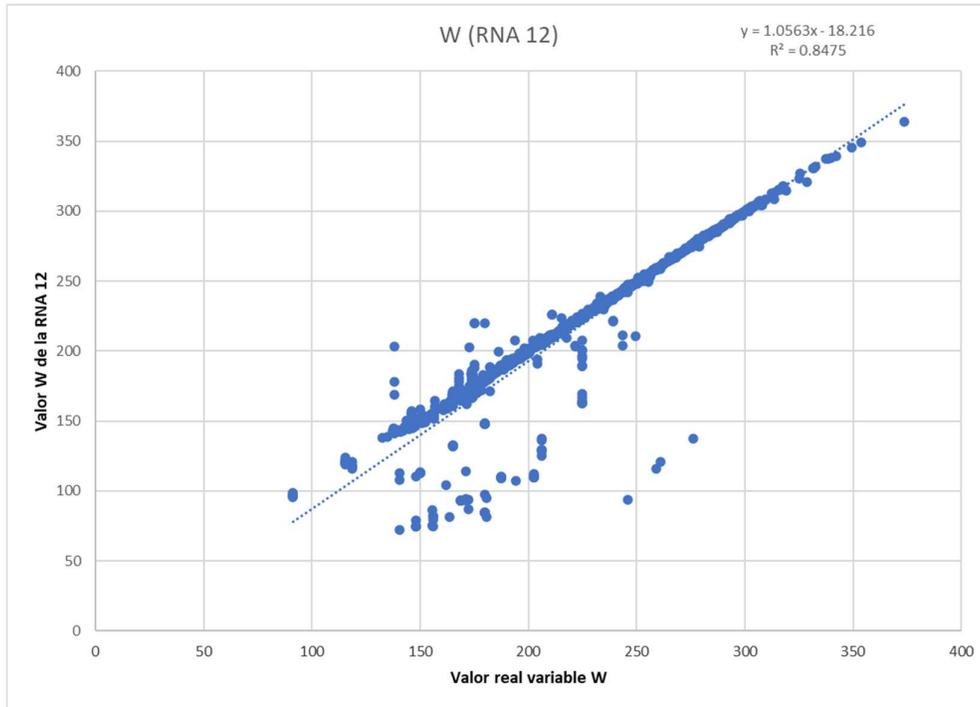
Tabla 5.16: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 11.



Gráfica 5.12: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 11

RED 12 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
29	0.9452	0.1147	0.1147	0.1470
70	0.5730	4.4076	4.4076	5.6464
24	0.9095	0.2482	0.2482	0.3179
57	0.4338	1.9074	1.9074	2.4435
142	0.6618	3.0668	3.0668	3.9288
28	0.9176	0.2302	0.2302	0.2949
65	0.8399	0.5611	0.5611	0.7188
42	0.7975	0.7111	0.7111	0.9109
58	0.4370	2.7196	2.7196	3.4839

Tabla 5.17: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 12.



Gráfica 5.13: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 12

Las redes neuronales 13 y 14 tenían como objetivo analizar la influencia que tenía la variable del aditivo inclusor de aire en las mezclas, por lo que se extrajo esta variable de los modelos.

La red neuronal artificial 13 consideró 7 variables dependientes extrayendo además la variable de la cantidad de aditivo superplastificante obteniendo un valor del coeficiente de determinación 94.02%.

RED 13 (12 VARIABLES)				
# Interacciones	R	MSE	RMSE	PSE
120	0.6452	2.5196	2.5196	3.2342
72	0.8033	0.4227	0.4227	0.5426
34	0.9630	0.0734	0.0734	0.0942
70	0.8023	0.4537	0.4537	0.5824
71	0.6675	30.4320	30.4320	3.9066
35	0.9676	0.0667	0.0667	0.0856
30	0.9256	0.2139	0.2139	0.2746
27	0.9040	0.1919	0.1919	0.2464
120	0.5447	1.3612	1.3612	1.7474

Tabla 5.18: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 13.

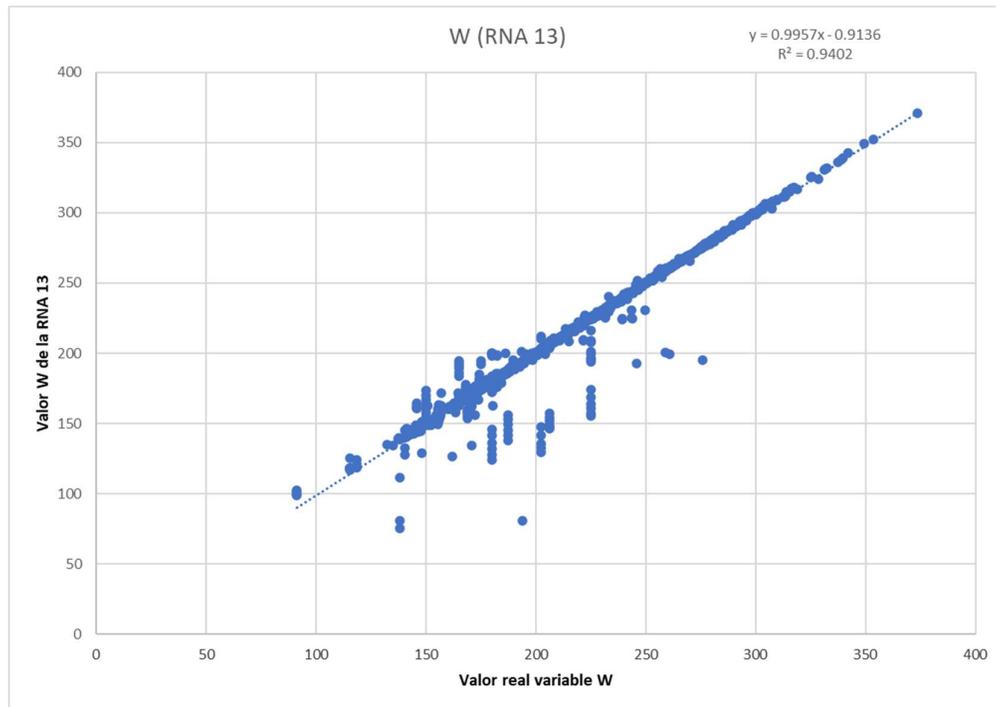
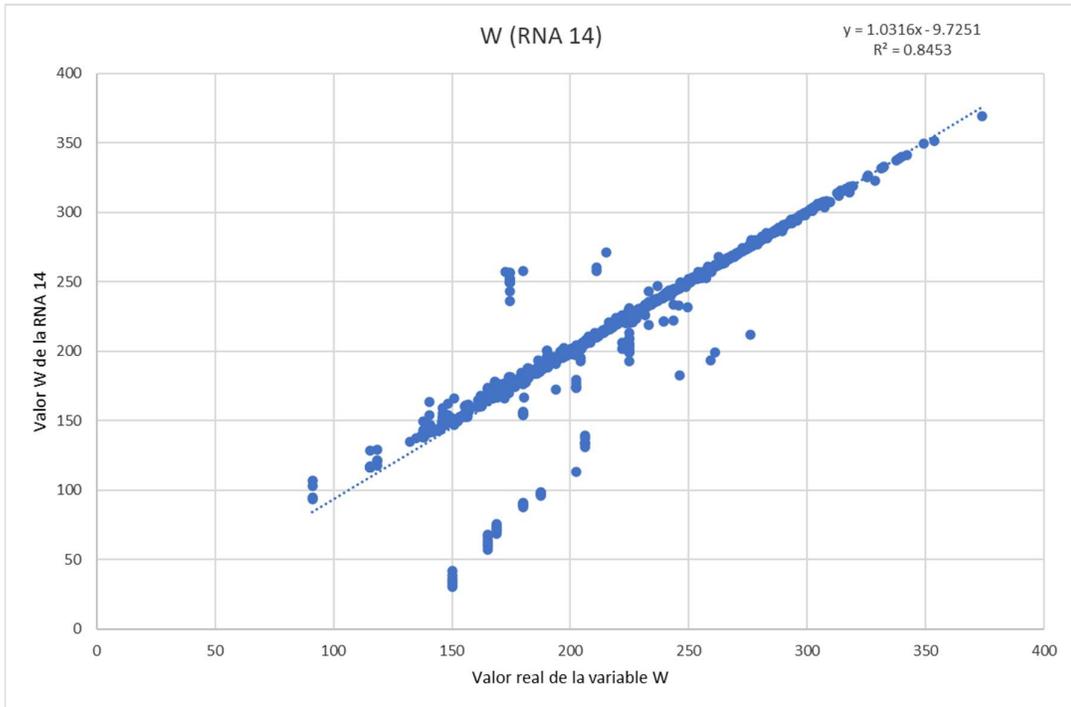


Figura 5.14: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 13.

La red neuronal artificial 14 obtuvo un valor del coeficiente de determinación de 84.53% mostrando que la interrogación entre variables extraídas y las que participan en el modelo no era tan efectiva como en el modelo de la red neuronal artificial 14.

RED 14 (12 VARIABLES)				
# Iteraciones	R	MSE	RMSE	PSE
46	0.9106	0.2214	0.2214	0.2842
89	0.6196	1.8863	1.8863	2.4215
30	0.9513	0.1062	0.1062	0.1363
48	0.8507	0.3562	0.3562	0.4572
64	0.8069	0.6306	0.6306	0.8095
29	0.9459	0.1287	0.1287	0.1652
34	0.9264	0.1546	0.1546	0.1985
72	0.7311	1.1352	1.1352	1.4573
42	0.9354	0.1560	0.1560	0.2002

Tabla 5.19: Valores de R y de los errores MSE, RMSE y PSE para la red neuronal artificial propuesta 14.



Gráfica 5.15: Ecuación y gráfica de regresión de la RNA 14.

5.2. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

En este trabajo se han construido redes neuronales artificiales que tienen un esquema de 3 capas, una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida, y en el que el número de neuronas por cada capa ha sido definido en base a la cantidad de variables predictoras disponibles; en la capa de salida tuvimos una sola neurona tanto para el análisis de la variable consistencia como la cantidad de agua presente en la mezcla de hormigón fresco.

Las 7 primeras redes neuronales artificiales construidas tenían como variable dependiente a la consistencia o asentamiento en el hormigón en estado fresco mientras que las 7 redes neuronales posteriores se construyeron con la intención de verificar la posibilidad de hacer crecer los coeficientes de determinación entre componentes importantes relevantes en la mezcla de hormigón como es la cantidad de agua presente en la mezcla.

En líneas generales se evidenció que los coeficientes de determinación eran mayores en las 7 últimas redes neuronales artificiales construidas cuya variable dependiente era la cantidad de agua presente en la mezcla. Este aumento en los coeficientes de determinación indica que es mucho más sencillo predecir la cantidad de agua teniendo la consistencia del hormigón en estado fresco definida.

VARIABLE PREDICTORA	1	2	3	4	5	6	7
TipCemento	X	X		X			X
RedAgua	X	X	X	X	X	X	X
SuperPlast	X	X	X	X	X	X	X
CantCemento	X	X	X	X	X	X	X
a/c	X	X	X	X	X	X	X
IncAire	X	X	X				
T	X	X	X				
AgregRec	X	X					
W	X	X		X	X	X	
Fino	X					X	
Grueso	X						
AgregTotal	X	X		X	X		X
# Variables	12	10	6	7	6	6	6
VARIABLE OBJETIVO	00	00	00	00	00	00	00
R ²	85.53%	77.77%	81.49%	79.69%	75.39%	76.14%	82.93%

Tabla 5.20: Redes neuronales propuestas para variable objetivo consistencia en el tiempo cero.

La tabla 5.20 muestra un resumen con los coeficientes de determinación de las redes neuronales artificiales 1 a 7 mientras que la tabla 5.21 muestra el resumen correspondiente a las redes neuronales artificiales 8 a 14.

REDES NEURONALES PROPUESTAS PARA VARIABLE OBJETIVO "W"

VARIABLE PREDICTORA	8	9	10	11	12	13	14
TipCemento	X	X		X		X	X
RedAgua	X	X	X	X	X	X	X
SuperPlast	X	X	X	X	X		X
CantCemento	X	X	X	X	X	X	X
a/c	X	X	X	X	X	X	X
IncAire	X	X	X	X			
T	X	X	X				
AgregRec	X	X					
Fino	X				X	X	
Grueso	X					X	
AgregTotal	X	X	X				X
00	X	X	X	X	X	X	X
# Variables	12	10	8	7	6	7	7
VARIABLE OBJETIVO	W	W	W	W	W	W	W
R ²	62.35%	96.04%	92.54%	95.31%	84.75%	94.02%	84.53%

Tabla 5.21: Redes neuronales propuestas para variable objetivo cantidad de agua en la mezcla.

6. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este estudio hemos tenido como objetivo principal analizar cuáles son las variables que influyen en la consistencia o asentamiento de una mezcla de hormigón normal y además el predecir este asentamiento con herramientas estadísticas clásicas y modernas como son las redes neuronales artificiales. Este objetivo se ha visto cumplido cuando nos ha sido posible verificar que existen variables que influyen especialmente en la consistencia del hormigón como son la presencia de aditivo reductor de agua y la cantidad de agua presente en la mezcla; además hemos podido verificar que utilizando redes neuronales artificiales las predicciones de estas variables para con la consistencia han sido de más del 80% en redes neuronales construidas para este fin.

Hemos podido verificar también, de forma indirecta que la variable cantidad de agua presente en la mezcla puede cuantificarse y predecirse con mayor robustez si definimos con anterioridad la consistencia que queremos alcanzar.

6.1. CONCLUSIONES GENERALES

De forma general la principal conclusión que se puede obtener de este estudio es que la utilización de redes neuronales artificiales puede lograr predicciones más exactas que la estadística clásica conocida hasta ahora. Todas las redes neuronales artificiales construidas en este estudio han dado valores de coeficientes de determinación de prácticamente el doble con respecto a la utilización de estadística clásica en metodologías como la regresión simple aditiva.

En segundo lugar, y enfocándonos en la variable consistencia, objetivo principal de nuestro estudio, podemos mencionar que la conclusión más importante es que se va a ver afectada e influida por las variables cantidad de cemento, cantidad de aditivo reductor de agua, cantidad de agua presente en la mezcla y cantidad total de agregado. Es interesante observar que cuando estas variables entran en interacción con las variables adicionales propuestas, los coeficientes de determinación podrían tomar valores menores concluyendo que estas interacciones no siempre podrían ser ventajosas para la consistencia en el hormigón.

También es importante mencionar que se obtienen mejores valores del coeficiente de determinación si utilizamos como variable dependiente a la cantidad de agua presente en la mezcla.

6.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

- La consistencia del hormigón en estado fresco inmediatamente después de haber sido mezclado depende en su mayoría de la cantidad de cemento, el contenido de aditivo reductor de agua y de la cantidad de agua presente en la mezcla.
- La influencia que tienen variables como la cantidad de aditivo superplastificante, cantidad de aditivo inclusor de aire o temperatura del hormigón en estado fresco

no son relevantes a la hora de predecir la consistencia del hormigón en estado fresco.

- Se ha comprobado que la interacción de los agregados fino y grueso en la predicción de la consistencia del hormigón en estado fresco no ayuda a obtener valores del coeficiente de determinación representativos. Es mucho mejor considerar la cantidad total de agregados en la mezcla.
- Con respecto a la utilización de la estadística clásica para la predicción y cuantificación de la consistencia del hormigón en estado fresco es importante mencionar que es una herramienta útil pero que no es suficiente para lograr valores definitivos, especialmente cuando los análisis consideran una sola variable. Será responsabilidad del investigador utilizar los valores obtenidos en estos análisis como referencia y no como hechos consumados.
- El análisis realizado mediante regresión simple aditiva podría ayudar mucho cuando se sospecha de la influencia de una variable en la característica del hormigón en estudio. Por ejemplo, las variables cantidad de agua y cantidad de aditivo reductor de agua fueron las que obtuvieron los mayores valores del coeficiente de determinación coincidiendo con la bibliografía en que son variables importantes a la hora de definir la consistencia en el hormigón en estado fresco.
- También es importante mencionar que los análisis realizados con estadística clásica podrían llegar a un 43% como valor del coeficiente de determinación, es decir, explican menos de la mitad de las interacciones entre las variables que afectan a la consistencia en el hormigón en estado fresco.
- Con respecto a las redes neuronales construidas es necesario mencionar que son una herramienta muy potente a la hora de realizar predicciones en parámetros con elevada variabilidad. El uso de estas redes neuronales artificiales debiera extenderse a todas las ramas de ingeniería.
- Es importante realizar los análisis mediante redes neuronales artificiales definiendo con exhaustividad las variables que nos interesan incluir y sobre todo realizar un análisis de independencia entre cada una de ellas pues las interacciones que puedan tener al momento de ejecutar el análisis podrían afectar el obtener valores del coeficiente de determinación relativamente bajos.
- Si bien es cierto que los valores obtenidos con las redes neuronales artificiales para la variable consistencia eran mucho mayores que los obtenidos con el uso de estadística clásica, estos en general seguían siendo comparativamente bajos con los obtenidos en el análisis de variables dependientes como en agua presente en la mezcla. Lo ideal era obtener para la variable consistencia valores mayores al 90% sin embargo, se obtuvieron en promedio valores que estaban alrededor de 82%.

6.3. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Dada la importancia que tienen las características del hormigón en estado fresco es necesario continuar con la investigación de sus características en estado fresco y además en estado endurecido. En este estudio nos hemos enfocado en estado fresco con un número limitado de datos y que han sido obtenidos experimentalmente para calcular o predecir variables diferentes a la consistencia en estado fresco por lo que recomendamos se hagan más estudios enfocados directamente a obtener la mejor consistencia del hormigón en estado fresco para beneficio del constructor.

Por otro lado, específicamente podríamos mencionar las siguientes líneas de investigación como posibles mejoras en las redes neuronales artificiales:

- Representar la distribución de los datos gráficamente con “corrplot” y calcular la matriz de correlación con el objetivo de ver si hay datos agrupados. Si con “corrplot” se observa que existen datos “clusterizados” muy claramente en algún par de variables, entonces se puede emplear un algoritmo tipo Kmeans y luego entrenar redes por separado para cada “clúster”.
- Establecer entradas no jerárquicas en 1.0. cuando las entradas no tienen correlación en la salida por ser de tipo cualitativo (por ejemplo, tipo de cemento) En este caso hay que distribuir cada tipo en una variable de entrada y poner 1 cuando corresponde a ese tipo y 0 al resto de tipos.
- Redes bicapa. En lugar de usar una sola capa oculta con muchas neuronas, se puede emplear dos capas ocultas con menor número de neuronas.
- Reducción de pesos en la red. En el software MatLab se puede forzar a que los pesos sean lo más pequeños posibles.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Beadoin, J., Ramachandran, V., & Shihua, Z. (1989). Control of slump loss in superplasticized concrete. *Materials and Structures*, 107-111.
- Carrasco Avendaño, J. (2020). Modelos predictivos aplicados a la resistencia a compresión del hormigón de un proyecto hidroeléctrico en Ecuador.
- Collepari, M., Corradi, M., & Valente, M. (1980). Low-Slump-Loss Superplasticized Concrete.
- Collins, F., & Sanjayan, J. (1999). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and Concrete Research*, 459-462.
- Coppola, I., Erali, E., Troli, R., & Collepari, M. (s.f.). Blending of Acrylic Superplasticizer with Naphthalene, Melamine or lignosulfoate Based. *ACI Material Journal*.
- Hewlett, P. (1975). Experiences in th Use of Superplasticizer in England. *ACI MATERIAL JOURNAL*.
- Islam, N., Fauzi Mohd Zain, M., & Jamil, M. (2012). PREDICTION OF STRENGTH AND SLUMP OF RICE HUSK ASH INCORPORATED HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 310-317. doi:10.3846/13923730.2012.698890
- Kasami, H., & Ikeda, T. (1967). On Workability and Pumpability of Superplasticized Concrete - Experience in Japan. *ACI MATERIAL JOURNAL*.
- Khayat, K., Vachon, M., & Lanctôt, M.-C. (1997). Use of Blended Silica Fume Cement in Commercial Concrete Mixtures. *ACI MATERIALS JOURNAL*.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Skokie, Illinois.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de concreto*. México: Portland Cement Association.
- Lamond, J., & Pielert, J. (Edits.). (2006). *Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete Mking Material*. ASTM International.
- Mahajan, L., Mahadik, S., & Bhagat, S. (2020). Investigation of Fly Ash Concrete by Slump Cone and Compaction Factor Test. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. doi:10.1088/1757-899X/970/1/012011
- MAILVAGANAM, N. (1967). Factors Influencing Slump Loss in Flowing Concrete. *ACI Material Journal*.
- Navarro Ferrer, F. (2016). Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales. .
- Ortiz Bruno, M. (2019). Modelos Predictivos De Resistencia Y Durabilidad En Hormigones.
- Pasquel Carbajal, E. (1998). *Tópicos de Tecnología del Concreto en el Perú*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.

- PERENCHIO, W., WHITING,, D., & KANTRO, D. (s.f.). Water Reduction, Slump Loss, and Entrained Air - Void Systems as Influenced by Superplasticizers. *ACI Material Journal*.
- Previte, R. (1977). Concrete Slump Loss. *ACI Journal*.
- Salem, M., Alsadey, S., & Johari, M. (2016). Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 153-158. doi:DOI: 10.9790/1684-130407153158
- Salem, M., Alsadey, S., & Johari, M. (2016). Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 153-158. doi:10.9790/1684-130407153158
- Shaikuthali, S., Mannan, M., Thanon Dawood, E., Teo, D., Ahmadi, R., & Ismail, I. (2019). Workability and compressive strength properties of normal weight concrete using high dosage of fly ash as cement replacement. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s41024-019-0065-5>
- Shirzadi Javid, A., Naseri, H., & Etebari Ghasbeh, M. (2021). Estimating the Optimal Mixture Design of Concrete Pavements Using a Numerical Method and Meta-heuristic Algorithms. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 913-927. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00352-6>
- Sičáková^{1*}, A., Urbán, K., & Kováč, M. (2018). Slump Loss of Concrete Based on RCA and Prepared by Specific Mixing Approach. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 1015–1020. Obtenido de <https://doi.org/10.3311/PPci.11733>
- Surahyo, A. (2019). *Concrete Construction Practical Problems and Solutions*. Toronto: Oxford University Press. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10510-5>
- Tajbakhshian, A., Reza Saeb, M., Hassan Jafari, S., Najafi, F., Ali Khonakdar, H., Ayoubi, M., & Hassanpour Asl, F. (2016). High-performance carboxylate superplasticizers for concretes:. doi:DOI: 10.1002/app.44908
- Tangchirapat, W., Rattanasotinunt, C., Buranasing, R., & Jaturapitakkul, C. (2013). Influence of Fly Ash on Slump Loss and Strength of Concrete Fully Incorporating Recycled Concrete Aggregates. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000585
- Yancha Alvarado, A. (2022). Modelos predictivos de la resistencia del hormigón mediante estadística y redes neuronales artificiales.
- Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P., & Nanni, A. (2018). Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete. *Construction and Building Materials*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.126>

8. ANEXOS

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m ³)	a/c
1.00	1	OPC	I	6	0	0	364	0.5
	2	AAS	Slag	66	0	0	347	0.5
	3	AAS/CSF	Slag	66	0	0	313	0.5
	4	AAS/UFS	Slag	66	0	0	314	0.5
	5	AAS/UFA	Slag	66	0	0	308	0.5
	6	260 TYPE 10	Tipo 10 (Canada)	67	3	0.16	260	0.67
	7	255 SF CEMENT	BLENDED SF Cement	1	3	0.16	255	0.59
	8	280 TYPE 10	Tipo 10 (Canada)	67	3	0.16	280	0.63
	9	275 SF CEMENT	BLENDED SF Cement	1	3	0.19	275	0.62
	10	Type 10	Type 10	67	3	0.16	300	0.5
2.00	11	Type 10	Type 10	67	3	0.11	365	0.42
	12	Type 10	Type 10	67	3	0.13	415	0.39
	13	Type 10	Type 10	67	3	0.17	470	0.36
	14	Type 20	Type 20	68	3	0.1	300	0.46
	15	Type 20	Type 20	68	3	0.15	370	0.39
	16	Type 20	Type 20	68	3	0.17	420	0.37
	17	Type 20	Type 20	68	3	0.19	480	0.33
	18	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	310	0.47
	19	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	360	0.44
	20	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	410	0.4
	21	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	460	0.37
	22	Type 20	Type 20	68	3	0	260	0.65
	23	Type 20	Type 20	68	3	0	270	0.59
	24	Type 20	Type 20	68	3	0	310	0.51
	25	Type 20	Type 20	68	3	0	370	0.46
	26	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	255	0.64
	27	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	300	0.53
	28	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	365	0.45
	29	SF CEMENT	SF CEMENT	65	3	0	235	0.69
	3.00	30	3-RCA CEM	CEM I 42.5 R	4	6.664889363		310
31		3-RCA FA	CEM I 42.5 R	4	6.664889363		310	0.5
32		3-RCA RCP	CEM I 42.5 R	4	6.664889363		310	0.5
33		3-NA CEM	CEM I 42.5 R	4	6.641086187		336	0.5
34		3-NA FA	CEM I 42.5 R	4	6.641086187		336	0.5
35		3-NA RCP	CEM I 42.5 R	4	6.641086187		336	0.5
36		Conv Concrete 01	I	6	0	3	300	0.6
4.00	37	Conv Concrete 02	I	6	0	3	300	0.6
	38	SC RET	I	6	0	3	300	0.55
	39	SP CONCRETE 01	I	6	0	3	300	0.55
	40	SP CONCRETE 02	I	6	0	3	300	0.55
5.00	41	Concrete 01	Portland Cement	64	4.52173913		345	0.5
	42	Concrete 02	Cemento Resistente sulfato	5	5.2		300	0.6
6.00	43	MIX 41	I	6	0		338.7743	0.43
	44	MIX 42	I	6	0		336.4011	0.46
	45	MIX 43	I	6	0		332.248	0.47
	46	MIX 44	I	6	0		331.6547	0.49
	47	M-L1 15.5	I	6	1.212396694		326	0.535
7.00	48	M-L1 22	I	6	1.212396694		326	0.535
	49	M-L1-32	I	6	1.212396694		326	0.535
	50	M-R1 32	I	6	1.212396694		326	0.535
	51	M-L1 22	I	6	1.212396694		326	0.535
	52	M-L1 23	I	6	1.212396694		326	0.535
	53	M-L1 22	I	6	1.212396694		326	0.535
	54	M-L1 22	I	6	1.212396694		326	0.535
	55	CEM V	I	6	1.212396694		326	0.535
	56	CEM III	I	6	1.212396694		326	0.535
	57	CEM I	I	6	1.212396694		326	0.535
8.00	58	CE 42.5R 100A 0N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	59	CE 42.5R 75A 25 N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	60	CE 42.5R 50A 50N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	61	CE 42.5R 25A 75N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	62	CE 42.5R 0A 100N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	63	CE II/A-L 42.5R 100A 0N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	64	CE II/A-L 42.5R 75A 25 N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	65	CE II/A-L 42.5R 50A 50N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	66	CE II/A-L 42.5R 25A 75N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	67	CE II/A-L 42.5R 0A 100N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	68	CE I 42.5R 100A 0N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	69	CE I 42.5R 75A 25 N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	70	CE I 42.5R 50A 50N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	71	CE I 42.5R 25A 75N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	72	CE I 42.5R 0A 100N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5
	73	CE II /A - L 42.5R 100A 0N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	74	CE II /A - L 42.5R 75A 25 N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	75	CE II /A - L 42.5R 50A 50N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	76	CE II /A - L 42.5R 25A 75N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
	77	CE II /A - L 42.5R 0A 100N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48
78	CE I 42.5R 100A 0N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5	
79	CE I 42.5R 75A 25 N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5	
80	CE I 42.5R 50A 50N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5	
81	CE I 42.5R 25A 75N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5	
82	CE I 42.5R 0A 100N	CE I 42.5R	2	0	2.876033058	348	0.5	
83	CE II/A - L 42.5R 100A 0N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48	
84	CE II/A - L 42.5R 75A 25 N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48	
85	CE II/A - L 42.5R 50A 50N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48	
86	CE II/A - L 42.5R 25A 75N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48	
87	CE II/A - L 42.5R 0A 100N	CE II	3	0	2.892561983	350	0.48	
9.00	88	Reference	I	6	0	0	480	0.47
	89	10% FA	I	6	0	0	432	0.47
	90	20% FA	I	6	0	0	384	0.47
	91	30% FA	I	6	0	0	336	0.47
	92	40% FA	I	6	0	0	288	0.47
	93	50% FA	I	6	0	0	240	0.47
	94	60% FA	I	6	0	0	192	0.47
	95	Control M	I	6	0	0	340	0.56
10.00	96	Control M1	I	6	0	0	340	0.66
	97	400ml/100 MS1	I	6	0	4	340	0.56
	98	600ml/100 MS2	I	6	0	6	340	0.56
	99	800ml/100 MS3	I	6	0	8	340	0.56
	100	1000ml/100 MS4	I	6	0	10	340	0.56
	101	1200ml/100 MS5	I	6	0	12	340	0.56
11.00	102	SP-AA50	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	103	SP-AA60	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	104	SP-AA70	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	105	SP-AA80	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	106	SP-AA90	I	6	0	0.867768595	350	0.33

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
	107	SP-MA50	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	108	SP-MA60	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	109	SP-MA70	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	110	SP-MA80	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	111	SP-MA90	I	6	0	0.867768595	350	0.33
	112	DA 0.6	I	6	0	0	350	0.6
	113	WA 0.6	I	6	0	0	350	0.6
	114	DA 0.55	I	6	0	0	350	0.55
	115	WA 0.55	I	6	0	0	350	0.55
	116	DA 0.5	I	6	0	3	350	0.5
	117	WA 0.5	I	6	0	3	350	0.5
	118	A -21 -01	I	6	0	0	307	0.6
	119	B -21 -01	I	6	0	0	307	0.59
	120	A -21 -02	I	6	0	0	307	0.57
	121	B -21 -02	I	6	0	0	307	0.55
	122	A -21 -03	I	6	0	0	307	0.55
	123	B -21 -03	I	6	0	0	307	0.59
	124	A -29 -01	I	6	0	0	307	0.6
	125	B -29 -01	I	6	0	0	307	0.55
	126	A -29 -02	I	6	0	0	307	0.57
	127	B -29 -02	I	6	0	0	307	0.59
	128	A -29 -03	I	6	0	0	307	0.55
	129	B -29 -03	I	6	0	0	307	0.55
	130	Control M	I	6	0	0	340	0.56
	131	Control M1	I	6	0	0	340	0.56
	132	MS1	I	6	0	4	340	0.56
	133	MS2	I	6	0	6	340	0.56
	134	MS3	I	6	0	8	340	0.56
	135	MS4	I	6	0	10	340	0.56
	136	MS5	I	6	0	12	340	0.56
	137	1.5 SP A	V	69	0	15	350	0.4
	138	1 SP A	V	69	0	15	360	0.54
	139	Control	V	69	0	0	350	0.4
	140	3 SP C	V	69	0	30	353	0.39
	141	CONTROL	I	6	0	0	350	0.5
	142	0.3 SP	I	6	0	21.27659574	350	0.5
	143	0.3 SP + 2 Pt	I	6	20	21.27659574	350	0.5
	144	0.3 SP+2 PS	I	6	20	21.27659574	350	0.5
	145	CON	I	6	0	0	380	0.48
	146	AF	I	6	0	0	380	0.48
	147	ADF20	I	6	0	0	304	0.48
	148	ADF35	I	6	0	0	247	0.48
	149	ADF50	I	6	0	0	190	0.48
	150	AGF20	I	6	0	0	304	0.48
	151	AGF35	I	6	0	0	247	0.48
	152	AGF50	I	6	0	0	190	0.48
	153	BF	I	6	0	0	380	0.48
	154	BOF20	I	6	0	0	304	0.48
	155	BOF35	I	6	0	0	247	0.48
	156	BOF50	I	6	0	0	190	0.48
	157	BGF20	I	6	0	0	304	0.48
	158	BGF35	I	6	0	0	247	0.48
	159	BGF50	I	6	0	0	190	0.48
	160	1	I	6	0	26.66314678	378.8	0.38
	161	2	I	6	0	20.40282501	382.3	0.4
	162	3	I	6	0	18.59024012	387.3	0.39
	163	4	I	6	0	20.52481164	384.9	0.39
	164	5	I	6	0	13.35275552	411.9	0.4
	165	6	I	6	0	17.18634913	407.3	0.4
	166	7	I	6	0	25.96728123	385.1	0.4
	167	8	I	6	0	10.8668183	395.7	0.4
	168	9	I	6	0	10.66802134	393.7	0.4
	169	10	I	6	0	35.21478521	400.4	0.35
	170	11	I	6	0	26.38067061	405.6	0.37
	171	12	I	6	0	23.500612	408.5	0.35
	172	13	I	6	0	27.16720178	404.9	0.36
	173	14	I	6	0	19.05855339	435.5	0.36
	174	15	I	6	0	20.64693737	435.9	0.36
	175	16	I	6	0	26.68539326	427.2	0.36
	176	17	I	6	0	37.84956606	414.8	0.36
	177	18	I	6	0	12.94706724	419.4	0.36
	178	19	I	6	0	17.08373436	415.6	0.36
	179	20	I	6	0	14.93256262	415.2	0.36
	180	21	I	6	0	46.22349297	419.7	0.32
	181	22	I	6	0	33.1620738	428.2	0.34
	182	23	I	6	0	34.00093153	429.4	0.32
	183	24	I	6	0	37.70916804	424.3	0.33
	184	25	I	6	0	24.20409943	458.6	0.33
	185	26	I	6	0	35.74504737	464.4	0.33
	186	27	I	6	0	39.84238179	456.8	0.33
	187	28	I	6	0	55.09332134	444.7	0.33
	188	29	I	6	0	21.00271003	442.8	0.33
	189	30	I	6	0	21.44160584	438.4	0.33
	190	31	I	6	0	53.30587966	437.1	0.3
	191	32	I	6	0	41.07460036	450.4	0.32
	192	33	I	6	0	41.54632304	450.1	0.29
	193	34	I	6	0	48.47801578	443.5	0.3
	194	35	I	6	0	36.75249169	481.6	0.3
	195	36	I	6	0	54.72233482	493.4	0.3
	196	37	I	6	0	54.42596016	486.9	0.3
	197	38	I	6	0	77.24689539	475.1	0.3
	198	39	I	6	0	28.08747856	466.4	0.3
	199	40	I	6	0	35.30180867	458.9	0.3
	200	41	I	6	0	29.02317522	461.7	0.3
	201	42	I	6	0	50.38103302	472.4	0.3
	202	43	I	6	0	50.74309979	471	0.27
	203	44	I	6	0	62.02723147	462.7	0.28
	204	45	I	6	0	50.70310953	504.9	0.28
	205	46	I	6	0	65.96558317	523	0.27
	206	47	I	6	0	78.58659973	517.9	0.27
	207	48	I	6	0	101.4807502	506.5	0.27
	208	49	I	6	0	39.55954323	490.4	0.27
	209	50	I	6	0	47.82699106	480.9	0.27
	210	51	I	6	0	61.28640777	494.4	0.28
	211	52	I	6	0	58.10646079	492.2	0.25
	212	53	I	6	0	79.47706993	481.9	0.26

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superolastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
	213	54	I	6	0	69.82024598	528.5	0.25
	214	55	I	6	0	91.00758397	553.8	0.25
	215	56	I	6	0	105.7989456	550.1	0.25
	216	57	I	6	0	134.6439169	539.2	0.25
	217	58	I	6	0	55.53398058	515	0.25
	218	59	I	6	0	73.69884783	503.4	0.25
	219	60	I	6	0	60.219694	509.8	0.25
	220	S1-F00	OPC-53	11	0	0	300	0.5
	221	S2-F10	OPC-54	12	0	0	300	0.5
	222	S3-F20	OPC-55	13	0	0	300	0.5
	223	S4-F30	OPC-56	14	0	0	300	0.5
	224	S5-F40	OPC-57	15	0	0	300	0.5
	225	S6-F50	OPC-58	16	0	0	300	0.5
	226	S7-F00	OPC-59	17	0	0	300	0.55
	227	S8-F10	OPC-60	18	0	0	300	0.55
	228	S9-F20	OPC-61	19	0	0	300	0.55
	229	S10-F30	OPC-62	20	0	0	300	0.55
	230	S11-F40	OPC-63	21	0	0	300	0.55
	231	S12-F50	OPC-64	22	0	0	300	0.55
	232	S13-F00	OPC-65	23	0	0	300	0.6
	233	S14-F10	OPC-66	24	0	0	300	0.6
	234	S15-F20	OPC-67	25	0	0	300	0.6
	235	S16-F30	OPC-68	26	0	0	300	0.6
	236	S17-F40	OPC-69	27	0	0	300	0.6
	237	S18-F50	OPC-70	28	0	0	300	0.6
	238	S19-F00	OPC-71	29	0	0	375	0.45
	239	S20-F10	OPC-72	30	0	0	375	0.45
	240	S21-F20	OPC-73	31	0	0	375	0.45
	241	S22-F30	OPC-74	32	0	0	375	0.45
	242	S23-F40	OPC-75	33	0	0	375	0.45
	243	S24-F50	OPC-76	34	0	0	375	0.45
	244	S25-F00	OPC-77	35	0	0	375	0.5
	245	S26-F10	OPC-78	36	0	0	375	0.5
	246	S27-F20	OPC-79	37	0	0	375	0.5
	247	S28-F30	OPC-80	38	0	0	375	0.5
	248	S29-F40	OPC-81	39	0	0	375	0.5
	249	S30-F50	OPC-82	40	0	0	375	0.5
	250	S31-F00	OPC-83	41	0	0	375	0.55
	251	S32-F10	OPC-84	42	0	0	375	0.55
	252	S33-F20	OPC-85	43	0	0	375	0.55
	253	S34-F30	OPC-86	44	0	0	375	0.55
	254	S35-F40	OPC-87	45	0	0	375	0.55
	255	S36-F50	OPC-88	46	0	0	375	0.55
	256	S37-F00	OPC-89	47	0	0	450	0.4
	257	S38-F10	OPC-90	48	0	0	450	0.4
	258	S39-F20	OPC-91	49	0	0	450	0.4
	259	S40-F30	OPC-92	50	0	0	450	0.4
	260	S41-F40	OPC-93	51	0	0	450	0.4
	261	S42-F50	OPC-94	52	0	0	450	0.4
	262	S43-F00	OPC-95	53	0	0	450	0.45
	263	S44-F10	OPC-96	54	0	0	450	0.45
	264	S45-F20	OPC-97	55	0	0	450	0.45
	265	S46-F30	OPC-98	56	0	0	450	0.45
	266	S47-F40	OPC-99	57	0	0	450	0.45
	267	S48-F50	OPC-100	58	0	0	450	0.45
	268	S49-F00	OPC-101	59	0	0	450	0.5
	269	S50-F10	OPC-102	59	0	0	450	0.5
	270	S51-F20	OPC-103	60	0	0	450	0.5
	271	S52-F30	OPC-104	61	0	0	450	0.5
	272	S53-F40	OPC-105	62	0	0	450	0.5
	273	S54-F50	OPC-106	63	0	0	450	0.5
	274	M-1	II	7	0	4.147465438	380	0.39
	275	M-2	II	7	0	3.686635945	380	0.41
	276	M-3	II	7	0	5.069124424	380	0.37
	277	M-4	II	7	0	4.147465438	360	0.39
	278	M-5	II	7	0	4.147465438	400	0.39
	279	M-6	II	7	0	4.147465438	380	0.39
	280	M-7	II	7	0	5.069124424	380	0.39
	281	M-8	II	7	0	4.147465438	380	0.39
	282	M-9	II	7	0	0	380	0.45
	283	M-10	II	7	0	3.686635945	420	0.41
	284	M-11	II	7	0	6.511721098	386.4	0.37
	285	M-12	II	7	0	0	380	0.43
	286	M-13	II	7	0	0	331.2	0.45
	287	M-14	II	7	0	0	420	0.43
	288	M-15	II	7	0	8.160522273	403.2	0.37
	289	M-16	II	7	0	0	400	0.45
	290	M-17	II	7	0	4.508114606	349.6	0.39
	291	M-18	II	7	0	0	349.6	0.45
	292	M-19	II	7	0	0	386.4	0.43
	293	M-20	II	7	0	5.009016229	386.4	0.41
	294	M-21	II	7	0	5.280337942	345.6	0.39
	295	M-22	II	7	0	4.320276498	384	0.39
	296	M-23	II	7	0	0	380	0.45
	297	M-24	II	7	0	3.686635945	380	0.41
	298	1	1	6	5.186186285	0	395.7	0.603740207
	299	2	1	6	5.156040944	0	399.7	0.731548661
	300	3	1	6	5.471370995	0	386.2	0.716209218
	301	4	1	6	5.129711651	0	384.8	0.71491684
	302	5	1	6	5.677962268	0	384.4	0.700052029
	303	6	1	6	5.576996007	0	389.8	0.725756798
	304	7	1	6	5.631899076	0	386	0.679533679
	305	8	1	6	5.688744413	0	385.2	0.635773624
	306	9	1	6	6.866239012	0	366	0.605737705
	307	10	2	7	7.295971786	0	394.5	0.415969582
	308	11	2	7	0	8.214813972	399.5	0.639048811
	309	12	2	7	5.677501055	0	412	0.611407767
	310	13	2	7	6.088216153	0	414.2	0.700869145
	311	14	2	7	6.519701724	0	426.8	0.649484536
	312	15	4	9	6.570048309	0	450	0.445555556
	313	16	1	6	6.192019671	0	389	0.523393316
	314	17	4	9	0	5.232177894	458.7	0.470459996
	315	18	3	8	0	7.350268568	450.2	0.502221235
	316	19	4	9	0	7.059501513	441.7	0.412044374
	317	20	1	6	0	8.056696985	393.8	0.542661249
	318	21	1	6	0	8.423475259	395	0.551392405

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
	319	22	3	8	0	7.212121212	450	0.429111111
	320	23	1	6	0	8.079782077	393.8	0.44464195
	321	24	1	6	0	7.286876548	385.5	0.524513619
	322	25	1	6	0	7.18805248	390.8	0.48234391
	323	26	1	6	0	6.923931281	384.7	0.54068105
	324	27	1	6	0	7.728922192	385.8	0.491705547
	325	28	1	6	0	7.339752667	385.2	0.511163032
	326	29	1	6	0	7.540521494	387	0.528682171
	327	30	1	6	0	7.259528131	385.7	0.502463054
	328	31	1	6	0	7.250274809	388.7	0.581939799
	329	32	1	6	0	6.171555371	393.3	0.470633105
	330	33	1	6	0	6.651884701	389.5	0.549935815
	331	34	1	6	0	6.667750854	391.3	0.508816765
	332	35	1	6	0	6.511521266	396.5	0.543001261
	333	36	1	6	0	6.637064735	389	0.49151671
	334	37	1	6	0	7.053691587	391.8	0.444614599
	335	38	1	6	0	6.742617996	391	0.527365729
	336	39	1	6	0	7.140895358	397.2	0.452165156
	337	40	1	6	0	7.142023573	389.5	0.451861361
	338	41	1	6	0	6.976798633	388.3	0.535153232
	339	42	1	6	0	6.970154029	397.8	0.466314731
	340	43	1	6	0	6.987613928	389	0.487403599
	341	44	1	6	0	6.931964056	389.5	0.45237484
	342	45	1	6	0	7.09948205	407.2	0.508349705
	343	46	1	6	0	6.962351728	387.8	0.572202166
	344	47	1	6	0	7.053291536	406	0.529064039
	345	48	1	6	0	6.849787381	395.5	0.55676359
	346	49	1	6	0	7.119116062	404.8	0.488142292
	347	50	1	6	0	7.087434858	392.5	0.553121019
	348	51	1	6	0	7.078701232	391.7	0.505233597
	349	52	1	6	0	7.12373414	390.5	0.453008963
	350	53	1	6	0	7.105434758	404.3	0.434825625
	351	54	1	6	0	7.106826589	405.5	0.713440197
	352	55	1	6	0	7.170886667	389.2	0.558838643
	353	56	1	6	0	7.348411511	413.2	0.440222652
	354	57	1	6	0	7.098074339	406	0.485960591
	355	58	1	6	0	7.156177156	390	0.463846154
	356	59	1	6	0	6.279075097	396.7	0.528611041
	357	60	1	6	0	5.683273938	390.3	0.47937484
	358	61	1	6	0	7.240135025	390.5	0.575672215
	359	62	1	6	0	8.676840048	390.8	0.398413511
	360	63	1	6	0	7.511605664	389.7	0.638696433
	361	64	1	6	0	6.699544059	390.8	0.510747185
	362	65	1	6	0	6.476865011	390.2	0.480779088
	363	66	1	6	0	6.687565308	391.5	0.528735632
	364	67	1	6	0	6.779739993	390.2	0.473859559
	365	68	1	6	0	6.725357868	389.3	0.482918058
	366	69	1	6	0	6.264013129	393.3	0.527587084
	367	70	1	6	0	6.981148696	412.8	0.452277132
	368	71	1	6	0	6.321879301	389.7	0.442904799
	369	72	1	6	0	6.309885487	389	0.557326478
	370	73	1	6	0	6.207858638	391	0.50741688
	371	74	1	6	0	6.837606838	409.5	0.402686203
	372	75	1	6	0	6.289749345	388.8	0.52031893
	373	76	1	6	0	6.26479187	391.8	0.531138336
	374	77	1	6	0	7.11751663	410	0.544634146
	375	78	1	6	0	6.321879301	389.7	0.585065435
	376	79	2	7	0	6.76240937	391.2	0.562883436
	377	80	1	6	0	7.564698076	411	0.588077859
	378	81	2	7	0	7.03937313	422.3	0.416765333
	379	82	1	6	0	6.740011581	392.5	0.604076433
	380	83	2	7	0	6.370611486	391	0.484143223
	381	84	2	7	0	7.233674307	409.7	0.40322187
	382	85	1	6	0	6.331746545	393.4	0.543467209
	383	86	1	6	0	6.32350196	389.6	0.483316222
	384	87	1	6	0	6.060606061	390	0.538205128
	385	88	1	6	0	6.393861893	391	0.497442455
	386	89	2	7	0	6.235893618	390.7	0.57921679
	387	90	1	6	0	6.313778482	390.2	0.506150692
	388	91	1	6	0	6.81603165	422.8	0.51986755
	389	92	1	6	0	6.407376758	384.5	0.602080624
	390	93	1	6	0	6.665432327	392.8	0.563645621
	391	94	1	6	0	6.285647771	390.5	0.565685019
	392	95	1	6	0	6.604407573	392.3	0.57252103
	393	96	1	6	0	6.698564593	389.5	0.546341463
	394	97	1	6	0	6.698564593	389.5	0.533504493
	395	98	2	7	0	6.909697403	419.7	0.494639028
	396	99	1	6	0	6.550643174	420.5	0.518192628
	397	100	1	6	0	6.666666667	390	0.540512821
	398	101	1	6	0	6.820517612	389.2	0.602774923
	399	102	1	6	0	6.792593282	390.8	0.552712385
	400	103	1	6	0	6.541216574	394.7	0.515328097
	401	104	1	6	0	6.737448598	391.3	0.593151035
	402	105	1	6	0	6.687565308	391.5	0.510344828
	403	106	1	6	0	6.649616368	391	0.5657289
	404	107	1	6	0	6.531831012	389.7	0.622016936
	405	108	1	6	0	6.293352933	395.8	0.481051036
	406	109	1	6	0	6.091606603	391	0.517647059
	407	110	1	6	0	6.721987854	392.2	0.605303417
	408	111	1	6	0	6.196764685	391.7	0.508041869
	409	112	1	6	0	6.550732834	385.8	0.628564023
	410	113	1	6	0	6.203647558	389.8	0.503591585
	411	114	1	6	0	6.321260506	388.3	0.499613701
	412	115	1	6	0	6.192527063	390.5	0.525736236
	413	116	1	6	0	6.207858638	391	0.568542199
	414	117	1	6	0	6.134969325	391.2	0.592535787
	415	118	1	6	0	6.263592866	418	0.461244019
	416	119	1	6	0	6.275223365	389.7	0.616628176
	417	120	1	6	0	6.042635398	404.7	0.495675809
	418	121	1	6	0	6.213211249	389.2	0.627697842
	419	122	1	6	0	6.259927123	389.2	0.566289825
	420	123	1	6	0	6.293706294	390	0.485897436
	421	124	1	6	0	6.258319128	389.3	0.582584125
	422	125	1	6	0	6.175826708	394.5	0.503168568
	423	126	1	6	0	6.273613508	389.8	0.573884043
	424	127	1	6	0	6.266391255	391.7	0.620628032

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m ³)	a/c
	425	128	1	6	0	6.266367377	388.8	0.477623457
	426	129	1	6	0	6.270396227	390	0.741794872
	427	130	1	6	0	6.311197735	391.8	0.614088821
	428	131	1	6	0	6.348465399	389.5	0.660333761
	429	132	1	6	0	6.26497187	391.8	0.686830015
	430	133	1	6	0	6.332338598	374.7	0.638110488
	431	134	1	6	0	6.373871778	390.8	0.667349028
	432	135	1	6	0	6.339105725	374.3	0.488111141
	433	136	1	6	0	6.383672709	390.2	0.495130702
	434	137	1	6	0	6.424242424	375	0.5608
	435	138	1	6	0	6.324110672	391	0.610997442
	436	139	1	6	0	6.337076557	390.2	0.474628396
	437	140	1	6	0	6.282430137	390.7	0.553109803
	438	141	1	6	0	6.327347167	390.8	0.589048106
	439	142	1	6	0	6.275181772	392.6	0.597300051
	440	143	1	6	0	6.262367594	390.5	0.552112676
	441	144	1	6	0	6.376716808	389.2	0.526978417
	442	145	1	6	0	6.057535067	394.7	0.480618191
	443	146	1	6	0	5.594405594	390	0.493589744
	444	147	1	6	0	6.330586976	390.6	0.612135177
	445	148	1	6	0	6.187773332	390.8	0.570368475
	446	149	1	6	0	6.259161877	390.7	0.490657794
	447	150	1	6	5.212716223	0	372	0.789247312
	448	151	1	6	5.146886016	0	370	0.784324324
	449	152	1	6	5.198487713	0	368	0.752445652
	450	153	1	6	5.362318841	0	360	0.705555556
	451	154	1	6	5.236608215	0	362	0.619337017
	452	155	1	6	5.284650492	0	362	0.651933702
	453	156	1	6	5.212587077	0	362	0.779834254
	454	157	1	6	6.127017792	0	369	0.761788618
	455	158	1	6	5.640423032	0	370	0.736756757
	456	159	1	6	5.212652529	0	367	0.654768392
	457	160	1	6	5.203136137	0	366	0.660382514
	458	161	1	6	5.152115631	0	373	0.673726542
	459	162	1	6	5.160834217	0	369	0.639837398
	460	163	1	6	5.214494363	0	360.2	0.824264298
	461	164	1	6	5.327804631	0	360.7	0.902689215
	462	165	1	6	5.203136137	0	366	0.922404372
	463	166	1	6	5.287571803	0	361.8	0.603095633
	464	167	1	6	5.169999641	0	363.3	0.603358106
	465	168	1	6	5.267905466	0	361.5	0.614661134
	466	169	1	6	5.29696563	0	362.8	0.714994487
	467	170	1	6	5.287571803	0	361.8	0.657822001
	468	171	1	6	5.327804631	0	360.7	0.711948988
	469	172	1	6	4.340686799	0	304.5	0.748111658
	470	173	1	6	4.28779693	0	304.2	0.743589744
	471	174	1	6	5.135781624	0	370.8	0.675296656
	472	175	1	6	5.406986951	0	371.5	0.753701211
	473	176	1	6	5.402485143	0	370.2	0.759589411
	474	177	1	6	4.351452297	0	359.7	0.757019739
	475	178	1	6	4.293853073	0	362.5	0.721931034
	476	179	1	6	4.321270792	0	360.2	0.76568573
	477	180	1	6	5.193889542	0	370	0.7
	478	181	1	6	4.244641433	0	370.8	0.6596548
	479	182	1	6	5.210877707	0	373.8	0.673354735
	480	183	1	6	5.380495102	0	360.4	0.583518313
	481	184	1	6	5.315073741	0	363.2	0.571585903
	482	185	1	6	5.306307814	0	363.8	0.579439252
	483	186	1	6	5.34823198	0	364.2	0.491762768
	484	187	1	6	5.356713908	0	362	0.529005525
	485	188	1	6	5.093788475	0	360.2	0.80094392
	486	189	1	6	4.317674727	0	360.5	0.816920943
	487	190	1	6	4.368115146	0	364.3	0.827340104
	488	191	1	6	4.393694324	0	360.2	0.695724597
	489	192	1	6	5.170781443	0	358.2	0.7319933
	490	193	1	6	4.392724096	0	358.3	0.768071449
	491	194	1	6	4.249843582	0	368.3	0.816453978
	492	195	1	6	4.46895838	0	369.7	0.526102245
	493	196	1	6	4.494436032	0	361.8	0.514925373
	494	197	1	6	4.357455824	0	361.2	0.82585825
	495	198	1	6	5.299887287	0	362.6	0.84666299
	496	199	1	6	5.155161145	0	472.3	0.663561296
	497	200	1	6	5.458584576	0	479.5	0.685088634
	498	201	1	6	4.335715151	0	359	0.721727019
	499	202	1	6	4.353873133	0	359.5	0.742141864
	500	203	1	6	5.377255662	0	359	0.692200557
	501	204	1	6	5.44537083	0	359.3	0.65683273
	502	205	1	6	5.351912344	0	360.7	0.772941503
	503	206	1	6	4.338238819	0	362.8	0.845093716
	504	207	1	6	4.363583472	0	358.7	0.750209088
	505	208	1	6	4.269243851	0	370.7	0.69382498
	506	209	1	6	4.2855891	0	369.2	0.693391116
	507	210	1	6	4.450252534	0	369.3	0.673436231
	508	211	1	6	4.471377302	0	369.5	0.686062246
	509	212	1	6	4.412368714	0	370.5	0.554385965
	510	213	1	6	4.388898668	0	370.5	0.786234818
	511	214	1	6	4.33604336	0	369	0.672899729
	512	215	1	6	4.306642349	0	369.5	0.818673884
	513	216	1	6	4.836134848	0	370.4	0.817224622
	514	217	1	6	4.314816561	0	368.8	0.851681128
	515	218	1	6	4.215506036	0	371.3	0.823862106
	516	219	1	6	4.312668464	0	371	0.696765499
	517	220	1	6	4.326663061	0	369.8	0.734451055
	518	221	1	6	4.377243043	0	369.5	0.793504736
	519	222	1	6	4.312477907	0	369	0.810840108
	520	223	1	6	4.351354212	0	369.7	0.944820124
	521	224	1	6	4.289544236	0	373	0.727077748
	522	225	1	6	4.290991759	0	306	0.913071895
	523	226	1	6	4.144842368	0	306.3	0.918054195
	524	227	1	6	4.037164822	0	303.7	0.988146197
	525	228	1	6	4.394829612	0	370	0.727027027
	526	229	1	6	4.441833137	0	370	0.737297297
	527	230	1	6	4.441833137	0	370	0.68
	528	231	1	6	4.4653349	0	370	0.565135135
	529	232	1	6	4.418331375	0	370	0.639459459
	530	233	1	6	4.539995196	0	362	0.810497238

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superolastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
	531	234	1	6	4.512338425	0	370	0.705675676
	532	235	1	6	4.441833137	0	370	0.729459459
	533	236	1	6	4.112808461	0	370	0.719189189
	534	237	1	6	4.042303173	0	370	0.724324324
	535	238	1	6	4.453298957	0	371	0.757951482
	536	239	1	6	4.491264373	0	369.8	0.700378583
	537	240	1	6	4.488836663	0	370	0.794594595
	538	241	1	6	5.213164414	0	370.3	0.616257089
	539	242	1	6	5.156451424	0	371	0.747439353
	540	243	1	6	5.217391304	0	370	0.682432432
	541	244	1	6	4.928236929	0	372.3	0.71796938
	542	245	1	6	5.16988426	0	373.4	0.817354044
	543	246	1	6	4.38952659	0	396.2	0.597425543
	544	247	1	6	5.242059821	0	394.8	0.735309017
	545	248	1	6	5.314009662	0	396	0.723737374
	546	249	1	6	4.391743522	0	396	0.615151515
	547	250	1	6	4.393730736	0	397.8	0.606837607
	548	251	1	6	4.336106879	0	371	0.79703504
	549	252	1	6	4.357247162	0	369.2	0.78900325
	550	253	1	6	4.377084674	0	371.5	1.006191117
	551	254	1	6	4.258422737	0	369.6	0.775162338
	552	255	1	6	4.187312443	0	373.8	0.811128946
	553	256	1	6	4.301075269	0	372	0.85
	554	257	1	6	4.278074866	0	374	0.810962567
	555	258	1	6	4.107463413	0	285.8	0.927571228
	556	259	1	6	4.26752323	0	379	0.93298153
	557	260	1	6	3.947413197	0	383.3	0.84816071
	558	261	1	6	4.273160646	0	378.5	0.727873184
	559	262	1	6	4.441833137	0	370	0.62972973
	560	263	1	6	4.513232514	0	368	0.675815217
	561	264	1	6	4.456902922	0	370.7	0.631238198
	562	265	1	6	4.447305284	0	371.5	0.573889637
	563	266	1	6	4.488836663	0	370	0.612972973
	564	267	1	6	4.43536621	0	372.5	0.629261745
	565	268	1	6	4.451457911	0	369.2	0.635698808
	566	269	1	6	4.481079233	0	368.7	0.662055872
	567	270	1	6	4.184240104	0	390.7	0.730483747
	568	271	1	6	3.818361435	0	391.7	0.729895328
	569	272	1	6	4.473798844	0	369.3	0.646628757
	570	273	1	6	4.455122224	0	372.8	0.699302575
	571	274	1	6	4.488836663	0	370	0.725135135
	572	275	2	7	4.482778853	0	370.5	0.820782726
	573	276	1	6	4.356022904	0	371.3	0.718825747
	574	277	1	6	5.701374665	0	411.8	0.647887324
	575	278	1	6	5.766010218	0	410.2	0.659678206
	576	279	1	6	5.682057326	0	413.2	0.708857696
	577	280	1	6	4.429860541	0	371	0.803504043
	578	281	1	6	3.756372417	0	372.7	0.890260263
	579	282	1	6	4.462304044	0	372.2	0.694787749
	580	283	1	6	5.54040323	0	406.5	0.571217712
	581	284	1	6	5.839571057	0	409.5	0.694993895
	582	285	1	6	5.417654809	0	412.5	0.626909091
	583	286	1	6	5.404552863	0	413.5	0.608706167
	584	287	1	6	5.471187851	0	418	0.577033493
	585	288	1	6	5.726662793	0	411.5	0.677035237
	586	289	1	6	5.719430175	0	410.5	0.73593179
	587	290	1	6	5.775788576	0	408	0.721568627
	588	291	1	6	4.708712837	0	506	0.508498024
	589	292	1	6	6.52173913	0	412	0.567961165
	590	293	1	6	5.697519338	0	407.5	0.712147239
	591	294	1	6	4.367404105	0	288.7	1.016279875
	592	295	1	6	3.999345136	0	371.8	0.8154922
	593	296	1	6	4.439433444	0	370.2	0.761480281
	594	297	1	6	5.217863509	0	368.3	0.684496335
	595	298	1	6	5.174583387	0	369.7	0.641060319
	596	299	1	6	3.993974004	0	372.3	0.733279613
	597	300	1	6	4.456902922	0	370.7	0.770434313
	598	301	1	6	4.426706224	0	369.3	0.786081776
	599	302	1	6	4.459308807	0	370.5	0.78974359
	600	303	1	6	4.451457911	0	369.2	0.765980498
	601	304	1	6	7.843229344	0	370.3	0.69700243
	602	305	1	6	4.116145876	0	369.7	0.685691101
	603	306	1	6	3.948296122	0	370	0.778378378
	604	307	1	6	4.480360305	0	370.7	0.764769355
	605	308	1	6	4.361821235	0	372.8	0.7347103
	606	309	1	6	5.191434134	0	368.5	0.718046133
	607	310	1	6	5.200917809	0	369.5	0.680920162
	608	311	1	6	5.713085486	0	310.5	0.6
	609	312	1	6	5.191434134	0	402	0.599253731
	610	313	1	6	5.121365698	0	407.5	0.554110429
	611	314	1	6	6.451695819	0	338.3	0.816730712
	612	315	2	7	3.433113081	0	369.8	0.822606814
	613	316	2	7	6.679916736	0	369.7	0.768460914
	614	317	2	7	6.660100371	0	370.8	0.709816613
	615	318	2	7	6.418382613	0	380.7	0.776989756
	616	319	1	6	6.349858955	0	380.7	0.676385605
	617	320	1	6	4.589045126	0	369.5	0.925845737
	618	321	2	7	5.50014525	0	449	0.590868597
	619	322	2	7	5.833156278	0	450.2	0.539093736
	620	323	1	6	5.142953815	0	385.5	0.725551232
	621	324	2	7	4.404047976	0	371.2	0.650592672
	622	325	2	7	5.202722835	0	379.4	0.663679494
	623	326	2	7	5.18087413	0	381	0.69028871
	624	327	1	6	5.60178132	0	371	0.692183288
	625	328	1	6	6.52173913	0	372	0.543817204
	626	329	1	6	5.25038042	0	374.3	0.564253273
	627	330	2	7	4.103935087	0	370.8	0.704153182
	628	331	2	7	4.391269124	0	370.3	0.691601404
	629	332	2	7	4.224608344	0	345.8	0.641989589
	630	333	2	7	5.140096618	0	450	0.468888889
	631	334	1	6	5.339229222	0	369.7	0.451717609
	632	335	1	6	4.029692471	0	410	0.706585366
	633	336	2	7	2.812234613	0	312.3	0.741914825
	634	337	2	7	0	0	371.3	0.70751414
	635	338	1	6	4.971813833	0	346.3	0.621137742
	636	339	1	6	5.674086034	0	377	0.544562334

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
11.00	637	340	1	6	5.66446252	0	371.5	0.622880215
	638	341	1	6	5.844041542	0	370.5	0.645614035
	639	342	1	6	5.770623554	0	372.2	0.643739925
	640	343	2	7	4.37132785	0	370	0.715135135
	641	344	1	6	5.186880244	0	370.5	0.588394062
	642	345	1	6	5.061821559	0	374.5	0.562883845
	643	346	1	6	5.101449275	0	375	0.575466667
	644	347	1	6	5.166198969	0	370.3	0.5773697
	645	348	1	6	5.778233747	0	368.7	0.629237863
	646	349	1	6	4.882017901	0	368.7	0.711418497
	647	350	2	7	5.642579628	0	457.7	0.627485252
	648	351	1	6	2.702702703	0	370	0.63027027
	649	352	1	6	2.66982049	0	371.3	0.650417452
	650	353	1	6	4.430305173	0	369	0.601626016
	651	354	2	7	4.426706224	0	369.3	0.766314649
	652	355	1	6	4.063185798	0	400.2	0.746376812
	653	356	1	6	3.832965576	0	419.7	0.733857517
	654	357	2	7	4.273855511	0	370.3	0.75884418
	655	358	2	7	4.380798849	0	369.2	0.747833153
	656	359	1	6	4.339571467	0	368.7	0.672904801
	657	360	1	6	4.351354212	0	369.7	0.668650257
	658	361	1	6	4.353709478	0	369.5	0.706901218
	659	362	1	6	4.341958575	0	370.5	0.675303644
	660	363	2	7	5.270092227	0	448.8	0.429590018
	661	364	2	7	4.245537236	0	395.3	0.522135087
	662	365	2	7	4.23532526	0	394.2	0.742516489
	663	366	1	6	3.946933377	0	420.8	0.75831749
	664	367	1	6	3.90096905	0	421.3	0.743413245
	665	368	1	6	5.374745557	0	380.2	0.57864282
	666	369	1	6	5.263157895	0	380	0.543157895
	667	370	1	6	5.203303757	0	382.7	0.510844003
	668	371	1	6	5.210963684	0	378.8	0.538542767
	669	372	1	6	4.304552805	0	381.8	0.569669984
	670	373	2	7	4.353524417	0	381.5	0.517169069
	671	374	1	6	4.496959963	0	379	0.513456464
	672	375	1	6	4.933703361	0	380.7	0.527712109
	673	376	1	6	4.916027393	0	380.3	0.541151722
	674	377	2	7	4.53587099	0	381.5	0.626998689
	675	378	1	6	4.568243853	0	380.7	0.6107171
	676	379	1	6	4.598224448	0	382	0.537434555
	677	380	2	7	4.586314438	0	379.2	0.53771097
	678	381	2	7	4.54644608	0	378.7	0.527066279
	679	382	2	7	4.527563534	0	382.2	0.513867085
	680	383	2	7	4.462242563	0	380	0.628421053
	681	384	2	7	4.381882166	0	383	0.60078329
	682	385	1	6	5.270092227	0	382.8	0.565569488
	683	386	1	6	4.812351703	0	390.3	0.547527543
	684	387	1	6	0	0	420.7	0.562396007
	685	388	1	6	5.367397164	0	371	0.452021563
	686	389	1	6	5.270092227	0	346.5	0.587301587
	687	390	1	6	5.130317115	0	369.5	0.588903924
	688	391	1	6	7.735728448	0	401.3	0.520059806
	689	392	1	6	5.395704278	0	375.5	0.503328895
	690	393	1	6	5.310144928	0	375	0.435466667
	691	394	1	6	5.291800021	0	376.3	0.476215785
	692	395	2	7	4.356022904	0	371.3	0.511984918
	693	396	1	6	4.425507874	0	369.4	0.588792637
	694	397	2	7	4.253819036	0	370	0.626216216
	695	398	1	6	3.905793203	0	371.8	0.674556213
	696	399	1	6	3.790740859	0	339.5	0.795581738
	697	400	1	6	5.402485143	0	370.2	0.541058887
	698	401	1	6	5.226766671	0	371	0.555795148
	699	402	1	6	6.899244988	0	400.8	0.412924152
	700	403	1	6	6.059317529	0	409	0.443031785
	701	404	1	6	6.214262596	0	403	0.449875931
	702	405	2	7	5.342237062	0	299.5	0.503505843
	703	406	2	7	4.251520917	0	370.2	0.566450567
	704	407	2	7	6.355340848	0	405	0.465432099
	705	408	1	6	6.205045625	0	405	0.481481481
	706	409	1	6	7.927097058	0	396	0.521464646
	707	410	1	6	6.824705007	0	409	0.438875306
	708	411	1	6	6.227996019	0	406.3	0.538272213
	709	412	2	7	6.003001501	0	399.8	0.502501251
	710	413	1	6	6.006722325	0	401	0.462593516
	711	414	1	6	5.95950149	0	399.8	0.46098049
	712	415	1	6	6.018729766	0	400.2	0.455272364
	713	416	2	7	5.043172614	0	398.3	0.626914386
	714	417	2	7	4.289230048	0	371	0.651212938
	715	418	2	7	4.34313081	0	370.4	0.592062635
	716	419	2	7	4.207573633	0	372	0.622311828
	717	420	1	6	4.153714588	0	320.3	0.559475492
	718	421	1	6	4.129220306	0	322.2	0.693047796
	719	422	1	6	4.203662036	0	322.7	0.694762938
	720	423	2	7	4.487487694	0	379.8	0.495260664
	721	424	2	7	4.616351483	0	380.5	0.523521682
	722	425	2	7	4.739336493	0	379.8	0.408899421
	723	426	1	6	4.92639056	0	379.5	0.540711462
	724	427	1	6	4.830917874	0	378	0.539153439
	725	428	2	7	5.194154298	0	381.7	0.557767881
	726	429	2	7	4.276550249	0	378.2	0.584611317
	727	430	1	6	4.491793838	0	377.5	0.55205298
	728	431	2	7	4.385756958	0	366.8	0.631952017
	729	432	2	7	4.367894793	0	368.3	0.54900896
	730	433	1	6	4.805662889	0	401.7	0.531491163
	731	434	1	6	4.712036226	0	402.3	0.526969923
	732	435	1	6	4.962472588	0	422.3	0.490172863
	733	436	1	6	5.226065272	0	401	0.596259352
	734	437	1	6	5.195996027	0	398.3	0.550841075
	735	438	1	6	5.12658984	0	400.3	0.572820385
	736	439	1	6	5.116359397	0	402.8	0.593098312
	737	440	1	6	5.127870847	0	400.2	0.475512244
	738	441	1	6	3.714351133	0	341.8	0.519894675
	739	442	1	6	6.011219496	0	400.7	0.586224108
	740	443	2	7	7.033721117	0	405.5	0.49025894
	741	444	2	7	6.030150754	0	398	0.46758794
	742	445	1	6	6.432687271	0	415	0.461204819

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m ³)	a/c
	743	446	1	6	5.953013713	0	409	0.418337408
	744	447	2	7	6.035105614	0	409.2	0.445014663
	745	448	2	7	4.838022165	0	408	0.464705882
	746	449	1	6	4.548132438	0	369	0.637940379
	747	450	1	6	4.561807793	0	369.8	0.534342888
	748	451	1	6	4.388678144	0	372.5	0.654496644
	749	452	1	6	6.336736798	0	400.7	0.400798602
	750	453	1	6	4.509029741	0	372.2	0.549167114
	751	454	1	6	4.567984083	0	369.3	0.512862172
	752	455	1	6	4.456317588	0	372.7	0.503622216
	753	456	1	6	4.46292251	0	370.2	0.509184225
	754	457	1	6	4.414751846	0	370.3	0.576559546
	755	458	1	6	4.406107938	0	373	0.563806971
	756	459	1	6	4.468306605	0	371.7	0.60425074
	757	460	1	6	4.507108725	0	368.5	0.610312076
	758	461	1	6	7.401475967	0	401.8	0.597312096
	759	462	1	6	7.385348422	0	401.5	0.434620174
	760	463	1	6	6.276084315	0	411.5	0.422600243
	761	464	1	6	6.998939555	0	410	0.442926829
	762	465	1	6	7.342528977	0	414.5	0.440289505
	763	466	1	6	7.471661966	0	408.5	0.464626683
	764	467	1	6	7.591272181	0	405.5	0.509494451
	765	468	1	6	4.284074971	0	341	0.621407625
	766	469	1	6	4.398976982	0	340	0.594411765
	767	470	1	6	4.351643318	0	341.7	0.603453322
	768	471	1	6	4.309575418	0	341	0.618475073
	769	472	1	6	4.338945205	0	342.7	0.552378173
	770	473	2	7	4.391212316	0	330.7	0.614454188
	771	474	1	6	4.351758399	0	331.7	0.596924932
	772	475	1	6	6.860911616	0	392.9	0.565283787
	773	476	1	6	7.049933356	0	394.7	0.565999493
	774	477	1	6	7.035175879	0	398	0.555527638
	775	478	1	6	4.667986412	0	355.8	0.548903879
	776	479	1	6	7.035031812	0	394.3	0.509764139
	777	480	1	6	6.934782609	0	400	0.35475
	778	481	2	7	6.575816569	0	402	0.524875622
	779	482	1	6	6.648321409	0	395	0.492911392
	780	483	1	6	6.670335718	0	395	0.551898734
	781	484	1	6	4.351513811	0	353.7	0.566016398
	782	485	1	6	6.50083612	0	416	0.463942308
	783	486	1	6	6.234536279	0	398.9	0.564051141
	784	487	1	6	4.462335761	0	368.3	0.644854738
	785	488	1	6	4.336106879	0	371	0.549595687
	786	489	1	6	4.350152372	0	373.8	0.531567683
	787	490	1	6	4.328152666	0	375.7	0.555230237
	788	491	1	6	4.278928092	0	359.7	0.569919377
	789	492	1	6	4.611516527	0	354.5	0.462341326
	790	493	1	6	4.439295079	0	356.5	0.558204769
	791	494	1	6	6.925145675	0	388	0.417525773
	792	495	1	6	6.801068739	0	393.8	0.408836973
	793	496	1	6	4.932293878	0	481.3	0.407022647
	794	497	1	6	5.612087573	0	423	0.493617021
	795	498	2	7	6.655156176	0	415.5	0.51022864
	796	499	2	7	6.637422921	0	415.3	0.481579581
	797	500	1	6	4.960676306	0	420.7	0.47183266
	798	501	1	6	4.404352537	0	369.2	0.638136511
	799	502	1	6	4.308974676	0	369.3	0.424587057
	800	503	1	6	5.196974618	0	374.8	0.499466382
	801	504	1	6	4.83382818	0	340.7	0.657469915
	802	505	1	6	4.50466386	0	368.7	0.614863032
	803	506	1	6	5.909666526	0	422.3	0.475491357
	804	507	1	6	4.320820956	0	370.3	0.530650824
	805	508	1	6	4.469617245	0	367.7	0.58770737
	806	509	1	6	4.344341321	0	374.3	0.592839968
	807	510	1	6	4.225160147	0	382.8	0.610240334
	808	511	1	6	3.307341332	0	360.2	0.563575791
	809	512	1	6	3.502248876	0	362.5	0.544
	810	513	1	6	3.537538542	0	363.8	0.593183068
	811	514	1	6	4.401948403	0	361.5	0.59197787
	812	515	1	6	4.302059497	0	380	0.548157895
	813	516	1	6	4.286267983	0	381.4	0.568956476
	814	517	1	6	4.392215499	0	372.2	0.59940892
	815	518	1	6	4.146396052	0	369.1	0.487401788
	816	519	1	6	4.205312712	0	372.2	0.627619559
	817	520	1	6	4.80865558	0	390.6	0.641321045
	818	521	1	6	5.976162498	0	388.5	0.652252252
	819	522	1	6	6.495547407	0	415	0.522891566
	820	523	1	6	5.692081495	0	414	0.477536232
	821	524	1	6	5.629069523	0	414	0.479951691
	822	525	1	6	5.942028986	0	420	0.577142857
	823	526	1	6	5.885347724	0	427	0.445901639
	824	527	1	6	5.920444033	0	423	0.4643026
	825	528	1	6	6.040093726	0	417.5	0.420598802
	826	529	1	6	5.972687398	0	419.3	0.550679704
	827	530	1	6	4.239290047	0	340.5	0.520117474
	828	531	1	6	4.305787335	0	341.3	0.742162321
	829	532	1	6	6.00902379	0	424	0.441273585
	830	533	1	6	3.853964737	0	376.8	0.531050955
	831	534	1	6	0	0	200.8	1.214641434
	832	535	1	6	4.379613605	0	369.3	0.645545627
	833	536	1	6	4.196842132	0	339.8	0.591524426
	834	537	1	6	4.342581423	0	414.5	0.480337756
	835	538	1	6	6.271198598	0	424.3	0.491397596
	836	539	1	6	6.306241746	0	424.7	0.490934777
	837	540	1	6	4.316827591	0	378.7	0.525481912
	838	541	1	6	4.305539538	0	339.3	0.603300914
	839	542	1	6	6.179425625	0	391.2	0.467280164
	840	543	1	6	6.164911379	0	389.3	0.59722579
	841	544	1	6	6.07343537	0	392.3	0.575070099
	842	545	1	6	5.904042598	0	390.3	0.563668973
	843	546	1	6	5.963881661	0	389.3	0.477266889
	844	547	1	6	4.554303581	0	368.5	0.587516961
	845	548	1	6	4.329004329	0	369.6	0.516504329
	846	549	1	6	4.39911106	0	381.5	0.472608126
	847	550	1	6	4.432807368	0	378.6	0.576597993
	848	551	1	6	0	0	201	1.106467662

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
	849	552	1	6	0	0	199.7	0.969954932
	850	553	1	6	4.443033957	0	328.8	0.743309002
	851	554	1	6	5.195613285	0	279.5	0.880500894
	852	555	1	6	4.306005173	0	280.7	0.914499466
	853	556	1	6	4.45274714	0	339.8	0.688640377
	854	557	1	6	4.37295803	0	346	0.659248555
	855	558	1	6	4.355850021	0	379.3	0.530714474
	856	559	1	6	4.134331899	0	384.9	0.571057418
	857	560	1	6	6.044511606	0	391.3	0.601584462
	858	561	1	6	4.232582504	0	415	0.539759036
	859	562	1	6	4.887176665	0	395	0.624303797
	860	563	1	6	4.87483531	0	396	0.641666667
	861	564	1	6	4.87483531	0	396	0.622727273
	862	565	1	6	5.00112638	0	386	0.705958549
	863	566	1	6	4.013377926	0	390	0.586153846
	864	567	2	7	0	5.450132392	412	0.676941748
	865	568	2	7	5.208989708	0	414	0.603864734
	866	569	2	7	5.221602274	0	413	0.673607748
	867	570	2	7	5.205143907	0	426	0.663615023
	868	571	1	6	4.26851251	0	301.5	0.860696517
	869	572	1	6	5.131860299	0	305	0.960983607
	870	573	1	6	0	0	381	0.612073491
	871	574	1	6	4.336874384	0	397	0.645088161
	872	575	1	6	4.335782247	0	361	0.608033241
	873	576	1	6	4.323804948	0	362	0.606353591
	874	577	1	6	4.347826087	0	360	0.609722222
	875	578	1	6	5.203328255	0	371	0.730188679
	876	579	1	6	5.217391304	0	370	0.732162162
	877	580	1	6	5.203328255	0	371	0.730188679
	878	581	1	6	5.217391304	0	370	0.662432432
	879	582	1	6	5.217391304	0	370	0.662432432
	880	583	1	6	5.203328255	0	371	0.655256065
	881	584	1	6	5.217391304	0	370	0.657027027
	882	585	1	6	5.203328255	0	371	0.691105121
	883	586	1	6	4.218914801	0	371	0.632345013
	884	587	1	6	4.26011778	0	347	0.772910663
	885	588	1	6	4.335782247	0	361	0.665373961
	886	589	1	6	4.335782247	0	361	0.691689751
	887	590	1	6	4.272430259	0	346	0.665317919
	888	591	1	6	4.218914801	0	371	0.70296496
	889	592	1	6	5.217391304	0	370	0.582702703
	890	593	1	6	4.253308129	0	368	0.661956522
	891	594	1	6	4.276550249	0	366	0.66557377
	892	595	1	6	4.347826087	0	360	0.703333333
	893	596	1	6	4.335782247	0	361	0.67534626
	894	597	1	6	4.335782247	0	361	0.64099723
	895	598	1	6	4.335782247	0	361	0.665373961
	896	599	1	6	5.217391304	0	370	0.686216216
	897	600	1	6	5.217391304	0	370	0.582702703
	898	601	1	6	5.203328255	0	371	0.581132075
	899	602	1	6	5.217391304	0	370	0.586756757
	900	603	1	6	5.422569614	0	356	0.609831461
	901	604	1	6	4.230317274	0	370	0.597297297
	902	605	1	6	4.324450678	0	372	0.755107527
	903	606	1	6	4.336106879	0	371	0.913207547
	904	607	1	6	4.347826087	0	370	0.918378378
	905	608	1	6	4.347826087	0	370	0.858378378
	906	609	1	6	4.347826087	0	370	0.819459459
	907	610	1	6	4.347826087	0	370	0.852432432
	908	611	1	6	4.347826087	0	370	0.798648649
	909	612	1	6	4.347826087	0	370	0.798648649
	910	613	1	6	4.359608813	0	369	0.773712737
	911	614	1	6	4.336106879	0	371	0.769541779
	912	615	1	6	4.359608813	0	369	0.758807588
	913	616	1	6	4.347826087	0	370	0.830540541
	914	617	1	6	4.371455577	0	368	0.775815217
	915	618	1	6	4.336106879	0	371	0.774663073
	916	619	1	6	4.336106879	0	371	0.778706199
	917	620	1	6	4.359608813	0	369	0.744173442
	918	621	1	6	4.336106879	0	371	0.68490566
	919	622	1	6	4.347826087	0	370	0.686756757
	920	623	1	6	4.347826087	0	370	0.790810811
	921	624	1	6	4.336106879	0	371	0.72884097
	922	625	1	6	4.336106879	0	371	0.811051213
	923	626	1	6	5.231530576	0	369	0.591869919
	924	627	1	6	5.203328255	0	371	0.698113208
	925	628	1	6	5.217391304	0	370	0.727567568
	926	629	1	6	5.131860299	0	305	0.960655738
	927	630	1	6	5.274411974	0	305	1.007540984
	928	631	1	6	5.291762014	0	304	0.965789474
	929	632	1	6	6.308610401	0	306	0.904248366
	930	633	1	6	4.138068806	0	304.7	0.912701017
	931	634	1	6	4.230317274	0	370	0.709189189
	932	635	1	6	4.230317274	0	370	0.709189189
	933	636	1	6	5.217391304	0	370	0.73972973
	934	637	1	6	5.203328255	0	371	0.737735849
	935	638	1	6	5.203328255	0	371	0.693800539
	936	639	1	6	5.203328255	0	371	0.693800539
	937	640	1	6	5.217391304	0	370	0.779459459
	938	641	1	6	5.203328255	0	371	0.777358491
	939	642	1	6	5.203328255	0	371	0.790835558
	940	643	1	6	5.203328255	0	371	0.790835558
	941	644	1	6	4.230317274	0	370	0.696216216
	942	645	1	6	4.230317274	0	370	0.730810811
	943	646	1	6	5.217391304	0	370	0.771081081
	944	647	1	6	5.245746692	0	368	0.64076087
	945	648	1	6	5.217391304	0	370	0.637297297
	946	649	1	6	5.217391304	0	370	0.743513514
	947	650	1	6	5.217391304	0	370	0.836756757
	948	651	1	6	5.203328255	0	371	0.834501348
	949	652	1	6	5.217391304	0	370	0.718918919
	950	653	1	6	5.175428372	0	373	0.713136729
	951	654	1	6	5.189340813	0	372	0.794623656
	952	655	1	6	5.217391304	0	370	0.699189189
	953	656	1	6	5.203328255	0	371	0.718598383
	954	657	1	6	5.203328255	0	371	0.750134771

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Tipo de Mezcla	Mezcla	Tipo de Cemento	Tipo de Cemento (TipCem)	Cantidad de aditivo reductor de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de aditivo superplastificante de agua (mL/kg cemento)	Cantidad de cemento (kg/m3)	a/c
	955	658	1	6	4.336106879	0	371	0.856603774
	956	659	1	6	5.217391304	0	370	0.738108108
	957	660	1	6	5.217391304	0	370	0.717837838
	958	661	1	6	5.203328255	0	371	0.85606469
	959	662	1	6	5.217391304	0	370	0.858378378
	960	663	1	6	5.203328255	0	371	0.823180593
	961	664	1	6	5.203328255	0	371	0.817250674
	962	665	1	6	5.217391304	0	370	0.819459459
	963	666	1	6	5.217391304	0	370	0.805135135
	964	667	1	6	5.175428372	0	373	0.679892761
	965	668	1	6	5.217391304	0	370	0.685405405
	966	669	1	6	5.217391304	0	370	0.685405405
	967	670	1	6	4.230317274	0	370	0.726216216
	968	671	1	6	4.173913043	0	375	0.716533333
	969	672	1	6	5.189340813	0	372	0.823924731
	970	673	1	6	5.217391304	0	370	0.828378378
	971	674	1	6	5.203328255	0	371	0.780592992
	972	675	1	6	5.217391304	0	370	0.782702703
	973	676	1	6	5.217391304	0	370	0.808378378
	974	677	1	6	5.203328255	0	371	0.742587601
	975	678	1	6	5.203328255	0	371	0.742587601
	976	679	1	6	4.241781548	0	369	0.619512195
	977	680	1	6	4.218914801	0	371	0.616172507
	978	681	1	6	5.167958656	0	387	0.694315245
	979	682	1	6	4.347826087	0	370	0.762702703
	980	683	1	6	4.359608813	0	369	0.773441734
	981	684	1	6	4.336106879	0	371	0.814555256
	982	685	1	6	4.336706327	0	391	0.772890026
	983	686	1	6	3.642773208	0	370	0.844324324
	984	687	1	6	4.336106879	0	371	0.892991914
	985	688	1	6	4.359482457	0	373	0.719034853
	986	689	1	6	4.336106879	0	371	0.896226415
	987	690	1	6	5.203328255	0	371	0.683557951
	988	691	1	6	5.198741112	0	373	0.679892761
	989	692	1	6	4.359608813	0	369	0.755826558
	990	693	1	6	5.226766671	0	371	0.72722372
	991	694	1	6	5.226766671	0	371	0.711320755
	992	695	1	6	5.203328255	0	371	0.7393531
	993	696	1	6	5.189340813	0	372	0.737365591
	994	697	1	6	5.203328255	0	371	0.7393531
	995	698	1	6	5.217391304	0	370	0.713243243
	996	699	1	6	5.226766671	0	371	0.692722372
	997	700	1	6	5.217391304	0	370	0.816756757
	998	701	1	6	5.217391304	0	370	0.764054054
	999	702	1	6	4.347826087	0	370	0.812702703
	1000	703	2	7	4.301325273	0	374	0.713101604
	1001	704	2	7	4.359608813	0	369	0.608672087
	1002	705	1	6	4.301325273	0	374	0.713101604
	1003	706	1	6	4.272430259	0	346	0.645086705
	1004	707	1	6	5.167958656	0	387	0.635658915
	1005	708	1	6	0	0	269	0.913011152
	1006	709	1	6	6.400353123	0	394	0.587817259

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo inclusor de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
1.00	0	20	0	182	841	1145	1986
	0	20	0	173.5	801	1090	1891
	0	20	0	174	802	1091	1893
	0	20	0	174.5	805	1096	1901
	0	20	0	171.5	791	1077	1868
2.00	0	20	0	174.2	870	1110	1980
	0	20	0	150.45	810	1130	1940
	0	20	0	176.4	850	1100	1950
	0	20	0	170.5	830	1080	1910
	0	20	0	150	800	1120	1920
	0	20	0	153.3	730	1140	1870
	0	20	0	161.85	690	1150	1840
	0	20	0	169.2	620	1140	1760
	0	20	0	138	770	1120	1890
	0	20	0	144.3	740	1140	1880
	0	20	0	155.4	690	1150	1840
	0	20	0	158.4	640	1170	1810
	0	20	0	145.7	770	1150	1920
	0	20	0	158.4	720	1120	1840
	0	20	0	164	670	1110	1780
	0	20	0	170.2	610	1120	1730
	0	20	0	169	860	1100	1960
	0	20	0	159.3	890	1060	1950
	0	20	0	158.1	840	1110	1950
	0	20	0	170.2	770	1120	1890
0	20	0	163.2	840	1090	1930	
0	20	0	159	810	1080	1890	
0	20	0	164.25	760	1110	1870	
0	20	0	162.15	870	1080	1950	
3.00	0	20	1	249.6	898	769	1667
	0	20	1	243.6	898	769	1667
	0	20	1	243.6	898	769	1667
	0	20	0	215.2	896	896	1792
	0	20	0	211	896	896	1792
4.00	0	20	0	211	896	896	1792
	0	20	0	180	840	1101	1941
	0	20	0	180	840	1053	1893
	0	20	0	165	840	1053	1893
	0	20	0	165	845	1053	1898
5.00	0	20	0	165	845	1053	1898
	0	20	0	172.5	760	1110	1870
	0	20	0	180	900	1150	2050
	0	20	0	246	810	1050	1860
	0	20	0	259	810	1050	1860
6.00	0	20	0	261	810	1030	1840
	0	20	0	276	810	1050	1860
	0	15.5	0	174.41	828	1016	1844
	0	22	0	174.41	828	1016	1844
	0	32	0	174.41	828	1016	1844
7.00	0	32	0	174.41	828	1016	1844
	0	22	0	174.41	828	1016	1844
	0	23	0	174.41	828	1016	1844
	0	22	0	174.41	828	1016	1844
	0	22	0	174.41	828	1016	1844
	0	20	0	174.41	828	1016	1844
	0	20	0	174.41	828	1016	1844
	0	20	0	174.41	828	1016	1844
	0	20	0	174.41	828	1016	1844
	0	20	0	174.41	828	1016	1844
8.00	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	174	864	1028	1892
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	0	20	0	168	867	1031	1898
	9.00	0	20	0	174	864	1028
0		20	0	174	864	1028	1892
0		20	0	174	864	1028	1892
0		20	0	225	460	1185	1645
0		20	0	225	460	1185	1645
0		20	0	225	460	1185	1645
0		20	0	225	460	1185	1645
10.00	0	20	0	225	460	1185	1645
	0	20	0	225	460	1185	1645
	0	20	0	225	460	1185	1645
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
11.00	0	20	0	190	965	865	1830
	0	50	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	60	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	70	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	80	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
0	90	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042	

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo incluser de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
	0	50	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	60	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	70	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	80	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
	0	90	0	115.5	542.2535211	542.2535211	1084.507042
12.00	0	20	0	239.3	780	1050	1830
	0	20	0	239.3	780	1050	1830
	0	20	0	221.8	780	1050	1830
	0	20	0	221.8	780	1050	1830
	0	20	0	204.3	780	1050	1830
	0	20	0	204.3	780	1050	1830
	0	21	0	184.2	824	1040	1864
	0	21	0	181.13	824	1040	1864
	0	21	0	174.99	824	1040	1864
	0	21	0	168.85	824	1040	1864
	0	21	0	168.85	824	1040	1864
	0	21	0	181.13	824	1040	1864
	0	29	0	184.2	824	1040	1864
	0	29	0	168.85	824	1040	1864
	0	29	0	174.99	824	1040	1864
	0	29	0	181.13	824	1040	1864
	0	29	0	168.85	824	1040	1864
	0	29	0	168.85	824	1040	1864
14.00	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	225	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
	0	20	0	190	965	865	1830
15.00	0	20	0	138			2015
	0	20	0	138			2015
	0	20	0	194			1950
	0	20	0	138			2015
16.00	0	20	0	175	700	1120	1820
	0	20	0	175	700	1120	1820
	0	20	0	175	700	1120	1820
	0	20	0	175	700	1120	1820
17.00	0	20	1	182.4	1806	0	1806
	0	20	1	182.4	800	1006	1806
	0	20	1	145.92	790	994	1784
	0	20	1	118.56	780	982	1762
	0	20	1	91.2	770	970	1740
	0	20	1	145.92	795	1000	1795
	0	20	1	118.56	790	994	1784
	0	20	1	91.2	785	988	1773
	0	20	1	182.4	800	1006	1806
	0	20	1	145.92	790	994	1784
	0	20	1	118.56	780	982	1762
	0	20	1	91.2	770	970	1740
	0	20	1	145.92	795	1000	1795
	0	20	1	118.56	790	994	1784
	0	20	1	91.2	785	988	1773
18.00	0	20	0	169.8	703.3	979.4	1682.7
	0	20	0	176.1	682.4	1003.1	1685.5
	0	20	0	171.7	681.6	1018.6	1700.2
	0	20	0	164.8	720.7	1031.6	1752.3
	0	20	0	176.2	694.4	1018.7	1713.1
	0	20	0	175.5	690.9	1017.7	1708.6
	0	20	0	176.5	683.5	1006.7	1690.2
	0	20	0	178	684.8	1014	1698.8
	0	20	0	178.4	683.9	1014	1697.9
	0	20	0	162.7	693.5	984.4	1677.9
	0	20	0	170.3	669.5	1005.6	1675.1
	0	20	0	162.7	670.6	1030.2	1700.8
	0	20	0	156.9	708.1	1041.4	1749.5
	0	20	0	168.2	679.4	1028.7	1708.1
	0	20	0	169.1	672	1027.5	1699.5
	0	20	0	169.1	667.8	1021.2	1689
	0	20	0	169.1	661.1	1010.8	1671.9
	0	20	0	168.8	672.3	1026.8	1699.1
	0	20	0	168.6	672.2	1025.9	1698.1
	0	20	0	165.4	685.5	1034.3	1719.8
	0	20	0	156.1	683.7	986.4	1670.1
	0	20	0	165.2	656.2	1005.9	1662.1
	0	20	0	154.7	657	1035.6	1692.6
	0	20	0	149.9	693.6	1046	1739.6
	0	20	0	161	663.8	1035.5	1699.3
	0	20	0	162.6	647.9	1026.2	1674.1
	0	20	0	162.6	644.9	1021.5	1666.4
	0	20	0	162.6	636.2	1007.8	1644
	0	20	0	160.6	659.1	1036.4	1695.5
	0	20	0	157.4	671.5	1043	1714.5
	0	20	0	149.8	676.6	989.9	1666.5
	0	20	0	160.6	642.1	1004.1	1646.2
	0	20	0	147.6	638.8	1032.2	1671
	0	20	0	143.6	678.8	1048.3	1727.1
	0	20	0	154.6	647.5	1039	1686.5
	0	20	0	156.5	621.5	1018.4	1639.9
	0	20	0	156.5	620.8	1017.2	1638
	0	20	0	156.5	608.6	997.3	1605.9
	0	20	0	153.2	645	1043	1688
	0	20	0	152.1	644.8	1037.9	1682.7
	0	20	0	150.1	656.4	1048.3	1704.7
	0	20	0	156.3	627.3	1000	1627.3
	0	20	0	141	622.5	1030	1652.5
	0	20	0	137.8	662.3	1046.5	1708.8
	0	20	0	148.6	627.6	1035	1662.6
	0	20	0	150.9	598.3	1013.3	1611.6
	0	20	0	150.9	591.4	1001.7	1593.1
	0	20	0	141	579.1	980.8	1559.9
	0	20	0	146.4	629.6	1046.2	1675.8
	0	20	0	144.8	628.6	1037.8	1666.4
	0	20	0	152.4	611.3	993.3	1604.6
	0	20	0	134.9	609.1	1031.5	1640.6
	0	20	0	132.4	643.6	1039.8	1683.4

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo incluído de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
	0	20	0	143	604.6	1024.1	1628.7
	0	20	0	145.6	567.4	992.9	1560.3
	0	20	0	145.6	559.4	978.8	1538.2
	0	20	0	145.6	543.8	951.6	1495.4
	0	20	0	140	612.5	1045.4	1657.9
	0	20	0	138.1	605.2	1024.4	1629.6
	0	20	0	137.2	617	1039.9	1656.9
	0	20	0	150			
	0	20	0	150			
	0	20	0	150			
	0	20	0	150			
	0	20	0	150			
	0	20	0	150			
	0	20	0	165			
	0	20	0	165			
	0	20	0	165			
	0	20	0	165			
	0	20	0	165			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	168.75			
	0	20	0	168.75			
	0	20	0	168.75			
	0	20	0	168.75			
	0	20	0	168.75			
	0	20	0	168.75			
	0	20	0	187.5			
	0	20	0	187.5			
	0	20	0	187.5			
	0	20	0	187.5			
	0	20	0	187.5			
	0	20	0	206.25			
	0	20	0	206.25			
	0	20	0	206.25			
	0	20	0	206.25			
	0	20	0	206.25			
	0	20	0	206.25			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	180			
	0	20	0	202.5			
	0	20	0	202.5			
	0	20	0	202.5			
	0	20	0	202.5			
	0	20	0	202.5			
	0	20	0	202.5			
	0	20	0	225			
	0	20	0	225			
	0	20	0	225			
	0	20	0	225			
	0	20	0	225			
	0	20	0	225			
	0	20	0	148.2			1809.5
	0	20	0	155.8			1790.6
	0	20	0	140.6			1828
	0	20	0	140.4			1845.8
	0	20	0	156			1773.2
	0.3	20	0	148.2			1808.9
	0	20	0	148.2			1804.4
	0.6	20	0	148.2			1804.8
	0	20	0	171			1755.3
	0.3	20	0	172.2			1715.7
	0	20	0	155.4			1744.7
	0	20	0	163.4			1774.7
	0.652173913	20	0	162			1779.7
	0.6	20	0	180.6			1697.9
	0	20	0	155.4			1744.4
	0.6	20	0	180			1712.8
	0.326086957	20	0	148.2			1798.6
	0.326086957	20	0	171			1740.2
	0	20	0	180.6			1683.9
	0	20	0	172.2			1699.1
	0	20	0	140.4			1837.1
	0.625	20	0	156			1767.1
	0.3	20	0	171			1750.9
	0.6	20	0	155.8			1785.8
	0	26	0	238.9	379	1477	1856
	0	27	0	292.4	392	1462	1854
	0	27.5	0	276.6	271	1631	1902
	0	27	0	275.1	0	1916	1916
	0	27	0	269.1	306	1507	1813
	0	25	0	282.9	379	1514	1893
	0	27	0	262.3	377	1526	1903
	0	24	0	244.9	370	1517	1887
	0	27	0	221.7	377	1464	1841
	0	26	0	164.1	268	1654	1922
	0	25	0	255.3	386	1457	1843
	0	24.4	0	251.9	183	1606	1789
	0	28	0	290.3	290	1577	1867
	0	26	0	277.2	347	1420	1767
	0	28.5	0	200.5	190	1600	1790
	0	27	0	203.6	222	1789	2011
	0	27	0	215.8	195	1587	1782
	0	29.5	0	226.1	209	1704	1913
	0	27	0	182	191	1711	1902
	0	26	0	213.7	411	1522	1933
	0	27.1	0	217.8	0	1984	1984

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo incluído de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m ³)	Agreg Fino (kg/m ³)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m ³)
	0	27	0	193.1	0	1821	1821
	0	27	0	175.1	199	1780	1979
	0	29.9	0	202.2	214	1968	2182
	0	27	0	188.5	216	1781	1997
	0	26	0	208	201	1767	1968
	0	27	0	189.7	396	1553	1949
	0	28	0	196.9	201	1769	1970
	0	26	0	204.6	214	1771	1985
	0	26.1	0	193.8	209	1769	1978
	0	28	0	226.2	197	1741	1938
	0	26	0	185.1	221	1794	2015
	0	25.8	0	214.2	150	1838	1988
	0	25	0	199.1	193	1745	1938
	0	27	0	215.3	198	1729	1927
	0	27	0	191.2	138	1825	1963
	0	27.4	0	174.2	202	1744	1946
	0	31	0	206.2	231	1743	1974
	0	28	0	179.6	213	1761	1974
	0	27.6	0	176	147	1845	1992
	0	26.4	0	207.8	435	1539	1974
	0	26	0	185.5	194	1748	1942
	0	27.4	0	189.6	430	1543	1973
	0	28.4	0	176.2	393	1543	1936
	0	25.8	0	207	482	1395	1877
	0	25.5	0	221.9	394	1557	1951
	0	26	0	214.8	379	1518	1897
	0	24.7	0	220.2	497	1442	1939
	0	29.4	0	197.6	357	1538	1895
	0	27	0	217.1	508	1448	1956
	0	25	0	197.9	400	1547	1947
	0	27	0	176.9	403	1535	1938
	0	26	0	175.8	389	1484	1873
	0	26.6	0	289.3	387	1543	1930
	0	25	0	217.5	304	1654	1958
	0	28	0	181.9	371	1585	1956
	0	27.4	0	197.3	412	1529	1941
	0	27.8	0	180.9	380	1606	1986
	0	26	0	209.7	366	1607	1973
	0	26	0	187.1	340	1621	1961
	0	27.3	0	224.8	410	1554	1964
	0	27	0	155.7	348	1560	1908
	0	30	0	248.9	413	1552	1965
	0	26	0	199.6	407	1604	2011
	0	24	0	187.6	403	1606	2009
	0	26.1	0	207	406	1606	2012
	0	29.3	0	184.9	400	1604	2004
	0	25	0	188	409	1602	2011
	0	28.1	0	207.5	392	1565	1957
	0	24.9	0	186.7	406	1577	1983
	0	26	0	172.6	392	1581	1973
	0	29.9	0	216.8	382	1561	1943
	0	25	0	198.4	404	1580	1984
	0	25.7	0	164.9	430	1547	1977
	0	26.9	0	202.3	384	1498	1882
	0	27	0	208.1	390	1498	1888
	0	27.5	0	223.3	397	1473	1870
	0	26.5	0	228	384	1511	1895
	0	28	0	220.2	213	1740	1953
	0	26.9	0	241.7	435	1474	1909
	0	26	0	176	200	1654	1854
	0	27	0	237.1	207	1757	1964
	0	29.4	0	189.3	237	1791	2028
	0	27	0	165.2	192	1647	1839
	0	26.5	0	213.8	201	1727	1928
	0	26.7	0	188.3	210	1791	2001
	0	27.2	0	209.9	208	1753	1961
	0	26.5	0	194.5	196	1740	1936
	0	25.5	0	226.3	389	1533	1922
	0	29.6	0	197.5	187	1711	1898
	0	29	0	219.8	366	1483	1849
	0	26	0	231.5	386	1540	1926
	0	26	0	221.4	371	1520	1891
	0	26	0	220.9	391	1571	1962
	0	25	0	224.6	370	1527	1897
	0	28.2	0	212.8	382	1533	1915
	0	27.1	0	207.8	388	1523	1911
	0	28.5	0	207.6	358	1469	1827
	0	28.5	0	217.9	358	1458	1816
	0	26.3	0	210.8	391	1597	1988
	0	23.9	0	234.6	914	1031	1945
	0	26.8	0	216	372	1519	1891
	0	30.2	0	203.4	377	1520	1897
	0	25	0	232.1	881	1101	1982
	0	25	0	199.8	849	1084	1933
	0	25.4	0	221.2	404	1535	1939
	0	25.6	0	242.4	302	1644	1946
	0	25.6	0	190.4	292	1616	1908
	0	25	0	202.4	397	1518	1915
	0	26	0	237.4	289	1599	1888
	0	27.4	0	199	346	1581	1927
	0	26.3	0	242.5	304	1679	1983
	0	26.2	0	196.3	355	1585	1940
	0	25.7	0	194	374	1578	1952
	0	28.9	0	205.3	301	1649	1950
	0	26.3	0	222.3	342	1573	1915
	0	30.5	0	231.8	286	1641	1927
	0	26	0	192.8	340	1528	1868
	0	26.3	0	240.3	289	1634	1923
	0	26.3	0	200.6	298	1654	1952
	0	28.8	0	244.3	295	1650	1945
	0	29.9	0	220.4	306	1634	1940
	0	26	0	189.5	295	1640	1935
	0	27.5	0	226.8	282	1634	1916
	0	26	0	198.5	305	1633	1938
	0	30	0	223.7	286	1628	1914
	0	26.8	0	243.1	282	1598	1880

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo incluído de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
	0	25.7	0	185.7	295	1648	1943
	0	26.3	0	289.3	288	1614	1902
	0	26.8	0	240.6	297	1600	1897
	0	27.6	0	257.2	299	1616	1915
	0	27	0	269.1	290	1612	1902
	0	25.3	0	239.1	701	1248	1949
	0	27.3	0	260.8	286	1626	1912
	0	25.7	0	182.7	701	1259	1960
	0	26	0	193.2	296	1653	1949
	0	26	0	210.3	407	1531	1938
	0	27	0	238.9	305	1652	1957
	0	26.5	0	185.2	299	1638	1937
	0	29	0	216.1	299	1663	1962
	0	26.1	0	230.2	312	1655	1967
	0	25.3	0	234.5	299	1653	1952
	0	28	0	215.6	291	1645	1936
	0	29.9	0	205.1	583	1340	1923
	0	26.3	0	189.7	591	1343	1934
	0	26.6	0	192.5	519	1482	2001
	0	25.5	0	239.1	295	1647	1942
	0	26	0	222.9	428	1531	1959
	0	26.9	0	191.7	388	1526	1914
	0	29	0	293.6	316	1602	1918
	0	21	0	290.2	302	1597	1899
	0	29	0	276.9	282	1560	1842
	0	29	0	254	0	1865	1865
	0	26	0	224.2	0	1887	1887
	0	28	0	236	0	1895	1895
	0	28	0	282.3	0	1891	1891
	0	29	0	281.1	319	1588	1907
	0	28	0	272.6	338	1610	1948
	0	28	0	240.3	283	1564	1847
	0	28	0	241.7	278	1578	1856
	0	26	0	251.3	286	1573	1859
	0	26	0	236.1	280	1586	1866
	0	28	0	296.9	0	1866	1866
	0	26	0	325.6	0	1884	1884
	0	28	0	337.6	0	1903	1903
	0	27	0	218.2	0	1872	1872
	0	27	0	219.2	0	1871	1871
	0	27	0	222.2	0	1881	1881
	0	28	0	259.4	0	1895	1895
	0	27	0	238	0	1882	1882
	0	28	0	256.8	0	1882	1882
	0	30	0	227.8	378	1533	1911
	0	26	0	226.2	385	1543	1928
	0	25	0	250.4	0	1893	1893
	0	28	0	280	426	1521	1947
	0	26	0	281.2	365	1517	1882
	0	30	0	272.3	395	1495	1890
	0	27	0	261.7	389	1493	1882
	0	27	0	275.8	418	1482	1900
	0	29	0	259	359	1464	1823
	0	26	0	244.6	404	1457	1861
	0	29	0	251.7	375	1486	1861
	0	26	0	210.3	357	1432	1789
	0	26	0	207.6	356	1448	1804
	0	26	0	210.8	352	1445	1797
	0	26	0	179.1	356	1442	1798
	0	28	0	191.5	357	1438	1795
	0	27	0	288.5	403	1505	1908
	0	27	0	294.5	409	1472	1881
	0	27	0	301.4	406	1472	1878
	0	29	0	250.6	377	1490	1867
	0	26	0	262.2	392	1530	1922
	0	26	0	275.2	386	1482	1868
	0	30	0	300.7	374	1494	1868
	0	25	0	194.5	379	1522	1901
	0	28	0	186.3	374	1512	1886
	0	28.6	0	298.3	384	1477	1861
	0	26	0	307	372	1492	1864
	0	28	0	313.4	360	1417	1777
	0	26	0	328.5	354	1397	1751
	0	29.8	0	259.1	412	1496	1908
	0	31.5	0	266.8	433	1479	1912
	0	28	0	248.5	386	1501	1887
	0	29	0	236	363	1495	1858
	0	27	0	278.8	383	1476	1859
	0	27	0	306.6	400	1485	1885
	0	25	0	269.1	393	1486	1879
	0	27	0	257.2	404	1501	1905
	0	27	0	256	404	1502	1906
	0	27	0	248.7	357	1458	1815
	0	28	0	253.5	356	1467	1823
	0	27	0	205.4	367	1500	1867
	0	27.3	0	291.3	511	1228	1739
	0	27	0	248.3	551	1222	1773
	0	26	0	302.5	526	1244	1770
	0	28	0	302.7	664	1136	1800
	0	26.5	0	314.1	600	1153	1753
	0	30	0	305.9	609	1162	1771
	0	27	0	258.5	637	1134	1771
	0	28	0	271.6	534	1212	1746
	0	27	0	293.2	597	1158	1755
	0	27	0	299.2	548	1228	1776
	0	26	0	349.3	592	1138	1730
	0	27	0	271.2	524	1218	1742
	0	29	0	279.4	402	1558	1960
	0	26	0	281.2	411	1542	1953
	0	28	0	300.1	386	1546	1932
	0	29	0	269	215	1644	1859
	0	27	0	272.8	288	1570	1858
	0	28	0	251.6	194	1661	1855
	0	27	0	209.1	205	1647	1852
	0	28	0	236.6	197	1656	1853
	0	27	0	293.4	189	1644	1833

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo inclusor de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
	0	26	0	261.1	379	1506	1885
	0	27	0	269.9	288	1573	1861
	0	26	0	266.1	281	1589	1870
	0	27	0	268	199	1663	1862
	0	26	0	281.2	198	1677	1875
	0	27	0	259	310	1541	1851
	0	27	0	294	299	1608	1907
	0	27	0	228.2	431	1504	1935
	0	31	0	277.3	426	1511	1937
	0	27.5	0	252.5	378	1489	1867
	0	30	0	267.3	303	1611	1914
	0	27	0	305.2	377	1504	1881
	0	27	0	236.7	388	1480	1868
	0	28	0	290.3	363	1481	1844
	0	26	0	286.6	362	1478	1840
	0	27	0	243.6	367	1475	1842
	0	26	0	241.4	367	1458	1825
	0	25	0	295.7	620	1155	1775
	0	28	0	291.3	588	1152	1740
	0	28	0	373.8	635	1145	1780
	0	27	0	286.5	654	1134	1788
	0	27	0	303.2	633	1143	1776
	0	26	0	316.2	628	1157	1785
	0	25	0	303.3	601	1145	1746
	0	28	0	265.1	0	1948	1948
	0	27	0	353.6	553	1242	1795
	0	26	0	325.1	502	1250	1752
	0	26	0	275.5	0	1706	1706
	0	27	0	233	297	727	1024
	0	28	0	248.7	291	1568	1859
	0	26	0	234	303	1537	1840
	0	28	0	213.2	298	1538	1836
	0	27	0	226.8	294	1558	1852
	0	25.5	0	234.4	380	1519	1899
	0	26	0	234.7	390	1501	1891
	0	28	0	244.1	388	1517	1905
	0	26	0	285.4	200	1667	1867
	0	26	0	285.9	189	1666	1855
	0	27	0	238.8	195	1698	1893
	0	26	0	260.7	198	1694	1892
	0	25	0	268.3	366	1542	1908
	0	25	0	304.1	377	1552	1929
	0	26	0	266.9	204	1741	1945
	0	26.7	0	266.8	450	1386	1836
	0	24.3	0	270.6	464	1408	1872
	0	25	0	292.9	458	1379	1837
	0	30	0	298.1	384	1489	1873
	0	26	0	331.8	369	1484	1853
	0	28	0	258.6	194	1710	1904
	0	26	0	232.2	433	1448	1881
	0	27	0	284.6	410	1414	1824
	0	27	0	258.6	404	1453	1857
	0	24	0	251.7	416	1409	1825
	0	26	0	241.2	408	1374	1782
	0	25	0	278.6	478	1409	1887
	0	26	0	302.1	458	1394	1852
	0	26	0	294.4	443	1368	1811
	0	27.2	0	257.3	451	1361	1812
	0	28	0	234	427	1383	1810
	0	26	0	290.2	447	1375	1822
	0	24.7	0	293.4	421	1539	1960
	0	24	0	303.2	372	1480	1852
	0	26.5	0	281.9	375	1490	1865
	0	26.5	0	252.1	192	1663	1855
	0	25.8	0	237	198	1666	1864
	0	26	0	273	376	1483	1859
	0	30	0	285.6	381	1518	1899
	0	29	0	290.3	402	1542	1944
	0	27.5	0	292.6	389	1498	1887
	0	27	0	282.8	395	1488	1883
	0	27	0	258.1	198	1694	1892
	0	26	0	253.5	194	1696	1890
	0	26	0	288	369	1480	1849
	0	29	0	283.5	423	1505	1928
	0	27	0	273.9	377	1487	1864
	0	26	0	264.6	277	1602	1879
	0	26	0	251.6	280	1577	1857
	0	26.5	0	186.3	326	1020	1346
	0	27	0	240.9	374	1445	1819
	0	25	0	225.8	360	1453	1813
	0	27	0	276.3	388	1516	1904
	0	27	0	304.2	639	1214	1853
	0	25	0	284.1	592	1217	1809
	0	25	0	263.2	595	1212	1807
	0	26.3	0	295.8	601	1217	1818
	0	29	0	257.5	604	1211	1815
	0	27	0	342.1	610	1242	1852
	0	28.6	0	265.3	171	1551	1722
	0	27.2	0	242.7	192	1565	1757
	0	28.5	0	279.7	197	1650	1847
	0	28	0	241.5	200	1721	1921
	0	25	0	251.8	308	1614	1922
	0	27	0	254.9	286	1666	1952
	0	27	0	256.8	172	1668	1840
	0	27	0	202.3	1046	801	1847
	0	29	0	211.2	172	1654	1826
	0	30	0	261.1	0	1877	1877
	0	26.2	0	256.1	0	1863	1863
	0	28	0	222	0	1477	1477
	0	29	0	211	192	1572	1764
	0	27	0	167	192	1740	1932
	0	24	0	289.7	198	1684	1882
	0	27	0	231.7	0	1334	1334
	0	27	0	262.7	0	1924	1924
	0	28	0	215.1	1082	825	1907
	0	29.6	0	205.3	1059	803	1862

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo incluído de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m³)	Agreg Fino (kg/m³)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m³)
	0	29	0	231.4	186	1680	1866
	0	30	0	239.2	186	1654	1840
	0	31	0	239.6	182	1674	1856
	0	28	0	264.6	199	1737	1936
	0	26	0	218	248	1612	1860
	0	26	0	210.8	240	1620	1860
	0	28	0	215.8	260	1618	1878
	0	25.5	0	213.8	240	1622	1862
	0	27	0	232	256	1613	1869
	0	26	0	262.3	247	1612	1859
	0	26	0	287.2	240	1613	1853
	0	26.5	0	233.2	1061	800	1861
	0	24	0	241.5	1129	822	1951
	0	27	0	222	1054	803	1857
	0	25	0	283	207	1729	1936
21.00	0	26	0	298.7	186	1715	1901
	0	24	0	308	206	1692	1898
	0	27	0	281	186	1708	1894
	0	25.4	0	276.1	185	1724	1909
	0	26.9	0	248.1	181	1724	1905
	0	28	0	247.2	186	1678	1864
	0	27	0	261.2	186	1689	1875
	0	25	0	250.2	207	1673	1880
	0	25	0	192.8	169	1575	1744
	0	27	0	206.4	0	1879	1879
	0	26.3	0	292.7	0	1898	1898
	0	25	0	319.1	0	1879	1879
	0	25	0	313.2	0	1905	1905
	0	26.1	0	220	281	1612	1893
	0	27	0	206.4	183	1719	1902
	0	26.3	0	195.5	196	1692	1888
	0	25.2	0	204	193	1704	1897
	0	25.5	0	217.5	193	1702	1895
	0	26.5	0	197.3	193	1301	1494
	0	26.5	0	194.6	192	1310	1502
	0	25	0	200.9	217	1679	1896
	0	26	0	205.8	203	1683	1886
	0	25.3	0	239.2	188	1709	1897
	0	26	0	232.5	188	1691	1879
	0	26	0	205.3	197	1697	1894
	0	25.4	0	203.9	193	1683	1876
	0	25.3	0	199.6	186	1705	1891
	0	24.6	0	196.4	198	1714	1912
	0	25.5	0	238.8	189	1686	1875
	0	27	0	230.1	194	1683	1877
	0	29.8	0	216.5	193	1738	1931
	0	29	0	213.7	204	1719	1923
	0	27	0	236.6	0	1767	1767
	0	27	0	167.7	387	1571	1958
	0	29.5	0	203.5	302	1581	1883
	0	27	0	217.6	188	1750	1938
	0	26	0	208.7	211	1826	2037
	0	27	0	189	393	1541	1934
	0	27	0	163.3	202	1724	1926
	0	27	0	179.2	204	1723	1927
	0	26.4	0	190.1	196	1745	1941
	0	26.9	0	217.5	199	1719	1918
	0	26	0	231.7	221	1730	1951
	0	29	0	250.8	192	1716	1908
	0	26	0	270.1	1100	958	2058
	0	26	0	200.3	183	1693	1876
	0	27	0	206.2	188	1730	1918
	0	28.4	0	165.5	0	1911	1911
	0	26.5	0	181.2	199	1721	1920
	0	29	0	181.3	229	1710	1939
	0	26.5	0	150.8	146	1265	1411
	0	26.2	0	209.7	204	1768	1972
	0	28	0	188.5	211	1738	1949
	0	24	0	195	195	1706	1901
	0	29	0	206.5	188	1740	1928
	0	27	0	179.5	199	1751	1950
	0	28	0	218.7	196	1718	1914
	0	27	0	200.9	182	1717	1899
	0	26.4	0	185.5	192	1705	1897
	0	26.5	0	184.3	180	1732	1912
	0	30.5	0	182.2	186	1725	1911
	0	27	0	249.7	898	1046	1944
	0	25	0	241.6	642	1122	1764
	0	26	0	219.3	597	1128	1725
	0	27	0	231.5	629	1137	1766
	0	26.2	0	179.2	194	1696	1890
	0	28	0	223.3	248	1643	1891
	0	26	0	224.2	243	1638	1881
	0	27	0	188.1	199	1703	1902
	0	27	0	199.2	194	1727	1921
	0	26	0	155.3	208	1726	1934
	0	26	0	205.2	191	1703	1894
	0	25.5	0	203.8	208	1713	1921
	0	24.4	0	212.9	289	1606	1895
	0	28.1	0	221.1	401	1480	1881
	0	26.9	0	208.4	373	1473	1846
	0	26	0	231.8	391	1565	1956
	0	27	0	202.2	392	1546	1938
	0	27	0	213.5	506	1423	1929
	0	28	0	212	503	1410	1913
	0	27	0	207	507	1419	1926
	0	26	0	239.1	532	1454	1986
	0	30	0	219.4	515	1411	1926
	0	27.1	0	229.3	503	1422	1925
	0	27	0	238.9	504	1412	1916
	0	26	0	190.3	507	1413	1920
	0	27	0	177.7	998	960	1958
	0	27	0	234.9	380	1469	1849
	0	27.5	0	198.8	394	1521	1915
	0	26	0	186.1	175	1316	1491
	0	27	0	191.4	395	1506	1901

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo incluído de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m³)	Agreg Fino (kg/m³)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m³)
	0	25	0	171.1	385	1501	1886
	0	26	0	182.1	363	1557	1920
	0	29.5	0	189.6	381	1463	1844
	0	26.8	0	235.4	363	1479	1842
	0	27.2	0	197.6	270	1587	1857
	0	27	0	243.8	404	1583	1987
	0	27.2	0	160.6	379	1546	1925
	0	26.9	0	204.4	381	1484	1865
	0	28	0	189.4	367	1473	1840
	0	27	0	187.7	376	1474	1850
	0	26	0	188.5	381	1475	1856
	0	26	0	213.5	413	1595	2008
	0	27.6	0	210.3	397	1591	1988
	0	28.3	0	224.6	382	1484	1866
	0	27	0	224.9	376	1532	1908
	0	28	0	240	408	1521	1929
	0	27	0	174.5	417	1528	1945
	0	28	0	173.9	451	1561	2012
	0	25.5	0	181.6	396	1547	1943
	0	26.2	0	182.5	410	1542	1952
	0	27.9	0	189.8	394	1542	1936
	0	27.6	0	206.6	393	1538	1931
	0	29.9	0	211.9	462	1492	1954
	0	26.2	0	202.1	463	1423	1886
	0	27.6	0	206.2	467	1420	1887
	0	26	0	210.9	462	1492	1954
	0	26.9	0	189.3	459	1388	1847
	0	29.6	0	203.2	466	1401	1867
	0	27.8	0	198	471	1397	1868
	0	27	0	222.1	486	1456	1942
	0	27	0	223.4	466	1433	1899
	0	26	0	221.1	468	1506	1974
	0	26	0	195.3	214	1720	1934
	0	29	0	201	527	1487	2014
	0	30.7	0	141.9	489	1437	1926
	0	29.6	0	211	221	1691	1912
	0	29.5	0	194.7	182	1681	1863
	0	29.5	0	218	206	1686	1892
	0	28	0	200.2	176	1655	1831
	0	24.4	0	193	360	1521	1881
	0	28	0	225	201	1706	1907
	0	25	0	237.5	391	1545	1936
	0	26	0	203.9	379	1509	1888
	0	26.9	0	198.7	376	1542	1918
	0	27.6	0	208.6	360	1500	1860
	0	30	0	205	230	1794	2024
	0	28.7	0	163.9	232	1721	1953
	0	27.6	0	199	198	1677	1875
	0	30	0	162	197	1698	1895
	0	30.5	0	161	205	1719	1924
	0	25.7	0	195.9	351	1531	1882
	0	27.2	0	208.8	355	1455	1810
	0	27	0	212	398	1487	1885
	0	29	0	200	472	1582	2054
	0	27.4	0	198.5	352	1428	1780
	0	29.3	0	235.6	835	1014	1849
	0	24	0	156.8	836	1016	1852
	0	26.1	0	187.2	308	1632	1940
	0	29.8	0	224	395	1505	1900
	0	26.2	0	226.7	381	1505	1886
	0	29.8	0	200.8	337	1550	1887
	0	25.6	0	196.5	302	1624	1926
	0	28.3	0	216.1	287	1372	1659
	0	30.1	0	221.9	292	1725	2017
	0	24.6	0	233.6	303	1640	1943
	0	26.5	0	203	302	1667	1969
	0	26.5	0	197.2	295	1709	2004
	0	26	0	215.8	301	1650	1951
	0	29.5	0	214	276	1645	1921
	0	27	0	208.3	229	1627	1856
	0	27.9	0	217	289	1630	1919
	0	29.4	0	223.1	382	1496	1878
	0	26.4	0	179.9	367	1488	1855
	0	26.5	0	233.6	372	1492	1864
	0	26.5	0	250.5	283	1623	1906
	0	26.1	0	253.4	298	1620	1918
	0	26.5	0	217	386	1486	1872
	0	29.2	0	197.7	356	1438	1794
	0	24.5	0	198.7	359	1448	1807
	0	28.3	0	242.4	327	1530	1857
	0	25	0	190.4	370	1505	1875
	0	27.5	0	196.4	342	1518	1860
	0	25.5	0	175.6	324	1531	1855
	0	27.6	0	230.9	344	1515	1859
	0	26.4	0	177.1	305	1722	2027
	0	24.6	0	253.3	309	1752	2061
	0	26	0	187.1	361	1520	1881
	0	26.3	0	200.1	321	1637	1958
	0	25.7	0	243.9	487	1407	1894
	0	26.5	0	238.4	762	1147	1909
	0	25	0	201	302	1762	2064
	0	28	0	199.1	380	1484	1864
	0	27	0	208.5	489	1401	1890
	0	27	0	208.5	507	1406	1913
	0	25	0	199	302	1637	1939
	0	25	0	204.7	358	1719	2077
	0	27.3	0	182.8	590	1197	1787
	0	26	0	232.5	717	1189	1906
	0	27.1	0	225.6	731	1214	1945
	0	26	0	220	394	1522	1916
	0	26	0	185.8	376	1516	1892
	0	28.5	0	216.5	398	1567	1965
	0	27	0	190.9	383	1525	1908
	0	26	0	180.3	379	1531	1910
	0	26	0	218.3	385	1582	1967
	0	26.5	0	222.4	0	2173	2173

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo inclusor de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
	0	25	0	193.7	0	2220	2220
	0	31.5	0	244.4	408	1570	1978
	0	27.5	0	246.1	426	1557	1983
	0	27.5	0	256.7	395	1586	1981
	0	28.7	0	234	303	1759	2062
	0	28	0	228.1	291	1711	2002
	0	29.6	0	201.3	386	1535	1921
	0	27.2	0	219.8	384	1630	2014
	0	26.4	0	235.4	487	1430	1917
	0	28	0	224	392	1485	1877
	0	26	0	246.6	364	1888	2252
	0	28.5	0	254.1	364	1888	2252
	0	28	0	246.6	364	1888	2252
	0	26	0	272.5	364	1888	2252
	0	27	0	228.6	368	1474	1842
	0	27	0	278.9	368	1474	1842
	0	26	0	250	368	1474	1842
	0	27.2	0	278.2	368	1474	1842
	0	27	0	282.7	368	1474	1842
	0	27	0	259.5	382	1542	1924
	0	28	0	293.1	380	1523	1903
	0	28	0	233.2	364	1462	1826
	0	27	0	256.1	359	1438	1797
	0	29	0	219.5	368	1474	1842
	0	27	0	219.5	368	1474	1842
	0	28	0	219.5	368	1474	1842
	0	26	0	270.9	364	1462	1826
	0	28	0	270.9	364	1462	1826
	0	28	0	270.9	364	1462	1826
	0	27	0	245.1	364	1462	1826
	0	30	0	245.1	364	1462	1826
	0	27	0	243.1	364	1462	1826
	0	29	0	243.1	364	1462	1826
	0	27	0	256.4	364	1462	1826
	0	26	0	234.6	368	1474	1842
	0	27	0	268.2	0	1867	1867
	0	29.5	0	240.2	368	1474	1842
	0	25.5	0	249.7	368	1474	1842
	0	23	0	230.2	0	1867	1867
	0	27	0	260.8	368	1474	1842
	0	26	0	215.6	364	1462	1826
	0	28	0	243.6	368	1474	1842
	0	29	0	243.6	368	1474	1842
	0	28	0	253.2	368	1474	1842
	0	27	0	243.8	368	1474	1842
	0	28	0	231.4	368	1474	1842
	0	26	0	240.2	368	1474	1842
	0	27	0	253.9	364	1462	1826
	0	16	0	215.6	364	1462	1826
	0	27	0	215.6	364	1462	1826
	0	26	0	217.1	364	1462	1826
	0	28	0	217.1	364	1462	1826
	0	28	0	221	368	1474	1842
	0	26	0	280.9	497	1206	1703
	0	26	0	338.8	497	1206	1703
	0	28	0	339.8	497	1206	1703
	0	29	0	317.6	497	1206	1703
	0	27	0	303.2	497	1206	1703
	0	29	0	315.4	497	1206	1703
	0	27	0	295.5	497	1206	1703
	0	27	0	295.5	497	1206	1703
	0	28	0	285.5	497	1206	1703
	0	28	0	285.5	497	1206	1703
	0	27	0	280	497	1206	1703
	0	30	0	307.3	497	1206	1703
	0	27	0	285.5	497	1206	1703
	0	27	0	287.4	497	1206	1703
	0	26	0	288.9	497	1206	1703
	0	27	0	274.6	497	1206	1703
	0	26	0	254.1	497	1206	1703
	0	29	0	254.1	497	1206	1703
	0	27	0	292.6	497	1206	1703
	0	27	0	270.4	497	1206	1703
	0	26	0	300.9	497	1206	1703
	0	28	0	218.4	364	1462	1826
	0	29	0	259	364	1462	1826
	0	29	0	269.2	364	1462	1826
	0	28	0	293	380	1523	1903
	0	29	0	307.3	497	1206	1703
	0	27	0	293.6	497	1206	1703
	0	29	0	276.7	364	1462	1826
	0	29	0	278.1	379	1558	1937
	0	26	0	262.4	368	1474	1842
	0	30	0	262.4	368	1474	1842
	0	28	0	273.7	364	1462	1826
	0	27	0	273.7	364	1462	1826
	0	28	0	257.4	364	1462	1826
	0	30	0	257.4	364	1462	1826
	0	26	0	288.4	364	1462	1826
	0	30	0	288.4	364	1462	1826
	0	27	0	293.4	364	1462	1826
	0	29	0	293.4	364	1462	1826
	0	28	0	257.6	368	1474	1842
	0	29	0	270.4	368	1474	1842
	0	27	0	285.3	364	1462	1826
	0	30	0	235.8	364	1462	1826
	0	27	0	235.8	364	1462	1826
	0	29	0	275.1	364	1888	2252
	0	27	0	309.6	364	1888	2252
	0	26	0	309.6	364	1888	2252
	0	26	0	266	364	1888	2252
	0	27	0	266	364	1888	2252
	0	29	0	295.6	364	1888	2252
	0	27	0	258.7	364	1888	2252
	0	25	0	266.6	364	1888	2252
	0	26	0	278.3	364	1888	2252

ARTÍCULO/Base bibliográfica	Aditivo inductor de aire (mL/kg cemento)	T (°C)	AGREGADO RECICLADO	AGUA (w) (kg/m3)	Agreg Fino (kg/m3)	Agreg Grueso	Agregado Total (Kg/m3)
	0	26	0	317.8	497	1206	1703
	0	29	0	273.1	364	1888	2252
	0	27	0	265.6	364	1888	2252
	0	26	0	317.6	364	1888	2252
	0	27	0	317.6	364	1888	2252
	0	25	0	305.4	364	1462	1826
	0	24.8	0	303.2	364	1462	1826
	0	25	0	303.2	364	1462	1826
	0	27.8	0	297.9	364	1462	1826
	0	26	0	253.6	364	1462	1826
	0	27	0	253.6	364	1462	1826
	0	27	0	253.6	364	1462	1826
	0	26	0	268.7	368	1474	1842
	0	26	0	268.7	368	1474	1842
	0	26	0	306.5	364	1462	1826
	0	26	0	306.5	364	1462	1826
	0	27	0	289.6	364	1888	2252
	0	26	0	289.6	364	1888	2252
	0	27	0	299.1	364	1888	2252
	0	26	0	275.5	364	1888	2252
	0	26	0	275.5	364	1888	2252
	0	29	0	228.6	368	1474	1842
	0	26	0	228.6	368	1474	1842
	0	29.6	0	268.7	411	1381	1792
	0	27	0	282.2	497	1206	1703
	0	26	0	285.4	497	1206	1703
	0	24	0	302.2	497	1206	1703
	0	24.3	0	302.2	497	1206	1703
	0	27	0	312.4	497	1206	1703
	0	26.3	0	331.3	497	1206	1703
	0	26	0	268.2	497	1206	1703
	0	27	0	332.5	497	1206	1703
	0	26	0	253.6	368	1474	1842
	0	26	0	253.6	368	1474	1842
	0	25	0	278.9	368	1474	1842
	0	28	0	269.8	368	1474	1842
	0	26	0	263.9	368	1474	1842
	0	26.8	0	274.3	368	1474	1842
	0	27.2	0	274.3	368	1474	1842
	0	27	0	274.3	368	1474	1842
	0	26	0	263.9	368	1474	1842
	0	27	0	257	368	1474	1842
	0	26.5	0	302.2	368	1474	1842
	0	28	0	282.7	368	1474	1842
	0	26.5	0	300.7	497	1206	1703
	0	26	0	266.7	497	1206	1703
	0	27	0	224.6	497	1206	1703
	0	26	0	266.7	497	1206	1703
	0	25	0	223.2	0	1867	1867
	0	26	0	246	411	1381	1792
	0	27.7	0	245.6	0	1921	1921
	0	28	0	231.6	375	1477	1852



Designation: C143/C143M – 20

Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C143/C143M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of slump of hydraulic-cement concrete, both in the laboratory and in the field.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system are not necessarily exact equivalents; therefore, to ensure conformance with the standard, each system shall be used independently of the other, and values from the two systems shall not be combined.

1.3 The text of this standard refers to notes and footnotes that provide explanatory material. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.²)*

1.5 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.60 on Testing Fresh Concrete.

Current edition approved June 1, 2020. Published July 2020. Originally approved in 1922. Last previous edition approved in 2015 as C143/C143M – 15a. DOI: 10.1520/C0143_C0143M-20.

² Section on Safety Precautions, Manual of Aggregate and Concrete Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards*:³
 - C31/C31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
 - C138/C138M Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete
 - C172/C172M Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
 - C173/C173M Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method
 - C231/C231M Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
 - C670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials
 - D638 Test Method for Tensile Properties of Plastics

3. Summary of Test Method

3.1 A sample of freshly mixed concrete is placed and compacted by rodding in a mold shaped as the frustum of a cone. The mold is raised, and the concrete allowed to subside. The vertical distance between the original and displaced position of the center of the top surface of the concrete is measured and reported as the slump of the concrete.

4. Significance and Use

4.1 This test method is intended to provide the user with a procedure to determine slump of plastic hydraulic-cement concretes.

NOTE 1—This test method was originally developed to provide a technique to monitor the consistency of unhardened concrete. Under laboratory conditions, with strict control of all concrete materials, the slump is generally found to increase proportionally with the water content of a given concrete mixture, and thus to be inversely related to concrete strength. Under field conditions, however, such a strength relationship is

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

not clearly and consistently shown. Care should therefore be taken in relating slump results obtained under field conditions to strength.

4.2 This test method is considered applicable to plastic concrete having coarse aggregate up to 1½ in. [37.5 mm] in size. If the coarse aggregate is larger than 1½ in. [37.5 mm] in size, the test method is applicable when it is performed on the fraction of concrete passing a 1½-in. [37.5-mm] sieve, with the larger aggregate being removed in accordance with the section titled “Additional Procedure for Large Maximum Size Aggregate Concrete” in Practice C172/C172M.

4.3 This test method is not considered applicable to non-plastic and non-cohesive concrete.

NOTE 2—Concretes having slumps less than ½ in. [15 mm] may not be adequately plastic and concretes having slumps greater than about 9 in. [230 mm] may not be adequately cohesive for this test to have significance. Caution should be exercised in interpreting such results.

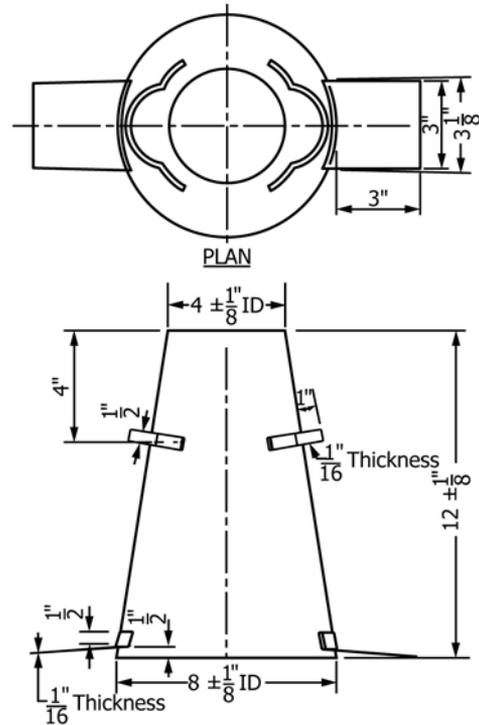
5. Apparatus

5.1 Mold—The test specimen shall be formed in a mold made of metal or plastic not readily attacked by the cement paste. The mold shall be sufficiently rigid to maintain the specified dimensions and tolerances during use, resistant to impact forces, and shall be non-absorbent. Metal molds shall have an average thickness of not less than 0.060 in. [1.5 mm] with no individual thickness measurement less than 0.045 in. [1.15 mm]. Plastic molds shall be ABS plastic or equivalent (Note 3) with a minimum average wall thickness of 0.125 in. [3 mm], with no individual thickness measurement less than 0.100 in. [2.5 mm]. The manufacturer or supplier shall certify the materials used in mold construction are in compliance with the requirements of this test method. The mold shall be in the form of the lateral surface of the frustum of a cone with the base 8 in. [200 mm] in diameter, the top 4 in. [100 mm] in diameter, and the height 12 in. [300 mm]. Individual diameters and heights shall be within ± 1/8 in. [3 mm] of the prescribed dimensions. The base and the top shall be open and parallel to each other and at right angles to the axis of the cone. The mold shall be provided with foot pieces and handles similar to those shown in Fig. 1. The mold shall be constructed without a seam. The interior of the mold shall be relatively smooth and free from projections. The mold shall be free from dents, deformation, or adhered mortar. A mold which clamps to a nonabsorbent base plate is acceptable instead of the one illustrated, provided the clamping arrangement is such that it can be fully released without movement of the mold and the base is large enough to contain all of the slumped concrete in an acceptable test.

NOTE 3—ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) plastic exhibits the following minimum mechanical properties:

Tensile modulus of elasticity, at 73 °F [23 °C]	320 000 psi	[2206 MPa]
Tensile strength (Test Method D638)	5670 psi	[39 MPa]
Percent Elongation at Break, at 73 °F [23 °C]	40 %	

5.1.1 Check and record conformance to the mold’s specified dimensions when it is purchased or first placed in service and at least annually thereafter. To measure the top diameter,



Dimensional Units	
in.	1/16 1/8 1/2 1 3 3 1/8 4 8 12
mm	[2] [3] [15] [25] [75] [80] [100] [200] [300]

FIG. 1 Mold for Slump Test

bottom diameter, and height, perform two measurements for each, approximately 90° apart, and record the results of each measurement. To verify mold thickness, perform two measurements approximately 180° apart at 1 ± 1/2 in. [25 ± 10 mm] from the top of the mold, two measurements approximately 180° apart at 1 ± 1/2 in. [25 ± 10 mm] from the bottom of the mold, and calculate the average of the four measurements.

5.2 Tamping Rod—A round, smooth, straight steel rod, with a 5/8 in. [16 mm] ± 1/16 in. [2 mm] diameter. The length of the tamping rod shall be at least 4 in. [100 mm] greater than the depth of the mold in which rodding is being performed, but not greater than 24 in. [600 mm] in overall length (Note 4). The rod shall have the tamping end or both ends rounded to a hemispherical tip of the same diameter as the rod.

NOTE 4—A rod length of 16 in. [400 mm] to 24 in. [600 mm] meets the requirements of the following: Practice C31/C31M, Test Method C138/C138M, Test Method C143/C143M, Test Method C173/C173M, and Test Method C231/C231M.

5.3 Measuring Device—A ruler, metal roll-up measuring tape, or similar rigid or semi-rigid length measuring instrument marked in increments of 1/4 in. [5 mm] or smaller. The instrument length shall be at least 12 in. [300 mm].

5.4 Scoop—of a size large enough so each amount of concrete obtained from the sampling receptacle is representative and small enough so it is not spilled during placement in the mold.

6. Sample

6.1 The sample of concrete from which test specimens are made shall be representative of the entire batch. It shall be obtained in accordance with Practice **C172/C172M**.

7. Procedure

7.1 Dampen the mold and place it on a rigid, flat, level, moist, nonabsorbent surface, free of vibration, and that is large enough to contain all of the slumped concrete. It shall be held firmly in place during filling and perimeter cleaning by the operator standing on the two foot pieces or by a clamping arrangement to a base plate as described in **5.1**. From the sample of concrete obtained in accordance with Section **6**, immediately fill the mold in three layers, each approximately one third the volume of the mold (See **Note 5**). Place the concrete in the mold using the scoop described in **5.4**. Move the scoop around the perimeter of the mold opening to ensure an even distribution of the concrete with minimal segregation.

NOTE 5—One third of the volume of the slump mold fills it to a depth of 2 $\frac{3}{8}$ in. [70 mm]; two thirds of the volume fills it to a depth of 6 $\frac{1}{8}$ in. [160 mm].

7.2 Rod each layer 25 times uniformly over the cross section with the rounded end of the rod. For the bottom layer, this will necessitate inclining the rod slightly and making approximately half of the strokes near the perimeter, and then progressing with vertical strokes spirally toward the center. Rod the bottom layer throughout its depth. For each upper layer, allow the rod to penetrate through the layer being rodded and into the layer below approximately 1 in. [25 mm].

7.3 In filling and rodding the top layer, heap the concrete above the mold before rodding is started. If the rodding operation results in subsidence of the concrete below the top edge of the mold, add additional concrete to keep an excess of concrete above the top of the mold at all times. After the top layer has been rodded, strike off the surface of the concrete by means of a screeding and rolling motion of the tamping rod. Continue to hold the mold down firmly and remove concrete from the area surrounding the base of the mold to preclude interference with the movement of slumping concrete. Remove the mold immediately from the concrete by raising it carefully in a vertical direction. Raise the mold a distance of 12 in. [300 mm] in 5 \pm 2 s by a steady upward lift with no lateral or torsional motion. Complete the entire test from the start of the filling through removal of the mold without interruption and complete it within an elapsed time of 2 $\frac{1}{2}$ min.

7.4 Immediately measure the slump by determining the vertical difference between the top of the mold and the displaced original center of the top surface of the specimen. If a decided falling away or shearing off of concrete from one side or portion of the mass occurs (**Note 6**), disregard the test and make a new test on another portion of the sample.

NOTE 6—If two consecutive tests on a sample of concrete show a falling away or shearing off of a portion of the concrete from the mass of the specimen, the concrete probably lacks necessary plasticity and cohesiveness for the slump test to be applicable.

8. Report

8.1 Report the slump in terms of inches [millimetres] to the nearest $\frac{1}{4}$ in. [5 mm] of subsidence of the specimen during the test.

9. Precision and Bias⁴

9.1 *Precision*—The estimates of precision for this test method are based upon results from tests conducted in Fayetteville, Arkansas by 15 technicians from 14 laboratories representing 3 states. All tests at 3 different slump ranges, from 1.0 in. [25 mm] to 6.5 in. [160 mm], were performed using one load of truck-mixed concrete. The concrete was delivered and tested at a low slump, with water then being added and mixed into the remaining concrete to independently produce moderate and finally high-slump concrete. The concrete mixture that used a No. 67 crushed limestone aggregate and a washed river sand, contained 500 lb of cementitious materials per cubic yard [297 kg of cementitious material per cubic metre]. The 500 lb [227 kg] were equally divided between a C150, Type I/II cement and a Class C fly ash. A double dosage of a chemical retarder was used in an attempt to minimize slump losses and maintain workability of the concrete. Concrete temperatures ranged from 86 to 93 °F [30 to 34 °C]. Slump losses averaged 0.68 in. [17 mm] during the 20 min required to perform a series of 6 tests at 1 slump range. Testing was performed alternately using metal and plastic molds, which were determined to produce comparable results. Precision data thus applies to both metal and plastic molds. A total of 270 slump tests were performed.

9.1.1 *Inch-Pound [SI]*—The data used to develop the precision statement were obtained using metric units (millimetres). The precision values shown in inch-pound units are conversions from the millimetre measurements, which were recorded to the nearest 1 mm.

9.1.2 *Measure of Variability*—The standard deviation was determined to be the most consistent measure of variability and was found to vary with the slump value.

9.1.3 *Single-Operator Precision*—The single-operator standard deviation represented by (1s) is shown in **Table 1** by

⁴ The test data used to develop this precision statement were based on tests performed in September 1997. Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:C09-1022. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

TABLE 1 Precision

Slump and Type Index	Standard Deviation (1s) ^a		Acceptable Range of Two Results (d2s) ^a	
	in.	[mm]	in.	[mm]
<i>Single-Operator Precision:</i>				
Slump 1.2 in. [30 mm]	0.23	[6]	0.65	[17]
Slump 3.4 in. [85 mm]	0.38	[9]	1.07	[25]
Slump 6.5 in. [160 mm]	0.40	[10]	1.13	[28]
<i>Multilaboratory Precision:</i>				
Slump 1.2 in. [30 mm]	0.29	[7]	0.82	[20]
Slump 3.4 in. [85 mm]	0.39	[10]	1.10	[28]
Slump 6.5 in. [160 mm]	0.53	[13]	1.50	[37]

^a These numbers represent, respectively, the (1s) and (d2s) limits as described in Practice **C670**.

average slump values. The reported results for the replicate readings apply to tests conducted by the same operator performing successive tests, one immediately following the other. Acceptable results of two properly conducted tests by the same operator on the same material (Note 7) will not differ from each other by more than the (d2s) value of the last column of Table 1 for the appropriate slump value and single-operator precision.

9.1.4 *Multilaboratory Precision*—The multilaboratory standard deviation represented by (1s) is shown in Table 1 by average slump values. The reported results for the replicate readings apply to tests conducted by different operators from different laboratories performing tests less than 4 min apart.

Therefore, acceptable results of two properly conducted slump tests on the same material (Note 7) by two different laboratories will not differ from each other by more than the (d2s) value of the last column of Table 1 for the appropriate slump value and multilaboratory precision.

NOTE 7—“Same materials,” is used to mean freshly mixed concrete from one batch.

9.2 *Bias*—This test method has no bias since slump is defined only in terms of this test method.

10. Keywords

10.1 concrete; concrete slump; cone; consistency; plasticity; slump; workability

SUMMARY OF CHANGES

Committee C09 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (C143/C143M – 15a) that may impact the use of this standard. (Approved June 1, 2020.)

(1) Revised 1.3.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>

Ensayos de hormigón fresco

Parte 2: Ensayo de asentamiento

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico CTN 83 *Hormigón*, cuya secretaría desempeña ANEFHOP.



UNE-EN 12350-2

Ensayos de hormigón fresco
Parte 2: Ensayo de asentamiento

Testing fresh concrete. Part 2: Slump test.

Essais pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement.

Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 12350-2:2019.

Esta norma anula y sustituye a la Norma UNE-EN 12350-2:2009.

Las observaciones a este documento han de dirigirse a:

Asociación Española de Normalización

Génova, 6
28004 MADRID-España
Tel.: 915 294 900
info@une.org
www.une.org

© UNE 2020

Prohibida la reproducción sin el consentimiento de UNE.

Todos los derechos de propiedad intelectual de la presente norma son titularidad de UNE.

Versión en español

**Ensayos de hormigón fresco
Parte 2: Ensayo de asentamiento**

Testing fresh concrete. Part 2: Slump test.

Essais pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement.

Prüfung von Frischbeton. Teil 2: Setzmaß.

Esta norma europea ha sido aprobada por CEN el 2019-04-29.

Los miembros de CEN están sometidos al Reglamento Interior de CEN/CENELEC que define las condiciones dentro de las cuales debe adoptarse, sin modificación, la norma europea como norma nacional. Las correspondientes listas actualizadas y las referencias bibliográficas relativas a estas normas nacionales pueden obtenerse en el Centro de Gestión de CEN/CENELEC, o a través de sus miembros.

Esta norma europea existe en tres versiones oficiales (alemán, francés e inglés). Una versión en otra lengua realizada bajo la responsabilidad de un miembro de CEN en su idioma nacional, y notificada al Centro de Gestión de CEN/CENELEC, tiene el mismo rango que aquéllas.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República de Macedonia del Norte, Rumanía, Serbia, Suecia, Suiza y Turquía.



COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation
Europäisches Komitee für Normung
CENTRO DE GESTIÓN: Rue de la Science, 23, B-1040 Brussels, Belgium

Índice

Prólogo europeo	5
1 Objeto y campo de aplicación.....	7
2 Normas para consulta.....	7
3 Términos y definiciones.....	7
4 Fundamento	7
5 Aparatos.....	7
6 Muestra de ensayo	8
7 Procedimiento	8
8 Resultados del ensayo	9
9 Informe del ensayo	10
10 Precisión	11
Bibliografía	12

Prólogo europeo

Esta Norma EN 12350-2 ha sido elaborada por el Comité Técnico CEN/TC 104 *Hormigón y productos relacionados*, cuya Secretaría desempeña SN.

Esta norma europea debe recibir el rango de norma nacional mediante la publicación de un texto idéntico a ella o mediante ratificación antes de finales de diciembre de 2019, y todas las normas nacionales técnicamente divergentes deben anularse antes de finales de diciembre de 2019.

Se llama la atención sobre la posibilidad de que algunos de los elementos de este documento estén sujetos a derechos de patente. CEN no es responsable de la identificación de dichos derechos de patente.

Esta norma anula y sustituye a la Norma EN 12350-2:2009.

Esta norma es de una serie sobre ensayos en hormigón.

La serie de la Norma EN 12350 incluye las partes siguientes:

- *Parte 1: Toma de muestras y aparatos comunes.*
- *Parte 2: Ensayo de asentamiento.*
- *Parte 3: Ensayo Vebe.*
- *Parte 4: Grado de compactibilidad.*
- *Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas.*
- *Parte 6: Densidad.*
- *Parte 7: Contenido de aire. Métodos de presión.*
- *Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.*
- *Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V.*
- *Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L.*
- *Parte 11: Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz.*
- *Parte 12: Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés.*

Se han realizado las siguientes modificaciones a la edición de 2009 de esta norma:

- a) revisión editorial;
- b) referencia a los aparatos comunes y sus especificaciones establecidas en la Norma EN 12350-1;
- c) referencia y procedimiento para los ensayos de mantenimiento del asentamiento;

- d) la opción de incluir en el informe la clase de asentamiento especificada o el valor objetivo de asentamiento.

De acuerdo con el Reglamento Interior de CEN/CENELEC, están obligados a adoptar esta norma europea los organismos de normalización de los siguientes países: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Islandia, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República de Macedonia del Norte, Rumanía, Serbia, Suecia, Suiza y Turquía.

1 Objeto y campo de aplicación

Este documento especifica un método para determinar la consistencia del hormigón fresco mediante el ensayo de asentamiento.

El ensayo de asentamiento es sensible a los cambios en la consistencia del hormigón cuando la medida del asentamiento se sitúa entre 10 mm y 210 mm. Más allá de estos valores extremos, la medición del asentamiento puede ser inadecuada y deberían considerarse otros métodos de medida de la consistencia.

Este ensayo no es apropiado si el asentamiento continúa produciéndose después de un período de 1 min después de la retirada del cono.

Este ensayo no es aplicable cuando el valor declarado de D de la fracción más gruesa del árido empleado en el hormigón ($D_{m\acute{a}x.}$) es mayor que 40 mm.

2 Normas para consulta

Los documentos indicados a continuación, en su totalidad o en parte, son normas para consulta indispensables para la aplicación de este documento. Para las referencias con fecha, solo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición (incluida cualquier modificación de esta).

EN 12350-1, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras y aparatos comunes.*

3 Términos y definiciones

No existen términos y definiciones en este documento.

ISO e IEC mantienen bases de datos terminológicas para su utilización en normalización en las siguientes direcciones:

- Electropedia de IEC: disponible en <http://www.electropedia.org/>
- Plataforma de búsqueda en línea de ISO: disponible en <http://www.iso.org/obp>

4 Fundamento

El hormigón fresco se compacta dentro de un cono. Cuando el cono se levanta en dirección vertical, el descenso producido por el asentamiento del hormigón da una medida de su consistencia.

5 Aparatos

5.1 Aparatos comunes para los ensayos de hormigón fresco

Los aparatos enumerados a continuación para la ejecución de este método de ensayo deben estar de acuerdo con las especificaciones indicadas en la Norma EN 12350-1 y con lo especificado a continuación:

5.1.1 Cono hueco

5.1.2 Barra de compactación**5.1.3 Embudo** (opcional).**5.1.4 Regla****5.1.5 Placa/superficie de base****5.1.6 Recipiente o bandeja de reamasado****5.1.7 Pala****5.1.8 Trapo húmedo****5.1.9 Cazo****5.1.10 Cronómetro****5.1.11 Recipiente hermético** (cuando tenga que medirse el mantenimiento del asentamiento).**5.1.12 Llana o fratás****6 Muestra de ensayo**

La muestra de hormigón se debe obtener según lo indicado en la Norma EN 12350-1.

La muestra debe homogeneizarse utilizando el recipiente o la bandeja de reamasado y la pala o el cazo antes de realizar el ensayo. Cuando la muestra se vaya a emplear para medir el mantenimiento del asentamiento para un tiempo especificado, el hormigón del recipiente hermético se debe vaciar en el recipiente o bandeja de reamasado y volver a mezclar usando la pala o el cazo antes de realizar el ensayo.

Las disposiciones vigentes en el lugar de uso del hormigón pueden proporcionar procedimientos alternativos de muestreo.

7 Procedimiento

Se humedece el cono y la placa de base, se elimina cualquier exceso de humedad con el trapo húmedo y se coloca el cono sobre la placa/superficie de base. Durante el proceso de llenado se sujeta el cono firmemente contra la placa/superficie de base, bien anclándolo a la base o bien pisando en las dos piezas de pie.

Se llena el cono en tres capas, de modo que cada una ocupe aproximadamente un tercio de la altura del cono una vez compactado el hormigón. Se compacta cada capa con 25 golpes con la barra de compactación. Se distribuyen uniformemente los golpes en la sección transversal de cada capa. Para la capa inferior, se necesitará inclinar ligeramente la barra de compactación y posicionar la mitad de los golpes aproximadamente en forma espiral hacia el centro. Se compacta la primera capa a lo largo de toda su altura teniendo cuidado de no golpear la base. Se compactan la segunda y la última capa a lo largo de toda su altura de forma que la barra penetre ligeramente en la capa inferior. En el llenado y compactación de la última capa, se procurará que el hormigón rebose antes de comenzar el proceso de compactación.

Si como consecuencia del proceso de compactación de la última capa resultase que falta hormigón y que por tanto está por debajo del nivel superior del cono, se añade más hormigón para que siempre haya exceso sobre el nivel superior del cono. Después de compactar la última capa, se enrasa la superficie del hormigón por medio de una acción de corte y rodillo de la barra de compactación.

Se retira el hormigón derramado sobre la placa/superficie de base. Se retira el cono levantándolo con cuidado en dirección vertical.

La operación de levantar el cono se realiza en un tiempo de 2 a 5 s, de una manera uniforme, sin causar al hormigón ningún movimiento lateral o de torsión.

La operación desde el comienzo del llenado del cono hasta la retirada del mismo se realiza sin interrupción y se completa en un tiempo no superior a 150 s.

Inmediatamente después de retirar el cono, se mide y se registra el asentamiento h determinando la diferencia entre la altura del cono y la del punto más alto de la masa de hormigón asentada, tal como se muestra en la figura 1.

La consistencia del hormigón cambia con el tiempo, debido a la hidratación del cemento y a la posible pérdida de humedad. Por tanto, ensayos sobre muestras diferentes deberían realizarse transcurrido el mismo intervalo de tiempo después del amasado si se quieren obtener resultados comparables.

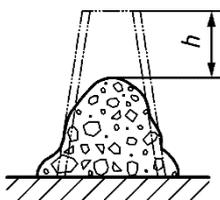
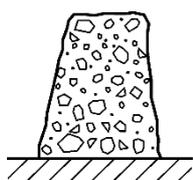
8 Resultados del ensayo

El ensayo solamente es válido si se produce un correcto asentamiento de la masa de hormigón, es decir, un asentamiento en el cual el hormigón permanece sustancialmente intacto y de forma simétrica, como se muestra en la figura 2 a).

Si se produce una caída lateral de la masa, como se muestra en la figura 2 b), el ensayo no es válido y se debe tomar otra muestra de hormigón y repetir el procedimiento.

Si dos ensayos consecutivos muestran que una parte del hormigón se desprende de la masa de ensayo, el hormigón carece de la necesaria plasticidad y cohesión para que el ensayo de asentamiento sea adecuado.

Se registra el asentamiento válido h , como se muestra en la figura 1, redondeado a los 10 mm.

**Figura 1 - Medida del asentamiento****a) Asentamiento simétrico****b) Asentamiento sesgado****Figura 2 - Formas de asentamiento**

9 Informe del ensayo

El informe debe incluir:

- a) referencia a esta norma;
- b) identificación de la muestra de ensayo;
- c) lugar de realización del ensayo;
- d) fecha de realización del ensayo;
- e) en el caso de ensayos de mantenimiento del asentamiento, la edad de la muestra desde el momento del primer contacto entre el cemento y el agua;
- f) tipo de asentamiento - simétrico/sesgado;
- g) asentamiento válido medido, redondeado a los 10 mm;
- h) cualquier desviación del método de ensayo normalizado;
- i) una declaración de la persona que ejecute el ensayo de que éste fue realizado de acuerdo con lo especificado en esta norma, excepto lo relacionado en el punto h).

El informe puede incluir adicionalmente:

- j) temperatura de la muestra de hormigón en el momento de realización del ensayo;
- k) hora del ensayo;
- l) clase de asentamiento especificada o valor objetivo de asentamiento especificado.

10 Precisión

Los valores sobre la precisión se incluyen en la tabla 1. Se aplican a mediciones del asentamiento inicial realizadas sobre hormigón de la misma muestra y cuando cada resultado de ensayo representa una única determinación. Los valores que se aplican cuando el resultado del ensayo se obtiene como media de dos determinaciones se dan en la tabla 2.

Tabla 1 – Valores de precisión para medidas del asentamiento (determinación única)

Intervalo (mm)	Condiciones de repetibilidad		Condiciones de reproducibilidad	
	s_r mm	r mm	s_R mm	R mm
50 a 80	5,8	16	9,0	25

Tabla 2 – Valores de precisión para medidas del asentamiento (determinación doble)

Intervalo (mm)	Condiciones de repetibilidad		Condiciones de reproducibilidad	
	s_r mm	r mm	s_R mm	R mm
50 a 80	4,1	11	8,0	22

NOTA 1 Los valores de precisión se obtuvieron de un experimento realizado en el Reino Unido en 1987 para varios de los ensayos descritos en la Norma BS 1881 [3]. El experimento se realizó con 16 operadores. Los hormigones se fabricaron utilizando un cemento Portland convencional, arena del Valle del Támesis, y árido grueso de 10 mm y 20 mm del Valle del Támesis.

NOTA 2 La diferencia entre dos resultados de ensayo obtenidos con la misma muestra y por el mismo operador, utilizando el mismo aparato y realizados los ensayos en el espacio de tiempo más breve posible, no excederá del valor de la repetibilidad r en una media de un caso en 20 casos de utilización normal y correcta del método.

NOTA 3 Los resultados de ensayo obtenidos por dos operadores sobre una misma muestra y obtenidos en el espacio de tiempo más breve posible utilizando sus propios equipos, no sobrepasarán el valor de la reproducibilidad R en más de un caso cada 20 casos de utilización normal y correcta del método.

NOTA 4 Para más información sobre la precisión, y para las definiciones de los términos estadísticos utilizados en relación con los términos de precisión, véase la Norma ISO 5725-1 [1].

NOTA 5 En 2013, empresas constructoras suizas llevaron a cabo una campaña interlaboratorios de 7 ensayos con 53 participantes. Los datos de precisión y reproducibilidad de estas pruebas se pueden encontrar en el documento VAB-Round robin test document N° 2-1-038-01.14 [2]

Bibliografía

- [1] ISO 5725-1, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: General principles and definitions.*
- [2] VAB-Ringversuch Dok. Nr. 2-1-038-01.14 The Association of Accredited Building Material Testing Laboratories 2013.
- [3] Series BS 1881, *Testing concrete.*

Para información relacionada con el desarrollo de las normas contacte con:

Asociación Española de Normalización
Génova, 6
28004 MADRID-España
Tel.: 915 294 900
info@une.org
www.une.org

Para información relacionada con la venta y distribución de las normas contacte con:

AENOR INTERNACIONAL S.A.U.
Tel.: 914 326 000
normas@aenor.com
www.aenor.com



organismo de normalización español en:

