



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA

---

# Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales.

Tesis Doctoral - Valencia, mayo 2016

---

Autor: Ferran Navarro Ferrer

Director: Víctor Yepes Piqueras



# Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a Víctor Yepes Piqueras, director de esta tesis, su dedicación y apoyo, sin los cuales no hubiera sido posible culminar la misma.

Al personal de HORMIGONES CARLET S.L., en especial a José Antonio Cabrera Tapia, por su ayuda y colaboración en este trabajo de investigación.

Finalmente, a mi familia, por el apoyo y comprensión recibido durante todo el período de realización de la tesis.



# Resumen

En la actualidad el hormigón es el material más empleado en la construcción debido a su moldeabilidad, a su capacidad de resistir esfuerzos de compresión y a su economía. Las prestaciones del hormigón dependen de su composición, de las condiciones de curado y del método y condiciones de mezclado. Las especificaciones básicas del hormigón demandadas por el peticionario al fabricante son la resistencia a compresión y la consistencia, que indica la trabajabilidad del mismo. Esta tesis es una contribución al conocimiento y la investigación de la influencia de diferentes parámetros en la resistencia a compresión y la consistencia del hormigón fabricado en condiciones industriales y la elaboración de modelos predictivos de dichas características prestacionales.

La mayor parte de los hormigones que se emplean en construcción se fabrican en centrales de hormigón preparado o en centrales de obra, y se corresponden con hormigones de resistencia entre 25 y 30  $N/mm^2$ , consistencia blanda o fluida, colocación mediante vertido o bombeo y compactación mediante vibración. Las condiciones de producción de hormigones en planta se ven afectadas por los condicionantes del proceso industrial y del negocio en sí, siendo controlada la cantidad de agua existente en la mezcla indirectamente.

En este trabajo se presenta una extensa base de datos construida con miles de resultados de ensayos de resistencia a compresión y consistencia realizados sobre hormigones fabricados en la misma planta y con diferentes dosificaciones, tipos de cemento y aditivos. Se tienen en consideración otros aspectos como la inclusión de fibras, la temperatura ambiente y del hormigón o la hora de realización de las probetas. Se crea una segunda base de datos de ensayos realizados en un periodo de tiempo corto con el mismo cemento y aditivo y teniendo en cuenta la relación agua/cemento exacta. Además, se ha realizado la conveniente caracterización de los materiales constituyentes de los hormigones ensayados.

Para analizar la influencia de los diferentes parámetros y factores tecnológicos y ambientales en la resistencia a compresión, en la evolución de la misma con el tiempo y en la consistencia del hormigón, se ha utilizado primeramente estadística clásica, concretamente análisis de regresión lineal múltiple, análisis de varianza (ANOVA) y análisis multivariante. También se ha verificado el ajuste de los da-

---

tos experimentales a modelos existentes en la bibliografía y a nuevos modelos de comportamiento propuestos.

Finalmente se han elaborado redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a compresión o la consistencia de un hormigón en función de diversas variables de entrada, al igual que para la obtención de modelos de comportamiento. Los resultados obtenidos mediante la aplicación de redes neuronales artificiales han sido más eficientes y mejores que los obtenidos mediante métodos estadísticos.

# Abstract

Nowadays concrete is the most used material in construction. This is because of its malleability, its ability to resist compressive and its economy. The benefits of concrete depend on its composition, curing conditions and the blending method and conditions. The basic specifications of this material, demanded by the petitioner to the manufacturer, are the compressive strength and the consistency, which indicates the workability. This thesis is a contribution to the knowledge and research of the influence that different parameters have on the compressive strength and on the consistency of the concrete produced in industrial conditions, and also contributes to the performance of predictive modelling with these characteristics.

Most of the concrete used in construction is manufactured in ready-mixed concrete plants or in plants of construction. The characteristics of this concrete are the following: a strength between 25 and 30  $N/mm^2$ , soft or fluid consistency, placed by pouring or pumping and compacted by vibration. The conditions of production on the plant are affected by conditions of the industrial process and the business itself; being the amount of water in the mixture indirectly controlled.

This paper presents an extensive database of thousands of test results on compressive resistance and consistency of the concrete produced in the same plants and varying the dosage, type of cement and additives. There are also taken into account other aspects such as the inclusion of fibres, the concrete and room temperature or when the concrete specimens are made. A second database is created by tests performed on a short period of time with the same cement and additive and taking into account the exact water-cement relationship. Furthermore, a convenient characterization of the constituent materials of the tested concrete has been done.

To analyse the influence of different parameters and technological and environmental factors on the compressive strength, in the evolution of it over time, and on the consistency of concrete, firstly classical statistics has been used, more precisely multiple linear regression, analysis of variance (ANOVA) and multivariate analysis have been used. It has also been verified the fit of the experimental data to the models existing in literature and to the new proposed behaviour models.

---

Finally artificial neural networks have been developed to predict the compressive strength or the consistency of concrete depending on input variables, as well as for obtaining behaviour models. The results obtained by the application of artificial neural networks are proofed to be more efficient and better than those obtained by statistical methods.

# Resum

Actualment el formigó és el material més empleat en la construcció gràcies a ser moldejable, a la seua capacitat de resistir esforços de compresió i a la seua economia. Les prestacions del formigó depenen de la seua composició, de les condicions de curat i del mètode i condicions de mesclat. Les especificacions bàsiques demandades pel peticionari al fabricant són la resistència a la compresió i la consistència, que indica la treballabilitat del mateix. Aquesta tesi és una contribució al coneixement i a la investigació de la influència de diferents paràmetres en la resistència a la compresió i la consistència del formigó fabricat en condicions industrials i l'elaboració de models predictius d'aquestes característiques prestacionals.

La major part dels formigons empleats en la construcció es fabriquen en centrals de formigó preparat o en centrals d'obra, i es corresponen amb formigons de resistència entre 25 i 30  $N/mm^2$ , consistència tova o fluida, colocació mitjançant versament o bombament i compactació mitjançant vibració. Les condicions de producció de formigó en planta es venen afectades pels condicionants del procés industrial i del negoci en si, sent controlada la quantitat d'aigua existent en la mescla indirectament.

Aquest treball presenta una extensa base de dades construïda amb milers de resultats d'assajos de resistència a compresió i consistència realitzats sobre formigons fabricats en la mateixa planta i amb diferents dosificacions, tipus de ciment i additius. Es tenen en compte altres aspectes com la inclusió de fibres, la temperatura ambient i del formigó o l'hora de realització de les probetes. Es crea una segona base de dades d'assajos realitzats en un període de temps curt amb el mateix ciment i additiu i tenint en compte la relació aigua/ciment exacta. A més a més, s'ha realitzat la caracterització corresponent dels materials constituents dels formigons assajats.

Per a analitzar la influència dels diferents paràmetres i factors tecnològics i ambientals en la resistència a compresió, en l'evolució d'aquesta en el temps i en la consistència del formigó, s'ha utilitzat l'estadística clàssica, concretament anàlisi de regressió lineal múltiple, anàlisi de variància (ANOVA) i anàlisi multivariant. Alhora, s'ha verificat l'ajustament de les dades experimentals a models existents en la bibliografia i a nous models de comportament proposats.

---

Finalment s'han elaborat xarxes neuronals artificials per a predir la resistència a la compressió o la consistència d'un formigó en funció de diverses variables d'entrada, al igual que per a l'obtenció de models de comportament. Els resultats obtinguts mitjançant l'aplicació de xarxes neuronals artificials han sigut més eficients i millors que els obtinguts mitjançant mètodes estadístics.

# Índice general

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 LOS ORÍGENES	3
1.3 ANÁLISIS DEL SECTOR	7
1.3.1 Introducción	7
1.3.2 Sector cementero	8
1.3.3 Áridos	10
1.3.4 Hormigón	11
1.4 OBJETIVOS	12
1.5 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	14
2 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	17
2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2 COMPONENTES DEL HORMIGÓN	17
2.2.1 Cemento como conglomerante hidráulico	17
2.2.2 Los áridos y su influencia en las características del hormigón	24
2.2.3 El agua y su papel en el hormigón	32
2.2.4 Aditivos	39
2.2.5 Hormigones con fibras	44
2.3 PROCESOS INDUSTRIALES DE PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN	50
2.3.1 Introducción	50
2.3.2 Almacenamiento de los componentes	51
2.3.3 Instalaciones de dosificación	51
2.3.4 Equipos de mezclado	53
2.3.5 Control de la consistencia y dosificación en agua del hormigón	57

2.3.6 Efectos de los parámetros de mezclado . . . . .	61
2.4 METODOLOGÍAS DE DOSIFICACIÓN . . . . .	63
2.5 REOLOGÍA DE HORMIGONES . . . . .	75
2.5.1 Aspectos reológicos de hormigones . . . . .	75
2.5.2 Factores que modifican el comportamiento reológico . . . . .	77
2.5.3 Determinación de la consistencia del hormigón . . . . .	80
2.5.4 Otros ensayos para medir la trabajabilidad del hormigón . . . . .	83
2.5.5 Reómetros de hormigón . . . . .	88
2.5.6 Medición de la trabajabilidad del hormigón en los camiones hormigonera . . . . .	93
2.6 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN. . . . .	96
2.7 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN . . . . .	102
2.8 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON EL TIEMPO. . . . .	107
2.9 MODELOS PREDICTIVOS: APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES. . . . .	111
3 MATERIALES, NORMATIVA, PROCEDIMIENTOS, INSTALACIONES Y ENSAYOS . . . . .	119
3.1 INTRODUCCIÓN . . . . .	119
3.2 MATERIALES UTILIZADOS . . . . .	120
3.2.1 Cementos. . . . .	120
3.2.2 Áridos. . . . .	122
3.2.3 Arena normalizada . . . . .	125
3.2.4 Agua . . . . .	125
3.2.5 Aditivos Plastificantes/Superplastificantes. . . . .	125
3.2.6 Fibras . . . . .	128
3.3 NORMATIVAS HORMIGÓN. . . . .	129
3.4 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES . . . . .	137
3.4.1 Ensayos caracterización de cementos . . . . .	137
3.4.2 Ensayos caracterización de áridos . . . . .	138
3.4.3 Ensayos caracterización de aditivos . . . . .	141
3.5 PROCEDIMIENTO INDUSTRIAL PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES DE PLANTA . . . . .	141
3.5.1 Introducción . . . . .	141
3.5.2 Almacenamiento . . . . .	142

3.5.3 Dosificación . . . . .	145
3.5.4 Mezclado . . . . .	146
3.5.5 Verificación de la trabajabilidad del hormigón en los camiones hormigonera	147
3.6 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES. . . . .	150
3.6.1 Fabricación, curado y preparación de probetas . . . . .	150
3.6.2 Determinación de la consistencia del hormigón. . . . .	152
3.6.3 Determinación de la densidad del hormigón. . . . .	153
3.6.4 Determinación de la resistencia a compresión del hormigón . . . . .	153
3.7 ENSAYOS INTERLABORATORIOS . . . . .	155
4 RESULTADOS DE ENSAYOS Y BASES DE DATOS . . . . .	159
4.1 INTRODUCCIÓN . . . . .	159
4.2 HORMIGÓN . . . . .	159
4.3 CEMENTOS . . . . .	162
4.4 ADITIVOS . . . . .	169
4.5 ÁRIDOS. . . . .	171
4.5.1 Granulometrías y módulos granulométricos . . . . .	171
4.5.2 Resumen valores de los ensayos de caracterización de los áridos . . . . .	175
5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS . . . . .	181
5.1 INTRODUCCIÓN . . . . .	181
5.2 METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES DE PLANTA . . . . .	182
5.3 CÁLCULO DEL AGUA PARA HORMIGONES DE PLANTA PRODUCIDOS INDUSTRIALMENTE. . . . .	190
5.4 ESTUDIO ESTADÍSTICO CLÁSICO . . . . .	194
5.4.1 Introducción . . . . .	194
5.4.2 Resistencia a compresión del hormigón. Influencia de diferentes variables y modelos estadísticos. . . . .	196
5.4.3 Influencia de la temperatura en la resistencia a compresión del hormigón. .	209
5.4.4 Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo. . . . .	215
5.4.5 Influencia de la relación cemento/agua en la resistencia a compresión del hormigón . . . . .	221
5.4.6 Análisis estadístico descriptivo de la resistencia a compresión. . . . .	225
5.4.7 Análisis de varianza . . . . .	228
5.4.8 Análisis multivariante . . . . .	238

5.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA) . . . . .	243
5.5.1 Introducción . . . . .	243
5.5.2 Funcionamiento RNA . . . . .	244
5.5.3 Tipos de redes neuronales artificiales . . . . .	246
5.5.4 Número de neuronas de la capa oculta . . . . .	247
5.5.5 Aprendizaje de la red neuronal . . . . .	248
5.5.6 Sobreaprendizaje de la red . . . . .	250
5.5.7 Datos de entrenamiento, validación y test . . . . .	250
5.5.8 Estandarización de los datos . . . . .	251
5.5.9 Evaluación del desempeño de la RNA . . . . .	252
5.6 APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES . . . . .	252
5.6.1 Elaboración de las redes neuronales artificiales . . . . .	252
5.6.2 Resumen de la aplicación de las redes neuronales artificiales. . . . .	283
6 CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN . . . . .	287
6.1 CONCLUSIONES GENERALES . . . . .	287
6.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS. . . . .	288
6.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN . . . . .	290
Bibliografía y normativa . . . . .	293
A BASES DE DATOS . . . . .	331
B COMPARACIONES MÚLTIPLES . . . . .	341

# Índice de figuras

1.1. Patentes de sistemas de hormigón armado (Christophe 1902). . . .	4
1.2. Anuncio cemento ( <i>El Cemento Armado</i> 1903) y puente de Ribera en Valencia de Don Juan (León) (Ribera 1910). . . . .	5
1.3. Mezcladora Coignet (CIMbéton 2009) y mezcladora planetaria (Nold y Löbe 2004). . . . .	6
1.4. Camión hormigonera, hacia 1930 (Karrena 2007). . . . .	6
1.5. Patente del pretensado,1928 (Freyssinet 1993) y logotipo vigueta pretensada, década 1940. . . . .	7
1.6. Evolución del consumo de cemento en España (Oficemen 2015). . .	8
1.7. Evolución de la producción de cemento por tipología y por clase resistente (Oficemen 2014). . . . .	9
2.1. Influencia de las constantes $p$ y $q$ en la resistencia a compresión del hormigón y de la matriz. . . . .	28
2.2. Efecto del volumen de áridos sobre la resistencia a compresión del hormigón (Stock <i>y col.</i> 1979). . . . .	32
2.3. El rol físico del agua en la mezcla (Klein 2012). . . . .	34
2.4. Elección de $A_{pt}$ con base en el tiempo de puesta en obra (Klein 2012). . . . .	36
2.5. Cálculo de espesor equivalente de agua de mojado (Klein 2012). . .	37
2.6. Cálculo del volumen de agua de fluidificación (Klein 2012). . . . .	38
2.7. Comportamiento típico de un HRFA a compresión, $f_{cm} = 42 \text{ N/mm}^2$ (König y Kützing 1999). . . . .	46

2.8. Influencia del contenido en fibras de polipropileno en la resistencia a compresión del hormigón (Fernández Cánovas 2013). . . . .	49
2.9. Turbomezcladoras de eje vertical. . . . .	54
2.10. Mezcladoras de tren planetario. . . . .	55
2.11. Mezcladoras de eje horizontal. . . . .	55
2.12. Mezcladoras cónicas. . . . .	57
2.13. Indicación de la potencia consumida por la mezcladora. . . . .	58
2.14. Evolución en el tiempo de la potencia consumida por la mezcladora (Cazacliu y Ventura 2010). . . . .	59
2.15. Sondas. . . . .	60
2.16. Evolución de la señal en función de la dosificación de agua en el hormigón (Brunquet y Cazacliu 2007). . . . .	61
2.17. Relación entre el módulo granulométrico y la resistencia del hormigón (Jiménez Montoya <i>y col.</i> 2010). . . . .	74
2.18. Husos granulométricos DIN 1045-1, tamaño máximo de partícula 16 mm. . . . .	75
2.19. Ensayo de asentamiento en cono de Abrams. . . . .	81
2.20. Consistómetro Vebe MATEST. . . . .	84
2.21. Manejabilímetro LCL para medir la docilidad del hormigón MATEST. . . . .	86
2.22. Ensayo de consistencia del hormigón fresco con la mesa de sacudidas (Adaptada de UNE-EN12350-5:2009). . . . .	87
2.23. Diferentes modelos de reómetros típicos (Koehler y Fowler 2006). . . . .	89
2.24. Reómetro BTRHEOM. . . . .	90
2.25. Reómetro ICAR. . . . .	91
2.26. Interfaz software reómetro ICAR. . . . .	92
2.27. Resultados de ensayo de incremento de esfuerzo con el reómetro ICAR. . . . .	93
2.28. Algunas patentes de dispositivos de medida en la cuba de la trabajabilidad del hormigón (Amziane <i>y col.</i> 2006b). . . . .	94

2.29. Influencia de la temperatura en la resistencia del hormigón a compresión (Verbeck y Helmuth 1968) (Neville 1995). . . . .	96
2.30. Influencia de la temperatura inicial de curado en la resistencia final del hormigón (Jalali y Abyaneh 1995). . . . .	97
2.31. Efecto de la temperatura en la demanda de agua del hormigón. Adaptado de Vaquero (2003). . . . .	98
2.32. Efecto de la temperatura en la consistencia del hormigón. Adaptado de Vaquero (2003). . . . .	99
2.33. Resistencia a 7 días en función de la relación $c/a$ para hormigones elaborados con cemento Portland de altas resistencias iniciales (Neville 1995). . . . .	105
3.1. Instalación tratamiento de áridos. . . . .	123
3.2. Áridos. . . . .	124
3.3. Áridos gruesos. . . . .	124
3.4. Arenas normalizadas. . . . .	125
3.5. Fibras utilizadas en la fabricación de hormigones. . . . .	128
3.6. Realización de morteros para determinación de resistencias mecánicas cementos. . . . .	137
3.7. Probetas para determinación de resistencias mecánicas cementos. . . . .	137
3.8. Cintas pesadoras y cinta extractora de áridos. . . . .	142
3.9. Esquema de almacenamiento y descarga de áridos a cinta extractora (1). . . . .	143
3.10. Esquema de almacenamiento y descarga de áridos a cinta extractora (2). . . . .	144
3.11. Elementos de almacenamiento y dosificación de cemento. . . . .	145
3.12. Elementos de dosificación en planta. . . . .	146
3.13. Planta de hormigón y mezcladora. . . . .	147
3.14. Interior de la mezcladora y amperímetro. . . . .	148
3.15. Mando de control y sensores del tambor del camión hormigonera. . . . .	148
3.16. Mando de control del tambor del camión hormigonera (Baryval 2004). . . . .	149

3.17. Detalle del selector de velocidad del tambor “ <i>Constant Speed Drive</i> ” (Baryval 2004). . . . .	149
3.18. Manómetro de presión, sensores y selector de velocidad del tambor.	150
3.19. Fabricación y elaboración de probetas. . . . .	151
3.20. Protección y curado de probetas. . . . .	151
3.21. Refrentado de probetas. . . . .	152
3.22. Grupo de probetas refrentadas. . . . .	152
3.23. Prensa de rotura de probetas. . . . .	154
3.24. Detalle probetas ensayadas. . . . .	154
4.1. Recuento de dosificaciones realizadas con cada cemento. . . . .	163
4.2. N° de dosificaciones de cada tipo de cemento empleado. . . . .	164
4.3. N° de dosificaciones de cada clase resistente. . . . .	164
4.4. Resistencia verdadera de los cementos utilizados. . . . .	166
4.5. Resistencia verdadera del cemento N° 25. . . . .	167
4.6. Resistencia verdadera del cemento N° 14. . . . .	167
4.7. Resistencia verdadera del cemento N° 7. . . . .	167
4.8. Tiempo de fluidez del cono de Marsh para los cementos CEM II/A- V 42,5R Holcim y Cemex. . . . .	170
4.9. Ensayo del cono de Marsh. . . . .	171
4.10. Curva granulométrica AF-0/4-T. . . . .	171
4.11. Curva granulométrica AF-0/4-R. . . . .	172
4.12. Curva granulométrica GR-4/8-M. . . . .	172
4.13. Curva granulométrica GR-6/12-M. . . . .	173
4.14. Curva granulométrica GR-10/16-M. . . . .	173
4.15. Curva granulométrica GR-16/25-M. . . . .	174
4.16. Curva granulométrica GR-20/32-M. . . . .	174

5.1. Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 16 mm.	183
5.2. Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 20 mm.	184
5.3. Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 25 mm.	184
5.4. Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 31,5 mm.	185
5.5. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 16 mm a las curvas de Fuller con $q = 0,5$ y Teórica con $q = 0,37$ .	186
5.6. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 16 mm a la curva de Bolomey.	186
5.7. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 20 mm a las curvas de Fuller con $q = 0,5$ y Teórica con $q = 0,37$ .	187
5.8. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 20 mm a la curva de Bolomey.	187
5.9. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 25 mm a las curvas de Fuller con $q = 0,5$ y Teórica con $q = 0,37$ .	188
5.10. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 25 mm a la curva de Bolomey.	188
5.11. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 31,5 mm a las curvas de Fuller con $q = 0,5$ y Teórica con $q = 0,37$ .	189
5.12. Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 31,5 mm a la curva de Bolomey.	189
5.13. Resistencia a compresión a 7 días en función de la temperatura ambiente (Todos los ensayos).	196
5.14. Resistencia a compresión a 28 días en función de la temperatura ambiente (Todos los ensayos).	197
5.15. Resistencia a compresión a 7 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-25).	197
5.16. Resistencia a compresión a 28 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-25).	198
5.17. Resistencia a compresión a 7 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-30).	199
5.18. Resistencia a compresión a 28 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-30).	199

5.19. Resistencia a compresión a 7 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos). . . . .	200
5.20. Resistencia a compresión a 28 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos). . . . .	200
5.21. Modelo cuadrático resistencia a compresión a 7 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos). . . . .	201
5.22. Modelo cuadrático resistencia a compresión a 28 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos). . . . .	201
5.23. Resistencia a compresión a 7 días en función del cono de Abrams (Todos los ensayos). . . . .	202
5.24. Resistencia a compresión a 28 días en función del cono de Abrams (Todos los ensayos). . . . .	202
5.25. Evolución de la temperatura ambiente durante el estudio (HA-25). . . . .	209
5.26. Evolución de la resistencia a 28 días por meses durante el estudio (HA-25). . . . .	210
5.27. Evolución de la resistencia a 7 días por meses durante el estudio (HA-25). . . . .	210
5.28. Evolución del cono de Abrams por meses durante el estudio (HA-25). . . . .	211
5.29. Relación entre la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón. . . . .	211
5.30. Evolución de la temperatura ambiente durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2). . . . .	212
5.31. Evolución de la resistencia a 28 días por meses durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2). . . . .	212
5.32. Evolución de la resistencia a 7 días por meses durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2). . . . .	213
5.33. Evolución del cono de Abrams por meses durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2). . . . .	213
5.34. Evolución del porcentaje de cemento por meses durante la duración del estudio (HA-25). . . . .	214
5.35. Evolución del porcentaje de cemento por meses durante la duración del estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2). . . . .	214

5.36. Ajuste del modelo Neville a los valores experimentales obtenidos en el estudio (solo ensayos a 7 y 28 días). . . . .	216
5.37. Ajuste del modelo ACI 209R-92 a los valores experimentales obtenidos en el estudio (solo ensayos a 7 y 28 días). . . . .	217
5.38. Ajuste del modelo BAEL-BPEL a los valores experimentales obtenidos en el estudio (solo ensayos a 7 y 28 días). . . . .	218
5.39. Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días). . . . .	219
5.40. Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días y cemento 14). . . . .	220
5.41. Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días y cemento 7). . . . .	220
5.42. Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días y cemento 25). . . . .	221
5.43. Resistencia a 7 días en función de la relación $c/a$ para todas las muestras. . . . .	223
5.44. Resistencia a 28 días en función de la relación $c/a$ para todas las muestras. . . . .	223
5.45. Resistencia a 28 días en función de la relación $c/a$ para diferentes cantidades de cemento. . . . .	224
5.46. Resistencia a 28 días en función de la relación $c/a$ para $tb0 = 0,13$ . . . . .	224
5.47. Resumen estadístico descriptivo para $f_{c28}$ en hormigones HA-25. . . . .	225
5.48. Resumen estadístico descriptivo para $f_{c28}$ en hormigones HA-25 (mes de junio). . . . .	226
5.49. Resumen estadístico descriptivo para $f_{c28}$ en hormigones HA-25 (mes de julio). . . . .	226
5.50. Resumen estadístico descriptivo para $f_{c28}$ en hormigones HA-30. . . . .	227
5.51. Gráfica de normalidad para la resistencia a 28 días en hormigones HA-25. . . . .	227
5.52. Gráfica de normalidad para la resistencia a 28 días en hormigones HA-30. . . . .	228
5.53. Influencia del tipo de cemento en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días $f_{c28}$ . . . . .	231

5.54. Influencia del tipo de fibras en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días $f_{c28}$ . . . . .	232
5.55. Influencia del tipo de aditivo en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días $f_{c28}$ . . . . .	232
5.56. Influencia del tipo de cemento en la resistencia a compresión del hormigón a 7 días $f_{c7}$ . . . . .	233
5.57. Influencia del tipo de fibras en la resistencia a compresión del hormigón a 7 días $f_{c7}$ . . . . .	233
5.58. Influencia del tipo de aditivo en la resistencia a compresión del hormigón a 7 días $f_{c7}$ . . . . .	234
5.59. Topología modelo de una red neuronal artificial. . . . .	243
5.60. Funcionamiento de una neurona artificial $k$ (Haykin 1999). . . . .	245
5.61. Tipología de funciones de transferencia. . . . .	246
5.62. Coeficientes de correlación. . . . .	254
5.63. Entorno red neuronal en Matlab R2013b. . . . .	256
5.64. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 1 y RNA 2. . . . .	261
5.65. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 3 y RNA 4. . . . .	261
5.66. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 5 y RNA 6. . . . .	262
5.67. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 7 y RNA 8. . . . .	263
5.68. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 9 y RNA 10. . . . .	264
5.69. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 11 y RNA 12. . . . .	264
5.70. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 13 y RNA 14. . . . .	267
5.71. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 15 y RNA 16. . . . .	268
5.72. Ajuste de las red neuronal artificial RNA 17 - $f_{c28}$ corregida. . . . .	269
5.73. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 18 y RNA 19. . . . .	270
5.74. Superficie de respuesta de la red neuronal RNA 20. . . . .	271
5.75. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 21 y RNA 22. . . . .	272
5.76. Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 23 y RNA 24. . . . .	273
5.77. Superficie de respuesta de la red neuronal artificial RNA 25. . . . .	274

5.78. Superficie de respuesta de la red neuronal artificial RNA 26. . . . .	274
5.79. Resistencias a compresión en función de la hora de realización de la probeta para invierno y verano: a)HA-25 y b)HA-30 (Cánoves 2012).276	
5.80. Resistencia y asentamiento en función de la hora de realización de la probeta para invierno y verano (Ortiz 2005). . . . .	276
5.81. Correlación entre valores calculados en la RNA 27 y experimentales para la $f_{c28}$ de la base de datos reducida. . . . .	278
5.82. Valores medios de las resistencias experimentales y calculadas con diferentes modelos. . . . .	280
5.83. Intervalos de confianza de la resistencias experimentales y calculadas con diferentes modelos. . . . .	281



# Índice de tablas

1.1. Canales de distribución del cemento en España (Adaptado de Oficemen 2014). . . . .	9
1.2. Consumo en $Mt$ de cemento en el año 2014 para algunos países de la UE (Adaptada de Oficemen 2015). . . . .	10
1.3. Porcentajes de hormigones empleados según $f_{ck}$ en la Comunidad de Madrid (Adaptada de Ortega 2010). . . . .	11
1.4. Porcentajes de hormigones ensayados según tipo de la EHE-08 (Ortega 2010). . . . .	11
1.5. Producción en millones de $m^3$ de hormigón en algunos países (Adaptada de ERMCO 2014). . . . .	12
2.1. Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes (RC-08). . . . .	20
2.2. Valores de la resistencia a compresión promedio de rocas de uso común en la fabricación de hormigón. . . . .	27
2.3. Tamaños máximos y mínimos de los áridos según EHE-08. . . . .	31
2.4. Valores de $K$ para áridos calizos de diferentes granulometrías. . . . .	35
2.5. Evolución histórica y características de los aditivos reductores de agua . . . . .	42
2.6. Propiedades de los distintos tipos de fibras utilizadas en refuerzos de hormigón. . . . .	45
2.7. Tolerancias de dosificación según la norma UNE-EN206-1: (2008) y la EHE-08. . . . .	52
2.8. Instalaciones de dosificación utilizadas para distintos materiales constituyentes. . . . .	52

2.9. Módulo granulométrico de áridos que siguen la parábola de Fuller.	73
2.10. Valores parámetros tensión umbral en función de la concentración relativa. . . . .	79
2.11. Coeficientes para el cálculo del asentamiento en cono de Abrams. .	82
2.12. Valores umbral de cizalla para diferentes aplicaciones (de Larrard 2000). . . . .	83
2.13. Clases de consistencia según el tiempo Vebe. . . . .	84
2.14. Relación entre el asiento en cono de Abrams y el tiempo Vebe (Delibes 1993). . . . .	85
2.15. Clases de consistencia según el grado de compactabilidad (Adaptada de UNE-EN206-1:2008). . . . .	87
2.16. Clases de consistencia según el ensayo de mesa de sacudidas (UNE-EN206-1: 2008). . . . .	88
2.17. Relación de resistencias en función de la temperatura y la resistencia característica del hormigón en el estudio de Gómez y Vidal (2006).	100
2.18. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con la edad (EHE-99). . . . .	107
2.19. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con la edad. Adaptada de ECP (2009). . . . .	108
2.20. Valores de las constantes $A$ y $B$ para el cálculo de la resistencia a compresión del hormigón según la temperatura inicial de curado (Cánoves <i>y col.</i> 2012). . . . .	110
2.21. Valores de las constantes $a$ y $b$ según el modelo ACI 209R-92 para condiciones medias de curado. . . . .	111
2.22. Valores de las constantes $a$ y $b$ según las normas francesas de hormigón (BAEL y BPEL). . . . .	111
3.1. Características de los cementos empleados en el estudio (Cuadro elaborado a partir de datos facilitados por los fabricantes). . . . .	122
3.2. Resultados del ensayo de superficie específica Blaine en los cementos empleados en el estudio (Cuadro elaborado a partir de datos facilitados por los fabricantes). . . . .	122
3.3. Características de los aditivos utilizados (Cuadro elaborado a partir de datos facilitados por los fabricantes). . . . .	127

3.4. Propiedades de las fibras de polipropileno facilitadas por el fabricante.	128
3.5. Valores de geometría de las fibras onduladas de acero para hormigón obtenidos de la ficha técnica facilitada por el fabricante. . . . .	129
3.6. Consistencias y valores límite de asentamiento (Adaptada EHE-08).	130
3.7. Comprobación de la homogeneidad del hormigón (Tabla 71.2.4 de la EHE-08). . . . .	132
3.8. Tamaño máximo de los lotes de control de la resistencia, para hormigones sin distintivo de calidad oficialmente reconocido (Tabla 86.5.4.1 de la EHE-08). . . . .	133
3.9. Conformidad del lote en función de la resistencia (Tabla 86.5.4.2 de la EHE-08). . . . .	134
3.10. Criterios para la aceptación del lote (Tabla 86.5.4.3a de la EHE-08).	135
3.11. Criterios para la aceptación del lote (Tabla 86.5.4.3b de la EHE-08).	135
3.12. Valores estadísticos ensayos interlaboratorios. . . . .	157
3.13. Resultados enviados por los laboratorios y laboratorio propio L.P.	158
4.1. Composición de los distintos tipos de cementos comunes según la norma UNE-EN197-1: (2011). . . . .	165
4.2. Resultados ensayos resistencia cemento. . . . .	168
4.3. Frecuencia de aditivos utilizados. . . . .	169
4.4. Ensayo del cono de Marsh para el cemento CEM II/A-V 42,5R de Holcim. . . . .	170
4.5. Ensayo del cono de Marsh para el cemento CEM II/A-V 42,5R de Cemex. . . . .	170
4.6. Parámetros estadísticos del módulo granulométrico de los áridos gruesos empleados en el estudio. . . . .	176
4.7. Parámetros estadísticos del módulo granulométrico de las arenas empleadas. . . . .	176
4.8. Parámetros estadísticos del valor del equivalente de arena (EA) de las arenas empleadas. . . . .	176
4.9. Parámetros estadísticos del valor de la humedad de las arenas empleadas. . . . .	177

4.10. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido fino AF-0/4-T.	177
4.11. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido fino AF-0/4-T. . . . .	177
4.12. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido fino AF-0/4-L.	177
4.13. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido fino AF-0/4-L. . . . .	178
4.14. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-4/8-M. . . . .	178
4.15. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-4/8-M. . . . .	178
4.16. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-6/12-M. . . . .	178
4.17. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-6/12-M. . . . .	179
4.18. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-10/16-M. . . . .	179
4.19. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-10/16-M. . . . .	179
4.20. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-16/25-M. . . . .	179
4.21. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-16/25-M. . . . .	180
4.22. Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-20/32-M. . . . .	180
4.23. Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-20/32-M. . . . .	180
5.1. Módulos granulométricos obtenidos en función del tamaño máximo del hormigón. . . . .	190
5.2. Coeficientes de absorción de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos. . . . .	191
5.3. Cálculo $V_B$ , $V_p$ y $V_{p(total)}$ . . . . .	192
5.4. Cálculo volumen agua y volumen real ( $l/m^3$ ). . . . .	193

5.5. Hormigones empleados en la campaña experimental. . . . .	194
5.6. Valores de $R^2$ de ecuaciones de regresión simple para $f_{c28}$ y distintas variables explicativas de Cánoves (2012) para HA-25. . . . .	203
5.7. Valores de $R^2$ de ecuaciones de regresión simple para $f_{c28}$ y distintas variables explicativas de Cánoves (2012) para HA-30. . . . .	203
5.8. Pasos sucesivos para la variable $f_{c28}$ . . . . .	204
5.9. Ecuaciones de regresión para $f_{c28}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio. . . . .	205
5.10. Pasos sucesivos para la variable $f_{c7}$ . . . . .	205
5.11. Ecuaciones de regresión para $f_{c7}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio. . . . .	206
5.12. Ecuaciones de regresión para $f_{c28}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio. . . . .	206
5.13. Ecuaciones de regresión para $f_{c7}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio. . . . .	207
5.14. Ecuaciones de regresión para $f_{c28}$ y $f_{c7}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio (Base de datos reducida). . . . .	207
5.15. Ecuaciones de regresión para $f_{c28}$ y $f_{c7}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio (Base de datos reducida). . . . .	208
5.16. Ecuaciones de regresión para $f_{c28}$ y $f_{c7}$ y valores de $R^2$ para los distintos modelos de estudio (Base de datos reducida). . . . .	208
5.17. Ajustes para el modelo Neville de relación entre las resistencias del hormigón a 7 y 28 días. . . . .	216
5.18. Ajustes para los modelos ACI 209R-92 y BAEL-BPEL de relación entre las resistencias del hormigón a 7 y 28 días. . . . .	217
5.19. Ajustes para el modelo de relación entre las resistencias del hormigón a 7 y 28 días y la relación cemento/agua. . . . .	222
5.20. Estadísticos descriptivos para la variable tipo de cemento. . . . .	229
5.21. Estadísticos descriptivos para la variable fibras. . . . .	230
5.22. Estadísticos descriptivos para la variable tipo de aditivo. . . . .	231
5.23. Estadístico de Levene para la variable tipo de cemento. . . . .	234
5.24. Estadístico de Levene para la variable tipo de aditivo. . . . .	234

5.25. Estadístico de Levene para la variable fibras. . . . .	234
5.26. Anova para la variable tipo de cemento. . . . .	235
5.27. Anova para la variable tipo de aditivo. . . . .	235
5.28. Anova para la variable fibras. . . . .	235
5.29. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 5.	236
5.30. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 12.	237
5.31. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 13.	237
5.32. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 15.	238
5.33. Comparación múltiple de Tamhane para la variable fibras. . . . .	238
5.34. Estadísticos descriptivos y comunalidades. . . . .	239
5.35. Varianza total explicada. Método de extracción: Análisis de Com- ponentes Principales. . . . .	240
5.36. Matriz de componentes rotados. Método de rotación: Varimax con Kaiser. . . . .	241
5.37. Matriz de transformación de las componentes. Método de rotación: Varimax con Kaiser. . . . .	242
5.38. Número de neuronas de la capa oculta según diversos autores. . . .	248
5.39. Valores de $R$ obtenidos en función del n° de neuronas en la capa oculta en la RNA 6. . . . .	253
5.40. Variables de entrada en las distintas RNA (1). . . . .	257
5.41. Variables de entrada en las distintas RNA (2). . . . .	258
5.42. Variables de entrada en las distintas RNA (3). . . . .	259
5.43. Variables de salida de las distintas RNA (1). . . . .	260
5.44. Variables de salida de las distintas RNA (2). . . . .	260
5.45. Variables de salida de las distintas RNA (3). . . . .	260
5.46. Valores de $R$ obtenidos en cada ejecución para las distintas RNA (1).	263
5.47. Valores de $R$ obtenidos en cada ejecución para las distintas RNA (2).	265
5.48. Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 13.	266

5.49. Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 14. 266

5.50. Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 15. 267

5.51. Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 16. 268

5.52. Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 17. 269

5.53. Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 27. 278

5.54. Valores de resistencia experimental y según diferentes modelos. . . 279

5.55. Anova para la variable resistencia. . . . . 281

5.56. Estadístico de Levene para la variable resistencia. . . . . 282

5.57. Comparación múltiple DMS para la resistencia a compresión. . . . 282

5.58. Valores del coeficiente  $R^2$  para distintas redes neuronales artificiales. 284

B.1. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 1. 341

B.2. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 2. 342

B.3. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 3. 342

B.4. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 4. 343

B.5. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 6. 343

B.6. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 7. 343

B.7. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 8. 344

B.8. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 9. 344

B.9. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 10. 345

B.10. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 11. 345

B.11. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 14. 346

B.12. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 16. 346

B.13. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 17. 347

B.14. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 18. 347

B.15. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 19. 348

B.16. Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 20. 348

B.17.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	21.349
B.18.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	22.349
B.19.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	23.350
B.20.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	24.350
B.21.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	25.351
B.22.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	26.351
B.23.Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM	27.352
B.24.Comparativa múltiple de Tamhane para el tipo de aditivo. . . . .	353

## Símbolos y nomenclatura

$A$	Amperios, 147
$A$	Asentamiento en el cono de Abrams, 81, 82
$A$	Constante, 67, 106, 110
$A$	Parámetro experimental, 104
$A_{(h)}$	Constante de Hamaker, 38
$A_{pt(i)}$	Coef. de absorción de agua para el árido $i$ en el tiempo $t$ , 35
$A_{pt}$	Coef. de absorción de agua en el tiempo $t$ , 35
$A_{p24}$	Coef. de absorción de agua a las 24 horas, 35
$A_{sup}$	Área superficial total de los granos, 36, 38
$AdiReal$	Porcentaje de aditivo real, 160
$AdiTeo$	Porcentaje de aditivo teórico, 160
$B$	Coef. de compactación, 67
$B$	Constante, 106, 110
$B$	Parámetro experimental, 104
$C$	Parámetro experimental, 104
$C_N$	Número de coordinación, 38
$C_m$	Coefficiente mezcladora, 58
$C_{s arido(i)}$	Contenido de árido, 35
$CemTeo$	Contenido de cemento teórico, 160
$ConA$	Descenso en cono de Abrams, 160
$D$	Diámetro máximo del árido, 30
$D_{50}$	Dimensión correspondiente al 50% del pasante, 79
$D_{max}$	Diámetro máximo del árido, 31, 65, 66
$D_{max}$	Tamaño máximo del árido, 160
$DiasEP1$	Edad de rotura de las primeras probetas, 160
$DiasEP2$	Edad de rotura de las segundas probetas, 160
$EMP$	Espesor máximo de pasta, 106
$F$	Coefficiente ferrallado, 81
$FechaFabPro$	Fecha fabricación probetas, 159
$Fib$	Tipo de fibra, 160
$G$	Coefficiente angularidad, 81
$GR$	Grupo de árido, 30
$G_t$	Tensión umbral de cizalla, 95
$H.AL$	Humedad de la arena lavada, 162

$H.AT$	Humedad de la arena triturada, 162
$H_t$	Viscosidad plástica, 95
$HoraFabPro$	Hora fabricación probetas, 160
$IF$	Identificación muestra de ensayo, 159
$IL$	Forma del árido, 30
$K$	Parámetro, 72, 106
$K$	Parámetro de ajuste, 35
$K_1$	Coefficiente función del cemento y del curado, 109
$K_2$	Coefficiente, 135
$K_2$	Coefficiente función del cemento y del curado, 109
$K_3$	Coefficiente, 135
$K_f$	Índice compactabilidad parcial finos, 79
$K_g$	Constante empírica, 106
$K_i$	Contribución fracción $i$ al índice compactabilidad, 79
$K_{moj}$	Coef. corrector, 36
$M$	Salidas de la red, 247
$MER$	Error relativo promedio, 252
$MG$	Módulo granulométrico de la mezcla, 160
$MSE$	Promedio de errores al cuadrado, 248
$MesFabPro$	Mes fabricación probetas, 268
$N$	Número de datos, 251
$N$	Naturalez del árido, 30
$N$	Neurona de una capa dada, 247
$N_{V_B/m^3}$	Número de $V_B$ presente en $1 m^3$ , 37
$P$	Porosidad, 21
$P$	Proporción granular, 66
$PSE$	Predicted Square Error, 251
$P_0$	Porosidad para resistencia mecánica nula, 21
$P_T$	Presión total para girar cuba llena, 95
$P_\infty$	Potencia a la estabilización, 58
$P_c$	Presión ejercida hormigón cuba llena, 95
$P_e$	Presión necesaria girar cuba vacía, 95
$P_m$	Potencia rozamiento de palas, 58
$Pesol - 4$	Peso de cada una de las 4 probetas de la familia, 160
$R$	Coefficiente correlación, 253
$R$	Radio de las partículas, 38
$R$	Radio medio del encofrado, 67
$RMSE$	Raíz del promedio de los errores al cuadrado, 252
$R^2$	Coefficiente de determinación, 195
$R_{c28}$	Resistencia verdadera del cemento a 28 días, 23, 106
$ResisVerdCem$	Resistencia verdadera del cemento, 160
$S$	Resistencia de la pasta, 21
$SSE$	Total de los cuadrados de los errores, 252
$S_0$	Resistencia de la pasta con porosidad 0, 21
$S_c$	Superficie total mojada por efecto pared, 67

$S_p$	Dosificación en extracto seco de superplastificante, 62
$S_p^*$	Dosificación de saturación en extracto seco de superplastificante, 62
$T$	Esfuerzo torsor, 88
$T_{amb}$	Temperatura ambiente a la realización del ensayo, 160
$T_{horm}$	Temperatura del hormigón a la realización del ensayo, 160
$TipoAditivo$	Tipo de aditivo, 160
$TipoCem$	Tipo de cemento, 160
$TipoHor$	Tipo de hormigón, 159
$T_s$	Tiempo de estabilización del watímetro, 62
$V$	Viscosidad plástica, 89
$V$	Volumen hormigón, 81
$V_a$	Volumen aire ocluido, 79
$V_a$	Volumen de agua, 103
$V_b$	Volumen del hormigón, 67
$V_c$	Volumen de cemento, 103
$V_f$	Volumen finos, 79
$V_h$	Volumen de aire ocluido, 22
$V_h$	Volumen de huecos, 103
$V_p$	Volumen de poros efectivos, 37
$V_v$	Volumen de huecos, 66
$V_{D(min)}$	Volumen mínimo para distanciar las partículas, 37, 38
$V_{abs}$	Volumen de agua de absorción, 34
$V_{agua\ total}$	Volumen de agua total en la mezcla, 34
$V_{fluid}$	Volumen de agua de fluidificación, 34, 38
$V_{g1}$	Volumen de árido de orden 1, 66
$V_{gel}$	Volumen de gel, 22
$V_{gel}$	Volumen de hidratos, 102
$V_{gi}$	Volumen de árido de orden i, 66
$V_{moj}$	Volumen de agua de mojado, 34
$V_{p(total)}$	Volumen total de poros efectivos, 37
$V_{pc}$	Volumen de poros, 102
$V_{pc}$	Volumen de poros capilares, 22
$W$	Matriz de pesos sinápticos, 247
$W_j$	Valores de los pesos y bias de la red, 251
$X$	Vector de entradas, 247
$Y$	Tensión de corte, 89
$Y$	Vector de salida, 247
$\alpha$	Grado de hidratación del cemento, 22, 103
$\alpha$	Parámetro de ajuste, 105
$\beta_{cc}$	Coefficiente, 107
$\delta$	Coefficiente de variación del tipo de hormigón suministrado, 135
$\dot{\gamma}$	Gradiente de velocidad, 58, 76
$\eta$	Viscosidad plástica, 77
$\gamma$	Factor de ponderación, 251
$\lambda$	Esbeltez de la fibra, 45

$\mu$	Viscosidad plástica, 76
$\mu_{pl}$	Viscosidad plástica, 58
$\bar{x}$	Resistencia media obtenida en las $N$ amasadas ensayadas, 134
$\phi$	Diámetro vibrador, 81
$\phi$	Relación entre volumen sólido y volumen total, 62, 78
$\phi^*$	Compacidad de la fase sólida, 62
$\rho$	Densidad del cemento, 103
$\rho$	Masa volúmica del hormigón, 82
$\sigma$	Desviación típica del tipo de hormigón suministrado, 134
$\tau$	Tensión de corte, 76
$\tau_0$	Tensión umbral, 38, 58, 76–78
$a$	Agua añadida, 162
$a$	Cantidad de agua en peso, 103
$a$	Constante, 95, 110
$a$	Constante Bolomey, 65
$a/c$	Relación agua/cemento, 22, 103, 162
$a_i$	Parámetros, 79
$ad/d$	Relación aditivo/cemento en peso, 44
$b$	Constante, 95, 110
$b$	Constante que depende del tipo de cemento, 21
$b$	Vector de sesgos, 247
$c$	Cantidad de cemento en peso, 103
$c/a$	Relación cemento/agua, 162
$d$	Abertura tamiz, 65
$d$	Tamaño mínimo del árido, 30
$d_1$	Diámetro 1, 44
$d_1$	Dimensión de árido de orden 1, 66
$d_2$	Diámetro 2, 44
$d_f$	Diámetro de la fibra, 45
$d_k$	Proporción geométrica diámetro de tamices, 65
$e_i$	Error para el dato $i$ , 251
$e_{D(min)}$	Espesor de agua mínimo que distancia las partículas, 38
$e_{eqmoj}$	Espesor equivalente de agua de mojado, 36
$f$	Función de activación, 247
$f(\bar{x})$	Función de aceptación, 134
$f(x)$	Función de aceptación, 134
$f_c$	Resistencia a compresión del hormigón, 26, 104
$f_c(j)$	Resistencia a compresión a la edad $j$ , 107
$f_{c(t)}$	Resistencia a compresión a $t$ días, 110
$f_{c28}$	Resistencia a compresión a los 28 días, 107, 109, 110, 160
$f_{c7}$	Resistencia a compresión a los 7 días, 109, 160
$f_{cg}$	Resistencia intrínseca de la roca, 27
$f_{ck}$	Resistencia característica especificada de proyecto, 135
$f_{cm}$	Resistencia a compresión de la matriz, 26
$f_{cm}$	Resistencia media a compresión, 72

$f_{cp}$	Resistencia de la pasta, 22
$f_c$	Resistencia a compresión del hormigón, 102, 103
$g$	Volumen árido en unidad volumen hormigón, 106
$g^*$	Compacidad hormigón, 106
$i$	Distintos tipos de áridos componentes de la mezcla, 35
$k$	Constante, 21
$k$	Neuronas en la capa oculta, 247
$k$	Término corrector, 67
$k_p$	Término de consistencia, 67
$k_s$	Término función modulo finura arena, 67
$kg0$	Contenido en Kg de cemento, 160
$kg1 - 7$	Peso de cada una de las 7 fracciones granulométricas, 160
$kgTotal$	Peso total de los componentes sólidos, 160
$l$	Longitud de la fibra, 45
$m$	Consistencia, 76
$m$	Neuronas en la capa de salida, 247
$mg$	Módulo granulométrico, 171
$mg_i$	Módulo granulométrico de la fracción granulométrica $i$ , 160
$n$	Constante, 22
$n$	Número de parámetros de la red, 251
$n$	Neuronas en la capas de entrada, 247
$n$	Índice de fluidez, 76
$p$	Constante experimental, 26
$p$	porcentaje de árido que pasa por cada tamiz, 64
$q$	Constante experimental, 26
$q$	Parámetro, 65
$r_N$	Recorrido muestral de las $N$ amasadas, 135
$s$	Coefficiente, 107
$s$	Desviación típica, 135
$s_{35}^*$	Desviación típica muestral de las 35 últimas amasadas, 135
$t$	Edad del hormigón en días, 109
$t$	Tiempo, 35, 43
$t_V$	Tiempo total de vibrado, 81
$t_i$	Porcentaje de Fuller de la fracción granulométrica $i$ , 160
$t_i$	Valor calculado para la red neuronal $y_i$ , 251
$tb0$	Porcentaje de cemento en la dosificación, 160
$tb_i$	Porcentaje de Bolomey de la fracción granulométrica $i$ , 160
$trCA$	Tiempo hasta la realización del ensayo cono de Abrams, 160
$v$	Velocidad rotación cuba, 95
$x$	Relación gel/espacio, 22
$x$	Relación volumen de hidratos, 102
$x_i$	Resistencia obtenida para la amasada $i$ , 134
$x_{(1)}$	Valor mínimo de las últimas $N$ amasadas, 135
$x_{(N)}$	Valor máximo de las últimas $N$ amasadas, 135
$y_i$	Red neuronal $i$ , 251



# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Desde que las primeras civilizaciones empezaron a construir, se han buscado materiales capaces de enlazar piedras en la formación de una masa sólida. Los materiales fabricados a base de cemento actuando como conglomerante hidráulico están entre los más abundantes creados por el hombre y el uso del hormigón como material de construcción se encuentra actualmente ampliamente extendido, ofreciendo una gran versatilidad en su uso y un coste relativamente bajo, siendo el hormigón el material más utilizado en construcción en el mundo.

Las especificaciones básicas del hormigón demandadas por el cliente o peticionario al fabricante, son la resistencia a compresión y la trabajabilidad del mismo. La tendencia actual a nivel mundial propone construcciones durables que implican ciertos requisitos para el hormigón. Estos requisitos serán función de las clases de exposición a las que vaya a estar sometido. Como en la práctica totalidad de los materiales, las prestaciones del hormigón dependen de su composición, de las condiciones de curado y del método y condiciones de mezclado al fabricarlo.

En cuanto a la fabricación actual del hormigón estructural, esta debe de realizarse en centrales que dispongan de instalaciones de almacenamiento, dosificación y mezclado de los materiales componentes consiguiéndose una mezcla íntima y homogénea. Así pues, el mezclado de las materias primas se realizará en mezcladoras, debiéndose prolongar en el tiempo hasta que la mezcla presente un estado uniforme. Las condiciones de producción de hormigones en planta presentan características especiales que tienen que ver con los propios condicionantes del proceso industrial y del negocio propiamente dicho. Estas características constituyen el foco de atención de la presente tesis doctoral.

Tanto la resistencia a compresión como la trabajabilidad del hormigón, dependen de varios factores entre los que se encuentra el agua como uno de los más influyentes y decisivos. Para controlar la resistencia y la trabajabilidad del hormigón producido en central debemos medir la consistencia de la mezcla en la propia mezcladora y conocer la cantidad de agua total. Esta agua total es la adición del agua dosificada más la aportada por los áridos finos y el agua existente en el interior de la mezcladora antes de la carga de los componentes.

Como consecuencia de que los tiempos de mezclado necesarios son muy estrictos y por motivos de aprovechamiento industrial, la cantidad de agua se controla indirectamente con la intensidad o la potencia consumida por la mezcladora. Al final del ciclo de mezclado, la mezcladora producirá la descarga en automático cuando se haya cumplido el tiempo de mezclado prescrito. La situación habitual en las plantas de hormigón preparado es que la relación agua/cemento se mantiene dentro de unos intervalos dados por debajo del límite especificado por la normativa, pero no se dispone de un conocimiento exacto y directo del agua total de la mezcla como el que se consigue en laboratorio. También es habitual o al menos técnicamente posible, utilizar el camión hormigonera para conocer la docilidad y consistencia del hormigón que transporta mediante el conocimiento de la presión en el reductor de la cuba a una determinada velocidad de rotación de la misma.

La tendencia normativa a nivel mundial se decanta por estrategias capaces de construir estructuras suficientemente durables. Esto supone, en lo que se refiere a la dosificación y comportamiento del hormigón, limitar la máxima relación agua/cemento y el mínimo contenido en cemento como requisitos generales. Adicionalmente, se plantean otros requisitos si es el caso, como el mínimo contenido en aire ocluido, utilización de cemento sulforesistente o resistente al agua de mar y resistencia frente a la erosión o bien frente a las reacciones álcali-árido.

En función de las clases de exposición a las que vaya a estar sometido el hormigón, la máxima relación agua/cemento será de 0,65 y el mínimo contenido en cemento será de  $200 \text{ kg/m}^3$  para el hormigón en masa, y de  $250 \text{ kg/m}^3$  y  $275 \text{ kg/m}^3$  para el hormigón armado y pretensado respectivamente. El contenido de cemento medio por metro cúbico de hormigón fabricado en España ha sido de  $283 \text{ kg/m}^3$  en el 2013 (ERMCO 2014).

La mayor parte de los hormigones que se emplean en construcción se producen en centrales de hormigón preparado o en centrales de obra, siendo los denominados hormigones convencionales. Estos hormigones están caracterizados por tener resistencias a compresión que oscilan, frecuentemente, entre 25 y  $30 \text{ N/mm}^2$  y consistencia blanda o fluida, además de colocarse en obra mediante vertido o bombeo y compactarse mediante vibración. Un porcentaje reducido del total del hormigón producido se suele realizar en plantas de prefabricación y se caracterizan por poseer resistencias a compresión de 35 a  $45 \text{ N/mm}^2$ , y de forma excepcional pueden alcanzar resistencias superiores a 50 o  $60 \text{ N/mm}^2$ .

En la actualidad se recoge en la bibliografía multitud de métodos, tanto analíticos como de carácter práctico, para determinar la composición de las mezclas de hormigón. El hecho de que algunos de estos métodos se sigan utilizando cien años más tarde y de que un gran número de autores se sigan ocupando de este problema, nos demuestra que no se ha logrado todavía obtener la solución definitiva al mismo. De igual manera, seguimos esforzándonos en la búsqueda de relaciones y modelos que sirvan para determinar la influencia que ejercen los distintos materiales constituyentes del hormigón, así como determinados parámetros tecnológicos y ambientales en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón.

## 1.2 LOS ORÍGENES

Juntar piedras con un producto amalgamador es una idea que ya pensaron las primeras civilizaciones. Los egipcios, hacia el año 2500 a.c. ya utilizaron mortero de cal y yeso en la construcción de las pirámides de Giza (Oficemen 2015). Es a los romanos a los que se les atribuye el uso del hormigón en construcciones a gran escala como son el Coliseo (cimientos y paredes internas) y el Panteón construidos en Roma en los años 80 y 120 d.c. respectivamente, o el puente de Alcántara construido en Hispania del 104 al 106 d.c.

Aunque el hormigón ya se utilizaba como material de construcción en las civilizaciones antiguas, el uso del mismo decae después del imperio Romano y no será hasta la segunda mitad del siglo XVIII cuando vuelve a emplearse de nuevo en Francia e Inglaterra. Así, en 1758, el ingeniero John Smeaton, ideó un nuevo mortero al reconstruir el faro de Eddyston en la costa de Cornish. Smeaton descubrió que los morteros formados por la adición de una puzolana a una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción del agua de mar y que la presencia de arcilla en las calces los mejoraba, haciendo que estos fraguasen bajo el agua y una vez endurecidos, fueran insolubles.

Posteriormente, Joseph Aspdin patentó en 1824 el cemento Portland. No obstante, se considera que el padre del cemento fue el químico francés Vicat, que propuso en 1817 un sistema de fabricación que se sigue utilizando en la actualidad. Finalmente, el cemento Portland tal y como lo conocemos en la actualidad, fue producido en 1845 por Isaac C. Johnson (Oficemen 2015) al lograr conseguir temperaturas suficientemente altas para clinkerizar a la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.

La primera aplicación moderna del hormigón documentada fue la construcción de unas nuevas dársenas en el puerto de Toulon (Francia) en 1748, mediante tongadas alternas de hormigón fabricado con puzolana y mampostería irregular (Belidor 1770). En 1845 Lambot empieza a fabricar en Francia objetos en los que combina el hormigón y el acero surgiendo de esta forma el primer hormigón armado.

En 1861 François Coignet publica el libro "*Bétons Agglomérés appliqués à l'art de construire*", en el que estudia el papel que juegan el hormigón y el acero como partes integrantes del nuevo material. Joseph Monier construye en 1875 el primer puente de hormigón armado del mundo en Chazalet (Francia) con un vano de 16.5 m de luz patentando el hormigón armado. En 1885, asociados Coignet y Monier, presentan en la Exposición Universal de París ejemplos de elementos que podrían realizarse con hormigón como vigas, bóvedas, tubos, etc.

A finales del siglo XIX se incorporan otros países como Alemania y los Estados Unidos a la utilización del hormigón en la construcción. En 1875 se empezó a utilizar el hormigón armado en Norteamérica siendo en 1890 cuando realmente su empleo adquiere un impulso extraordinario. En esta época la propia indefinición científica del hormigón armado dio lugar a la aparición de numerosos sistemas, patrocinados y patentados cada uno de ellos por una firma comercial. Así pues, a pesar de las aplicaciones aisladas y de las patentes que hizo Monier sobre el hormigón armado, este material no avanzaría de forma importante hasta que los técnicos y empresarios alemanes (Freytag entre ellos) que adquirieron sus derechos para su explotación en las Potencias Centrales, impulsaran su desarrollo. En 1885 el ingeniero Gustaf Wayss, que acababa de asociarse a las empresas alemanas que poseían los derechos comprados a Monier, dejó sentados los principios fundamentales del comportamiento del hormigón armado.

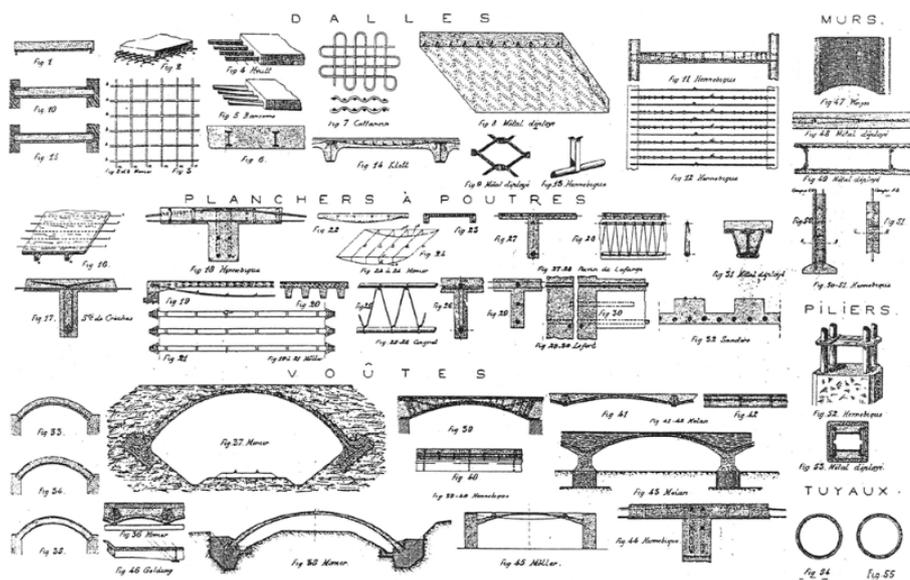


Figura 1.1: Patentes de sistemas de hormigón armado (Christophe 1902).

En 1886, el ingeniero Mathias Koenen, director técnico de la empresa de Wayss y Freytag publicó el primer método empírico de cálculo de secciones de hormigón armado sujetas a flexión. El primer método de dimensionamiento elástico de este

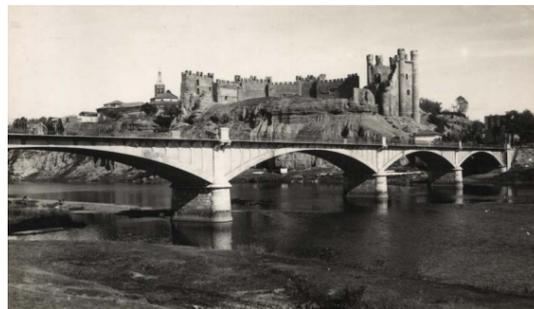
tipo de secciones fue publicado en 1884 por Edmond Coignet y De Tedesco. La empresa de Wayss y Freytag construyó entre 1887 y 1899 trescientos veinte puentes distribuidos por toda Alemania y el Imperio austro-húngaro.

En 1890 se vivió en Francia una verdadera "fiebre" del hormigón armado, entre otros motivos por el éxito que las construcciones de Monier estaban teniendo en Alemania. En 1886, el constructor parisino Jean Bordenave, patentó un sistema de tuberías de hormigón armado (Sidéro-ciment) que aplicaría por primera vez en la traída de agua potable para Venecia. F. Hennebique deposita en 1892 en Francia y Bélgica la primera patente significativa en el ámbito del hormigón (Denoël *y col.* 2013). En 1902 Rabut define las leyes de deformación del hormigón armado y sus reglas de cálculo y empleo. En 1904 aparece el primer volumen completo sobre hormigón debido a De Tedesco. En 1928 F. Dischinger presenta la primera tesis doctoral en el ámbito del hormigón estructural, sobre láminas de hormigón para cubrir grandes espacios.

La utilización del hormigón como técnica constructiva llegó también a finales del siglo XIX a España y se desarrolló de una manera importante al encontrarse el país en una situación económica en la que el sector de la construcción se vio potenciado. Simultáneamente nacería y se desarrollaría la industria nacional del cemento portland y España se situaría en las primeras posiciones en el desarrollo de la nueva tecnología de construcción mediante hormigón armado. En 1893 el ingeniero Francesc Maciá proyecta y construye el depósito de agua de Puigverd (LLeida) que se considera la primera construcción de hormigón armado en España, junto con la fabricación de traviesas de ferrocarril por parte de Nicolau en 1891. Otros ingenieros y arquitectos aportaron una importante contribución al desarrollo del hormigón armado en España en las primeras décadas del siglo XX entre los que se encuentra Ribera, Zafra, Rebollo, Durán, Jalvo, Fernandez Casado, Torroja, entre tantos, tal y como se puede consultar en Burgos (2009). Es a partir de 1910 cuando se introduce la enseñanza del hormigón armado en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid.



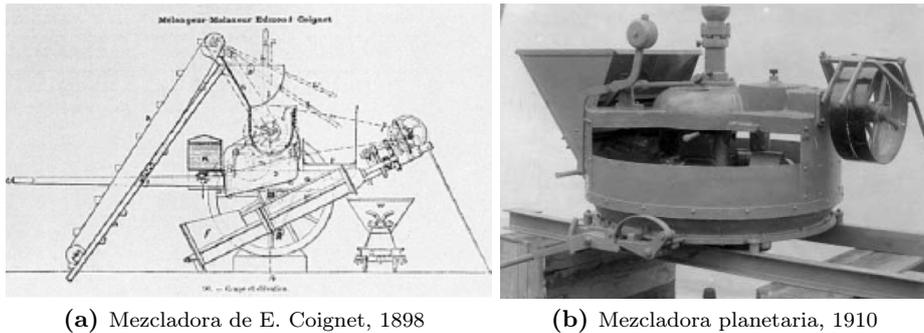
(a) Anuncio cemento, 1903



(b) Puente Ribera, 1909

**Figura 1.2:** Anuncio cemento (*El Cemento Armado* 1903) y puente de Ribera en Valencia de Don Juan (León) (Ribera 1910).

En 1906, la empresa germana Eirich crea la mezcladora planetaria (Nold y Löbe 2004). En 1913 se suministra por primera vez hormigón preparado en central a una obra de Baltimore en U.S.A. En 1916 se patenta el primer camión hormigonera.



**Figura 1.3:** Mezcladora Coignet (CIMbéton 2009) y mezcladora planetaria (Nold y Löbe 2004).

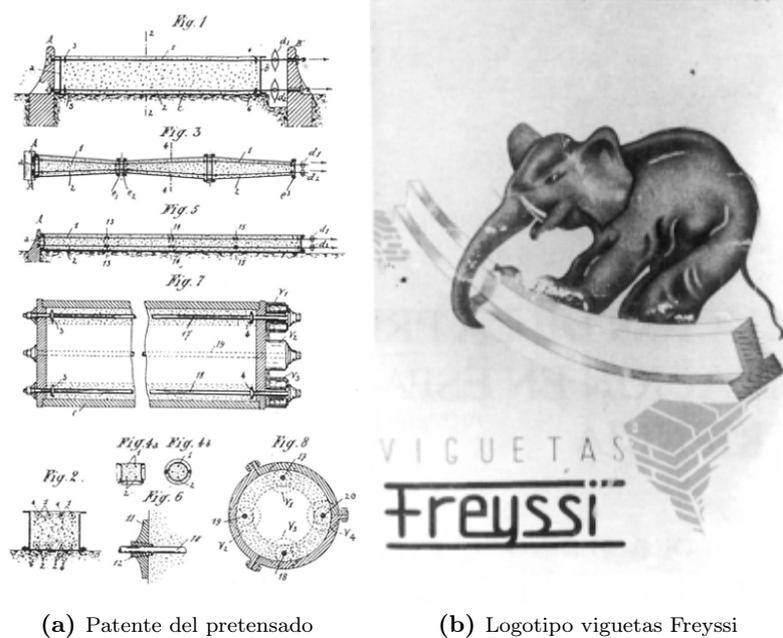


**Figura 1.4:** Camión hormigonera, hacia 1930 (Karrena 2007).

En la primera década del siglo XX, empieza a aplicarse el hormigón en obras singulares. Así, en 1903, Perret construye el primer edificio con estructura de hormigón armado en París. Wright usó el hormigón por primera vez en 1905 en la fábrica E-Z en Chicago. En 1906 construye en hormigón la fachada de la Iglesia Oak Park de Illinois y en 1929 construye el primer rascacielos en hormigón. Le Corbusier construye, en 1914, las primeras casas industrializadas en hormigón armado. Entre 1923 y 1924 se construyó lo que se supone una de las primeras cubiertas laminares o cáscara de 40 m de luz y 6 cm de espesor en Jena, siendo su autor Walther Bannersfeld. En 1939 Nervi construyó un hangar de 100x40 m de piezas prefabricadas de hormigón unidas "in situ" mediante hormigonado. En 1942, Eduardo Torroja utiliza en el viaducto del Esla, armaduras autoportantes y el hormigonado por anillos.

Aunque se hicieron intentos desde 1876, en 1928 Freyssinet patenta el hormigón pretensado, que rápidamente adquiere la categoría de un nuevo material que inclu-

ye al hormigón armado. A principios de los años 40, el ingeniero Fernández Conde, obtiene de Freyssinet las patentes del pretensado para España y América Latina, fabricando las primeras viguetas pretensadas en España.



**Figura 1.5:** Patente del pretensado, 1928 (Freyssinet 1993) y logotipo vigueta pretensada, década 1940.

## 1.3 ANÁLISIS DEL SECTOR

### 1.3.1 Introducción

En el apartado que nos ocupa se realiza un análisis del sector con la motivación de conocer ciertos aspectos trascendentes como son el contenido medio de cemento por metro cúbico de hormigón fabricado, la producción de cemento por tipología y clase resistente y los canales de distribución del cemento. En cuanto a los hormigones, interesa conocer los más empleados por tipo, sobre todo en lo relativo a consistencia y resistencia característica. En lo que respecta a los áridos, se plantea el conocimiento de la procedencia u origen de los mismos.

### 1.3.2 Sector cementero

El sector cementero español ha sido muy importante durante los años que van desde el 2000 hasta el 2007, habiendo sido España la quinta potencia mundial en producción y consumo. A partir del 2007 el consumo de cemento ha ido decreciendo año tras año como se puede ver en la figura 1.6, cerrando 2014 en 10,83 *Mt* (millones de toneladas), cifra similar a la obtenida en 2013 y muy lejos de los consumos de los años 2006 y 2007 con cifras cercanas a los 56 *Mt* (1250 *kg* per cápita de consumo). Esto anterior es consecuencia del contexto económico de España y del sector de la construcción en particular (Oficemen 2015).

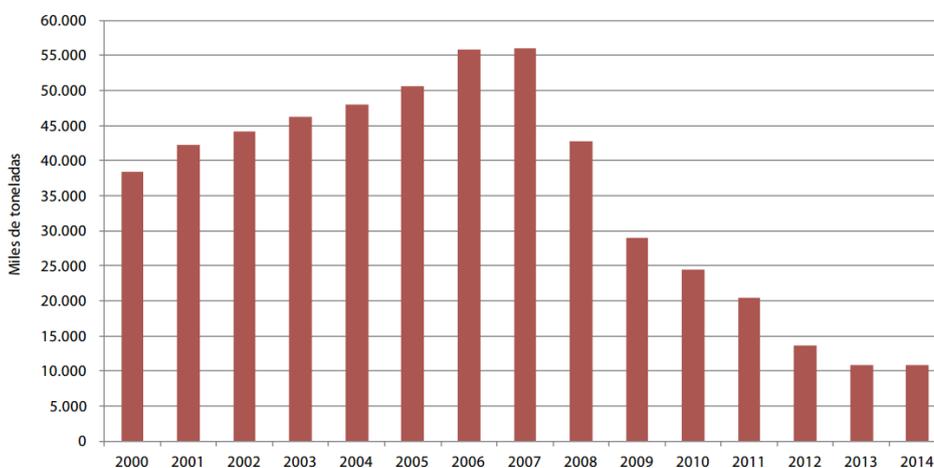


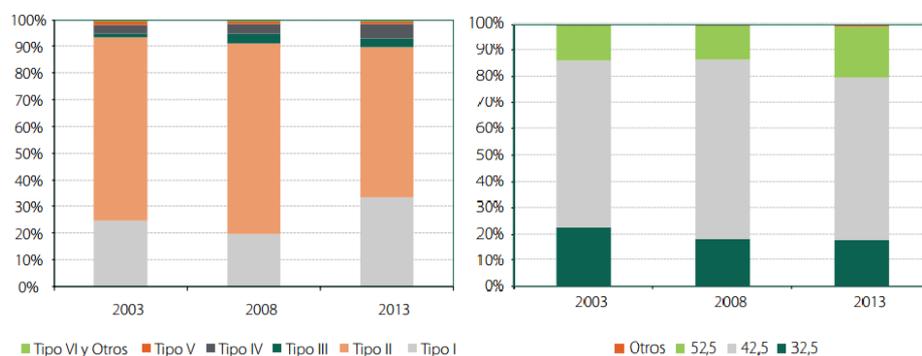
Figura 1.6: Evolución del consumo de cemento en España (Oficemen 2015).

El contenido en cemento medio por metro cúbico de hormigón fabricado en España en el 2013 es de 283 *kg/m<sup>3</sup>*, que aumenta a 285,1 *kg/m<sup>3</sup>* si tomamos la media de la UE (ERMCO 2014).

En cuanto a la producción de cemento, en función de su tipología, la producción nacional está concentrada en dos tipos, el tipo I y el tipo II, suponiendo el 33 % y el 57 % de la producción total de cemento respectivamente en el año 2013. Los otros tipos restantes suponen tan solo el 10 % en ese año. En cuanto a la producción de cemento por clase de resistencia, el 42,5 supone un 62 % y el 52,5 casi un 20 % en el 2013. La producción de cemento en 2003 era inferior para el 52,5 (14 %) y similar para el 42,5 (63 %) (Oficemen 2014).

En las gráficas de la figura 1.7 se aprecia la evolución de la producción por tipos de cemento y por clases resistentes.

Los cementos más empleados para dosificar el HA-25/B/20/IIa en la Comunidad de Madrid en el periodo 2001-2007, fueron del tipo II en el 90 % de los casos y del tipo I en el 10 % restante (Ortega 2010).



**Figura 1.7:** Evolución de la producción de cemento por tipología y por clase resistente (Oficemen 2014).

El sector cementero español realiza sus ventas a través de cuatro tipos de clientes inmediatos o canales de distribución: empresas hormigoneras, empresas de prefabricados de hormigón, constructoras como cliente directo y almacenistas intermedios. Las empresas hormigoneras suponen un volumen entre el 55 y el 58 % de las ventas totales del sector cementero en España, tal y como se puede apreciar en la tabla 1.1.

CANALES DE DISTRIBUCIÓN	AÑO		
	2003	2008	2013
ALMACENISTAS	22%	23%	28%
CONSTRUCTORES	6%	8%	6%
HORMIGÓN PREPARADO	58%	55%	56%
PREFABRICADOS	11%	11%	9%
OTROS USOS	3%	3%	2%

**Tabla 1.1:** Canales de distribución del cemento en España (Adaptado de Oficemen 2014).

En cuanto al consumo de cemento en el año 2014 en los países de la UE, en la tabla 1.2 tenemos datos de algunos de los que consideramos más representativos (Oficemen 2015).

País	Consumo
Alemania	27,10
Italia	19,90
Francia	18,20
Polonia	15,59
Gran Bretaña	10,57
España	10,83

**Tabla 1.2:** Consumo en *Mt* de cemento en el año 2014 para algunos países de la UE (Adaptada de Oficemen 2015).

### 1.3.3 Áridos

El sector de los áridos es el principal suministrador de materias primas para la construcción, siendo el consumo en España en el año 2013 de 91,7 *Mt* (millones de toneladas) más 0,6 *Mt* de áridos reciclados. Esto representa una caída del 81,1 % desde el máximo previo a la crisis de 486 *Mt* del año 2006. España, que se encontraba en segunda posición en el 2006, ocupó en 2013 el décimo lugar de los países de la UEPG (Union Européenne des Producteurs de Granulats), por detrás incluso de países como Austria y Rumanía. El consumo en el año 2014 fue de 90,1 *Mt*, siendo la previsión para el 2015 de 95 *Mt* (ANEFA 2015).

El consumo anual de áridos por habitante en España en el 2014 fue de 1,9 *t*, muy por debajo de la media europea (5 *t/habitante*) y muy lejos de las cerca de 12 *t/habitante* del año 2006. De hecho, de los 39 países de la UEPG, España ocupa el último puesto.

El consumo de áridos para la construcción en España muestra unas diferencias territoriales importantes, siendo en el 2014 de 0,9 *t/habitante* para la Comunidad de Madrid y la Comunidad Valenciana y de 6,4 *t/habitante* para Navarra.

Los datos del sector de los áridos en 2013 publicados por UEPG para sus 39 países miembros, indican que el sector ha producido 2609 *Mt* en 14753 explotaciones que dan empleo a 204203 trabajadores. En lo que se refiere al consumo de áridos en Europa en 2012 según la procedencia u origen de los mismos, tenemos que las rocas trituradas ocupan el primer lugar con el 52,73 %, seguido de las arenas y gravas naturales con el 39,29 %. Los áridos procedentes de otras fuentes, entre los que se encuentran los marinos, los artificiales y los reciclados, representaron un 8 % del consumo total (4,86 % para los reciclados) (ANEFA 2014).

### 1.3.4 Hormigón

La mayor parte de los hormigones que se emplean en construcción se caracterizan por tener resistencias a compresión entre 25 y 30  $N/mm^2$ . De hecho, el 80% de los hormigones fabricados en España el año 2013 correspondían a estas dos clases resistentes. En cuanto a la consistencia del hormigón producido en España en 2013, la mayor parte del hormigón (92%) es de consistencia blanda o fluida, correspondientes a un asiento de 60 a 150 mm, siendo la producción de hormigón autocompactable menor del 1% de la producción total (ERMCO 2014).

Según Cánoves *y col.* (2012), el hormigón más empleado en la provincia de Valencia durante el periodo de tiempo de 2000 a 2011 es el tipificado por la EHE (2008) como HA-25/B/20/IIa, y seguidamente el más empleado durante el periodo de tiempo 2006 a 2011 es el HA-30/B/20/IIa.

Ortega (2010) estudió los hormigones más empleados según su resistencia en la Comunidad de Madrid en el periodo del año 2001 al 2007, obteniendo que el hormigón de uso mayoritario fue el de resistencia característica 25  $N/mm^2$  (entre el 60 y el 78%) seguido del de 30  $N/mm^2$  según se aprecia en la tabla 1.3.

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Tipo de hormigón más usado (<math>f_{ck}</math>)</b>	25	25	25	25	25	25	25
<b>Porcentaje %</b>	60	68	74	69	78	53	62
<b>2º Tipo de hormigón más usado (<math>f_{ck}</math>)</b>	30	30	30	30	30	30	30
<b>Porcentaje %</b>	7	16	18	14	12	27	15
<b>Nº de muestras</b>	20150	22300	25125	28350	32500	35655	39543

**Tabla 1.3:** Porcentajes de hormigones empleados según  $f_{ck}$  en la Comunidad de Madrid (Adaptada de Ortega 2010).

Dentro de la resistencia característica 25  $N/mm^2$ , el hormigón más ensayado en la Comunidad de Madrid en el periodo 2001-2007 fue el HA-25/B/20/IIa con valores entre el 49 y el 71% del total de hormigones de 25 MPa de resistencia característica, seguido del HA-25/B/20/I, tal y como se puede comprobar en la tabla 1.4.

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>HA/25/B/20/IIa</b>	49%	49%	54%	71%	52%	54%	58%
<b>HA/25/B/20/I</b>	32%	39%	38%	19%	32%	35%	32%

**Tabla 1.4:** Porcentajes de hormigones ensayados según tipo de la EHE-08 (Ortega 2010).

En cuanto a la producción de hormigón preparado y total de hormigón producido en los últimos años para ciertos países, la podemos observar en la tabla 1.5 (ERMCO 2014).

País \ Año	Hormigón preparado			Hormigón total		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013
<b>España</b>	30,8	21,6	16,3	60,0	40,0	32,0
<b>Alemania</b>	48,0	46,0	45,6	71,3	67,9	67,2
<b>Italia</b>	52,6	40,0	31,7	75,1	58,7	46,6
<b>Polonia</b>	23,7	19,5	18,0	43,1	34,8	32,1
<b>Francia</b>	41,3	38,9	38,6	59,0	55,0	54,0
<b>Reino Unido</b>	15,7	14,2	15,8	30,5	28,0	28,2
<b>Turquía</b>	90,0	93,0	102,0	100,0	104,0	115,0
<b>Rusia</b>	40,0	42,0	44,0	65,0	70,0	76,0
<b>USA</b>	203,0	225,0	230,0	270,0	310,0	330,0
<b>Japón</b>	88,0	92,0	99,0	123,0	128,0	138,0

**Tabla 1.5:** Producción en millones de  $m^3$  de hormigón en algunos países (Adaptada de ERMCO 2014).

El consumo de hormigón preparado en España en 2012 fue idéntico al de la media de la UE ( $0,5 m^3$  per cápita de consumo). En el 2013 este consumo ya descendió a  $0,3 m^3$  por habitante, manteniéndose la media de la UE en  $0,5$  (ERMCO 2014).

## 1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal de la presente tesis doctoral es caracterizar la influencia de diferentes parámetros en la resistencia a compresión y en la consistencia del hormigón, al ser estas las especificaciones básicas demandadas al mismo, y la elaboración de modelos predictivos de las características prestacionales de los hormigones fabricados en condiciones industriales. Aunque la metodología utilizada es perfectamente apropiada a otros hormigones, este estudio de investigación se ha centrado en hormigones preparados en planta.

Para la consecución del objetivo principal se han tenido que cubrir diferentes etapas que representan en sí mismas los objetivos específicos del presente trabajo de investigación y que son los siguientes:

- Realizar una revisión bibliográfica crítica y sintética del estado actual del conocimiento en el campo que nos ocupa.

- Desarrollar un amplio programa experimental que permita conseguir el objetivo principal de este trabajo de investigación.
- Identificar las condiciones específicas e industriales de producción de los hormigones de planta.
- Realizar la caracterización de los materiales constituyentes y del hormigón mediante los correspondientes ensayos.
- Crear una base de datos con los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y consistencia del hormigón y los parámetros y factores tecnológico-ambientales correspondientes a los hormigones ensayados.
- Identificar posibles problemas existentes en cuanto al resultado de las mediciones, ensayos y metodología empleada en este trabajo de investigación.
- El estudio y análisis de la influencia de diferentes parámetros y factores tecnológicos-ambientales en la resistencia a compresión, en la evolución de la misma con el tiempo y en la consistencia del hormigón.
- El desarrollo de modelos y herramientas de predicción de la resistencia a compresión y la consistencia del hormigón.
- La comparación de los resultados obtenidos en este trabajo con los de otras investigaciones.

En cuanto a lo que se refiere a los parámetros y factores tecnológicos-ambientales a estudiar y su influencia en la resistencia a compresión del hormigón y en la evolución de la misma con el tiempo, estos serán, fundamentalmente: el contenido de cemento y el tipo de cemento y la resistencia verdadera del mismo, la consistencia del hormigón y el tiempo pasado hasta la realización del ensayo, la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón, la hora y fecha de fabricación de la probeta, el contenido y tipo de aditivo, la existencia de fibras y el tipo de las mismas, la curva granulométrica de los áridos y el tamaño máximo del hormigón. También se tendrá en cuenta la relación cemento/agua en un número reducido de ensayos.

Para la determinación de la influencia en la consistencia del hormigón medida mediante asentamiento en cono de Abrams de los diversos parámetros y factores tecnológicos-ambientales, se tendrán en cuenta, básicamente, los siguientes: el contenido de cemento y el tipo de cemento y la resistencia verdadera del mismo, la resistencia a compresión del hormigón y el tiempo pasado hasta la realización del ensayo de consistencia, la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón, la hora y fecha de fabricación de la probeta, el contenido y tipo de aditivo, la existencia de fibras y el tipo de las mismas, la curva granulométrica de los áridos y el tamaño máximo del hormigón.

## 1.5 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

Para alcanzar los objetivos propuestos se han realizado distintos trabajos que se desarrollan en los siguientes capítulos de esta tesis. La tesis está estructurada en 6 capítulos, la bibliografía y normativa empleada y dos anexos. En el capítulo 1, que nos ocupa, se presenta el tema y los objetivos de la tesis, así como la estructura de la misma.

En el capítulo 2 se hace una revisión del estado del conocimiento. Primeramente sobre los materiales constituyentes del hormigón y su influencia en las propiedades mecánicas y reológicas. Seguidamente se estudian los procesos industriales de producción de hormigón, así como las diferentes metodologías de dosificación y aspectos de la reología de hormigones. Se continúa con la influencia de la temperatura en la resistencia y trabajabilidad del hormigón. Posteriormente se analizan diferentes modelos de predicción de la resistencia a compresión y de la evolución de la misma con el tiempo. Finalmente se exponen diferentes aplicaciones recientes de las redes neuronales artificiales a los temas estudiados en la tesis.

Los materiales componentes del hormigón y los ensayos de caracterización de los mismos, así como los ensayos de caracterización del hormigón se presentan en el capítulo 3. En este capítulo también se describe la planta y el proceso industrial seguido para la fabricación del hormigón. Así mismo, se describe la normativa vigente y se presentan, por último, datos comparativos de resultados obtenidos por diferentes laboratorios.

En el capítulo 4 se exponen los resultados de las campañas experimentales realizadas para los cementos, áridos, aditivos y hormigones. También es en este capítulo donde se describen las dos bases de datos confeccionadas para su estudio y análisis. Estas dos bases de datos se corresponden a una base de datos general compuesta por 2413 muestras y a una base de datos reducida de 16 muestras, con cuatro probetas por muestra en cada caso.

En el capítulo 5 se realiza un análisis de resultados así como una discusión de los mismos. Inicialmente se comprueba la metodología empleada en la dosificación de los hormigones estudiados y se presenta un cálculo del agua. Posteriormente se analiza la influencia de diferentes parámetros y factores tecnológicos-ambientales en la resistencia a compresión y en la evolución con el tiempo de la misma mediante métodos estadísticos, usando el análisis de regresión múltiple, el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis multivariante. Por último se han elaborado redes neuronales artificiales que predicen la resistencia a compresión del hormigón o bien la consistencia del mismo. Estas redes neuronales artificiales se han utilizado para la obtención de modelos de la resistencia a compresión del hormigón en función de diferentes variables.

En el capítulo 6 se exponen las conclusiones derivadas de los trabajos realizados, así como se proponen futuras líneas de investigación que permitan una mayor profundización de varios de los aspectos abordados en la presente tesis doctoral.

## *1.5 METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA DE LA TESIS*

---

Al final de los capítulos y antes de los anexos, se indica la normativa y referencias bibliográficas empleadas y consultadas en el desarrollo de la investigación.

Finalmente, se incluye un primer anexo que contiene un pequeño extracto de la base de datos general y la base de datos reducida completa y un segundo anexo con tablas correspondientes a las comparaciones múltiples.



## Capítulo 2

# ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta una síntesis bibliográfica del estado actual del conocimiento en el campo objeto de este trabajo de investigación. El primer apartado se dedica a los materiales constituyentes de los hormigones de planta: cemento, áridos, agua y aditivos; y a los hormigones reforzados con fibras.

Seguidamente se dedican sendos apartados a los procesos industriales de producción de hormigón y a revisar las principales metodologías de dosificación. También se analizan aspectos relacionados con la reología de hormigones, la medición de la trabajabilidad de los mismos y la influencia de la temperatura tanto en la resistencia como en la trabajabilidad del hormigón.

Posteriormente se presenta una revisión de los modelos de resistencia a compresión existentes más importantes y de la evolución de la resistencia con el tiempo. Para finalizar se presentan investigaciones realizadas recientemente en campos como la predicción de propiedades del hormigón o bien la dosificación de mezclas, mediante el empleo de redes neuronales artificiales.

### 2.2 COMPONENTES DEL HORMIGÓN

#### 2.2.1 Cemento como conglomerante hidráulico

El cemento es el conglomerante hidráulico que se utiliza para fabricar hormigón y mortero. En la fabricación del cemento intervienen calizas, margas y arcillas en proporciones adecuadas. Estas materias primas, una vez trituradas y tamizadas son introducidas en un horno cilíndrico que gira a razón de dos vueltas por minuto

y en el que se inyecta el combustible pulverizado a contracorriente, alcanzándose temperaturas superiores a los 1500 °C. Se logra así obtener el clínker, que está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminatos de calcio (Taylor 1978).

Posteriormente y una vez enfriado el clínker, se muele el mismo conjuntamente con un regulador de fraguado (generalmente el sulfato cálcico dihidrato o yeso) y adiciones como las escorias de alto horno, los esquistos calcinados, el humo de sílice, las puzolanas naturales, las cenizas volantes y la caliza. La molienda se prolonga hasta obtener una finura bien definida.

La norma UNE-EN197-1: (2011) agrupa los cementos comunes en 5 clases principales:

- CEM I: Cemento Portland.
- CEM II: Cemento Portland compuesto.
- CEM III: Cemento con escoria de alto horno.
- CEM IV: Cemento puzolánico.
- CEM V: Cemento compuesto.

Los cementos comunes pueden presentar características especiales adicionales, como pueden ser los cementos resistentes a los sulfatos (SR), los resistentes al agua de mar (MR), los de bajo calor de hidratación (LH) y los blancos (BL).

La base de la composición de los cementos comunes es el clínker (K) de cemento Portland, pudiendo contener otros componentes de diferente naturaleza. Los cementos Portland del tipo I o CEM I corresponden a aquellos constituidos al menos por el 95 % de clínker (K).

Los cementos Portland del tipo II o CEM II, también conocidos como cementos Portland compuestos o con adiciones, poseen un comportamiento intermedio entre el tipo I y el tipo III (cementos con escorias de alto horno) o los tipos IV (cementos puzolánicos). Su contenido en clínker (K) oscila entre un 65 y un 94 %, dependiendo del porcentaje de adición utilizado. Estas adiciones que contienen estos tipos de cementos, pueden ser o bien únicas tales como la puzolana natural (P), las cenizas volantes (V), el filler calizo (L o LL), el humo de sílice (D) o la escoria de alto horno (S) en porcentajes que pueden ir desde un 6 hasta un 35 % según el caso, o bien combinaciones de ellas como en el cemento Portland compuesto, llamado también mixto, donde igualmente el porcentaje de las combinaciones de las adiciones van desde un 6 hasta un 35 % según sea el caso. Cada tipo de adición tiene sus ventajas e inconvenientes. Por ejemplo, el filler calizo mejora las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como una vez endurecidos.

Estos cementos tipo II se han venido utilizando con gran éxito en España y en Europa por razones económicas, en primer lugar debido al ahorro energético que supone poder reemplazar parcialmente el clinker por las distintas adiciones y en segundo lugar, por el aprovechamiento de productos naturales y subproductos y residuos industriales. De hecho, los cementos más empleados para dosificar hormigones son el tipo II seguido de lejos por el tipo I.

Los cementos del tipo III o CEM III, denominados “cementos con escorias de alto horno”, poseen una proporción de escorias muy elevada, entre un 36 y un 95 %, siendo esta su único tipo de adición, que se complementa con una cantidad de clinker que oscila entre un 5 y un 64 %, dependiendo del porcentaje de escoria utilizado. El sufijo A indica una proporción de escoria entre el 36 y el 65 %, B si es del 66 al 80 % y C si está entre el 81 y 95 %.

Estos tipos de cemento presentan poca retracción y un bajo calor de hidratación, siendo el proceso de hidratación más lento que el del clinker. Por esto anterior las resistencias a compresión a edades tempranas disminuyen en función de la cantidad de escoria añadida, siendo a 28 días similares a los cementos Portland (Reino 2013), por lo que pueden ser utilizados en grandes macizos. Por último, son cementos delicados y exigen más precauciones en su utilización que los anteriores, siendo además más resistentes que los cementos de tipo I y II a las aguas sulfatadas, las aguas de mar y a las aguas muy puras, pero no debiendo utilizarse cuando la agresividad sea grande (Jiménez Montoya *y col.* 2010).

Los cementos del tipo IV o CEM IV, denominados también puzolánicos, poseen un contenido de clinker que oscila entre un 45 y un 89 % según sea el caso, y solamente llevan como adición o bien el humo de sílice, puzolana natural, cenizas volantes silíceas o bien una combinación de ellas en proporciones de entre el 11 y un 55 % según el contenido en clinker. Los marcados como A tienen entre el 11 y el 35 % de adición y los marcados como B entre el 36 y el 50 %. Estos cementos endurecen más lentamente, especialmente en ambiente frío, requiriendo más agua de amasado que el cemento Portland normal, pero a largo plazo superan la resistencia de este. Por otro lado, le confiere al hormigón una elevada densidad, disminuyendo su porosidad y haciéndolo más compacto. (Jiménez Montoya *y col.* 2010).

Los cementos del tipo V o CEM V, también denominados compuestos, poseen según el caso, un contenido de clinker que oscila entre un 20 y un 64 %, y un contenido de una mezcla de diferentes adiciones entre el 18 y el 50 %.

En el caso de los cementos Portland del tipo II, IV y V que lleven humo de sílice como adición o como parte de ella, la cantidad estará limitada a un 10 %. También en el caso de los cementos Portland compuestos (tipo II), en los cementos puzolánicos (tipo IV) y en los cementos compuestos (tipo V) en cualquiera de sus designaciones, los componentes principales que sean diferentes del clinker serán declarados en la designación del cemento (Jiménez Montoya *y col.* 2010).

En cuanto a la resistencia, los cementos se dividen en tres clases dependiendo de la resistencia a compresión del mortero a los 28 días. Las 3 clases representan las resistencias mínimas a compresión requeridas a 28 días en  $N/mm^2$ : 32,5, 42,5 y 52,5. Los cementos con elevada resistencia a compresión a los 2 días tienen una designación adicional (R) que indica alta resistencia inicial, frente a los de resistencia inicial normal (N).

Clase de resistencia <sup>1)</sup>	Resistencia a compresión UNE-EN 196-1 <sup>2)</sup>				Tiempo de fraguado UNE-EN196-3		Estabilidad de volumen según UNE-EN 196-3	Calor de hidratación <sup>3)</sup>	
	Resistencia inicial (N/mm <sup>2</sup> )		Resistencia nominal (N/mm <sup>2</sup> )		Inicio (min)	Final (h)	Expansión (mm)	UNE-EN 196-9 (J/g)	UNE-EN 196-8 (J/g)
	2 días	7 días	28 días					41 horas	7 días
32,5N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10	≤ 270	
32,5R	≥ 10,0	-							
42,5N	≥ 10,0	-							
42,5R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60				
52,5N	≥ 20,0	-							
52,5R	≥ 30,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45				

<sup>1)</sup> R = Alta resistencia inicial  
N = Resistencia inicial normal

<sup>2)</sup> 1 N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa

<sup>3)</sup> Solo para los comunes de bajo calor de hidratación

**Tabla 2.1:** Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes (RC-08).

En la instrucción para la recepción de cementos RC-08 (2008) se encuentran las características más resaltantes, indicaciones y recomendaciones de uso de los cementos comunes de acuerdo a su tipo y a la clase resistente a la que pertenecen. El Anejo 8 de la RC-08 así como el Anejo 4 de la EHE (2008) contienen tablas con los cementos recomendables en función de la aplicación. Por otra parte, en Jiménez Montoya *y col.* (2010) se recogen unos criterios de aplicación práctica.

Las propiedades mecánicas de los morteros y hormigones vienen determinadas fundamentalmente por la microestructura de la pasta de cemento y por las características de los áridos y las propiedades de la interfase árido-pasta. La microestructura de la pasta de cemento depende de ciertos factores como son la naturaleza del cemento, temperatura y tiempo de hidratación, relación agua/cemento o la utilización de aditivos reductores de agua (Ramachandran *y col.* 1998) (Odler 1998).

La hidratación del cemento Portland es una secuencia de reacciones químicas entre los componentes minerales del clínker, el sulfato cálcico y el agua. Dichas reacciones se producen simultáneamente aunque a diferentes velocidades y se influyen unas sobre otras. El final de este proceso conduce al fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento (Jawed *y col.* 1983).

Como consecuencia de la hidratación del cemento Portland, se produce una microestructura formada por fases sólidas hidratadas, poros y agua. Las fases sólidas son el gel C-S-H (diferentes formas morfológicas y composicionales de silicatos cálcicos hidratados), hidróxido cálcico o portlandita, y sulfoaluminatos cálcicos hidratados (estringita y fases monosulfoaluminato). En la pasta de cemento completamente hidratada, el gel C-S-H constituye entre el 50 y el 60% del volumen de sólidos, siendo el compuesto que aporta la mayor parte de las propiedades resistentes de la pasta de cemento endurecida (Puertas *y col.* 1989).

Los cristales de hidróxido cálcico o portlandita (CH) constituyen entre el 20 y el 25 % del volumen de sólidos de la pasta hidratada y su contribución a la resistencia del cemento es mínima como consecuencia de que las fuerzas de enlace son débiles debido al gran tamaño de los cristales (baja superficie específica). El tamaño de los cristales y la morfología de los mismos puede variar y depende básicamente de las condiciones de curado, la relación agua/cemento y la concentración de iones extraños (Odler 1998) (Mehta y Monteiro 2006).

Los sulfoaluminatos cálcicos hidratados representan entre el 15 y el 20 % del volumen en la pasta hidratada y contribuyen en muy pequeña proporción a las resistencias de la pasta de cemento. La presencia de estringita y fases monosulfoaluminato en la pasta de cemento la convierte en vulnerable al ataque por sulfatos.

La pasta de cemento hidratada contiene un amplio rango de tamaños de poro, que se pueden clasificar en poros de aire (de 10 a 200  $\mu m$  pudiendo llegar incluso a los 2-3  $mm$ ), poros capilares (entre 10  $\mu m$  y menos de 0,01  $\mu m$ ) y poros interlaminares asociados al gel C-S-H (generalmente en el rango de entre 5 y 25  $\text{Å}$ ) (Puertas y col. 1989) (Mehta y Monteiro 2006).

La hidratación de la pasta de cemento comienza con la formación del gel C-S-H que rellena los espacios entre los granos de cemento, estableciendo puentes entre ellos dando lugar a la rigidez y endurecimiento de la pasta. La continua formación del gel va llenando gradualmente los poros capilares, decreciendo la porosidad de la pasta e incrementándose la resistencia de la misma.

En materiales sólidos porosos, la relación entre resistencia de la pasta  $S$  y porosidad  $P$  viene definida por la siguiente expresión, obtenida de resultados experimentales (Feldman y Beaudoin 1974):

$$S = S_0 \cdot e^{-b \cdot P} \quad (2.1)$$

donde  $S_0$  es la resistencia de la pasta con porosidad 0 y  $b$  es una constante que depende del tipo de cemento, la edad de la pasta, etc.

Otra relación habitual en la biografía es la de Roy y Gouda (1973), definida por la ecuación siguiente:

$$P = P_0 \cdot e^{-k \cdot S} \quad (2.2)$$

donde  $P_0$  es la porosidad para una resistencia mecánica nula y  $k$  una constante.

La pasta de cemento endurecida es un material poroso en el que su resistencia a compresión depende directamente de su volumen sólido como han demostrado varios investigadores (Powers y Brownyard 1946-1947) (Powers 1962). Estos autores proponen una expresión en la que la resistencia mecánica depende de la cantidad de producto hidratado que ocupa el espacio habilitado para ello (suma del volumen

de gel, los poros capilares y el aire ocluido). La relación gel/espacio ( $x$ ) se define como:

$$x = \frac{V_{gel}}{V_{gel} + V_{pc} + V_h} \quad (2.3)$$

donde  $V_{gel}$  es el volumen de gel y  $V_{pc}$  y  $V_h$  el volumen de los poros capilares y del aire ocluido en la mezcla respectivamente.

A la relación  $x$  también se le llama grado de llenado y toma el valor siguiente si asumimos que el volumen de aire ocluido en la mezcla es despreciable. Si el volumen de aire no fuera despreciable, la relación  $a/c$  se sustituiría por  $(a/c + V_h)$ .

$$x = \frac{0,66\alpha}{0,32\alpha + a/c} \quad (2.4)$$

donde  $\alpha$  es el grado de hidratación del cemento y  $a/c$  la relación agua/cemento.

La expresión que relaciona la resistencia de la pasta  $f_{cp}$  con la relación gel/espacio ( $x$ ) es (Powers y Brownyard 1946-1947) (Powers 1962):

$$f_{cp} = A \cdot x^n \quad (2.5)$$

tomando  $n$  un valor entre 2,6 y 3.

De Larrard (1988) en su modelo estructural supuesto para la pasta de cemento endurecida, obtiene la ecuación siguiente:

$$f_{cp} \propto \left( \frac{V_c}{V_c + V_a + V_h} \right)^c \quad (2.6)$$

donde si se considera una estructura de barras  $c = 2$  y tenemos una ecuación similar a la de Féret (1892) y si se considera una estructura de placas  $c = 3$  y la ecuación resultante es similar a la de Powers y Brownyard (1946-1947) que tiene en cuenta la relación gel/espacio.

La anterior relación designa la concentración en hidratos en la pasta endurecida cuando el cemento está completamente hidratado. La ecuación de Powers tiene en cuenta además el grado de hidratación del cemento  $\alpha$  con lo que es más general pero necesita la evaluación del anterior parámetro, cuestión bastante difícil en la práctica.

Después de ensayos en pastas de cemento con dosificaciones diversas, Marchand (1992) llega a la conclusión que la ley de potencia se ajusta más convenientemente

con un exponente  $c = 2,85$ , posiblemente como consecuencia de una hidratación incompleta de las mezclas con una relación agua/cemento baja.

Así pues, de Larrard (2000) obtiene un modelo más general para la resistencia a compresión a 28 días de pastas de cemento endurecidas en agua:

$$f_{cp} = 11,4 \cdot R_{c28} \cdot \left( \frac{V_c}{V_c + V_a + V_h} \right)^{2,85} \quad (2.7)$$

donde  $R_{c28}$  es la resistencia verdadera del cemento a 28 días. La anterior relación supone que el valor del exponente  $c = 2,85$  se mantiene independientemente de la clase resistente del cemento. Así pues, la resistencia mecánica de la pasta de cemento y por consiguiente la del hormigón, será mayor cuanto mayor sea la cantidad de cemento y la resistencia verdadera del mismo empleado en la dosificación y cuanto menor sea la relación agua/cemento.

El hecho de que el cemento no esté completamente hidratado no perjudica necesariamente a la resistencia del hormigón, ya que puede tenerse una cantidad limitada de gel C-S-H, pero también muy baja porosidad (Wong y Buenfeld 2009). Esto anterior explica como es posible producir hormigones de ultra-alta resistencia con relaciones  $a/c$  de 0,23 aunque el cemento no esté hidratado completamente.

La hidratación del cemento se inicia en la superficie de las partículas y la velocidad de hidratación aumenta con la finura del cemento, ya que las partículas cuanto más finas mayor superficie específica de contacto expuesta al agua y en consecuencia, la hidratación es mayor sobre todo a edades tempranas. La finura del cemento puede tener influencia en la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado.

La forma de molido del cemento, o lo que es lo mismo, la superficie específica de sus partículas, se caracteriza por su Finura Blaine, medida por medio del permeabilímetro Blaine (Duda 1977). En el anterior aparato, la finura del cemento es medida como superficie específica, siendo esta proporcional a la raíz cuadrada del tiempo que el flujo de aire tarda en pasar, a través de una capa de dimensiones y porosidad especificadas, entre dos marcas del aparato. En el caso de cementos comunes, la superficie específica toma un valor de entre 2800 y 3600  $gr/cm^2$ . Los inconvenientes de los cementos muy finos son: mayor retracción, un mayor coste de molienda, mayor sensibilidad a la meteorización, mayor demanda de agua, etc. Los inconvenientes anteriores también se presentan en los morteros y hormigones fabricados con los cementos finamente molidos. La finura de molido también influye en la plasticidad y cohesión de la pasta de cemento en estado fresco.

Se ha demostrado, también, que tanto para aditivos reductores de agua convencionales como para aditivos de última generación del tipo PCE, que a mayor superficie específica del cemento, o lo que es lo mismo a mayor finura, se necesita mayor cantidad de aditivo para adsorberse sobre los granos de cemento y producir su dispersión, presentando mayor resistencia a fluir (Bonen y Sarkar 1995) (Ferrari *y col.*

2000) (Vikan *y col.* 2007). Por consiguiente, a mayor finura de cemento se requiere mayor dosificación de aditivo para conseguir una fluidez determinada. Además de la finura debe tenerse en cuenta, también, la distribución granulométrica (Houst *y col.* 2002).

La granulometría del cemento tiene un importante efecto sobre la evolución de las resistencias del mismo. Con una granulometría adecuada que permita conseguir una compacidad máxima, se pueden obtener resistencias elevadas sin necesidad de aumentar la superficie específica del cemento. Se acepta en la bibliografía (Duda 1977) (Neville 1995) que para una finura dada del cemento, si las partículas que se hallan entre 3 y 30  $\mu\text{m}$  tienen porcentajes elevados, los hormigones fabricados con dichos cementos, tendrán resistencias iniciales y finales mayores que si el porcentaje de las anteriores partículas es menor.

### 2.2.2 Los áridos y su influencia en las características del hormigón

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

Los áridos desempeñan un papel económico y técnico fundamental en las características del hormigón, ya que representan aproximadamente el 80 % del volumen del mismo, siendo el resto la pasta de cemento que rellena los huecos existentes entre ellos y que envuelve a los gránulos manteniéndolos unidos. Las características de los áridos tienen un efecto muy importante en las características del hormigón tanto en estado fresco como endurecido y un impacto en el costo efectivo del hormigón (Hudson 1999). La importancia del árido sobre las propiedades finales del hormigón viene dado por sus características físicas y químicas, por el volumen del mismo que se utilice y por la distribución de dicho volumen (combinaciones grava/arena o esqueleto granular).

Los áridos se clasifican en naturales, artificiales y reciclados. Los naturales proceden de la desintegración natural o artificial de rocas (machaqueo).

En algunas ocasiones se utiliza el término natural para los granulares o rodados. El árido natural se define en la norma UNE-EN12620:2003+A1: (2009) como el "árido de origen mineral que únicamente ha sido sometido a procesos mecánicos". Los áridos naturales granulares o rodados se obtienen en las graveras, utilizándose después de un proceso que incluye el lavado y la clasificación. Los áridos naturales de machaqueo se producen en canteras después de someterlos a procesos de trituración y clasificación.

Los áridos artificiales son obtenidos mediante un proceso industrial y los áridos reciclados son los que se generan con la destrucción de construcciones previas

y que constituyen la gran mayoría de los RCD (Residuos de la Construcción y Demolición), siendo unos y otros de utilización excepcional.

Los áridos deben elegirse de acuerdo con su naturaleza, resistencia, forma, absorción de agua, granulometría, durabilidad, etc; sin embargo, en la mayoría de los casos debemos utilizar los áridos disponibles en el lugar de su utilización o en sus proximidades como consecuencia de los costes de transporte. Se deben de emplear los mejores materiales entre los que estén a nuestra disposición (Charif *y col.* 1990), ya que la utilización de materiales especiales, aunque es siempre posible, conduce a un hormigón con costes elevados y no competitivo (Torralles-Carbonari *y col.* 1996).

Kompen (1994) señala que deben de escogerse los áridos entre los que se encuentran más disponibles, buscando de los mismos una baja absorción de agua como primera característica. La absorción de agua condiciona la docilidad del hormigón ya que a mayor cantidad de agua absorbida por el árido menor cantidad quedará disponible en el amasado. La porosidad está ligada con la circulación de fluidos dentro del material, por lo que condiciona toda una serie de propiedades del mismo, como la absorción de agua, succión capilar, contenido en humedad natural, resistencia a los ciclos hielo-deshielo, etc, en definitiva un aspecto de gran trascendencia para la durabilidad.

El conocimiento de la humedad que poseen los áridos, en especial las arenas, es de gran importancia por la repercusión que puede tener ésta en la relación real agua/cemento (de Larrard 1994).

Desde el punto de vista de la fabricación del hormigón, los áridos calizos son más absorbentes que los silíceos por lo que necesitan mayor cantidad de agua durante el amasado, aunque el uso de aditivos reductores de agua contribuye a paliar este fenómeno. Los áridos calizos presentan una menor resistencia al desgaste que los silíceos, pero por lo contrario, la adherencia del árido calizo machacado con el cemento es superior a la del árido silíceo debido a la mayor rugosidad y porosidad del calizo. También presentan los áridos calizos mayores adherencias químicas debido a su reactividad con el aluminato tricálcico del cemento y el aumento de velocidad de hidratación del silicato tricálcico, pues los finos del árido calizo no son inertes al cemento (de Larrard 2000) (Giganto y Morano 2006).

Ciertas propiedades de los áridos dependen de las rocas de las que proceden como su composición química, estructura petrográfica, resistencia, dureza, densidad, compacidad, color, etc; otras propiedades, sin embargo, van a depender del proceso de formación del árido como el tamaño, forma, textura superficial, absorción, etc. Las propiedades anteriores van a influenciar en las características del hormigón, tanto en su estado fresco como endurecido (Fernández Cánovas 2013).

La descripción petrográfica del material suministra una información valiosa sobre la mineralogía, tamaño de grano y textura, aspectos que condicionarán de forma determinante el comportamiento futuro del árido (Bustillo 2008). El análisis mine-

ralógico permitirá detectar la presencia de componentes que pueden ser peligrosos si el material se usa como árido. Los áridos empleados en hormigones no deben ser activos frente a los componentes del cemento o frente a agentes externos como el aire, agua, hielo, etc.

Las propiedades físicas que pueden afectar al comportamiento del árido son básicamente la densidad, la absorción de agua, la porosidad, la humedad o la dureza (Bustillo 2008). La densidad es importante cuando se quiere fabricar hormigones ligeros o pesados o se dosifica el hormigón en volumen.

En cuanto a la dureza, resulta trascendente en aplicaciones en las que el hormigón está sometido a desgaste o impactos. Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación como el ensayo de Los Ángeles nos ofrecen también información de la forma y homogeneidad de las partículas que constituyen la fracción estudiada, pues componentes con formas lajosas, por ejemplo, generan un mayor coeficiente de Los Ángeles (Bustillo 2008).

La resistencia a compresión es la propiedad mecánica más importante en el hormigón. Dado que un hormigón no puede tener más resistencia a compresión que la que tienen los áridos que lo constituyen, es imprescindible conocer el valor de la resistencia mecánica de los áridos, lo cual no siempre es fácil por las propias características del material, recurriéndose normalmente a realizar determinaciones indirectas: confecciones de hormigones patrón y estudio comparativo entre ellos, a través de probetas talladas de las rocas de las que proceden, o bien determinando mediante un ensayo a compresión el “índice de machacabilidad” de un conjunto de áridos introducidos en un molde muy rígido.

En la fabricación de hormigones es normal utilizar áridos cuyas resistencias a compresión sean superiores a  $100 \text{ N/mm}^2$ . La resistencia promedio de distintos áridos se puede ver en la tabla 2.2.

De Larrard (2000) propone la siguiente ecuación que tiene en cuenta la influencia de los áridos en la resistencia a compresión del hormigón:

$$f_c = \frac{p \cdot f_{cm}}{q \cdot f_{cm} + 1} \quad (2.8)$$

donde:

- $f_c$  es la resistencia a compresión del hormigón.
- $f_{cm}$  es la resistencia a compresión de la matriz.
- $p$  y  $q$  son dos constantes experimentales que dependen del tipo de árido.

La precisión del modelo descrito por la ecuación anterior es de  $2,2 \text{ MPa}$  y los parámetros  $p$  y  $q$  no pueden medirse directamente, deben de ser calibrados mediante

Material	Resistencia a compresión ( $N/mm^2$ )
Caliza	160
Cuarcita	278
Grava silícea	140
Granito	185
Gneis	165
Mármol	150
Esquistos	190
Arenisca	145
Pórfido	230
Basalto	200

**Tabla 2.2:** Valores de la resistencia a compresión promedio de rocas de uso común en la fabricación de hormigón.

ensayos a compresión del hormigón. El parámetro  $p$  tiene que ver con la adherencia a la pasta de cemento del árido y el parámetro  $q$  con la resistencia intrínseca del árido.

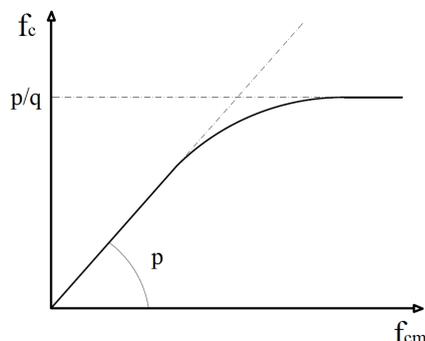
Si la resistencia a compresión de la matriz es muy elevada, la resistencia a compresión del hormigón tiende a  $p/q$ , lo que da a entender que la resistencia intrínseca de la roca controla la resistencia del hormigón. Sin embargo, si la resistencia de la matriz es débil, entonces la resistencia a compresión del hormigón es:

$$f_c \simeq p \cdot f_{cm} \quad (2.9)$$

Podemos suponer que existe una relación entre  $p$  y  $q$ . Si la resistencia intrínseca de la roca  $f_{cg}$  es conocida, entonces tenemos que:

$$\frac{p}{q} \simeq 2,14 \cdot f_{cg} \quad (2.10)$$

Cuando la resistencia de la matriz es inferior a la de los áridos, la resistencia del hormigón depende de la resistencia de la pasta y de la resistencia de la interfase pasta-árido, no siendo proporcional la resistencia del hormigón a la de la matriz para todo tipo de áridos. Por ejemplo, los áridos calizos presentan mejores adherencias a la pasta de cemento que los áridos silíceos.



**Figura 2.1:** Influencia de las constantes  $p$  y  $q$  en la resistencia a compresión del hormigón y de la matriz.

Gardoni *y col.* (2007), basados en ensayos de microscopía electrónica de barrido SEM, discuten la influencia de las características mineralógicas del árido en la microestructura de la interfaz pasta-árido.

Para algunos autores como Maruyama *y col.* (2002) y Noguchi *y col.* (2003), el efecto del árido grueso sobre la resistencia del hormigón depende de su cantidad, su granulometría, su tamaño máximo y su origen desde el punto de vista de producción.

Alsayed y Amjad (1996), Chan *y col.* (2003) y Vu *y col.* (2011) han discutido que hay otras características, además de la resistencia del árido (que depende de su origen geológico), que afectan a la resistencia mecánica del hormigón: tamaño, forma, textura de la superficie y mineralogía, ya que influyen en las características de la zona de transición. Para estos autores, en la interrelación mecánica entre la matriz y el árido grueso, la adherencia es una consecuencia de la textura superficial (los áridos triturados producen adherencias superiores a los de canto rodado). También han discutido el efecto del tamaño máximo y de la cantidad de árido grueso, así como la demanda de agua por parte de los mismos.

Aunque áridos procedentes de diferentes orígenes pueden tener granulometrías similares, suelen comportarse de manera diferente debido a la forma y textura de las partículas (Scandiuizzi y Andriolo 1986). La forma externa del árido y su textura superficial tienen una gran influencia en ciertas propiedades del hormigón, como puede ser la trabajabilidad y las resistencias mecánicas (Mehta y Monteiro 1994). Los áridos rodados proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo menos cantidad de agua y pasta de cemento que los áridos de machaqueo. Los áridos procedentes de la trituración necesitan mayor cantidad de agua y de pasta de cemento para lograr la trabajabilidad (Gallias *y col.* 2000) (Koehler y Fowler 2007) pero con una mayor adherencia entre el árido y la pasta (de Larrard 2000), que se refleja en una mayor resistencia del hormigón. El anterior efecto de los

áridos machacados se minimiza cuando las partículas se aproximan a poliedros de cuatro o más caras (Bustillo 2008). Ensayos diversos señalan la dependencia del porcentaje de huecos con la forma de los áridos (Neville 1995).

En general, el empleo de áridos gruesos con formas inadecuadas dificulta extraordinariamente la obtención de buenas resistencias y exige dosis excesivas de cemento. Féret (1938) y Kaplan (1958) atribuyen a la forma del árido grueso una gran importancia, sin embargo Walkers y Proudley (1929), Goldbeck (1930), Gordon (1958) y Berzin y Galaktionov (1963) no le confieren influencia alguna o bien solo insignificante. Según O'Reilly (1995), esta disparidad de opiniones tiene que ver con influencias secundarias y también por enfoques peculiares al formular las conclusiones.

Los áridos laminares y aciculares producen hormigones de peor calidad debido a que estas formas repercuten negativamente en las resistencias y en la durabilidad, ya que tienden a orientarse en un plano acumulando debajo de ellos agua y aire (Skalny y Mindess 1998).

Para medir la forma de los áridos está el coeficiente de forma o bien el índice de lajas determinados según la norma UNE-EN933-4: (2008) "*Determinación del coeficiente de forma*" y la norma UNE-EN933-3: (2012) "*Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas*" respectivamente.

Se denomina coeficiente de forma del árido grueso a la relación entre el volumen efectivo de la cantidad de árido considerado y el volumen de las esferas circunscritas a los granos considerados. El rango óptimo del coeficiente de forma del árido grueso en lo que respecta a la resistencia a la compresión se encuentra entre 0,2 y 0,3, tanto para 7 como para 28 días.

La presencia de finos debilita la adherencia del árido a la pasta de cemento, además de exigir mayor cantidad de agua de amasado. La instrucción EHE-08, al igual que otras normativas internacionales, limita los valores del contenido de finos en el árido. Nel Quiroga y Fowler (2004) hacen una recopilación de dichos valores. En el caso de la normativa española en la actualidad, permite para el árido fino un 6% que pasa por el tamiz 0,063 mm si son arenas naturales de canto rodado y de un 6 al 16% que pasa por el tamiz 0,063 mm si son arenas de machaqueo en función de la exposición. Para el árido grueso, la limitación de finos que pasan por el tamiz 0,063 mm se sitúa en el 1,5%.

Las arenas pueden presentar incompatibilidad con los aditivos reductores de agua si estas retienen una cierta cantidad de aditivo impidiendo que se adsorba sobre el cemento. Se considera que una arena no es compatible con un cierto aditivo cuando esta retiene un porcentaje superior al 40 - 50%, evaluado mediante ensayos de adsorción. La naturaleza mineralógica de la fracción <0,063 mm del árido fino es la que condiciona la compatibilidad. Arenas lavadas sin finos no presentan incompatibilidad con el aditivo, pero sin embargo arenas machacadas con finos ricos en arcillas pueden presentar incompatibilidad. Los aditivos plastificantes y

los superplastificantes convencionales no suelen presentar nunca fenómenos de incompatibilidad con las arenas, que sin embargo, sí se pueden dar en el caso de superplastificantes de última generación (Borralleras Mas 2012).

La distribución de los distintos tamaños de los granos que componen un árido tiene una gran importancia en las características del hormigón. El estudio de dicha distribución suele efectuarse mediante la curva granulométrica, que se determina cribando el árido a través de una serie normalizada según la EHE (2008) y la UNE-EN12620:2003+A1: (2009) de cribas y tamices.

La EHE (2008) establece los requisitos del árido utilizado para fabricar hormigón, resultando viables para este uso las gravas y arenas, tanto trituradas como rodadas. De hecho, cualquier tipo de árido que en la práctica haya mostrado un buen comportamiento puede ser utilizado.

La EHE (2008) ofrece el criterio general para la designación del árido de acuerdo al esquema siguiente:

$$GR - d/D - IL - N$$

donde  $GR$  hace referencia al grupo de árido, concretamente: árido grueso (AG), árido fino (AF), y finos (FN);  $d$  es el tamaño mínimo del árido ( $mm$ );  $D$  es el tamaño máximo del árido ( $mm$ );  $IL$  identifica la forma del árido: rodado (R), triturado (T) y mezcla (M); y finalmente  $N$  hace referencia a su naturaleza: calizo (C), silíceo (S), dolomítico (D), artificial (A) y reciclado (R). Este ha sido el formato utilizado para designar los diferentes áridos en este estudio.

La UNE-EN933-2: (1996) define el tamaño máximo ( $D$ ) y mínimo ( $d$ ) del árido grueso o fino en términos del tamiz de abertura. En la tabla 2.3 se muestran los requisitos generales relativos al tamaño máximo y mínimo del árido.

La distribución granulométrica del árido debe cumplir los requisitos para  $d/D$  de acuerdo con la UNE-EN933-1: (2012). La EHE-08 recomienda el huso de la UNE-EN933-2: (1996) para determinar la distribución granulométrica del árido, no imponiendo restricciones en el caso de árido grueso y todo-uno y estableciendo una granulometría comprendida dentro de unos husos para el caso de la arena. La EHE-08 también limita la cantidad de finos en el árido así como la composición de la fracción fina.

Diversos autores han estudiado el efecto de la proporción entre el volumen de áridos y el cemento en la resistencia del hormigón y han encontrado que aún no siendo un factor principal, para una relación agua/cemento constante, la resistencia aumenta ligeramente con la proporción de árido, es decir, con una dosificación con menos cemento (Erntroy y Shaclock 1954) (Neville 1995) (Popovics 1998) .

Un estudio efectuado por Stock *y col.* (1979) sobre el efecto del volumen granular mostraba por ajuste de los resultados experimentales que la resistencia disminuía

**Tabla 28.3.a Requisitos generales de los tamaños máximo D y mínimo d.**

		Porcentaje que pasa (en masa)				
		2 D	1,4 D <sup>a)</sup>	D <sup>b)</sup>	d	d/2 <sup>a)</sup>
Árido grueso	$D > 11,2$ ó $D/d > 2$	100	98 a 100	90 a 99	0 a 15	0 a 5
	$D \leq 11,2$ o $D/d \leq 2$	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
Árido fino	$D \leq 4$ y $d = 0$	100	95 a 100	85 a 99	-	-

a) Como tamices 1,4D y d/2 se tomarán de la serie elegida o el siguiente tamaño del tamiz más próximo de la serie.

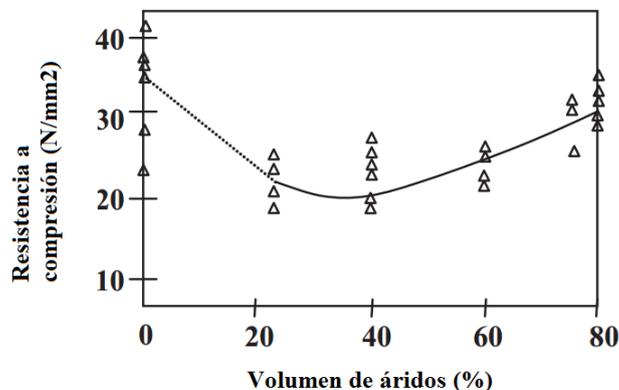
b) El porcentaje en masa que pase por el tamiz D podrá ser superior al 99 %, pero en tales casos el suministrador deberá documentar y declarar la granulometría representativa, incluyendo los tamices D, d, d/2 y los tamices intermedios entre d y D de la serie básica más la serie 1, o de la serie básica más la serie 2. Se podrán excluir los tamices con una relación menor a 1,4 veces el siguiente tamiz más bajo.

**Tabla 2.3:** Tamaños máximos y mínimos de los áridos según EHE-08.

cuando el volumen de pasta aumentaba, al menos en la gama usual de hormigones estructurales. Para un volumen granular del 40 %, tal y como se puede observar en la figura 2.2, la resistencia a compresión es mínima. Neville (1995) obtiene resultados similares para la relación entre la resistencia a compresión y el volumen de áridos en el hormigón con relaciones agua/cemento fijas y el modelo de comportamiento se mantiene para varias relaciones agua/cemento.

Inicialmente se consideró preferible utilizar en la fabricación del hormigón, el mayor tamaño máximo del árido posible con las limitaciones impuestas por la sección de la estructura y la distancia libre entre los refuerzos de acero. Esto es así porque a mayor tamaño del árido, menor superficie específica debe de ser mojada por unidad de volumen, con lo que para una trabajabilidad y contenido de cemento dados, la relación agua/cemento puede reducirse con el consiguiente aumento de resistencia.

Walker y Bloem (1960) publicaron en el "*ACI Journal*" un artículo en el que defendían que a relación  $a/c$  constante, la resistencia a compresión del hormigón disminuía cuando la dimensión máxima de los áridos  $D_{max}$  aumentaba. Esta propuesta siembra todavía hoy la controversia ya que siempre se ha admitido que a mayor  $D_{max}$ , más compacto es el hormigón y mayor resistencia y durabilidad presenta. En efecto dos fenómenos, antagónicos se ejercen: para una cantidad de cemento dado el aumento de  $D_{max}$  tiende a reducir la necesidad de agua; mientras



**Figura 2.2:** Efecto del volumen de áridos sobre la resistencia a compresión del hormigón (Stock y col. 1979).

que para una relación  $a/c$  dada, la resistencia obtenida es inferior a mayor tamaño de árido. Por consiguiente, existe un tamaño máximo de árido óptimo. Este tamaño máximo disminuye a medida que la cantidad de cemento aumenta (Cordon y Gillespie 1963).

### 2.2.3 El agua y su papel en el hormigón

El agua es el componente esencial en cualquier material fabricado con cemento, ya que sin ella no sería posible el proceso de hidratación. Es la reacción química entre el agua y el cemento la que propicia el fraguado y el endurecimiento de la pasta que une los áridos.

También es importante la función del agua en la trabajabilidad del hormigón en estado fresco al fluidificar la masa para que esta presente la consistencia adecuada a la aplicación deseada. Es decir, el agua actúa como lubricante confiriéndole al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.

La función del agua en la trabajabilidad puede ser entendida al considerarse al hormigón fresco como una suspensión de granos de diferentes tamaños en el agua (Toutou y Roussel 2006). Así pues, cuanto mayor es el volumen de agua, más fluido es el hormigón, ya que las partículas se encuentran más distantes unas de otras con lo que el contacto y fricción entre los granos es menor.

Se puede considerar que la cantidad de agua precisa para la hidratación del cemento es del 23% del peso de los componentes anhidros del mismo. No obstante, un hormigón en el que se emplease esta cantidad de agua sería imposible de trabajar,

de ahí la utilización de mayores cantidades de agua y el uso de aditivos reductores de agua en la fabricación del hormigón.

Taylor (1990), en base a la teoría de Powers y Brownyard (1946-1947), realiza una clasificación del agua en base a su función en la hidratación del cemento Portland y demuestra la cantidad aproximada necesaria al cumplimiento de cada función:

- El agua no evaporable ( $\simeq 0,23$ ) es aquella que reacciona con los compuestos del clínker y forma los productos de hidratación, no pudiendo eliminarse a través del secado D-secado. Powers y Brownyard (1946-1947) y Brouwers (2005) llegan a contenidos prácticamente iguales, aproximadamente a  $0,72 \text{ cm}^3/\text{g}$  o lo que es lo mismo, relaciones agua/cemento de 0,23.
- El agua químicamente combinada ( $\simeq 0,32$ ) incluye el agua no evaporable así como parte del agua presente en los poros de los productos de hidratación del cemento. Esta agua es parte integral de los productos cementicios hidratados y se ha evaluado como el agua retenida en equilibrio al 11 % de humedad relativa.
- La relación  $a/c$  crítica (entre 0,42 y 0,44 según Powers y Brownyard (1946-1947)) se refiere a aquella necesaria para la hidratación completa del cemento. Incluye, además del agua químicamente evaporable, el agua necesaria al distanciamiento entre granos para que los productos de hidratación tengan el espacio necesario para formarse. Brouwers (2004) propone una relación  $a/c$  de 0,39 para el cemento tipo I (CEM I), debido a su composición diferente con respecto a los utilizados por Powers y Brownyard (1946-1947).

Así pues, el agua presenta una función física en la hidratación del cemento, que es la de promover el espaciado entre granos para que puedan formarse los productos de hidratación. Bentz y Aitcin (2008) han descrito el papel del agua en determinar la distancia entre las partículas de cemento en las pastas. A menor distancia, más rápido llenan los espacios entre granos los productos de hidratación y más fuertes son los enlaces creados y por consiguiente la resistencia del hormigón.

La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, generalmente con la utilización de aditivos, dado que el exceso de agua se evapora aumentando la porosidad capilar del hormigón que disminuye su resistencia y aumenta su permeabilidad. Incluso en cuanto a la trabajabilidad, un exceso de agua resulta perjudicial a la mezcla, dado que los componentes sólidos y líquidos tienden a separarse, perdiendo cohesión y produciendo segregación.

La EHE-08 establece algunas consideraciones y especificaciones respecto a la utilización del agua en la fabricación del hormigón que hace extensivas al agua de curado. Así pues, el agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. En general podrán emplearse todas las aguas sancionadas en

la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización o exista duda, las aguas deben analizarse y deben cumplir las condiciones expresadas en la citada norma.

La característica porosa de los áridos que se utilizan en la producción de hormigones, provoca la absorción de agua por parte de los mismos. Además, el mojado de la superficie de los granos es inherente a la producción de hormigón, con lo que cuanto mayor es el área superficial a ser mojada, mayor es el volumen de agua necesario.

La compacidad del conjunto granular también define una de las funciones básicas del agua, como es rellenar los huecos entre partículas en las mezclas. Además, el agua produce espaciamiento de los granos de modo que el conjunto granular compacto pasa a ser una dispersión de partículas en agua. Esto es importante tanto para conseguir la consistencia adecuada en estado fresco, como en facilitar el espaciamiento necesario a la formación de los productos de hidratación del cemento.

La figura 2.3 resume el comportamiento físico del agua al entrar en contacto con las partículas granulares (absorción, mojado y fluidificación).

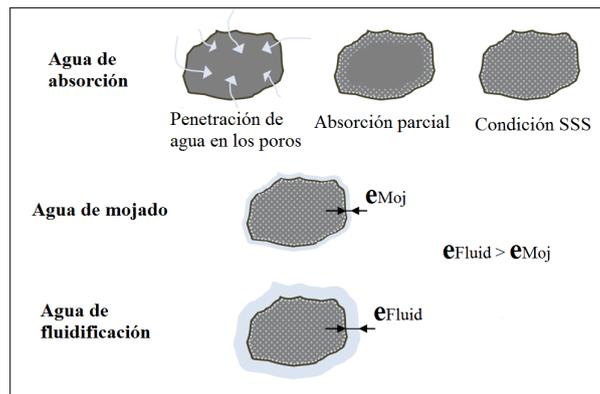


Figura 2.3: El rol físico del agua en la mezcla (Klein 2012).

Klein (2012) sintetizó el procedimiento de cálculo del volumen de agua necesario en la producción de hormigones, a partir de sus conjuntos granulares. Así, el volumen total de agua  $V_{agua\ total}$  de una mezcla viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_{agua\ total} = V_{abs} + V_{moj} + V_{fluid} \quad (2.11)$$

siendo  $V_{abs}$  el volumen de agua de absorción,  $V_{moj}$  el volumen de agua de mojado y  $V_{fluid}$  el volumen de agua de fluidificación.

El volumen de agua de absorción se calcula por el producto del coeficiente de absorción de agua de los áridos y el consumo de árido, en masa, para cada uno

de los diferentes tipos de áridos de la mezcla, tal y como muestra la siguiente ecuación:

$$V_{abs} = \sum (A_{\rho t(i)} \cdot C_{s\ arido(i)}) \quad (2.12)$$

donde:

$A_{\rho t(i)}$  es el coeficiente de absorción de agua para el árido  $i$  en el tiempo  $t$  (%).

$C_{s\ arido(i)}$  es el contenido de árido  $i$  en  $Kg/m^3$ .

$i$  son los distintos tipos de áridos componentes de la mezcla.

La absorción de agua por los áridos sigue una tendencia logarítmica en función del tiempo tal y como se desprende de numerosos estudios presentados en la literatura (Ortiz 2005) (Tam y col. 2008) (Alhozaimy 2009) (Ke y col. 2009) (Castro y col. 2011) (Tegguer 2012), siendo adecuado el uso de la ecuación siguiente (Klein 2012):

$$A_{\rho t} = A_{\rho 24} \cdot (1 - e^{-60K\sqrt{t}}) \quad (2.13)$$

donde:

$A_{\rho t}$  es el coeficiente de absorción de agua a tiempo  $t$  entre 0 y 24 horas (%).

$A_{\rho 24}$  es el coeficiente de absorción de agua a las 24 horas (%).

$t$  tiempo en  $h$ .

$K$  parámetro de ajuste de la ecuación.

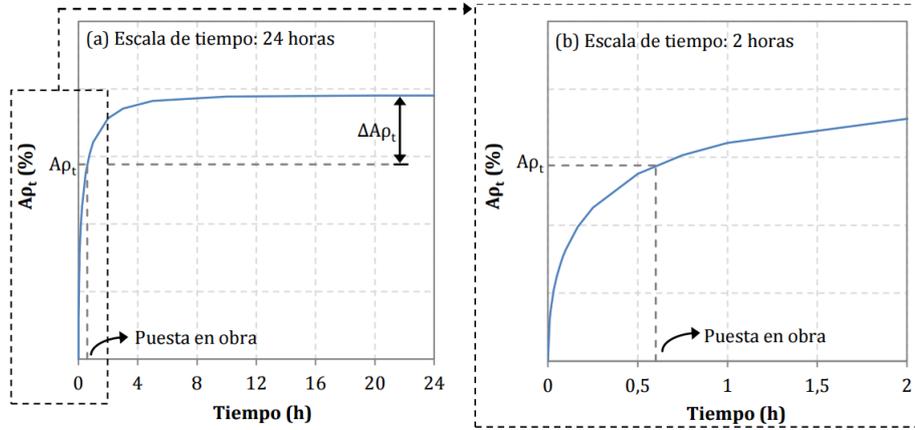
El parámetro  $K$  varía poco entre áridos de diferente naturaleza. También se observa una ligera variación debida a la granulometría, siendo  $K$  menor en el caso del árido fino que en el caso del árido grueso y creciendo el valor de  $K$  ligeramente tal y como aumenta el tamaño máximo del árido. En el caso de los áridos calizos utilizados en la presente tesis doctoral, se obtienen los siguientes valores de  $K$  en la revisión bibliográfica realizada (Ortiz 2005) (Alhozaimy 2009) (Klein 2012) (Klein y col. 2014):

Granulometría	K
Arido fino 0/4	0,03
Arido grueso 4/12	0,04
Arido grueso 12/32	0,05

**Tabla 2.4:** Valores de  $K$  para áridos calizos de diferentes granulometrías.

La elección del tiempo de absorción debe tener en cuenta los tiempos de producción, transporte y puesta en obra para que el hormigón conserve sus propiedades reológicas durante ese tiempo y evitar tanto pérdidas de trabajabilidad indeseables, como volúmenes de agua de absorción superiores al necesario que afectaran negativamente a la resistencia.

En situaciones que supongan tiempos superiores a los 60 minutos, el coeficiente de absorción en este intervalo de tiempo puede ser próximo al valor que se obtiene a las 24 horas, dado que se aproxima a la ecuación de saturación del árido, como se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 2.4:** Elección de  $A_{\rho t}$  con base en el tiempo de puesta en obra (Klein 2012).

Sin embargo, en el caso de hormigones donde la puesta en obra se realiza rápidamente, el coeficiente de absorción tiene un valor significativamente menor respecto a las 24 horas.

El volumen de agua necesario para mojar los granos componentes de los hormigones se calcula a partir tanto de la gráfica de la figura 2.5 como de la ecuación presentadas a continuación:

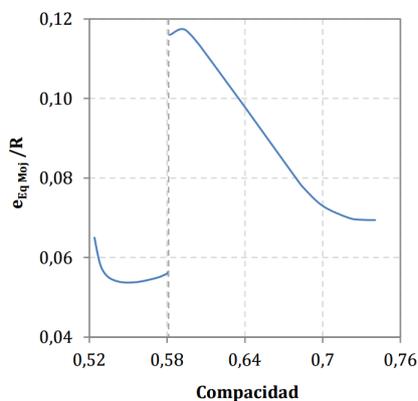
$$V_{moj} = e_{eq\ moj} \cdot K_{moj} \cdot A_{sup} \quad (2.14)$$

donde:

$e_{eq\ moj}$  es el espesor equivalente de agua de mojado ( $m$ ).

$K_{moj}$  es un coeficiente de corrección para  $e_{eq\ moj}$ .

$A_{sup}$  es el área superficial total de los granos ( $m^2$ ).



**Figura 2.5:** Cálculo de espesor equivalente de agua de mojado (Klein 2012).

El valor del coeficiente  $K_{moj}$  depende del porcentaje de aditivo superplastificante incorporado a la mezcla, tomando un valor igual a 2,0 cuando no se añade superplastificante a la mezcla, y valores iguales a 1,8 y 0,7 cuando los porcentajes de aditivos añadidos son de 0,5 y 1% respectivamente sobre el peso del cemento.

El volumen de agua de fluidificación se calcula en dos partes: el volumen necesario para rellenar los poros efectivos (aire) en el conjunto granular compacto  $V_{p(total)}$ , y el volumen necesario para distanciar las partículas  $V_{D(min)}$ .

El cálculo del volumen total de poros efectivos presentes en  $1\ m^3$ ,  $V_{p(total)}$  se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{p(total)} = V_p \cdot N_{V_B/m^3} \quad (2.15)$$

donde:

$V_{p(total)}$  es el volumen total de poros efectivos presentes en  $1\ m^3$  ( $m^3$ ).

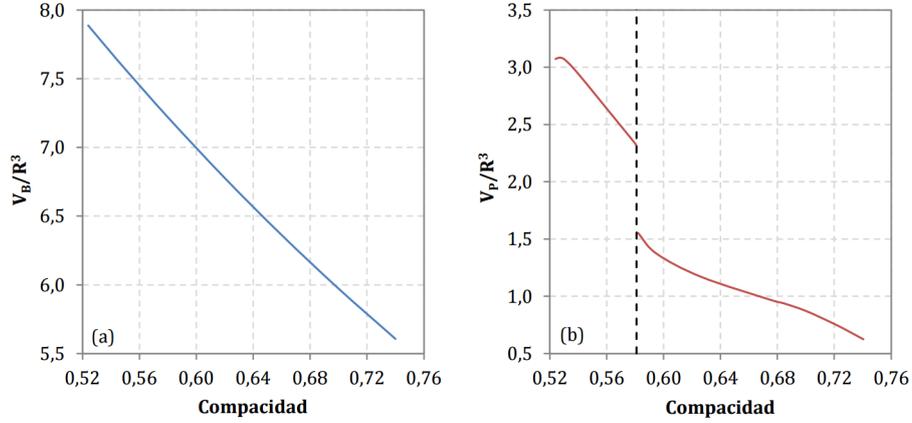
$V_p$  es el volumen de poros efectivos en el interior de  $V_B$  ( $m^3$ ).

$N_{V_B/m^3}$  es el número de  $V_B$  presente en  $1\ m^3$ .

El número de  $V_B$  en  $1\ m^3$  se calcula a partir de la ecuación:

$$N_{V_B/m^3} = \frac{1}{V_B} \quad (2.16)$$

$V_B$  y  $V_p$  se calculan a partir de las gráficas que se presentan a continuación en la figura 2.6.



**Figura 2.6:** Cálculo del volumen de agua de fluidificación (Klein 2012).

Finalmente, el volumen mínimo de agua necesario para distanciar las partículas se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V_{D(min)} = e_{D(min)} \cdot A_{sup} \quad (2.17)$$

$$e_{D(min)} = \frac{\sqrt{\frac{A_{(h)} C_N}{48\pi R \tau_0}}}{2} \quad (2.18)$$

siendo:

$V_{D(min)}$  el volumen mínimo de agua para distanciar las partículas ( $m^3$ ).

$e_{D(min)}$  el espesor mínimo de agua que actúa distanciando las partículas ( $m$ ).

$A_{sup}$  el área superficial total de los granos ( $m^2$ ).

$A_{(h)}$  la constante de Hamaker ( $J$ ).

$C_N$  el número de coordinación.

$R$  el radio de las partículas ( $m$ ).

$\tau_0$  la tensión umbral de la mezcla ( $Pa$ ).

Así, el volumen de agua de fluidificación se calcula según la ecuación:

$$V_{fluid} = V_{p(total)} + V_{D(min)} \quad (2.19)$$

#### 2.2.4 Aditivos

Los aditivos químicos para hormigón son definidos por la norma europea armonizada UNE-EN934-2:2010+A1: (2012) como "*Producto incorporado en el momento del amasado del hormigón en una cantidad no superior al 5 %, en masa, en relación al contenido de cemento*".

La incorporación de los aditivos plastificantes/superplastificantes da lugar a la mejora significativa de la trabajabilidad y bombeabilidad del hormigón fresco manteniendo una baja relación agua/cemento y contribuyendo así a la mejora de las propiedades mecánicas y de la durabilidad del hormigón.

Los aditivos plastificantes y superplastificantes están contemplados en la anteriormente mencionada norma UNE-EN934-2:2010+A1: (2012) y se denominan formalmente reductores de agua o plastificantes y reductores de agua de alta actividad o superplastificantes, aunque también se los conoce como fluidificantes y superfluidificantes.

En la práctica, plastificantes y superplastificantes pueden ser incorporados en el hormigón con tres objetivos diferentes (Edmeades y Hewlett 1998). Por un lado, permiten reducir la relación agua/cemento en el hormigón sin afectar a su trabajabilidad, de manera que se obtienen significativas mejoras de resistencia y durabilidad. Por otro lado, si se mantiene constante la relación agua/cemento, su incorporación conduce a una mejora de la trabajabilidad del hormigón, sin afectar significativamente las propiedades mecánicas y durabilidad. Por último, y aprovechando su capacidad reductora de agua, permiten optimizar simultáneamente el contenido de cemento y la relación agua/cemento con el objetivo de obtener un hormigón con la misma fluidez inicial y con la misma resistencia que nuestro hormigón de referencia.

En un hormigón sin plastificantes o superplastificantes, las partículas de cemento presentan una fuerte tendencia a agruparse debido a interacciones electroestáticas y de Van der Waals, dando lugar a flóculos o agrupaciones de partículas que impiden la dispersión uniforme de las partículas de cemento en la masa de hormigón y retienen una determinada cantidad de agua en su interior (M16-ACHE 2010). Debido a esto anterior, la trabajabilidad de la mezcla y la cantidad de agua disponible para la hidratación es menor, lo que conlleva la necesidad de incorporar una cantidad de agua adicional que implicará una cierta pérdida de resistencia del hormigón endurecido y un aumento de su permeabilidad.

En presencia de un aditivo reductor de agua, el grado de floculación de las partículas de cemento disminuye, dando lugar a un sistema con partículas dispersas en una solución acuosa. El agua que inicialmente estaba atrapada entre los flóculos de cemento, queda liberada con lo que aumenta la fluidez del hormigón y se dispone de una mayor accesibilidad del agua a la superficie del cemento para la hidratación temprana. Las interacciones entre los aditivos reductores de agua y las partículas de cemento se clasifican en:

- Interacciones físicas: las moléculas de aditivo se absorben sobre las partículas de cemento, impidiendo la floculación de estas debido a la generación de fuerzas repulsivas por disminución del potencial zeta (repulsión electroestática) y/o por impedimento estérico.
- Interacciones químicas: adsorción química o selectiva, reacción química con los hidratos del cemento y formación de complejos con  $Ca^{2+}$ .

Desde el punto de vista químico, tanto los aditivos plastificantes como los superplastificantes pertenecen a la categoría de los tensoactivos, así pues, se caracterizan por poseer actividad superficial en procesos en los que existe contacto entre un líquido y un sólido. Las propiedades de los mismos dependen de los grupos hidrofóbicos y de los grupos hidrofílicos.

A pesar de la gran cantidad de aditivos plastificantes y superplastificantes utilizados en la industrial del hormigón, es posible clasificarlos en función de la familia química a la que pertenecen. En los plastificantes se pueden distinguir tres composiciones básicas:

- Lignosulfonatos modificados (LS).
- Sales de ácido hidrocarboxílico.
- Derivados de polisacáridos.

En el caso de los superplastificantes se distinguen también tres categorías fundamentales:

- Sales de condensado de naftaleno sulfonado y formaldehído (SNF).
- Sales de melamina sulfonada y formaldehído (SMF).
- Polímeros con configuración tipo peine, denominados genéricamente policarboxilatos (PCE).

Uno de los aspectos más importantes en el empleo de aditivos plastificantes y superplastificantes radica en la elección del aditivo y de la dosis apropiada. El anterior aspecto condicionará las propiedades del hormigón y sus posibilidades de colocación en obra, así como su coste. La elección del aditivo y su correcta dosificación debe tener en consideración los materiales constituyentes (sobre todo el cemento) así como las condiciones de utilización (relación  $a/c$ , temperatura ambiente, secuencia de mezclado, etc). Según la aplicación, a la hora de seleccionar un aditivo y dosificación, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Capacidad reductora de agua y resistencias a compresión.

- Mantenimiento de la trabajabilidad en el tiempo y retraso de fraguado e incorporación de aire.

Decidir entre el empleo de un plastificante o un superplastificante dependerá del grado de reducción de agua o del aumento de trabajabilidad deseados. La norma UNE-EN934-2:2010+A1: (2012) nos indica el nivel de reducción del contenido de agua que proporciona cada tipo de aditivo con respecto a un hormigón de referencia. Evidentemente, a mayor reducción de la relación agua/cemento para la misma trabajabilidad, mayor resistencia alcanzada. Si lo que se pretende es obtener un asentamiento de cono superior, manteniéndose constante la relación  $a/c$ , entonces seguiremos las recomendaciones indicadas también en dicha norma.

En la elección del aditivo es muy importante también, tener en cuenta el mantenimiento de la trabajabilidad en el tiempo, así como limitar los retrasos de fraguado ocasionados por los aditivos. La utilización de cualquier aditivo reductor de agua en las pastas de cemento conlleva un cambio de fluidez de la misma y un retraso en los procesos de hidratación. En este retraso influyen muchos factores entre los que se encuentra la finura y composición del cemento, la naturaleza y peso molecular del aditivo, la dosis de aditivo y la temperatura. Numerosos estudios se han realizado para determinar el efecto de los aditivos reductores de agua del tipo LS, SNF y SMF sobre la hidratación del cemento Portland, entre los que destacan, Uchikawa *y col.* (1992), Ramachandran *y col.* (1998), Hanehara y Yamada (1999), Puertas y Vázquez (2001) y Chandra y Björnström (2002). Hay algunos autores (Uchikawa *y col.* 1992) (Uchikawa *y col.* 1995) que proponen que el retraso de la hidratación es consecuencia de la formación de un complejo de quelato con los iones  $Ca^{2+}$ , disminuyendo su concentración en la fase acuosa y retrasando la precipitación y por consiguiente el inicio de fraguado. Sin embargo, otros autores como Mollah *y col.* (2000) consideran que el retraso en la hidratación del cemento se debe a la adsorción del aditivo sobre los granos de cemento y posterior formación de una capa protectora que dificulta el contacto entre el agua y el cemento.

Los aditivos en la actualidad están formulados para evitar la incorporación de aire en el hormigón, no obstante es de todos conocido, la existencia de problemas habidos en lo que a la incorporación de aire se refiere.

En 1932 ya se utilizaban pequeñas cantidades de sales polimerizadas de naftaleno-sulfonato formaldehído para incrementar la fluidez del cemento. Rixom (1984) recoge numerosos trabajos sobre el uso de lignosulfonatos y composiciones mejoradas realizadas desde la segunda década de los años 30 y principios de los 40. En 1960, la utilización de plastificantes ya era habitual en Europa. Los plastificantes históricamente más utilizados son los basados en lignosulfonatos. El lignosulfonato es un producto secundario obtenido del proceso de extracción de la celulosa o pasta del papel de la madera, formado por una mezcla compleja de sustancias, y en consecuencia, sus características dependen de numerosos factores, como tipo y edad de la madera, proceso de fabricación de la pulpa del papel, proceso de

Año	1930	1970	1980	1990	2000
<b>Composición química</b>	Lignosulfonatos	Melamina y Naftaleno (SMF, SNF)	Subproducto industrial	Polímeros vinílicos	Policarboxilatos PCE
<b>Tipo aditivo</b>	Plastificantes	Superplastificantes dependiendo de la dosis	Polifuncionales	Superplastificantes	Superplastificantes
<b>Capacidad reductora de agua</b>	Hasta 10%	Hasta 25%	Hasta 15%	Hasta 30%	Hasta 40%
<b>Consistencia</b>	Plástica - Blanda	Fluida - Líquida	Blanda	Fluida - Líquida	Líquida y HAC
<b>Relación agua/cemento</b>	> 0,5	0,40 - 0,55	0,45 - 0,65	0,28 - 0,60	0,28 - 0,60
<b>Resistencia a compresión (Mpa)</b>	< 30	< 40	< 40	< 60	> 60
<b>Limitaciones</b>	Retrasos en fraguado a altas dosificaciones	Pérdida de trabajabilidad y segregación	Retrasos en fraguado	Riesgo de segregación a dosis elevadas	Riesgo de segregación a dosis elevadas
<b>Dosificación sobre peso cemento</b>	0,2 - 0,4%	1 - 2%	0,4 - 1%	0,8 - 2%	0,8 - 2%

**Tabla 2.5:** Evolución histórica y características de los aditivos reductores de agua

fermentación, etc. Su uso tan extendido tiene su base en las bajas dosificaciones, del orden de 0,5 % en peso del cemento, y bajo coste.

Los lignosulfonatos utilizados en la actualidad son los lignosulfonatos modificados (LS), que son aquellos en los que se ha reducido su contenido en azúcares mediante fermentación, y su porcentaje de incorporación de aire ocluido mediante antiespumantes principalmente. Como consecuencia del desarrollo por parte de la industria de la construcción, de lignosulfonatos con menores contenidos en azúcares (en definitiva, menores retrasos de fraguado) y menor oclusión de aire (mayores resistencias), estos han pasado de dosificaciones iniciales del 0,3 % a dosificaciones actuales del 0,4, 0,6 o incluso 0,8 % sobre el peso del cemento.

Una de las características principales de los aditivos del tipo lignosulfonato radica en el retraso en el fraguado como consecuencia de la formación de sacarosa por degradación bacteriana de la celulosa. Se forma sacarato cálcico que crea una ligera membrana que retrasa la hidratación del aluminato tricálcico. Estos aditivos son muy convenientes cuando tenemos tiempos de transporte de central a obra importantes y sobre todo a altas temperaturas, es decir, en verano en el Hemisferio Norte.

Hoy en día se están utilizando mezclas de policarboxilatos y lignosulfonatos para conseguir importantes reducciones de agua y mantenimientos de consistencia o retrasos de fraguado.

Otro tipo de plastificantes cuyo uso está menos extendido, son aquellos cuya formulación química está basada en sales de ácidos hidroxicarboxílicos y los derivados de polisacáridos.

Para poder elegir un u otro aditivo reductor de agua, se debe realizar un estudio previo en laboratorio y así poder detectar posibles problemas: incompatibilidad entre cemento y aditivo, retrasos de fraguado, etc (Day 1996). También se busca con estos estudios en laboratorio conocer el punto de saturación del aditivo para cada cemento utilizado y de esta manera optimizar la dosificación. El punto de saturación del aditivo se define como aquella dosificación a partir de la cual, mayores cantidades de aditivo no mejoran la trabajabilidad, sino que pueden incluso empeorarla y simultáneamente provocar problemas de retrasos de fraguado y segregación, además de encarecer significativamente el hormigón (Torralles-Carbonari y col. 1996).

La determinación de los parámetros reológicos es el método más riguroso para valorar el efecto de aditivos reductores de agua en el hormigón. No obstante, este método por su coste y laboriosidad, es generalmente inviable y se sustituye habitualmente por métodos más rápidos y sencillos de implementar realizados con morteros o pasta de cemento. Estos ensayos se fundamentan en considerar que es la pasta de cemento la base que gobierna la trabajabilidad y consistencia del hormigón fresco y permiten conocer el comportamiento de diferentes combinaciones cemento-aditivo, aunque estos resultados deben corroborarse en pruebas a la escala del hormigón. Los más habituales son el ensayo del cono de Marsh empleado tanto en pasta como en morteros o el mini-slump empleado exclusivamente en pasta de cemento.

### *Ensayo del cono de Marsh*

Este ensayo es adecuado para evaluar pastas de cemento muy fluidas con lo que se utiliza para evaluar el comportamiento de aditivos superplastificantes.

El ensayo es simple y rápido, y viene descrito en la norma UNE-EN445: (2009) “*Lechadas para tendones de pretensado : métodos de ensayo*”. El cono de Marsh consiste en un recipiente metálico de forma troncocónica como se puede observar en la figura 4.9 y con una abertura en la parte inferior de 8 mm de diámetro en pastas de cemento y 12,5 mm de diámetro en ensayos de mortero. Las dimensiones del recipiente vienen definidas en la norma.

El ensayo consiste en verter una determinada cantidad de pasta de cemento en el interior del cono y determinar el tiempo  $t$  que tarda en fluir una parte de la misma. Evidentemente a mayor fluidez de la pasta, menor tiempo. La elección de la cantidad de pasta se debe a un proceso de calibración descrito en la literatura (Agulló y col. 1999). El aumento de la dosis de aditivo en la pasta conduce a una reducción del tiempo de fluidez, hasta una cierta dosis del mismo por encima de la cual la fluidez deja de aumentar de forma significativa; a esta dosis se la llama

dosis o punto de saturación. Desde el punto de vista químico, la dosis de saturación se considera como la concentración en la que las condiciones superficiales son óptimas. En la literatura científica existen diferentes métodos para definir el punto de saturación. Algunos autores como Aitcin (1998) o Correira *y col.* (2002) lo definen como la intersección de dos líneas con diferente pendiente, otros autores definen el punto de saturación como la dosificación correspondiente a un ángulo interno  $\alpha_{ij} = 140 \pm 10^\circ$  en la curva  $\log(t) = ad/c$  (%).

En el trabajo de Roncero (2000) se determinó la relación entre los parámetros reológicos y el cono de Marsh de una pasta de cemento con aditivo superplastificante, observándose una tendencia similar entre la fluidez del cono de Marsh y la tensión umbral  $\tau_0$ , obteniéndose en ambos casos el mismo punto de saturación. Roncero (2000) también observó que los aditivos tipo polietercarboxilico (correspondientes a los superplastificantes denominados de nueva generación), muestran comportamientos más efectivos que los tradicionales con puntos de saturación tres veces menores y fluidez obtenida mayor. Con el ensayo en cono de Marsh también se puede evaluar la pérdida de fluidez con el tiempo, siendo este un problema bastante general en los aditivos superplastificantes.

### ***Mini-slump***

El mini-slump es un ensayo con una metodología similar al cono de Abrams pero con dimensiones más reducidas aunque proporcionales y en el que solo se tiene en cuenta el cono independientemente del tiempo (Pacios y Colonna 1997).

Este ensayo es exclusivo de pasta de cemento con una fluidez media o baja, requiere una cantidad mínima y es rápido y sencillo.

El procedimiento de ensayo consiste en llenar el mini-cono con la pasta de cemento y levantarlo rápidamente midiendo dos diámetros perpendiculares,  $d_1$  y  $d_2$ , de la extensión de la pasta. El valor del escurrimiento se determina como la media de los dos valores anteriores,  $(d_1 + d_2)/2$ .

Si durante un periodo de tiempo se repite el ensayo se puede obtener la evolución de la fluidez con el mismo.

### **2.2.5 Hormigones con fibras**

Los hormigones reforzados con fibras (HRF) se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa (EHE 2008). Adicionar fibras a un material con la finalidad de mejorar sus características es una técnica que se remonta a más de 4000 años de antigüedad (M2-ACHE 2002). El empleo de fibras tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura. Cuando se incluyen fibras con el objetivo de mejorar otras propiedades como la fisuración por retracción, resistencia al fuego,

abrasión o impacto, se considera que no tienen función estructural. La adición de fibras es admisible en hormigones en masa, armados y pretensados y la efectividad de las mismas puede ser muy variable. La incorporación de fibras modifica el comportamiento del hormigón, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de fisuras. En el caso de morteros y hormigón, las propiedades que se tratan de incrementar o mejorar son las resistencias a la fisuración, al impacto, a la tracción y, en consecuencia a la flexión.

Estas fibras se fabrican en la actualidad según la norma UNE-EN14889-1: (2008) y ASTM-A820 (2011) en un amplio rango de materiales: acero, polímeros, vidrio, carbono, etc.

La naturaleza y el tipo de fibras determinan la efectividad y eficiencia del refuerzo. En la actualidad se utilizan diversos tipos de fibras con características muy diversas, como se puede observar en la tabla siguiente:

FIBRA	Diámetro (µm)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (KN/mm <sup>2</sup> )	Tensión de rotura (KN/mm <sup>2</sup> )	Alargamiento (%)
Acero	5 - 1000	7,84	200	0,5 - 3	0,5 - 3,5
Acero Inox	5 - 100	7,86	160	2,1	3
Vidrio	9 - 15	2,6	70 - 80	2 - 2,4	2 - 3,6
Asbesto	1,5 - 20	3,2	83 - 138	0,6 - 1	1 - 2
Polipropileno	20 - 200	0,9	3,5 - 15	0,4 - 0,8	8
Aramida	10 - 15	1,45	65 - 133	2,9 - 3,6	2,1 - 4
Carbono	9 - 20	1,9	230	2,6 - 3	1
Nylon	20 - 400	1,1	4	0,9	13 - 15
Acrílica	14 - 18,0	1,18	14 - 20	0,2 - 0,4	11
Poliéster	20 - 400	1,4	8,2	0,7 - 0,9	11 - 13
Polietileno	25 - 1000	0,95	0,3	0,7 x10 <sup>(-3)</sup>	10

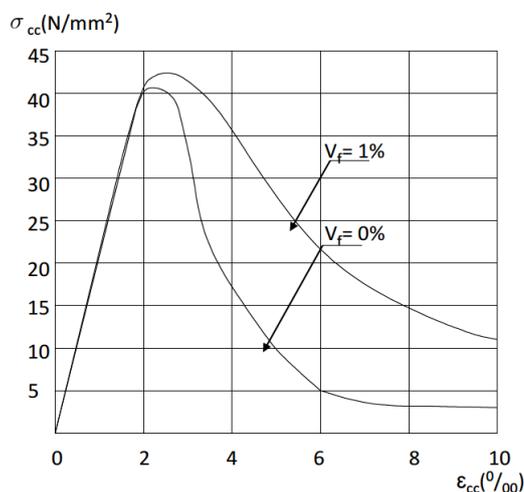
**Tabla 2.6:** Propiedades de los distintos tipos de fibras utilizadas en refuerzos de hormigón.

Las características geométricas de las fibras (longitud o longitud desarrollada  $l$ , diámetro o diámetro equivalente  $d_f$ , esbeltez o relación de aspecto de la fibra  $\lambda$ ), se establecerán de acuerdo con UNE-EN14889-1: (2008) para las de acero y con UNE-EN14889-2: (2008) para las poliméricas, que son las normas que rigen para las mismas.

Las fibras de acero se clasifican en los siguientes grupos: alambres estirados en frío (grupo I), láminas cortadas (grupo II), extractos fundidos (grupo III), conformadas en frío (grupo IV) y aserrados de bloques de acero (grupo V). La forma de la fibra: recta, ondulada, corrugada, conformadas en extremos de distintas formas, etc. incide de una manera importante en las características adherentes con el hormigón.

El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y la longitud de la misma  $l$  se recomienda que sea 2 veces el tamaño máximo del árido como mínimo, siendo habitual 2,5 a 3 veces.

El empleo de fibras de acero en el hormigón puede provocar una pérdida de ductilidad, función del tipo y longitud de la fibra empleada, así como de la cuantía de la misma, especialmente cuando el volumen de fibras o la esbeltez de las mismas son elevadas (Yazici 2007). Se recomienda que la consistencia del hormigón con fibras no sea inferior a un asiento en el cono de Abrams de 9 cm. La resistencia a compresión es similar a la de un hormigón convencional, lo que si que se observa es un aumento significativo de la ductilidad (Serna 1984) después de la fisuración para volúmenes de fibras de acero del 1% (Maidl 1995) (König y Kützing 1999) según se puede observar en la siguiente figura:



**Figura 2.7:** Comportamiento típico de un HRFA a compresión,  $f_{cm} = 42 \text{ N/mm}^2$  (König y Kützing 1999).

La resistencia última aumenta del 0 al 15% con volúmenes de fibras superiores al 1,5% (Dixon y Mayfield 1971) (Johnston 1974). Para aplicaciones comerciales, la cantidad de fibras de acero que incluye el hormigón está en valores de entre 20 - 40  $\text{Kg/m}^3$  (Naaman y Shah 1976) (Bekaert 1994) (Kausay 1994), es decir, una fracción de volumen menor del 0,5%. Para estos casos, el incremento de resistencia puede considerarse sin importancia (Mansur y col. 1986) (Narayan Swamy y col. 1993). Yazici (2007) indica que suelen producirse ligeros incrementos o decrementos de la resistencia del hormigón al adicionar fibras a las dosis habituales. Swamy (1985) ha obtenido incrementos medios de resistencia a compresión del 26%, 6% y 0,5% a 1, 7 y 28 días respectivamente con volúmenes de fibras de acero en el rango de 0,6 a 1,2%. Esto anterior indica que la influencia de las fibras sobre la resistencia a compresión del hormigón depende de la madurez del mismo. Otros investigadores han encontrado resistencias menores del hormigón al adicionar fibras

debido a la porosidad del hormigón, al proceso de amasado y a un inapropiado diseño de las amasadas de hormigón (Falkner *y col.* 1994). Más recientemente Gaweska (2004) y Cazacliu *y col.* (2006) concluyen que la introducción de fibras en el hormigón no mejora las propiedades mecánicas en compresión, ya que se perjudica la homogeneidad de la matriz, se perturba el empaquetamiento granular y se contribuye a un mayor volumen de aire.

Las fibras poliméricas empezaron a ser utilizadas como refuerzo del hormigón en la primera mitad de la década de los años 60 y están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Las fibras sintéticas de polipropileno, nylon y poliéster agregan poca o ninguna resistencia al hormigón y se vienen utilizando para minimizar la fisuración por retracción plástica o por secado prematuro del hormigón.

Cuando se emplean monofilamentos de polipropileno en piezas sometidas a flexotracción, la adherencia entre estos y la matriz se pierde como consecuencia del alto valor del coeficiente de Poisson de la fibra, produciéndose deslizamientos y grandes deformaciones y ocasionando, en algunos casos, que la resistencia a tracción y flexotracción no mejore e incluso que disminuya con respecto al hormigón sin fibras. Este inconveniente de falta de adherencia de las fibras monofilamento con la matriz se está resolviendo con la utilización de fibras en redes (fibriladas) o multifilamento que se abren en el hormigón y utilizando proporciones grandes de fibras.

En las fibras plásticas, se distinguen las microfibras de diámetro menor a 0,30 *mm* y las macrofibras cuyo diámetro es igual o superior a 0,30 *mm*, pudiendo colaborar estructuralmente estas últimas cuando su longitud oscila desde 20 a 60 *mm* y siempre que la relación longitud/tamaño máximo del árido no sea menor a 3. Las microfibras se emplean fundamentalmente para controlar y reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón (Soroushian *y col.* 1995) (Naaman *y col.* 2005) en pavimentos y soleras y en algunos casos, dependiendo de su composición, para mejorar el comportamiento frente al fuego (Liu *y col.* 2008).

Polímeros como el polipropileno, además de ser muy económicos con respecto a otras fibras como las de acero, son químicamente inertes, muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, presentando una superficie hidrófoba, por lo que no absorben agua durante la mezcla ni el posterior fraguado. Este aspecto anterior supone, a su vez, un inconveniente en cuanto a la adherencia de las mismas a la matriz cementicia. Otra desventaja de las fibras de polipropileno radica en su bajo módulo de elasticidad (entre 3,5 y 15 *GPa*) (Pujadas 2013).

Las fibras de polipropileno funden entre 150 y 170 °C y tienen mayor resistencia a tracción, dureza y rigidez que las fibras de polietileno (que funden entre 90 y 135 °C) pero menor resistencia al impacto. La desventaja de las fibras de polipropileno radica en que son susceptibles a la degradación por luz, calor y oxígeno, con lo que

es necesario añadir un antioxidante y un estabilizador en su proceso de producción, encareciéndose el mismo.

Según su proceso de fabricación las podemos clasificar en monofilamentosas o fibrilosas (UNE-EN14889-2: 2008):

- Monofilamentos extruídos (tipo I).
- Láminas fibriladas (tipo II).

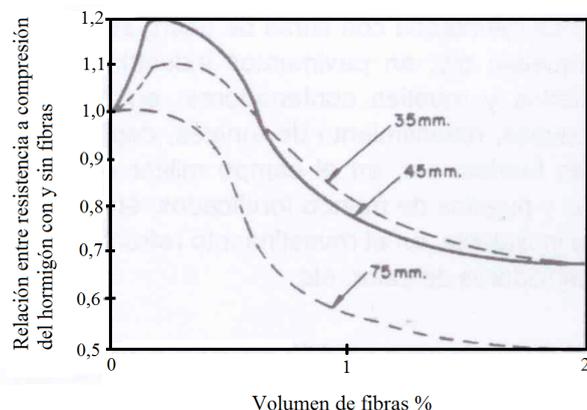
Las fibras de polipropileno al añadirse al hormigón se dispersan perfectamente en todo el volumen de este, no existiendo el peligro de formación de erizos o bolas cuando se utilizan grandes dosificaciones. Esto confiere a la matriz un armado en tres dimensiones. Señalar que aún siendo un elemento discreto, las fibras aportan continuidad al volumen de hormigón de tal modo que al fracturarse no se separa. Esto anterior, sumado a las características de la fibra (geometría y módulo elástico), repercute en un incremento del índice de tenacidad (capacidad de absorción de energía) con respecto al hormigón matriz y en una mejor recuperación en la zona post-elástica.

La consistencia de los hormigones reforzados con fibras de polipropileno aumenta en proporción al contenido de fibras. Se ha observado, sin embargo, que mezclas que dan asientos bajos en el cono de Abrams, son dóciles al ponerlas en obra mediante vibración. Esto anterior ocurre también con fibras metálicas.

En el caso de fibras con longitudes relativamente elevadas, alrededor de 50 *mm*, se observan pérdidas de trabajabilidad del hormigón importantes, incluso con bajos contenidos en fibras, llegando a afectar los resultados del cono de Abrams en hasta 75 *mm* (Pujadas 2013).

La dosificación, es decir, el volumen de fibras es muy importante en las propiedades finales del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido. Con un 0,6 % de contenido de fibras puede conseguirse a 7 días un incremento en la resistencia a flexión de un 25 %. La resistencia a compresión disminuye en general y tanto más cuanto mayor es la dosificación de fibras y la longitud de las mismas (Fernández Cánovas 2013).

Aunque se han usado dosificaciones en volúmenes mayores, la aplicación de las fibras de polipropileno está en el rango de 0,1 a 0,3 % en volumen, rango para el que la resistencia a compresión del hormigón no se ve afectada según numerosos estudios. Parveen y Sharma (2013) observan un incremento de la resistencia a compresión al dosificar con fibras hasta el 0,2 % y un decremento al dosificar con cantidades superiores. Alhozaimy *y col.* (1996) concluyen que la adición de fibras no influye en la resistencia a compresión del hormigón. Richardson (2006) sin embargo manifiesta una disminución de la resistencia a compresión del hormigón que contiene fibras de polipropileno del entorno del 8,7 al 9,5 % para dosificaciones de 0,9 *kg/m*<sup>3</sup> y que puede llegar a ser del 20 % para altas dosificaciones. Hay algún



**Figura 2.8:** Influencia del contenido en fibras de polipropileno en la resistencia a compresión del hormigón (Fernández Cánovas 2013).

estudio contradictorio en el que el refuerzo de fibras de polipropileno aumenta considerablemente, hasta un 25 %, la resistencia a compresión (Mindess y Vondran 1988). Hughes y Fattuhi (1976) manifiestan, sin embargo, decrementos en la resistencia.

Cadima *y col.* (2005) han realizado un estudio del comportamiento de hormigones reforzados con fibras sintéticas de polipropileno multifilamento en el que se concluye que la contribución del refuerzo de fibras no afecta a la resistencia a la compresión para el rango del estudio, que va de 0,6 a 1,8  $kg/m^3$ . Sin embargo, la adición de fibras reduce el asentamiento del cono de Abrams con respecto al hormigón patrón sin fibras (80 mm), desde 15 a 20 mm para la cuantía de 0,6  $kg/m^3$  hasta 35 mm para la cuantía máxima de 1,8  $kg/m^3$ .

Nkem e Ige (2014) en un estudio reciente muestran que la resistencia a compresión del hormigón reforzado con fibras de polipropileno depende del volumen de fibras. En dicho estudio se consigue un aumento de resistencia a compresión del hormigón del 5 al 10 % al adicionar un 0,25 % de fibra y del 3 al 5 % si se adiciona un 0,5 %. Sin embargo, la resistencia del hormigón decrece entre un 2 y un 4 % al dosificar al 0,75 % la fibra y del 4 % al 8 % si se dosifica al 1 %.

Broda y Brachaczek (2015) estudian la influencia de microfibras y fibras multifilamento de polipropileno en las propiedades mecánicas de cementos de mortero. Llegan a la conclusión de que independientemente de la geometría y de la dosificación de las fibras, estas no afectan a la resistencia a compresión de morteros de cemento con respecto a los mismos no reforzados. Estudiando detalladamente el artículo se observa que tanto la resistencia a compresión como a flexión disminuye ligeramente al aumentar la longitud de la fibra.

Mendoza *y col.* (2011) presentan un estudio en el que comprueban que la resistencia a compresión del hormigón, tanto a 7 como a 28 días, no se ve significativamente modificada por la incorporación de fibras de polipropileno monofilamento, aunque hay una tendencia a la disminución de la resistencia al aumentar la dosificación de fibra. Según los autores, esto anterior es debido a una reducción de la consistencia al aumentar la cantidad de fibras.

Un estudio reciente realizado con fibras de polipropileno por Machine *y col.* (2008) muestra que una dosificación de  $0,6 \text{ kg/m}^3$  de fibras multifilamento aumenta un 3,15 % la resistencia a compresión del hormigón y provoca un descenso de 16,5 a 15,9 *cm* en el cono de Abrams.

## 2.3 PROCESOS INDUSTRIALES DE PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN

### 2.3.1 Introducción

La fabricación del hormigón constituye la primera operación irreversible de una construcción con hormigón y condiciona todas las propiedades que el mismo va a adquirir (Charonnat 1999). Para fabricar hormigón es necesario dosificar los componentes según una fórmula seleccionada y asegurar una mezcla de los mismos lo más homogénea posible. Así pues, la fabricación del hormigón requiere:

- Almacenamiento de los componentes.
- Instalaciones de dosificación.
- Equipos de mezclado.

La calidad del hormigón fabricado en industria está afectado por las tres etapas de la cadena de producción: almacenamiento, dosificación y mezclado. Las propiedades de los componentes y sus proporciones pueden ser modificadas en el almacenamiento y dosificación. El mezclado por su parte afecta a la estructura del hormigón (Lê 2007).

El modo de producción adoptado en las centrales de hormigón preparado es discontinuo, amasada a amasada, con volúmenes de producción entre 40 y 150  $\text{m}^3/\text{hr}$ .

### 2.3.2 Almacenamiento de los componentes

La finalidad del almacenamiento es conservar las propiedades de los constituyentes del hormigón, facilitar su extracción para la producción del hormigón, así como asegurar la continuidad de la misma.

Los áridos se suelen almacenar bien en tolvas o bien en silos compartimentados en torres. Algún tipo de central almacena los áridos directamente en el suelo y en algunos casos se observan almacenamientos secundarios de áridos en el suelo. La alimentación de los áridos en las tolvas se realiza bien directamente desde el camión cuando las mismas están semienterradas o bien mediante palas frontales de neumáticos a partir de almacenamientos secundarios. Las torres compartimentadas se alimentan por cintas transportadoras o elevador de cangilones.

Los cementos y adiciones se almacenan siempre en silos. Los aditivos son almacenados en cisterna, y el agua se almacena en cisterna, depósito o bien se suministra directamente de la red.

A lo largo del almacenamiento, diversas perturbaciones en el estado de los constituyentes pueden provocar efectos perjudiciales a la calidad del hormigón fabricado. Se deben tomar ciertas precauciones para limitar sus influencias negativas según se puede consultar en Charonnat (1999).

El conocimiento de la humedad de los áridos, sobre todo de las arenas, es muy importante para fabricar un hormigón de calidad, con lo que es frecuente la instalación de sondas de humedad en los áridos que nos permiten un seguimiento en continuo en las bocas de descarga, de este parámetro. Este dato influenciará la dosificación en agua.

Una buena medición de la humedad en las arenas necesita una calibración previa de la sonda y repetitiva a intervalos de tiempo regulares. La calibración consiste en relacionar las señales eléctricas a la humedad de las arenas, generalmente mediante secado de muestras de arena en laboratorio. En el contexto de una central de fabricación de hormigón preparado, esta operación de medición de la humedad mediante sondas es difícil de realizar (Lê 2007), además de aumentar considerablemente los tiempos de fabricación y perjudicar la productividad.

### 2.3.3 Instalaciones de dosificación

La dosificación es el conjunto de operaciones que permiten cargar los constituyentes del hormigón en la mezcladora siguiendo un orden preestablecido y garantizando que se respeten las proporciones fijadas por las fórmulas correspondientes a cada mezcla.

En la realidad, la cantidad de materiales realmente utilizadas en una amasada fluctúan con respecto a los valores nominales de las fórmulas. Las normas UNE-

EN206-1: (2008) y la EHE-08 definen las tolerancias a respetar en la dosificación, según la tabla 2.7 que se presenta a continuación.

Materiales constituyentes	Tolerancia
Cemento Agua Total de áridos Adiciones utilizadas en una proporción superior al 5% sobre la masa del cemento	$\pm 3\%$ de la cantidad requerida
Aditivos y adiciones utilizadas en una proporción no superior al 5% sobre la masa del cemento	$\pm 5\%$ de la cantidad requerida
NOTA La tolerancia es la diferencia entre el valor nominal y el valor medido.	

**Tabla 2.7:** Tolerancias de dosificación según la norma UNE-EN206-1: (2008) y la EHE-08.

Los materiales constituyentes del hormigón se encuentran en estado sólido (cemento, áridos y adiciones) o líquido (agua y aditivos). Cada constituyente posee su línea de dosificación propia. La tabla 2.8 resume las instalaciones de dosificación utilizadas.

Componente	Extracción	Dispositivo de medida volumétrico	Dispositivo de medida ponderal
Áridos	Cierres de casco, cangilón, cinta, alimentador	-	Células de carga
Pulvurentos	Tornillo sin fin	-	Células de carga
Agua	Electro-válvula, bomba	Contador volumétrico	Células de carga
Aditivos	Bomba	Contador volumétrico	Células de carga

**Tabla 2.8:** Instalaciones de dosificación utilizadas para distintos materiales constituyentes.

Los constituyentes sólidos como el cemento, los áridos y las adiciones se dosifican por peso; el agua se puede dosificar por peso o por volumen, al igual que los aditivos

líquidos. En la actualidad, el agua se dosifica en la mayoría de los casos por peso, debido a la mayor rapidez y precisión. Los aditivos líquidos se continúan dosificando por volumen, aunque muchas centrales ya vienen preparadas para dosificarlos también en peso. En los aditivos, como las cantidades son bajas, las básculas deben ser más pequeñas y por consiguiente son más sensibles a las vibraciones existentes en las centrales.

En el caso de una dosificación ponderal por peso, se utilizan básculas para pesar los materiales garantizando que en ningún caso se dosifiquen cantidades por debajo del 10 % de la capacidad total de la escala de la báscula utilizada.

Existen diversos tipos de básculas, aunque todas se componen de un receptáculo, un dispositivo de medida y un sistema de evacuación (Charonnat 1982).

#### 2.3.4 Equipos de mezclado

A las mezcladoras, la norma UNE-EN206-1: (2008) sólo les exige uniformidad: *"9.6.2.3 Mezcladoras: las mezcladoras, con su capacidad, durante el tiempo de mezclado deben conseguir una distribución homogénea de las materias primas y una trabajabilidad uniforme del hormigón"*. El proceso de mezclado es completamente subjetivo y no es comprobable: *"9.8 Mezclado del hormigón: el mezclado de las materias primas se tiene que realizar en una mezcladora conforme a 9.6.2.3 y se debe prolongar hasta que la mezcla presente un estado uniforme"*, sin ofrecer la norma una definición de uniformidad.

La EHE-08 en su Artículo 71.2.4 indica que los equipos de mezclado o amasado *"pueden estar constituidos por amasadoras fijas o móviles capaces de mezclar los componentes del hormigón de modo que se obtenga una mezcla homogénea y completamente amasada, capaz de satisfacer los dos requisitos del Grupo A y al menos dos del grupo B, de la tabla 71.2.4."*

Al hormigón le influye el proceso de mezclado. Según Ferraris (2001), la calidad (prestaciones) del hormigón está determinada por la microestructura. Esta depende de la composición, de las condiciones del curado, pero también del método de mezclado y de las condiciones de mezclado al fabricar el hormigón.

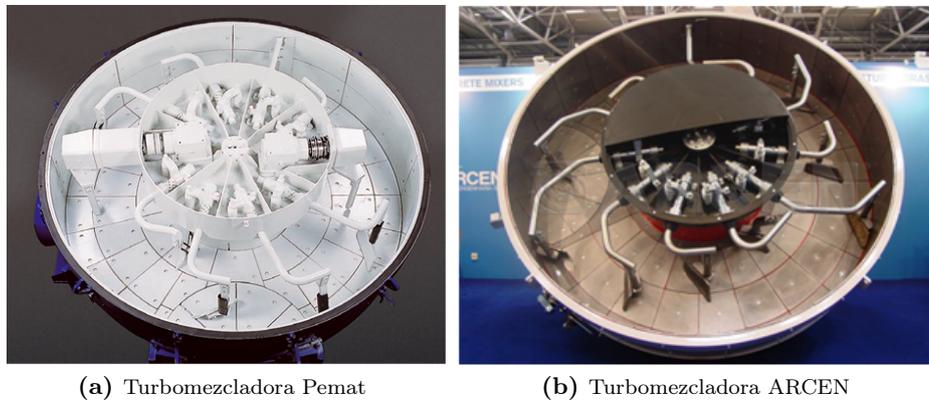
Todas las mezcladoras tienen elementos constitutivos comunes: cuba, paletas y cargador. El amasado se hace según dos técnicas principales:

- por elevación de los áridos y caída libre, en el caso de hormigoneras y mezcladoras de eje horizontal.
- por empuje de los elementos con ayuda de paletas sobre el fondo horizontal de una cuba cilíndrica, en el caso de amasado forzado con mezcladoras de eje vertical.

Existen diferentes tipos de mezcladoras de ciclo discontinuo, tal y como se puede consultar en Charonnat (1999) y Ferraris (2001). Los principales tipos de mezcladoras propuestos en el presente trabajo, son:

### *Turbomezcladora de eje vertical*

Consta de una cuba fija y en el interior de la misma gira un rotor con unos brazos suspendidos elásticamente y terminados en unas paletas, de forma que hay una velocidad periférica constante del orden de 3 a 4  $m/s$ .



**Figura 2.9:** Turbomezcladoras de eje vertical.

Es la mezcladora típica de las centrales de hormigonado.

### *Mezcladora forzada de tren planetario*

También llamada mezcladora de tren bailarín, consta de una cuba fija con su eje vertical y en el interior de la misma gira suspendido un reductor con un eje de salida planetario, al que está acoplado un conjunto de paletas que tienen un doble movimiento de rotación alrededor de su eje y alrededor del eje de la máquina, con lo que las partículas ligadas a las paletas describen un movimiento epicicloidal.

### *Mezcladora forzada a contracorriente*

La cuba no es fija, sino que posee un movimiento de rotación contrario al del sistema planetario, siendo las trayectorias descritas por las paletas sobre el fondo de la cuba las mismas que en la mezcladora de tren bailarín.

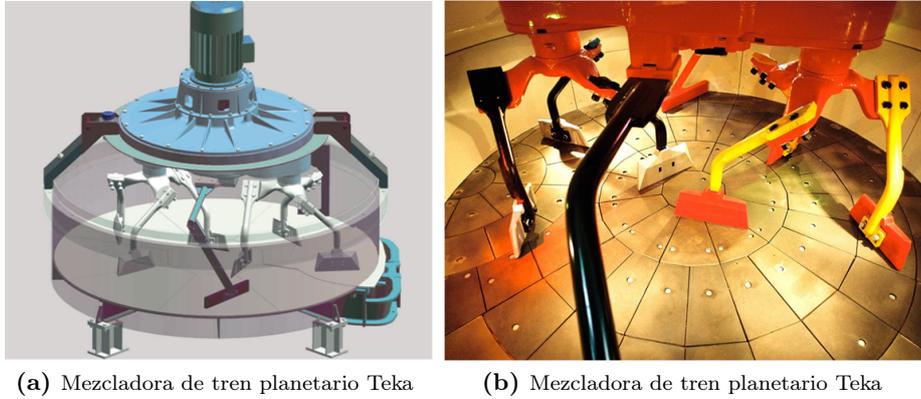


Figura 2.10: Mezcladoras de tren planetario.

#### *Mezcladoras de ejes horizontales de acción forzada*

Consiste en hacer girar en el interior de una cuba cilíndrica fija de eje horizontal, paletas que elevan por turnos pequeñas cantidades de una mezcla que vuelven a caer en la masa cuando la pala está en la parte alta de su curso. Las hay de dos tipos:

- En la de un eje horizontal se dispone de paletas unidas al extremo de unos radios y una lámina helicoidal.
- En las compuestas por dos ejes de paletas, estas giran en sentido inverso creando corrientes de circulación.

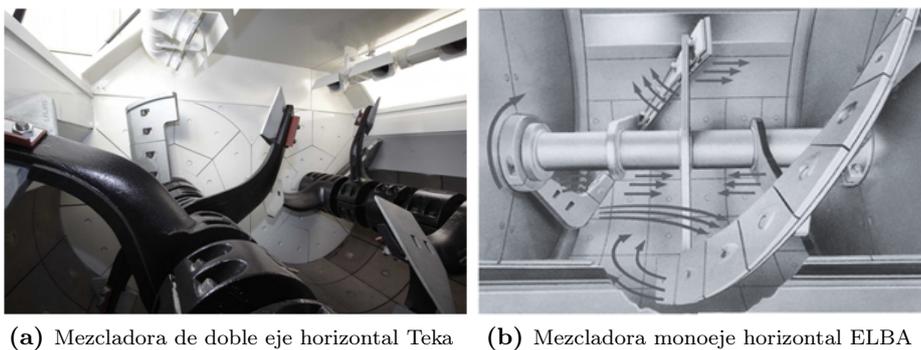


Figura 2.11: Mezcladoras de eje horizontal.

### ***Mezcladora de eje horizontal o inclinado de acción gravitatoria***

En este caso, estas mezcladoras están constituidas por una cuba móvil con un movimiento de rotación con respecto a un eje horizontal o bien inclinado. Las palas o espiras helicoidales en algunos casos, están fijas al interior de la cuba y provocan un movimiento de elevación de la masa del hormigón cuando gira la cuba. Ciertas palas están diseñadas para guiar al hormigón hacia la salida mediante inversión del sentido de giro de la cuba.

### ***Mezcladora cónica***

Este sistema de mezclado, aunque también tiene unos 100 años de antigüedad, no se ha impuesto en el mercado para el hormigón a pesar de que cuenta con la ventaja de una descarga sencilla. Sin embargo, en los sectores de la industria química, farmacéutica y alimentaria, las mezcladoras cónicas son muy comunes.

Consta de una cuba de mezclado en forma de cono en la que se colocan uno o dos dispositivos agitadores; en las mezcladoras con dos dispositivos, estos pueden funcionar en sentido contrario.

### ***Mezcladora Eirich***

Las mezcladoras Eirich actuales comienzan a fabricarse en el año 1972 y constan de una cuba mezcladora giratoria en posición inclinada, una rascadora fija para el fondo y la pared, así como un agitador de giro rápido. Las mezcladoras de hasta 3 metros cúbicos cuentan con un solo dispositivo de mezclado móvil; en las mezcladoras mayores hay dos o tres agitadores.

El principio de mezclado es único en el mundo: en el recipiente de mezclado, el material se transporta hacia arriba por medio del rozamiento de la pared y desde allí cae por gravedad hacia abajo. Con ayuda de la rascadora de la pared, el material se conduce hasta el agitador de giro rápido. En el tiempo en el que gira una vez el recipiente (unos pocos segundos) se voltea el 100% del material. El agitador puede alcanzar una velocidad perimetral de entre 2 y 40  $m/s$ .

Dependiendo del trabajo de mezclado, la mezcladora puede funcionar a contracorriente o en el mismo sentido. De hecho, con hormigones de gran calidad, la mayoría de las veces el recipiente de mezclado y el agitador circulan en la misma dirección ya que de este modo se puede aplicar el máximo de fuerzas de cizalla en el material.

La diferencia característica de estas mezcladoras radica en la separación entre el transporte del material y el proceso de mezclado. Esto anterior, permite variar mucho más la velocidad del dispositivo de mezclado y controlar perfectamente la aplicación de energía en la mezcla.



(a) Mezcladora cónica Kniele

(b) Mezcladora Eirich

**Figura 2.12:** Mezcladoras cónicas.

El tiempo de mezclado, el orden de introducción de los componentes, el porcentaje de llenado de la cuba y la velocidad de rotación de los útiles son factores que van a condicionar la homogeneidad de la mezcla. La medida de la potencia consumida por la mezcladora se utiliza generalmente como medida de calidad del hormigón obtenido.

### 2.3.5 Control de la consistencia y dosificación en agua del hormigón

La trabajabilidad del hormigón depende de varios factores siendo el agua uno de los más influyentes. Para controlar en continuo la trabajabilidad del hormigón producido en central, debemos conocer la dosificación de agua y medir la consistencia de la mezcla en la propia mezcladora. Los primeros métodos de control de la consistencia del hormigón en la mezcladora datan de finales de los años 20 del siglo pasado (Loring y Purrington 1928) (Yohe 1933).

#### *Watímetro - Amperímetro*

La medida de la potencia consumida por la mezcladora permite estimar la consistencia del hormigón, lo que permite explicar que sea muy utilizada en las centrales de hormigón. Esta medida permite controlar la evolución de la consistencia del hormigón durante el amasado, con lo que el watímetro es el útil de medida usual (Parey y Durrieu 1968) (Teillet *y col.* 1991) (Charonnat 1999) y viene siendo utilizado en la industria del hormigón desde 1966 debido a los trabajos de Delude y Ambrosino (1966). Se observa en la figura 2.13 la indicación de la potencia consumida por la mezcladora en la pantalla del ordenador.

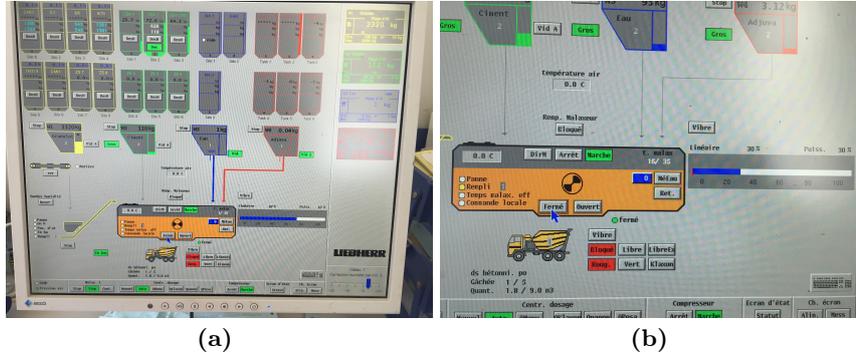


Figura 2.13: Indicación de la potencia consumida por la mezcladora.

La reología de los hormigones durante el mezclado es evolutiva y no lineal. Se considera que un hormigón está correctamente homogeneizado cuando la señal del watímetro se estabiliza al final del mezclado. Una utilización habitual, consiste en estimar la consistencia del hormigón por la medida de la potencia al final del mezclado.

En este sentido, Chopin (2003) ha demostrado que la reología del hormigón fresco está fuertemente ligada a la potencia consumida por la mezcladora. Asimilando la mezcladora a un reómetro de hormigón donde el gradiente de velocidad de deformación es igual a  $\dot{\gamma}$  y el hormigón se comporta reológicamente como un fluido de Bingham, la potencia a la estabilización  $P_{\infty}$  es función de la reología:

$$P_{\infty} = P_m + C_m \dot{\gamma} (\tau_0 + \mu_{pl} \dot{\gamma}) \quad (2.20)$$

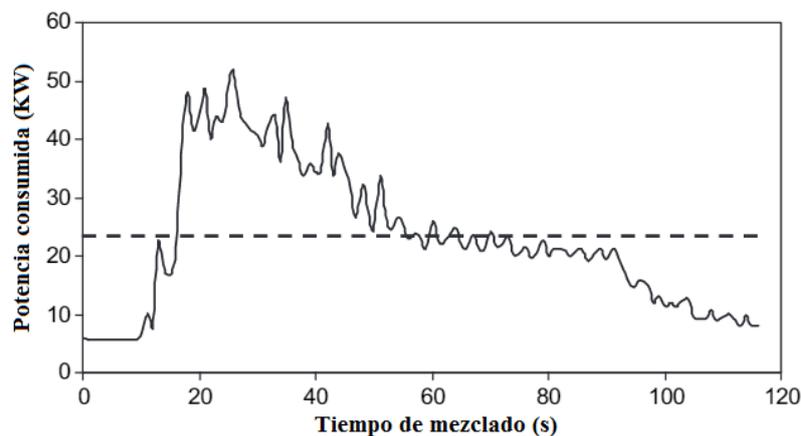
donde  $P_m$  es la potencia asociada al rozamiento de las palas sobre el fondo de la cuba y a una disipación mecánica,  $C_m$  es un coeficiente función del volumen de hormigón en el interior de la mezcladora,  $\dot{\gamma}$  es el gradiente de velocidad,  $\tau_0$  es la tensión umbral y  $\mu_{pl}$  es la viscosidad plástica medida en el reómetro.

Sin embargo, ciertos autores como Chopin (2003) o Lê (2007) han puesto en evidencia ciertos límites del watímetro, ya que la medida de la disipación viscosa (es decir, de la reología del hormigón) queda perturbada por el rozamiento de las palas del fondo de la cuba sobre los áridos o bien por la viscosidad del aceite de la mezcladora. En su tesis doctoral, Lê cuantificó la proporción de las diferentes contribuciones en una mezcladora de laboratorio: la potencia en vacío (disipaciones eléctricas, viscosidad del aceite) representa entorno al 60% de la potencia consumida por la mezcladora cuando el hormigón está correctamente homogeneizado, mientras que la reología representa un 27% y el rozamiento entre palas un 13% aproximadamente. No obstante, sobre la base de registros de la potencia consumida por una mezcladora a diferentes velocidades de mezclado (Nordenswan y Kappi

2007) (Lê 2007) o bien por una amasadora montada sobre un camión (Amziane y col. 2006a) podemos evaluar parámetros reológicos. Una de las ventajas más importantes del watímetro es su poca sensibilidad a fluctuaciones ya que mide sobre la totalidad del volumen de hormigón en el interior de la mezcladora.

La experiencia muestra que la potencia absorbida por la mezcladora varía durante el periodo de elaboración de la mezcla. Se ha constatado que la introducción de áridos, de cemento y de una cierta cantidad de agua, provoca al principio un aumento de la potencia de amasado que alcanza su máximo para una relación  $a/c$  aproximada de 0,4 en caso de hormigones ordinarios. Después se produce una disminución de potencia y una estabilización de la misma que se corresponde con el final del mezclado.

En la figura 2.14 se presenta la evolución de la potencia consumida por la mezcladora durante el tiempo que dura una amasada. En este caso se corresponde con una mezcladora de  $2\text{ m}^3$  con  $66\text{ kW}$  de potencia instalada y ciclo total con carga y descarga incluida de 120 segundos.



**Figura 2.14:** Evolución en el tiempo de la potencia consumida por la mezcladora (Cazacliu y Ventura 2010).

El watímetro es un aparato detector de la variación de la intensidad de una fase del motor asíncrono que llevan las mezcladoras, en el que se asume que la velocidad del motor asíncrono varía muy poco en función del par resistente y que el deslizamiento es estable para el régimen de funcionamiento normal de la mezcladora. En el funcionamiento en carga de la mezcladora, el factor de potencia  $\cos \varphi$  alcanza un máximo y la intensidad crece rápidamente, con lo que es posible asimilar las variaciones de intensidad a una variación de la potencia del motor (Rebut 1975).

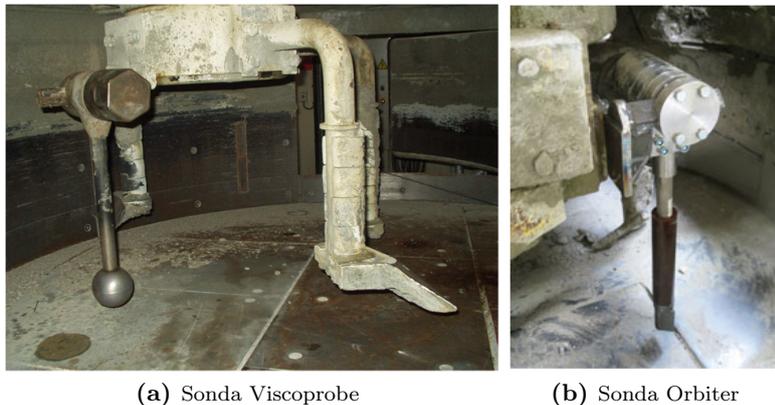
### *Sonda Viscoprobe*

La sonda Viscoprobe es una sonda esférica que se coloca en el interior de la mezcladora, directamente en contacto con el hormigón y que permite medir la consistencia del mismo. Este dispositivo se utiliza sobre todo en el caso de hormigones auto-compactables y se corresponde con un captador de fuerzas de nueva generación, que permite realizar una medición local de la consistencia del hormigón actuando como una sonda de humedad. El aspecto local de la medida en función de la posición de la sonda en la mezcladora puede tener como resultado valores variables de las características reológicas, sobre todo en el caso de zonas de mezcla muy fluida o bóvedas granulares (nidos de grava).

### *Sonda Orbiter*

La sonda de humedad Hidronix Hydro-Probe Orbiter es una sonda de humedad de tecnología digital, diseñada específicamente para medir la humedad y la temperatura en la mezcladora. Tiene diversas opciones para el montaje: estático o bien en mezcladora planetaria donde el cabezal de detección se mueve con facilidad a través de la mezcla, lo que proporciona una medición precisa de la humedad del material en tiempo real. Esta sonda se puede montar también como un sensor estático en tolvas o por encima de transportadores de cinta, por lo que es adecuado para medir la humedad de los áridos, sobre todo las arenas.

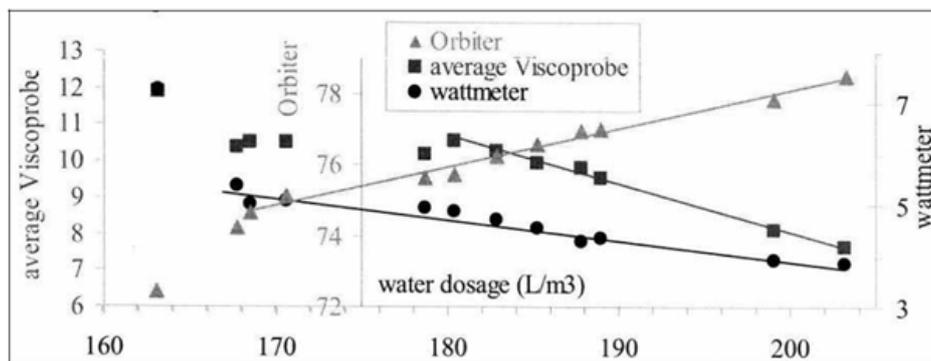
La sonda se compone de dos partes: el cabezal que alberga la electrónica y las conexiones, y el brazo de detección con un disco de cerámica.



**Figura 2.15:** Sondas.

Brunquet y Cazacliu (2007) realizaron un estudio de la evolución de la señal de los sistemas de medida anteriores en función de la dosificación en agua. Los hormigones fueron fabricados en una industria de prefabricación donde los materiales y el

protocolo de fabricación son comparables a una central de hormigón. Los resultados muestran que en el intervalo de dosificación de 180 - 204  $L/m^3$  el captador de fuerza puede estimar la dosificación en agua en la mezcladora con una precisión de 1,2  $L/m^3$ . En el intervalo de 170 - 204  $L/m^3$  la sonda de humedad tiene una precisión de 2,5  $L/m^3$  y el watímetro de 4,5  $L/m^3$  (2,5  $L/m^3$  con un tratamiento particular de la señal).



**Figura 2.16:** Evolución de la señal en función de la dosificación de agua en el hormigón (Brunquet y Cazacliu 2007).

### 2.3.6 Efectos de los parámetros de mezclado

Para una composición dada, dos hormigones pueden tener propiedades diferentes en función del procedimiento de mezclado en el que diversos parámetros pueden variar, entre los que se encuentra el tiempo de mezclado (Lê 2007).

El tiempo de mezclado es uno de los parámetros predominantes en la consecución de un hormigón homogéneo y uniforme. Las amasadoras fijas deberán, según figura en los comentarios de la EHE-08, tener un temporizador adecuado que no permita descargar las amasadas hasta que no se haya cumplido el tiempo de amasado prescrito.

Como hemos señalado con anterioridad, podemos mezclar los hormigones en una mezcladora fija o bien contentarnos con dosificar los componentes del hormigón y verterlos en un camión hormigonera que los amasa más o menos bien durante el transporte. También hemos visto que se utiliza a menudo la potencia disipada por la mezcladora (watímetro o amperímetro) para controlar el proceso; cuando la potencia o intensidad deja de disminuir se considera que continuar con el mezclado no aporta nada a las cualidades finales del hormigón y se procede al vaciado de la mezcladora.

Ciertos hormigones, como son los hormigones de altas prestaciones, tienen tiempos de estabilización del watímetro  $T_s$  muy elevados que inciden negativamente en el

rendimiento de las centrales y su capacidad para suministrar a las obras a un ritmo suficiente. En este contexto, y pensando que la reducción del tiempo  $T_s$  es muy importante dentro de la optimización de la central de producción de hormigón, y sabiendo que en realidad se dispone de una cierta extensión para que la duración del tiempo de mezclado sea más o menos  $T_s$ , la estimación a priori de  $T_s$  está justificada y afecta al coste de producción del hormigón y al rendimiento de la instalación (de Larrard y Sedran 2007).

Sobre la base del modelo propuesto por Chopin (2003) y Chopin *y col.* (2004), el tiempo de estabilización del watímetro  $T_s$  viene dado por la siguiente ecuación:

$$T_s = T_m + A \frac{\phi}{\phi^* - B \frac{S_p}{S_p^*}} \quad (2.21)$$

donde:

- $\phi$  es la relación entre el volumen sólido y el volumen total del hormigón fresco.
- $\phi^*$  es la compacidad de la fase sólida.
- $S_p$  es la dosificación en extracto seco de superplastificante.
- $S_p^*$  es la dosificación de saturación en extracto seco de superplastificante.

con  $T_m = -921$  s,  $A = 1062$  s y  $B = 0$  para superplastificantes de antiguas generaciones (naftaleno y melaminas sulfonadas) y  $B = 0,04$  para los superplastificantes más recientes (resinas vinílicas, polifosfonatos, policarboxilatos, etc.). En algunos casos, si no se distingue la naturaleza química del aditivo, se puede tomar  $B = 0,02$  como en BétonlabPro3 (de Larrard y Sedran 2007).

Los valores proporcionados por la ecuación 2.21 para el tiempo  $T_s$ , son coherentes con los valores obtenidos en la estación de estudio de mezclado del LCPC, equipada con una turbomezcladora de eje vertical de  $1$  m<sup>3</sup> de capacidad, representativa del tipo de mezcladora más comunmente utilizada en las centrales de hormigón preparado. Evidentemente, el tiempo de mezclado va a depender del tipo de mezcladora utilizada y del volumen de hormigón fabricado (de Larrard y Sedran 2007).

La homogeneización de una mezcla de hormigón en una mezcladora se realiza gracias al movimiento de un sistema de palas. Son estas palas las que proporcionan la energía que facilita el movimiento de los componentes y la homogeneización de la mezcla. El inconveniente de esta operación radica en que todos los componentes no presentan la misma aptitud de homogeneización frente a una determinada energía de movimiento de las palas. En consecuencia, la velocidad de giro de las palas de una mezcladora no es la misma para todos los hormigones.

En efecto, se puede constatar, que diferentes tipos de mezcladora con distintos movimientos de las palas no homogeneizan de la misma manera la mezcla de hormigón (Charonnat 1996). El camión hormigonera, por ejemplo, no tiene la misma capacidad de dispersión que las mezcladoras de los componentes del hormigón. Este problema ha sido sistemáticamente estudiado por Boussion y Charonnat (1987) y más recientemente por Chanut *y col.* (2004). En cuanto a las mezcladoras, es conocido desde hace tiempo, que las mezcladoras de tipo planetario son más eficaces que las turbomezcladoras y en ese sentido la experiencia realizada por Cazacliu y Dauvergne (2002) es una buena confirmación. En sus trabajos fabrican un HAC con dos mezcladoras diferentes: una turbomezcladora clásica con un movimiento de rotación simple y una turbomezcladora Liebherr con 5 brazos y 2 remolinos planetarios. Se comprobó que para un mismo tiempo de mezclado, la extensión del flujo del hormigón fabricado con la Liebherr era superior a la del fabricado con la turbomezcladora.

El volumen de la mezcladora conduce a tiempos de estabilización diferentes después del mezclado de hormigones con la misma dosificación. La experiencia confirma que los tiempos de estabilización son mayores en mezcladoras más pequeñas de laboratorio. Chopin (2003), en su trabajo de tesis, comparó los tiempos de estabilización de 3 mezcladoras de volúmenes 125, 330 y 1000 litros respectivamente. Las relaciones empíricas obtenidas, son las siguientes, en las que se observa que a menor volumen de mezcladora, mayor tiempo de estabilización:

$$Ts(1m^3) \simeq 0,703 Ts(330L)$$

y

$$Ts(330L) \simeq 0,61 Ts(125L)$$

## 2.4 METODOLOGÍAS DE DOSIFICACIÓN

La dosificación de un hormigón tiene por objeto determinar las proporciones en las que hay que mezclar los distintos componentes del mismo para conseguir que reúna las características y propiedades exigidas en el proyecto (Jiménez Montoya *y col.* 2010).

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

Existe numerosa bibliografía donde poder consultar métodos de dosificación de hormigones, entre ellos Arredondo (1977) y Brandt (1998). La siguiente reseña histórica permite descubrir que algunos de los métodos de dosificación del hormigón todavía utilizados en la actualidad, tienen en algún caso, más de 100 años de

antigüedad. Así mismo, la diversidad de métodos de dosificación existentes, muestra que la fabricación de mezclas ha sido desde hace tiempo, más un arte que una ciencia (Neville 2000).

La importancia del agua de amasado viene siendo investigada al menos desde principios del siglo XIX. Según Coutinho (1973), en 1828, Louis J. Vicat publica informaciones sobre la importancia del contenido de agua en la resistencia de los morteros, registrando los inconvenientes del exceso de agua y de la consistencia muy fluida (usual en aquella época) y en 1888, Paul Alexandre estudia la influencia del agua en la resistencia a compresión de morteros, estableciendo el concepto de agua de mojado, ya que divide el agua en aquella destinada a formar la pasta de cemento y en aquella en la que su función radica en mojar la arena.

En 1892, René Ferét estudió las relaciones existentes entre el volumen de agua y el volumen de vacíos en los morteros en la resistencia a compresión de los mismos (Scandiuzzi y Andriolo 1986).

A principios del siglo XX empezaron a surgir los primeros métodos de dosificación que tenían en cuenta diferentes propiedades y parámetros a la hora de dosificar. Las propiedades del hormigón consideradas históricamente en la dosificación han sido la consistencia y la resistencia, y muy posteriormente la durabilidad. Inicialmente, el agua dosificada en la mezcla estaba orientada a conseguir la consistencia adecuada a la puesta en obra del hormigón.

El problema de la dosificación es complejo, ya que depende de múltiples factores relacionados con las propiedades exigidas al hormigón tanto en estado fresco como endurecido, con las características de los componentes y por los medios de fabricación, transporte y colocación.

Un gran número de métodos de dosificación proponen curvas granulométricas de referencia con el fin de determinar la proporción más idónea de las fracciones granulométricas de áridos que ha de tener el hormigón, en definitiva pretenden la optimización del esqueleto granular. Estos métodos que están entre los primeros registrados tienen en cuenta únicamente la consistencia del hormigón y tienen como dato principal de partida el contenido de cemento.

Los primeros en proponer el uso de curvas granulométricas de referencia continuas a las cuales se deben adaptar las granulometrías de los áridos fueron Fuller y Thompson en 1907, Bolomey en 1926 y Faury en 1944. En los dos primeros métodos se toma como dato de partida la dosificación de cemento y se determina el volumen de agua de amasado mediante tablas que indican el volumen de agua que se debe añadir al hormigón según el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y la consistencia requerida.

Fuller y Thompson (1907) propusieron que la curva de distribución granulométrica del árido debe ajustarse a la siguiente ecuación general, donde  $p$  es el porcentaje

que pasa por cada tamiz,  $d$  es el tamaño de cada tamiz,  $D_{max}$  es el tamaño máximo del árido y  $q$  es un parámetro variable que toma el valor de 0,5.

$$p = \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^q \quad (2.22)$$

Andreasen y Andersen (1930) proponen en la ecuación anterior un parámetro  $q$  entre 0,21 y 0,37 para la curva granulométrica de referencia que produzca un esqueleto granular de compacidad máxima dependiendo de los requisitos de durabilidad (Brouwers y Radix 2005). En hormigones convencionales  $q$  toma un valor de 0,37.

Funk y Dinger (1994) modifican el modelo de Andreasen y Andersen para la mezcla de compacidad máxima, sustituyendo la ecuación 2.22 por la siguiente ecuación, que considera el tamaño mínimo en la distribución:

$$p = \left[\frac{(d - D_{min})}{(D_{max} - D_{min})}\right]^q \quad (2.23)$$

Bolomey (1926) propone una curva granulométrica de referencia basada en la expresión siguiente, donde  $p$  es el porcentaje que pasa por cada tamiz,  $d$  es el tamaño de cada tamiz,  $D_{max}$  es el tamaño máximo del árido y  $a$  depende de la consistencia del hormigón y de la naturaleza del árido ( $a$  varía entre 10 y 14):

$$p = a + (100 - a) \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^{0,5} \quad (2.24)$$

La anterior ecuación, también incluye el contenido de cemento en el hormigón, con lo que las curvas de Bolomey quedan siempre por encima de las de Fuller. En definitiva, Bolomey modificó la fórmula de Fuller con el propósito de incluir el cemento y de conseguir una curva granulométrica variable en función de la consistencia y la forma de los áridos.

Caquot (1937) después de una serie de ensayos experimentales muestra que la curva de referencia que representa las diferentes clases granulares de una mezcla es bilineal en  $\sqrt[5]{d}$ . Como las dimensiones granulares inferiores y superiores son limitadas, Caquot formula dos hipótesis: la porosidad de la mezcla es igual a la del cemento y la proporción de granos superiores al tamaño máximo es reemplazada por una proporción de granos de tamaño máximo y la misma superficie, presentando un efecto pared.

Siendo  $d$  la abertura del tamiz correspondiente a un tamaño medio de grano y  $D_{max}$  el tamaño máximo, para una muestra de áridos, donde los tamaños  $d_k$

siguen una proporción geométrica de razón  $k$  y de tamaño máximo  $D_{max}$ , Caquot llega a las siguientes conclusiones:

- La proporción granular  $P$  de dos áridos de tamaños sucesivos es:

$$P_k - P_{k-1} = A \sqrt[5]{d_k} \quad (2.25)$$

$$A = \frac{V_{g1}}{\sum_{i=1}^n V_{gi}} \frac{1}{\sqrt[5]{d_1}} \quad (2.26)$$

donde  $V_{g1}$  y  $V_{gi}$  son los volúmenes de áridos de orden 1 e  $i$ , y  $d_1$  la dimensión del árido de orden 1.

- La proporción del árido mayor con respecto al de tamaño inmediatamente inferior es:

$$P_{D_{max}} - P_{D_{max}-1} = A \frac{\sqrt[5]{D_{max}}}{1 - k^{-\frac{4}{5}}} \quad (2.27)$$

- El volumen de vacíos de la mezcla  $V_v$  es igual a la mitad del volumen de cemento  $V_c$ .

Faury introdujo algunas mejoras a los métodos propuestos por Fuller y Thompson y por Bolomey que se refieren a la consideración del efecto pared y su influencia en el tamaño máximo del árido, así como a la dosificación de agua. Faury considera que el volumen de agua necesario para la producción de  $1 \text{ m}^3$  de hormigón es el producto entre la proporción de huecos existentes en el esqueleto granular, incluyendo el cemento, y la densidad del agua. Si el hormigón tuviera aire incorporado, al volumen de huecos habría que restarle el volumen del aire para obtener la cantidad de agua.

Faury (1944) propone una curva de tipo continuo inspirada en la teoría de Caquot, en la que la escala de abcisas corresponde a los tamaños de partículas representados proporcionalmente a  $\sqrt[5]{D_{max}}$  (raíz quinta de su tamaño) y la escala de ordenadas corresponde a la proporción en volumen real presente en el hormigón de partículas de un tamaño dado con respecto al volumen real total de partículas sólidas, incluido el cemento. Faury distingue los granos medios y finos inferiores a  $D_{max}/2$  y los granos gruesos superiores a  $D_{max}/2$ . La curva granulométrica de referencia está compuesta de dos rectas en las que la abcisa del punto de corte es  $X = D_{max}/2$  y la ordenada  $Y$  toma un valor según la fórmula 2.28.

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D_{max}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{max}} - 0,75} \quad (2.28)$$

donde  $A = 22$  a  $38$  (media  $30$ ) depende de la consistencia del hormigón y la forma de los granos y arenas,  $B$  es el coeficiente de compactación que toma valor  $1,5$  en condiciones usuales de puesta en obra y  $1$  para vibración enérgica y  $R$  es el radio medio del encofrado:

$$R = \frac{V_b}{S_c} \quad (2.29)$$

siendo  $V_b$  el volumen del hormigón y  $S_c$  las superficies totales mojadas por el hormigón por efecto pared.

El método propuesto por Joisel (1952) está también orientado a la consistencia del hormigón al momento de dosificar. La determinación del volumen de agua se hace a través del uso de los gráficos y ábacos que tienen en cuenta la distribución granulométrica de los sólidos (incluyendo el cemento), la compacidad de los áridos y la densidad de los materiales. Joisel se inspiró, al igual que Faury, en la teoría de Caquot, aunque en su caso propuso una generalización considerando que la ley que conduce a la compacidad máxima es función de  $\sqrt[m]{v}$ , dependiendo  $m$  de la compacidad con la que se compacta el árido y tomando un valor entre  $4$  y  $6$  (5 según Caquot).

El método de G. Dreux y L. Gorisse (1970) se parece a los métodos de la época (Faury, Joisel, etc.) y se basa en la obtención de una curva granulométrica continua que permite tener un esqueleto granular lo más denso posible y optimizar la dosificación en cemento y agua de los hormigones ordinarios. La curva granulométrica de referencia está representada en escala semilogarítmica (escala utilizada en los análisis granulométricos) y el punto de quiebro está definido por la abscisa:

- $D_{max}/2$  si  $D_{max} < 25 \text{ mm}$
- $(D_{max} - 5 \text{ mm})/2$  si  $D_{max} > 25 \text{ mm}$

y la ordenada según la siguiente fórmula:

$$Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + k + k_s + k_p \quad (2.30)$$

con  $k$  siendo un término corrector,  $k_s$  una función del módulo de finura de la arena y  $k_p$  un término de consistencia para la bombeabilidad.

El método de Baron-Lesage no es en sí un método de dosificación, sino una técnica de optimización del esqueleto granular de un hormigón, en la que se determina por aproximaciones sucesivas las proporciones relativas de los constituyentes sólidos inertes para los que, a dosificaciones de cemento y agua fijas, el hormigón

fluya lo más rápido posible en el Manejabilímetro LCL. La dosificación del agua y del cemento se determina para que el hormigón con el esqueleto granular óptimo fluya en un tiempo dado en el Manejabilímetro LCL (Baron y Lesage 1976), y presente la resistencia mecánica requerida. Este método se desarrolló en el seno del LCPC en los años 80 y se fundamenta en las hipótesis siguientes, verificadas experimentalmente (Rosi 1998) :

- Para una relación agua/cemento fija, el hormigón más trabajable es aquel más compacto.
- La relación arena/grava correspondiente a la óptima para conseguir la compacidad máxima es independiente de la cantidad de pasta de cemento.

Este método tiene la ventaja de ser un método fundamental aplicable a cualquier tipo de material al no depender de fórmulas ni tablas. En su defecto posee la desventaja de resultar pesado cuando tenemos que buscar las proporciones óptimas de más de dos fracciones granulométricas (de Larrard 2000).

Baron y Olivier (1996) desarrollaron un método de dosificación que deriva del método de Dreux-Gorisse con modificaciones para adaptarlo a los hormigones actuales, sobre todo teniendo en cuenta la incorporación de aditivos y de adiciones minerales.

También existen otras metodologías basadas en el empleo de granulometrías discontinuas como por ejemplo, los propuestos por La Valette en 1948 y D.A. Stewart en 1951.

El método de dosificación de La Valette es un método experimental que consiste en determinar un mortero con contenido mínimo de cemento, lo que se hace considerando la densidad del conjunto de los áridos y los huecos existentes en la arena húmeda. El procedimiento continúa incorporando al mortero anteriormente definido la mayor cantidad posible de grava mojada para formar un hormigón compacto. La pasta debe resudar, mediante las condiciones reales de puesta en obra. Así, se tiene la cantidad de áridos y cemento utilizados. La cantidad de agua viene definida por el sumatorio del agua de mojado del cemento, de la arena y de la grava, de modo que se tiene la composición real del hormigón. Así pues, se consigue el hormigón de máxima compacidad con menor cantidad de arena y de cemento. La dosificación de áridos propuesta por La Valette elimina finos por una parte, siempre y cuando haya suficiente cantidad de cemento para sustituirlos y por otra parte elimina tamaños intermedios.

La técnica de Stewart (1951) se basa en el uso de un árido grueso grande y a menudo de un solo tamaño (generalmente de 40 *mm*), y de una arena relativamente fina, de manera que las partículas finas tendrán que rellenar los huecos que la falta de fracciones intermedias genera, dando lugar así a mezclas más dóciles que las conseguidas con granulometrías continuas. Estas mezclas presentan más riesgo de

segregación, por lo que se recomiendan cuando se compacten mediante vibración y exista un buen control para evitar la segregación.

Según Day (1995), las mezclas con granulometrías discontinuas pueden llegar a ser imbatibles cuando quien las utilice esté familiarizado con el tema, pero no recomienda en absoluto su uso general. Day también presenta un método más enfocado al control de calidad en producción.

Otras metodologías de dosificación serían los métodos basados en mezclas de prueba como el empleado en el Reino Unido por la *British Ready Mixed Concrete Association (BRMCA)* o el de O'Reilly que se utiliza en Cuba y otros países de África y América.

En el primero, en la mezcla inicial se usa una relación árido/cemento característica del rango que, probablemente, va a suministrarse en la práctica, ajustándose a ojo la proporción entre árido fino y grueso hasta la obtención de las propiedades plásticas óptimas. Posteriormente se preparan una serie de mezclas con distintas cantidades de cemento y se determinan las distintas cantidades de agua demandadas, así como las resistencias que resultan. Los datos así obtenidos permiten la interpolación de propiedades del hormigón en incrementos de 5 o 10 kg en el contenido en cemento. Este método, aunque proporciona resultados bastante respetables, presenta ciertas desventajas como son el tiempo y el coste que implica, la necesidad de instalaciones adecuadas y personal experto y el no poder hacer frente a cambios en las características de los áridos (si se modifica la granulometría de un árido, todo el proceso debe ser repetido).

O'Reilly (1993) propone un método de dosificación a partir de la determinación de las características de los áridos a emplear, y en función de las mismas se diseña la mezcla, ya que según demuestra, existe una influencia cuantitativa de la forma de los áridos en el consumo de cemento. El método consiste en determinar experimentalmente la contribución porcentual de áridos gruesos y arena que ofrezca el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos, y finalmente el contenido de cemento y agua mediante factores que dependen de la relación agua/cemento y de la consistencia deseada de la mezcla.

A mediados del siglo XX surgen los primeros métodos de dosificación que tienen en cuenta, además de la consistencia, la resistencia a compresión del hormigón. Ello se constata, en primer lugar, en el método propuesto por el *Road Research Laboratory (RRL)* en 1947, seguido por Antia (1949). A partir de 1954, tras la publicación del primer documento normativo respecto a la dosificación del hormigón *ACI Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete (ACI 613-54)* (1954), todos los métodos de dosificación tienen en cuenta la resistencia del hormigón. Tanto en el método propuesto por la *Road Note 4* del *Road Research Laboratory* en el Reino Unido como en el método de Jiménez Montoya se utilizan curvas granulométricas de referencia.

La durabilidad de las estructuras también se considera por primera vez a mediados del siglo XX, por Antia (1949), *ACI Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete ACI 613-54* y Walker y Bloem (1960) aunque es a partir de 1961 que se observa constancia de la consideración de la durabilidad del hormigón por los diversos métodos de dosificación. En 2004, la AFGC propone un método basado en la noción de “indicador de la durabilidad” combinando medidas de ensayos en laboratorio y modelos extraídos de códigos de cálculo.

Respecto a la forma de dosificar el agua, los métodos que dosifican el agua mediante tablas están entre los métodos más empleados. Entre estos, se cita los propuestos por el RRL (1947), *Cement and Concrete Association (1954)*, Erntroy y Shaclock (1954) y Radelat (1960). A partir de 1947, las tablas utilizadas recomiendan valores de relación  $a/c$  en lugar del contenido de agua en volumen. Por otra parte, los métodos propuestos por Antia (1949), *ACI Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete (ACI 613-54)* (1954), De La Peña (1955), Walker y Bloem (1960), García Balado (1961), West y Fulton (1961), Jiménez Montoya (1964) y *ACI Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete (ACI 211.1-77)* (1997) presentan tablas que recomiendan el volumen de agua según algunos criterios, tales como: la consistencia deseada, el módulo de finura de la arena, el tamaño máximo y/o el volumen de árido grueso. En estos métodos, la relación  $a/c$  se utiliza en la determinación del consumo de cemento Portland según la resistencia y/o durabilidad requeridas.

El método de Dewar (Dewar 1986) está basado en un modelo ternario de empaquetamiento granular.

El Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC) de partículas, desarrollado en el seno del LCPC, se utiliza para dosificar el hormigón relacionando el empaquetamiento de la masa granular con propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Este modelo fue desarrollado por de Larrard (2000) para dosificar los más variados tipos de hormigones, tales como hormigones de resistencia normal, de altas prestaciones, de muy altas prestaciones (Sedran 1999), compactados con rodillo (Pouliot y col. 2001), etc.

El Modelo del Empaquetamiento Compresible (MEC) es un modelo granular analítico que permite calcular la compacidad de una mezcla granular a partir de la compacidad y granulometría de sus constituyentes, de las proporciones de la mezcla y de un parámetro  $K$  llamado *índice de compactabilidad* que nos indica la intensidad de la compactación. El MEC es una versión mejorada del Modelo de Suspensión Sólida (Sedran y de Larrard 1994), el cual está basado en el Modelo Lineal de Compacidad.

El método *ACI American Concrete Institute* es uno de los métodos de dosificación más conocidos y utilizados en el mundo, siendo ampliamente utilizado en EE.UU. y en la mayoría de los países americanos. En 1944 el ACI aprueba y publica *ACI Standard Recommended Practice for the Design of Concrete Mixed (ACI 613-44)*

(1944). Esta recomendación incluye un conjunto de pasos para el diseño de mezclas de hormigón por el método de los volúmenes absolutos, basándose en la selección de la relación agua/cemento, la resistencia deseada y en las condiciones de servicio y que se conoce por el método ACI.

En 1954, el ACI, a través de su comité 613 estudia y reemplaza la recomendación del año 1944 por la *ACI Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete (ACI 613-54)* (1954), incluyendo procedimientos para el diseño de hormigones con y sin aire incorporado. Igualmente reemplaza el procedimiento de seleccionar el porcentaje de árido fino sobre la base de una variedad de factores por el de emplear un coeficiente para determinar la cantidad de árido grueso por unidad de volumen.

El método de dosificación propuesto por *ACI Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete (ACI 211.1-77)* (1997), está basado en el empleo de tablas. El *ACI 211.1-91* (1994) describe un método de dosificación de hormigón basado en etapas progresivas teniendo en cuenta las características de los materiales utilizados y siguiendo una secuencia lógica. La secuencia resumida del procedimiento es la siguiente: se elige la consistencia adecuada, tomando el asiento mínimo compatible con la colocación del hormigón en obra, consultándose los valores recomendados de asentamiento en cono de Abrams de una tabla y se toma el mayor tamaño máximo del árido posible, teniendo en cuenta factores como la dimensión de los elementos, el espacio entre armaduras, la disponibilidad de los áridos, etc. A partir de la consistencia hallada, del tamaño máximo del árido elegido, de su forma, de su textura y granulometría, así como de la cantidad de aire incorporado, podemos hallar mediante tablas, la cantidad de agua necesaria para un  $m^3$  de hormigón, siendo esta independiente de la cantidad de cemento empleada. Posteriormente, debemos fijar la relación agua/cemento siguiendo un criterio donde predominen razones bien de resistencia o bien de durabilidad.

Siguiendo el criterio de durabilidad podemos hallar la relación agua/cemento máxima mediante tablas, en función del tipo de estructura y de las condiciones de servicio a las que va a estar sometida. Si el criterio de diseño es la resistencia a compresión del hormigón, podemos hallar también mediante tablas, la relación agua/cemento que debe emplearse para conseguir la resistencia deseada en nuestro hormigón, tanto si incorporamos aire como si no. Conocida la relación agua/cemento y la cantidad de agua, se obtiene la cantidad de cemento, que debe ser coherente con la cantidad máxima especificada en normas.

Para la obtención de las cantidades de árido fino y árido grueso, en este método, no se utilizan curvas de referencia. Es interesante la utilización del árido grueso en la mayor cantidad posible compatible con la docilidad. Esta cantidad se determina mediante ensayos de laboratorio o bien, mediante tablas. El resto hasta alcanzar la masa o volumen total de hormigón será árido fino.

Finalmente, la última etapa consiste en el ajuste de las proporciones de la mezcla mediante ciertas reglas y la realización de amasadas de prueba.

Erntroy y Shaclock (1954) propusieron un método gráfico de dosificación en el que se relaciona la resistencia a compresión del hormigón con un número de referencia arbitrario para hormigón fabricado bien con granito triturado, bien con áridos gruesos de machaqueo o bien con granos irregulares, mezclados con arena natural. Otro gráfico relaciona el número de referencia con la relación agua/cemento para diferentes trabajabilidades del hormigón y para tamaños máximos de árido de 10 o 20 mm.

Walker y Bloem (1960) presenta una aproximación poco complicada, basada en la experiencia, para llegar a las proporciones de la mezcla. El método propuesto requiere de una serie de operaciones previas, tales como determinar las propiedades físicas de los materiales a utilizar e implica la selección del porcentaje óptimo de árido fino en el árido total a partir de una tabla empírica basada en el contenido de cemento y el tamaño máximo del árido.

De la Peña (1955) desarrolla un método de dosificación basado en la resistencia media a compresión del hormigón, la cual se determina mediante tablas como primer paso del procedimiento en función del coeficiente de vibración y las condiciones de ejecución previstas.

Una vez obtenida la resistencia media, se calcula la relación cemento/agua necesaria mediante la siguiente fórmula:

$$c/a = K \cdot f_{cm} + 0,5 \quad (2.31)$$

siendo  $c/a$  la relación cemento/agua,  $f_{cm}$  la resistencia media del hormigón en  $N/mm^2$  a los 28 días, y  $K$  un parámetro función del tipo de cemento y áridos empleados.

A partir del tamaño máximo del árido, definido como el diámetro del tamiz por el cual pasa el 75% de la mezcla, se determinan mediante tablas y gráficos las cantidades mínimas de agua, cemento y áridos.

García Balado publicó en Argentina en el año 1961 un método de dosificación para hormigones plásticos que surgió con la idea de abarcar los 4 aspectos fundamentales del hormigón en sus dos estados: resistencia, durabilidad, trabajabilidad y economía y se fundamenta en la ley de la relación agua/cemento establecida por Abrams para la resistencia a compresión (García Balado 1982).

El primer paso en la dosificación consiste en la determinación, mediante tablas, de la relación agua/cemento que produzca el hormigón de la resistencia y durabilidad requerida. Seguidamente se elige, mediante tablas, la consistencia deseada en función del asentamiento más reducido compatible con las condiciones de puesta en obra previstas para el hormigón. Mediante ensayos, se determinan los pesos

específicos, las granulometrías y los módulos granulométricos de los áridos. Finalmente y también mediante la utilización de tablas, se determina la combinación más conveniente de los áridos que proporciona la trabajabilidad necesaria cuando estos se mezclan con el cemento y el agua.

Este método propone a diferencia de otros, la creación de un pastón de prueba previo a la fabricación en masa del hormigón, para comprobar su consistencia mediante el cono de Abrams, y corregir si fuera necesario, los pesos de los distintos áridos para la dosificación.

Existen varios métodos de dosificación basados en el módulo granulométrico. El módulo granulométrico o de finura se obtiene sumando el porcentaje retenido y acumulado en los tamices 0,125 , 0,25 , 0,5 , 1 , 2 , 4 , 8 , 16 , 31,5 , 63 , y 125 mm dividido por 100. Este módulo da una idea del tamaño medio del árido utilizado.

Fuller adoptó el módulo de finura como una forma de ajustar la granulometría con la que consideró como óptima. De acuerdo con Abrams y Hummel y otros autores, no es necesario ceñirse a una curva granulométrica teórica, basta con que el módulo granulométrico del árido sea el mismo que el de la curva teórica adoptada, a igualdad de consistencia, ya que todas las mezclas con el mismo módulo demandan la misma cantidad de agua para producir hormigón de la misma docilidad y resistencia, siempre y cuando se utilice la misma cantidad de cemento. Esto es válido, también según Hummel y Abrams, para el caso de granulometría discontinua.

El módulo granulométrico correspondiente a la parábola de Fuller figura en la tabla 2.9 que se muestra a continuación, en función del tamaño máximo del árido. Si quiere considerarse, además, la variable contenido en cemento, pueden utilizarse los valores del módulo granulométrico recomendado por Abrams.

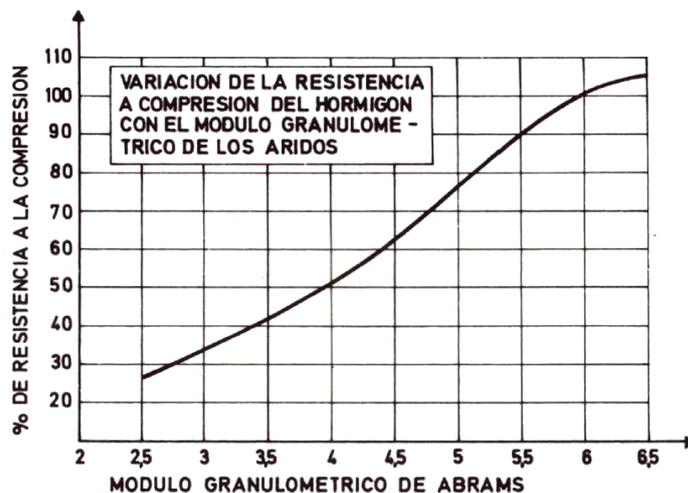
Tamaño máximo del árido (mm)	16	20	25	31,5
Módulo granulométrico de Fuller	4,799	5,137	5,439	5,719

**Tabla 2.9:** Módulo granulométrico de áridos que siguen la parábola de Fuller.

Puede relacionarse la resistencia a compresión del hormigón expresada en términos relativos con el módulo granulométrico de la mezcla. Jiménez Montoya *y col.* (2010) presentan una relación en condiciones medias y a título orientativo como se puede ver en la figura 2.17.

Los métodos basado en los husos granulométricos se sustentan en el principio de que las curvas granulométricas deben estar dentro de unos usos determinados.

La norma DIN1045-1: (2008) establece los husos granulométricos definidos por 4 curvas granulométricas basadas en el tamaño máximo de la partícula. Estos husos están también incluidos en el CódigoModeloDEB-FIP (1990). Las curvas



**Figura 2.17:** Relación entre el módulo granulométrico y la resistencia del hormigón (Jiménez Montoya y col. 2010).

granulométricas continuas A, B y C, que se observan en la figura 2.18, definen los siguientes dominios:

- A-B se refiere a granulometrías favorables que producen masas dóciles, trabajables y hormigones de alta resistencia.
- B-C se refiere a granulometrías aún utilizables que producen hormigones de baja resistencia y retracción.
- La zona localizada sobre la curva C conduce a granulometrías no convenientes que demandan demasiada agua de amasado.
- La zona localizada debajo de U conduce a granulometrías no utilizables que producen masas de difícil puesta en obra.

En el caso de granulometrías continuas, las curvas que definen la distribución granulométrica utilizable son las localizadas entre U y C. Cuanto más hacia arriba se encuentre la curva en el gráfico, más cantidad de agua demandará.

Al margen de los métodos de dosificación expuestos, recientemente se vienen utilizando procedimientos de optimización como son el Mortero de Hormigón Equivalente (Calibé 2004) que se basa en la existencia de una correlación simple entre las propiedades reológicas de un hormigón y las del mortero que lo compone (Scharzentruber y Catherine 2008) o bien el Diseño de Experimentos (Rougeron y Aïtcin 1994) (Louvet 1996).

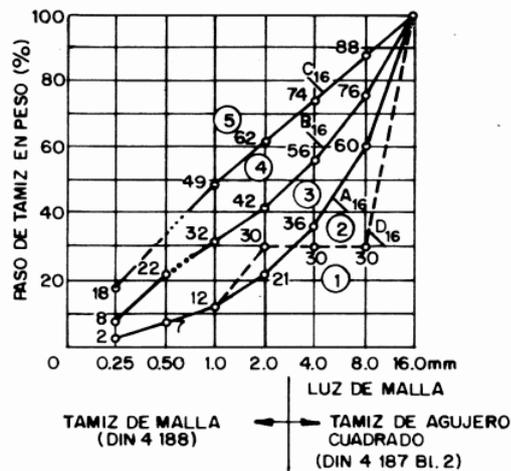


Figura 2.18: Husos granulométricos DIN 1045-1, tamaño máximo de partícula 16 mm.

## 2.5 REOLOGÍA DE HORMIGONES

### 2.5.1 Aspectos reológicos de hormigones

La reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de los materiales vinculando las relaciones entre esfuerzo aplicado, deformaciones y tiempo. Desde hace años se han construido diferentes viscosímetros para estudiar el hormigón fresco que posibilitan un mayor conocimiento del material y de los factores que lo modifican (Ferron 2008).

Para definir el comportamiento reológico de un fluido se recurre a un diagrama denominado curva de flujo, que representa en sus ejes el esfuerzo aplicado  $\tau$  (tensión de corte) y el gradiente de velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ . Los líquidos y suspensiones diluidas pueden ser clasificados en cuatro grandes categorías según sus propiedades:

- Newtonianos.
- No-newtonianos con comportamiento independiente del tiempo.
- No-newtonianos con comportamiento dependiente del tiempo.
- Viscoelásticos.

Los fluidos más sencillos como el agua se pueden caracterizar según la ley de Newton, expresada en la ecuación 2.32.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.32)$$

donde  $\tau$  es la tensión de corte,  $\mu$  es la viscosidad y  $\dot{\gamma}$  el gradiente de velocidad de deformación transversal.

El hormigón en estado fresco es considerado como un material intermedio entre un fluido y un empaquetamiento de partículas húmedas. Los fluidos con estructuras más complejas, como el hormigón, presentan propiedades elásticas y viscosas, es decir, poseen un valor umbral por debajo del cual no se produce movimiento. A estos materiales también se les conoce como viscoplásticos.

Para describir el comportamiento reológico del hormigón se han utilizado hasta la actualidad una diversidad de modelos que relacionan la velocidad de deformación con la tensión de corte aplicada (Ferraris 1999) (Banfill 2003). Los más comúnmente aplicados son el modelo de Bingham y el modelo de Herschel-Bulkley.

La realización de un vasto plan experimental permitió demostrar que el comportamiento del hormigón fresco se ajusta al modelo de Herschel-Bulkley (Ferraris y de Larrard 1998), al menos en el rango de gradientes de velocidad ensayados. Este modelo supone la siguiente relación entre la tensión de corte  $\tau$  aplicada y el gradiente de velocidad  $\dot{\gamma}$  obtenido:

$$\tau = \tau_0 + m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.33)$$

caracterizado por tres parámetros físicos:  $\tau_0$  tensión umbral,  $m$  consistencia y  $n$  índice de fluidez.

El modelo de Bingham, difundido en los medios científicos del hormigón gracias a los trabajos de Tattersall (1991), es en definitiva un modelo de Herschel-Bulkley donde el exponente  $n$  es igual a 1 y el parámetro  $m$  se convierte en la viscosidad plástica  $\mu$ . En la práctica  $n$  difiere sensiblemente de 1. Ferraris y de Larrard (1998) encontraron después de diversos ensayos que para hormigones sin superplastificante  $n$  vale 1,53 y para los hormigones con superplastificante  $n$  vale 1,36.

En el modelo de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.34)$$

la tensión umbral  $\tau_0$  aparece como la contribución de la fase sólida. Cuando aplicamos una tensión de cizalla al sistema se produce una deformación si la tensión aplicada es suficiente para vencer las fuerzas de fricción entre partículas. La tensión umbral está controlada por el número y la naturaleza de los contactos inter-granos, y no por la fase líquida cuyo papel es influir en la distancia media entre granos. Por contra, el término  $\mu\dot{\gamma}$  aparece como la contribución de la fase líquida.

El modelo más utilizado es el de Bingham, principalmente porque sus parámetros pueden medirse independientemente, aunque de Larrard y Ferraris (1998) han propuesto que algunos hormigones entre los que se encuentran los HAC podrían describirse mejor mediante el modelo de Heschel-Bulkley. A diferencia de los hormigones convencionales, los HAC se caracterizan por una tensión umbral muy baja.

### 2.5.2 Factores que modifican el comportamiento reológico

Los principales factores que modifican el comportamiento reológico del hormigón son: la composición de la mezcla, la granulometría, forma y tipo de los áridos, el contenido de agua y plastificante y las características del cemento. Los siguientes factores secundarios también modifican la reología del hormigón: método utilizado durante el mezclado, secuencia de entrada de materiales en la mezcladora, tiempo de mezclado y temperatura.

La mayoría de los cambios que se producen en la composición de la mezcla afectan a su respuesta reológica (Beaupré y Mindess 1998). Zerbino *y col.* (2008), indican que uno de los principales cambios es la cantidad de agua, que afecta a la viscosidad plástica y a la resistencia al flujo, de tal forma que a mayor contenido de agua ambos parámetros se reducen de forma significativa. Los autores también citan que la mayoría de los aditivos modifican de forma notoria los parámetros reológicos, siendo difícil predecir su comportamiento.

Banfill (1981) y Tattersall y Banfill (1983) comprobaron que tanto la tensión umbral  $\tau_0$  como la viscosidad plástica  $\mu$  son funciones exponenciales del contenido de agua y superplastificantes. Por su lado, Roy y Asaga (1979) cuantificaron los cambios entre distintos procedimientos de amasado y concluyeron que entre el proceso más intenso y el menos intenso, los valores de  $\tau_0$  y  $\mu$  disminuyeron del orden de un 60%.

A su vez, Carlsward *y col.* (2003) han estudiado los efectos del aire ocluido, del humo de sílice, del filler calizo y de humedad en la reología, encontrando que el contenido de aire ocluido aumenta el escurrimiento, reduce la viscosidad plástica  $\mu$  pero tiene poco efecto sobre la tensión umbral  $\tau_0$ .

Geiker *y col.* (2002) han observado que altos contenidos de árido grueso aumentan la tensión umbral y la viscosidad plástica. Además, debido a la fricción interna, los áridos sostienen parte de la estructura interna de la mezcla en fresco y restringen la segregación.

Emborg (1999) concluye que, partiendo de una amasada de referencia, un aumento en la dosificación de agua, un mayor porcentaje de árido grueso o la reducción del contenido en cemento disminuyen tanto el esfuerzo inicial de corte de la mezcla como su viscosidad.

Por otra parte, dosificaciones elevadas de superplastificantes también reducen el esfuerzo de corte inicial de la amasada, pero a la vez aumentan la viscosidad de la misma. En el caso de sustituir áridos rodados por áridos de machaqueo, la amasada tiene una tendencia a aumentar tanto su esfuerzo de corte inicial como su viscosidad.

### Viscosidad plástica $\mu$ y Tensión umbral de cizalla $\tau_0$

La viscosidad plástica  $\mu$  (en  $Pa \cdot s$ ) está controlada por el volumen sólido relativo  $\phi/\phi^*$ :

$$\mu = \exp[a + (\frac{\phi}{\phi^*} - b)] \quad (2.35)$$

donde:

- $\phi$  es la relación entre el volumen sólido y el volumen total de hormigón fresco.
- $\phi^*$  es la compacidad de la fase sólida.

con  $a$  y  $b$  dos parámetros ajustables. Diferentes autores que se pueden consultar en de Larrard y Sedran (2007) han propuesto diversos valores para los anteriores parámetros ( $a$  entre 20,36 y 45,88 y  $b$  entre 0,7123 y 0,8512).

En el anterior modelo la influencia del aire ocluido se toma igual a la del agua, es decir, reduciendo de forma importante la viscosidad plástica.

La tensión umbral  $\tau_0$  puede considerarse como el resultado macroscópico de la fricción y cohesión existente entre los contactos de los granos para que el material entre en movimiento. El modelo que relaciona la tensión umbral  $\tau_0$  con la concentración relativa de los hormigones propuesto por Ferraris y de Larrard (1998) es el siguiente:

$$\tau_0 = \exp[a_0 + (b_1 + b_2 \cdot [1 - \frac{S_p}{S_p^*}]^n + f(\frac{V_a}{V_a + V_f}))] \cdot K_f + \sum_{aridos} (a_i \cdot K_i) \quad (2.36)$$

con:

$$f(\frac{V_a}{V_a + V_f}) = (1 - \frac{S_p}{S_p^*})(\exp(2,2 \cdot \frac{V_a}{V_a + V_f}) - 1) + 4,1 \cdot \frac{S_p}{S_p^*} \cdot \frac{V_a}{V_a + V_f} \quad (2.37)$$

donde:

- $S_p$  es la dosificación de aditivo

- $S_p^*$  es la dosificación de saturación de aditivo
- $V_a$  es el volumen de aire ocluido
- $V_f$  es el volumen de finos
- $K_f$  es el índice de compactabilidad parcial relativa de a los finos
- $K_i$  es la contribución de la fracción  $i$  del árido al índice de compactabilidad de la mezcla
- los parámetros  $a_i$  para  $i \geq 1$  toman un valor

$$a_i = 0,736 - \log(d_i) \quad (2.38)$$

siendo  $d_i$  el diámetro medio en  $mm$  de la fracción granular  $i$ , es decir, la dimensión que corresponde al 50% del pasante o  $D_{50}$ .

Los valores de los restantes parámetros propuestos en la bibliografía están recogidos en la tabla siguiente (tabla 2.10):

Datos	$a_0$	$b_1$	$b_2$	$b_1 + b_2$	$n$
de Larrard y Ferraris (1998)	2,537	0,224	0,910	1,134	3
Sedran (1999)	2,123	-	-	1,136	-
Modelo BetonlabPro3 (2007)	2,330	0,435	0,700	1,135	2

**Tabla 2.10:** Valores parámetros tensión umbral en función de la concentración relativa.

El anterior modelo confirma el hecho de que la tensión umbral aumenta cuando la dimensión de los constituyentes disminuye. Así pues, el efecto del cemento es más importante que el de la arena, y este es superior a la contribución de la grava.

Según el modelo anterior, el aire ocluido reduce la tensión umbral por un efecto de volumen (la incorporación de aire disminuye los índices de compactación parciales) pero la aumenta por una fricción mayor debida a los finos al aumentar el término multiplicativo frente  $K_f$ . La experiencia muestra, en efecto, que la oclusión de aire produce hormigones con menores asentos, de manera más importante cuanto más ricos en cemento son (Sedran 2005).

### 2.5.3 Determinación de la consistencia del hormigón

La consistencia del hormigón se determina según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN12350-2: (2009) "*Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*".

El ensayo se realiza de muestras tomadas del hormigón proveniente de entre 1/4 y 3/4 de la descarga del camión y se realizarán dos ensayos de consistencia por familia, anotándose el descenso en cono de Abrams medio, el tiempo transcurrido desde el amasado del hormigón, la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón fresco.

#### *Cono de Abrams*

La medida de la consistencia de un hormigón fresco por medio del cono de Abrams es un ensayo muy sencillo, nada costoso y que proporciona unos resultados satisfactorios. Como consecuencia de lo anterior, este ensayo se emplea a nivel mundial con ligeras variantes. Este ensayo se realiza según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN12350-2: (2009) "*Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*". En este ensayo el hormigón se coloca en un molde metálico troncocónico de 30 cm de altura y de 20 y 10 cm de diámetro inferior y superior, respectivamente.

El hormigón se compacta en 3 capas, de aproximadamente la tercera parte del volumen del molde, que se compactan mediante 25 golpes efectuados por una barra de acero de 16 mm de diámetro terminada en una punta cónica rematada por un casquete esférico. Antes de llenar el molde es necesario humedecerlo interiormente para evitar el rozamiento del hormigón con la superficie del mismo y durante la operación de llenado el molde debe mantenerse fuertemente apoyado contra una plancha metálica que actúa de base.

Una vez llenado el molde y habiendo enrasado convenientemente la cara superior del hormigón, se eleva verticalmente con precaución el molde, midiéndose el asentamiento experimentado por la cara superior del mismo. El asentamiento se determina midiendo la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la muestra después del ensayo, con una precisión de  $\pm 0,5$  cm. Según el descenso de la superficie superior del hormigón, denominado "asiento", se puede clasificar la consistencia del hormigón según la tabla 3.6.

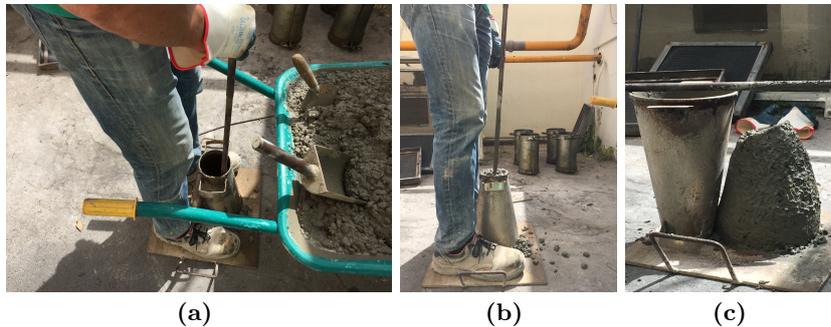
Geoffray (2008) pone en evidencia la importancia del conocimiento del cono de Abrams para la puesta en obra del hormigón. Durante el vertido del hormigón en el interior del encofrado uno de los factores que influyen en la presión del hormigón sobre el encofrado es el cono de Abrams del mismo. En el caso de hormigones compactados por vibración el tiempo de vibrado depende del cono del hormigón según la ecuación 2.39 obtenida empíricamente.

$$t_V = 2,5 \left( G + \frac{1}{A + 0,05} \right) \frac{V \cdot F}{\phi} \quad (2.39)$$

donde:

- $t_V$  es el tiempo total de vibrado ( $s$ ).
- $A$  es el asentamiento en cono de Abrams ( $cm$ ).
- $V$  es el volumen de hormigón ( $m^3$ ).
- $\phi$  es el diámetro del vibrador ( $m$ ).
- $F$  es el coeficiente de ferrallado que varía entre 1 y 1,5.
- $G$  es el coeficiente de angularidad de los áridos que toma valores entre 1 y 5.

El asentamiento en cono de Abrams es un indicador para clasificar el hormigón según su finalidad, empleo, puesta en obra y método de compactación. De Larrard (2000), por ejemplo, indica que un hormigón de resistencia normal para estructuras armadas o pretensadas debe tener un asiento en cono de Abrams entre 8 y 15  $cm$ .



**Figura 2.19:** Ensayo de asentamiento en cono de Abrams.

### *Medidas reológicas y asentamiento en cono de Abrams*

El Cono de Abrams es el ensayo más conocido y más utilizado para caracterizar la consistencia del hormigón. Además es un ensayo muy simple y de bajo coste, se utiliza tanto en centrales como en obra y está estandarizado en todo el mundo. Por consiguiente es importante encontrar un modelo que relacione el asentamiento en Cono de Abrams con las proporciones de la mezcla (dosificación). Distintas tentativas han sido realizadas por diversos investigadores para encontrar una relación entre el asentamiento en cono de Abrams y la tensión umbral de cizalla, tanto

por métodos empíricos como teóricos. Hu y de Larrard (1996) propone el modelo siguiente con una relación general de la forma:

$$A = c - \frac{a \tau_0}{\rho} \quad (2.40)$$

donde  $A$  es el asentamiento en cono de Abrams en  $mm$ ,  $\tau_0$  en  $Pa$  y  $\rho$  la masa volúmica del hormigón fresco en  $Kg/m^3$ .

Diversos autores proponen los valores de la tabla 2.11 para los parámetros de la ecuación 2.40.

<b>Autores</b>	<b>c</b>	<b>a</b>
Hu (1995)	300	270
de Larrard y Ferraris (1998)	331	347
Sedran (1999)	306	269
Sedran (1999)	268	269
Chopin (2003)	331	259
Banfill (2003)	268	199
Modelo BetonlabPro 3 (2007)	300	269

**Tabla 2.11:** Coeficientes para el cálculo del asentamiento en cono de Abrams.

Después de numerosas medidas experimentales, Ferraris y de Larrard (1998) mejoran la precisión del modelo de Hu mediante una corrección empírica que da lugar a la ecuación siguiente válida para asientos superiores a 100  $mm$ :

$$A = 300 - 347 \frac{(\tau_0 - 212)}{\rho} \quad (2.41)$$

O lo que es lo mismo:

$$\tau_0 = \frac{\rho(300 - A)}{347} + 212 \quad (2.42)$$

La validación del modelo presenta errores medios de 24  $mm$  en  $A$  y de 162  $Pa$  en  $\tau_0$ .

Murata y Kikukawa (1992) desarrollan la siguiente ecuación empírica utilizando un reómetro de cilindros coaxiales:

$$\tau_0 = 714 - \log A \quad (2.43)$$

donde  $\tau_0$  está en  $Pa$  y  $A$  en  $cm$ .

Roussel y Coussot (2006) proponen la siguiente correlación, también después de numerosas medidas experimentales, válida para asientos entre 50 y 250  $mm$ :

$$A = 255 - 176 \frac{\tau_0}{\rho} \quad (2.44)$$

Para hormigones más fluidos con asientos superiores a 250  $mm$ , Roussel (2007) propuso un método alternativo que consiste en la caja LCPC.

Basándose en la experiencia adquirida en la red de laboratorios de LCPC, de Larrard (2000) presentó valores característicos del umbral de cizalla  $\tau_0$  para diferentes tipos de hormigón:

Aplicación del hormigón	Umbral de cizalla $\tau_0$ (Pa)
Hormigón de resistencia normal para estructuras armadas y pretensadas	800 - 1500
Hormigón de altas prestaciones fabricado en obra	300 - 1200
Hormigón autocompactable HAC	200 - 500

**Tabla 2.12:** Valores umbral de cizalla para diferentes aplicaciones (de Larrard 2000).

#### 2.5.4 Otros ensayos para medir la trabajabilidad del hormigón

En ICAR 105 - 1, Koehler y Fowler (2003) describen 61 métodos diferentes para medir y caracterizar la trabajabilidad tanto de hormigones convencionales como de HAC, pastas de cemento y grouts.

##### *Consistómetro VEBE*

En los casos en los que el cono de Abrams carece de sensibilidad como ocurre con los hormigones muy secos, se utiliza el consistómetro Vebe, cuyo ensayo está descrito en la norma UNE-EN12350-3: (2009) "*Ensayos de hormigón fresco. Parte 3: Ensayo Vebe*".

El consistómetro Vebe es un aparato de ensayo de laboratorio que, además de medir la consistencia dada por el asiento del hormigón en el cono, permite dar una idea aproximada de la docilidad del hormigón fresco al indicar la facilidad de adaptación del hormigón a un molde determinado mediante una vibración.



**Figura 2.20:** Consistómetro Vebe MATEST.

El ensayo consiste en medir el tiempo que tarda un tronco de cono de hormigón, moldeado con el cono de Abrams y colocado en el interior de un recipiente metálico cilíndrico situado sobre una mesa vibrante, en deformarse y tomar la forma de este. Este tiempo se denomina tiempo Vebe (en segundos), e indica el tiempo transcurrido desde que se inicia la vibración hasta que el hormigón se compacta dando una superficie horizontal, lo que se aprecia por medio de un disco de plástico que acompaña libremente al hormigón durante su asiento.

El dato del tiempo Vebe, de acuerdo con la norma UNE-EN206-1: (2008), se puede adaptar a las clases de la tabla siguiente:

Clase	Tiempo Vebe (s)	Consistencia
V0	>31	
V1	30 - 21	Extremadamente seca
V2	20 - 11	Muy seca
V3	10 - 6	Seca
V4	5 - 3	

**Tabla 2.13:** Clases de consistencia según el tiempo Vebe.

Si el tiempo es inferior a 3 segundos o superior a 30 segundos, el hormigón posee una consistencia para la cual el ensayo Vebe no es recomendado.

Delibes (1993), propone una relación entre los valores posibles en el ensayo del cono de Abrams y los del ensayo Vebe, tal y como se observa en la tabla 2.14.

Clase de consistencia	Asiento en cono de Abrams (cm)	Tiempo Vebe (s)
Seca o muy seca	0 - 1 (Ensayo no adecuado)	> 30
		30 - 21
		20 - 11
Seca o plástica	1 - 2 3 - 4	10 - 5
Plástica o blanda	5 6 - 9	< 4
Fluida	10 - 15	Ensayo no adecuado
Líquida	> 16	Ensayo no adecuado

**Tabla 2.14:** Relación entre el asiento en cono de Abrams y el tiempo Vebe (Delibes 1993).

### *Manejabilímetro LCL*

Equipo diseñado para medir la docilidad del hormigón tanto en campo como en laboratorio. Está formado por un recipiente prismático dividido en dos partes desiguales de diferente volumen por medio de un partidador extraíble, y un vibrador eléctrico. El hormigón fresco se vierte dentro del espacio de mayor volumen, el separador se quita, y el vibrador comienza automáticamente a funcionar. Evidentemente, el hormigón tiende a llenar la parte vacía que dispone de unas marcas horizontales en la pared hacia la cual se desplaza la masa.

El ensayo consiste en medir el tiempo necesario para que el hormigón alcance una de las anteriores marcas, cuya elección debe de hacerse experimentalmente. Los tiempos en alcanzar estas marcas pueden ser muy diferentes, oscilando de unos segundos a varios minutos, dependiendo de la consistencia, cantidad de agua, dosificación de cemento, uso de aditivos, relación arena/grava del hormigón, intensidad de vibración, etc.

En un hormigón plástico, la docilidad o trabajabilidad es tanto mayor cuanto menor es el tiempo tardado en alcanzar la marca correspondiente. Como idea, podemos tomar los siguientes valores medios:

- Hormigones muy fluidos,  $t \leq 10$  s.
- Hormigones blandos,  $t \simeq 15$  s.
- Hormigones plásticos de buena trabajabilidad,  $20 \leq t \leq 30$  s.
- Hormigones secos poco trabajables,  $t \geq 40$  s.

El equipo LCL permite, para una misma dosificación de cemento y relación agua/cemento, determinar la relación óptima arena/grava; valor que tiene una gran importancia en la docilidad del hormigón. Igualmente, y una vez fijada la relación arena/grava idónea, permite determinar la dosificación de cemento o, con esta fija,

hallar la intensidad de vibración más conveniente para este hormigón, para lo cual el vibrador permite trabajar con diferentes intensidades.



**Figura 2.21:** Manejabilímetro LCL para medir la docilidad del hormigón MATEST.

### *Grado de compactabilidad*

El ensayo de compactabilidad, descrito en la norma UNE-EN12350-4: (2006) “*Ensayos de hormigón fresco. Parte 4: Grado de compactabilidad*”, determina un método para conocer la consistencia del hormigón fresco a través de la medida del grado de compactabilidad.

El fundamento del ensayo se basa en medir la distancia entre la superficie del hormigón fresco antes de ser sometido a vibración y la superficie después de la citada vibración. El procedimiento consiste en llenar un recipiente (de  $200 \pm 2$  mm x  $200 \pm 2$  mm de base y  $400 \pm 2$  mm de altura) previamente humedecidas las superficies interiores, sin apisonarlo y vertiendo el hormigón desde todas las posiciones hasta llenarlo y enrasarlo correctamente. Luego se somete al hormigón a un proceso de vibrado, bien con una mesa vibrante o un vibrador interno, hasta que este ya no presente ninguna disminución de volumen, evitando la pérdida de muestra por salpicaduras o fugas.

Posteriormente se mide la altura del hormigón, como valor promedio y con un margen de 1 mm, y se calcula el valor de la resta entre la altura del recipiente, que es la altura del hormigón previa al vibrado, y la altura una vez finalizado este.

El valor del grado de compactabilidad se puede adaptar a las siguientes clases de consistencia de la tabla 2.15, según la norma UNE-EN206-1: (2008).

Clase	Grado de compactabilidad
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 - 1,26
C2	1,25 - 1,11
C3	1,10 - 1,04

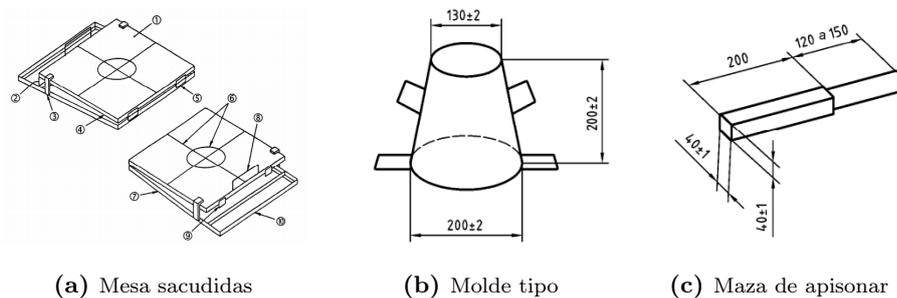
**Tabla 2.15:** Clases de consistencia según el grado de compactabilidad (Adaptada de UNE-EN206-1:2008).

### *Mesa de sacudidas*

Este ensayo, descrito en la norma UNE-EN12350-5: (2009) “*Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas*”, tiene por objeto determinar el escurrimiento del hormigón fresco, no pudiéndose aplicar a hormigones exentos de finos o con tamaño máximo de árido superiores a 63 mm.

El fundamento del ensayo es sencillo y se basa en calcular la consistencia del hormigón fresco mediante el esparcimiento del material sobre un plato plano sometido a sacudidas.

La mesa de sacudidas está formada por un plato liso, con una superficie plana de 700 x 700 mm, unido a una base rígida sobre la que se puede caer desde una altura determinada. El molde utilizado para formar la probeta de ensayo tendrá forma de tronco de cono abierto por ambas caras (superior e inferior), será de metal no atacable fácilmente por la pasta de cemento y su interior deberá ser liso, libre de protuberancias o abolladuras. Se dispondrá también de una maza de apisonar de sección cuadrada y una longitud aproximada de 200 mm.



**Figura 2.22:** Ensayo de consistencia del hormigón fresco con la mesa de sacudidas (Adaptada de UNE-EN12350-5:2009).

El desarrollo consiste en situar un molde tipo cono de Abrams centrado sobre la tapa de la mesa y llenarlo de hormigón en dos capas iguales, nivelando cada capa con ligeros golpes llevados a cabo con una maza. Después de haber nivelado el hormigón, se limpia la zona libre de la tapa de la mesa de cualquier resto de hormigón y se retira cuidadosamente el molde elevándolo verticalmente. Se eleva la tapa hasta el tope superior, y se deja caer libremente hasta el tope inferior repitiendo el proceso 15 veces, para luego medir la dimensión máxima del hormigón esparcido en las dos direcciones paralelas a los bordes de la mesa,  $d_1$  y  $d_2$ .

En el esparcimiento del hormigón se comprueba también la segregación. La pasta de cemento puede segregarse del árido grueso formando un anillo de pasta que se extiende varios  $mm$  más allá del árido grueso. En este caso, se anota que se ha producido segregación, y que por consiguiente, el ensayo no es válido.

Como resultado del ensayo, se determina el valor medio del escurrimiento  $(d_1 + d_2)/2$  y se anota el resultado redondeando a los 10  $mm$  más próximos.

Clase	Diámetro de escurrimiento (mm)
F1	$\leq 340$
F2	350 - 410
F3	420 - 480
F4	490 - 550
F5	560 - 620
F6	$\geq 630$

**Tabla 2.16:** Clases de consistencia según el ensayo de mesa de sacudidas (UNE-EN206-1: 2008).

### 2.5.5 Reómetros de hormigón

Fue a Tattersall (1991) a quien se debe el primer y más conocido diseño de un dispositivo de medida de las propiedades reológicas del hormigón. El aparato constaba de un recipiente para contener el hormigón a ensayar y una pala, o impulsor, de geometría especial. La pala se introduce en la muestra y comienza a girar, midiéndose el esfuerzo torsor que se opone al giro y la velocidad de giro. En el ensayo, se va incrementando la velocidad de rotación de las palas y se registra en una gráfica el momento torsor y la velocidad de giro. El gráfico obtenido es lineal para la mayor parte de hormigones, y en él se pueden relacionar los parámetros del modelo de Bingham. La ecuación que relaciona el esfuerzo torsor  $T$  en  $(N \cdot m)$  con la velocidad de giro  $N$  ( $rad/s$ ) se presenta en 2.45.

$$T = Y + V \cdot N \quad (2.45)$$

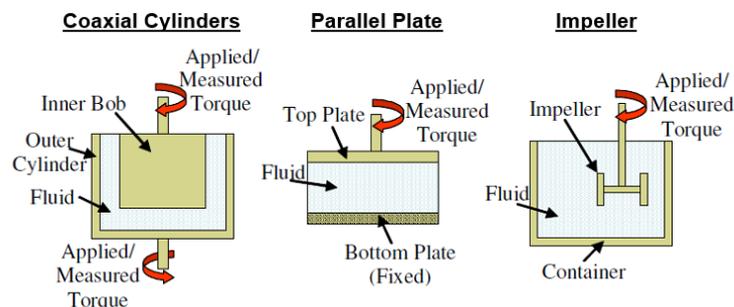
donde  $Y$  es la tensión de corte en ( $N \cdot m$ ) y  $V$  la viscosidad plástica del hormigón en ( $N \cdot m \cdot s$ ).

En la ecuación anterior se puede relacionar la tensión de corte con el torsor correspondiente a la velocidad de giro cero y la viscosidad plástica con la pendiente de la curva.

Posteriormente a Tattersall, otros investigadores como Wallevik (1988), Beaupré (1994) y Koehler y Fowler (2006), han mejorado el dispositivo de medida a la vez que han desarrollado diversos modelos comerciales. Una de las principales mejoras ha consistido en automatizar el instrumento de forma que el par torsor y la velocidad de giro se registren automáticamente.

Loureda y Vilar (2012) presentan una relación de los dispositivos que existen en la actualidad para predecir las propiedades reológicas del hormigón. Estos dispositivos, llamados reómetros, se encuadran en alguno de los tres grupos o modelos siguientes:

- Modelos rotacionales, donde un impulsor o pala gira con simetría axial a velocidad variable, midiéndose el torsor generado debido a la resistencia del hormigón.
- Modelos coaxiales, diseñados con dos cilindros concéntricos en los que un cilindro se hace girar a velocidad variable midiéndose el par torsor.
- Modelos de platos paralelos, donde el hormigón se coloca dentro de un recipiente cilíndrico que dispone de una unidad de platos paralelos, un plato inferior fijo y un plato superior móvil que gira a distintas velocidades, midiéndose el par en este último.



**Figura 2.23:** Diferentes modelos de reómetros típicos (Koehler y Fowler 2006).

Estudios comparativos entre los diferentes reómetros confirman que los valores de las constantes de Bingham (tensión de corte umbral  $\tau_0$  y viscosidad plástica  $\mu$ ), deducidas de las medidas físicas son diferentes. No obstante, todos los reómetros pueden ser utilizados para estimar las características reológicas de los hormigones y cualitativamente su correlación es buena (Ferraris y Martys 2003).

### Reómetro BTRHEOM

El BTRHEOM es un reómetro de tipo platos paralelos y su concepción permite utilizar un volumen mínimo de hormigón de 7 litros aproximadamente. Por medio de dos platos paralelos se aplica un momento torsor a la muestra de hormigón al girar uno de los dos platos alrededor del eje perpendicular a los mismos según podemos apreciar en la figura 2.24 (de Larrard *y col.* 1994) (Hu 1995).

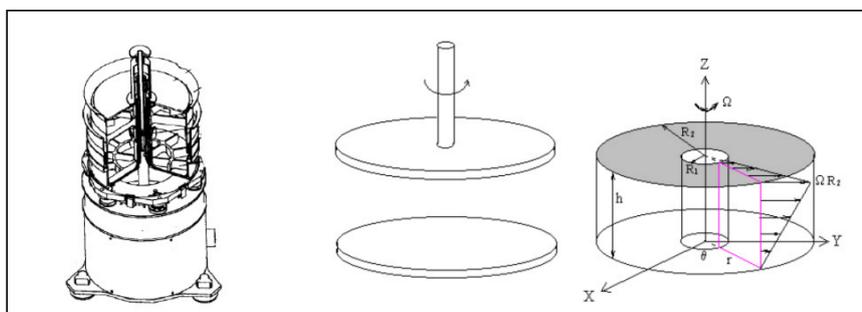


Figura 2.24: Reómetro BTRHEOM.

El campo de deformación impuesto por la geometría del aparato no es uniforme (como en el viscosímetro de Couette) y es función de la velocidad angular del plato superior. Aún así es posible, por integración del campo de deformación, calcular la ley de comportamiento del material ensayado a partir de la relación existente entre el momento torsor aplicado y la velocidad angular. Este reómetro BTRHEOM, que se puede ver en la figura anterior, fue desarrollado en el *LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, París)* y con el mismo se consigue una determinación cuantitativa del esfuerzo de fluencia y del esfuerzo estático de las mezclas de hormigón. Se utiliza con hormigones de 25 mm de tamaño máximo y asientos superiores a 10 cm.

En este instrumento de platos paralelos donde el esfuerzo cortante es impuesto por la geometría mediante la velocidad angular, el plato inferior se mantiene fijo y el superior gira alrededor del eje vertical. El control del mismo (velocidad de rotación, vibración), las medidas (momento y velocidad angular) y los cálculos de los parámetros reológicos están todos controlados mediante un programa llamado ADRHEO.

### **Reómetro ICAR**

El reómetro ICAR está diseñado para caracterizar el límite de elasticidad estática, el límite de elasticidad dinámico y la viscosidad plástica del hormigón. El instrumento fue desarrollado en el *ICAR (International Center for Aggregates Research)* ubicado en la Universidad de Texas en Austin para cubrir las necesidades de un método para caracterizar el comportamiento del flujo real de las mezclas de hormigón, ya que se entendía que los métodos tradicionales no eran capaces de caracterizar las propiedades reológicas fundamentales del hormigón durante los procesos de mezclado, transporte y colocación.

El reómetro ICAR es un instrumento de bajo coste y fácil de usar que puede ser utilizado para:

- Investigación y desarrollo para describir la influencia de los nuevos materiales en la reología del hormigón.
- Optimización de proporciones de la mezcla para que el hormigón fluya fácilmente sin segregarse.
- Control de calidad en obra.



**Figura 2.25:** Reómetro ICAR.

El reómetro ICAR se compone de un recipiente para contener el hormigón fresco, una cabeza controladora que incluye un motor eléctrico y un medidor de par, una paleta interior con 4 aspas fijada al eje por un portapaletas, un marco para sujetar el ensamblaje cabeza/paleta a la parte superior del recipiente, y un ordenador portátil para operar el controlador, grabar el par medio durante el ensayo y calcular los parámetros de flujo. El recipiente es una cubeta que contiene una serie de barras verticales alrededor del perímetro para evitar el deslizamiento del hormigón a lo largo de la pared del mismo durante el ensayo. El tamaño del recipiente y la longitud del eje de la paleta se seleccionan basándose en el tamaño máximo nominal del árido. La paleta tiene un diámetro y una altura de 127 mm.

Se pueden realizar dos tipos de ensayos. El primero es un ensayo de incremento de esfuerzo en el cual la paleta gira a una velocidad constante de  $0,025 \text{ rev/s}$ . El incremento inicial de par se mide como una función del tiempo. El máximo par medido durante el ensayo se usa para calcular el esfuerzo de fluencia estático.

El otro tipo de ensayo es determinar la curva de flujo para obtener el esfuerzo de fluencia dinámico y la viscosidad plástica. El ensayo de curva de flujo comienza con un periodo en el cual la paleta gira a velocidad máxima. Esto se hace para romper cualquier estructura tixotrópica que pueda existir y para proporcionar un historial de cortante consistente antes de medir los parámetros de Bingham.

La velocidad de la paleta se reduce en un número determinado de pasos, que se seleccionan por el usuario, pero por lo menos se recomiendan seis pasos. Durante cada paso la velocidad se mantiene constante y se registran la velocidad media y el par. La gráfica de par respecto la velocidad de rotación de la paleta es la curva de flujo.

El software del reómetro ICAR realiza todas las funciones necesarias: opera el controlador, registra el par, calcula los resultados de los ensayos y almacena los datos. Para simplificar, todo el programa se opera desde una sola pantalla como se muestra a continuación.

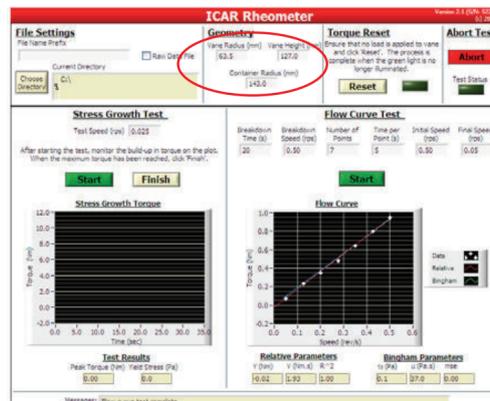


Figura 2.26: Interfaz software reómetro ICAR.

En la figura 2.27, se ejemplifican los resultados de un ensayo de incremento de esfuerzo. El par máximo y la geometría de ensayo se utilizan para calcular el esfuerzo de fluencia estático, que se muestra en la parte inferior de la pantalla del ordenador. La gráfica muestra el promedio del par y el promedio de rotación de la paleta medido durante 6 pasos de la disminución de la velocidad de la misma. El software calcula una recta de mejor ajuste a los datos y los informes del origen y la pendiente como parámetros relativos. El software también calcula los parámetros de Bingham: el esfuerzo de fluencia dinámico y la viscosidad plástica.

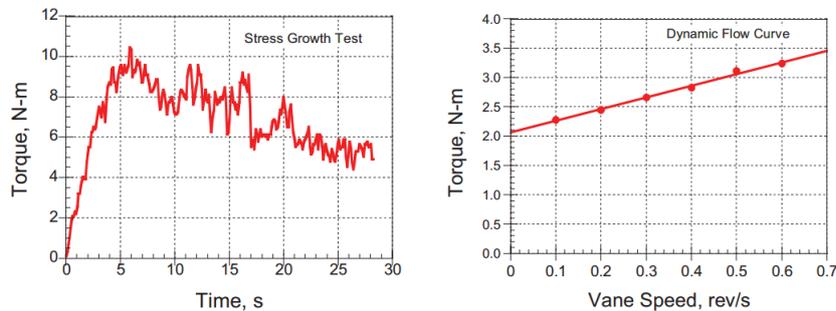


Figura 2.27: Resultados de ensayo de incremento de esfuerzo con el reómetro ICAR.

### Reómetros más actuales

Recientemente, Loureda y Vilar (2012) han diseñado un reómetro útil para la caracterización reológica de mezclas de hormigón fresco, con consistencias válidas a partir de 80 mm de asiento en cono de Abrams, y aplicable también a hormigones autocompactables. El reómetro es portable, y emplea una cuba de 25 litros en la que se introduce una pala agitadora cuya geometría se ha ajustado tras la realización de numerosas pruebas con hormigones diferentes. La pala diseñada se basa en el modelo ICAR aunque con recortes triangulares en el borde exterior de sus cuatro planos y genera, por una parte, valores mínimos del par torsor dentro del rango óptimo y, por otra, las mayores pendientes en la recta tipo Bingham representada.

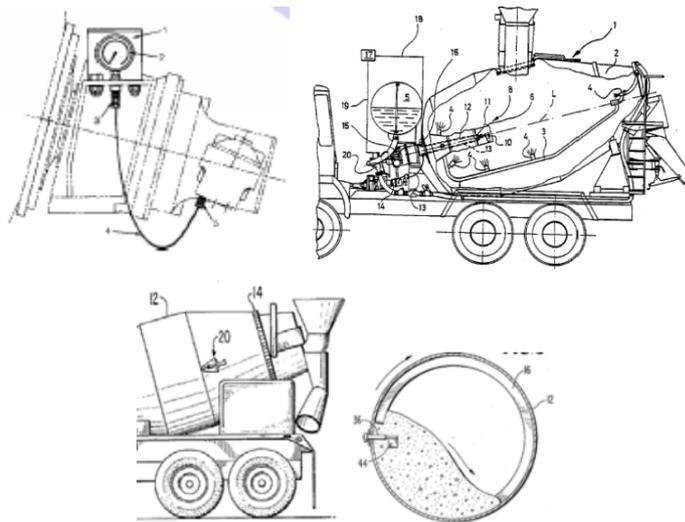
Todos los equipos de medida de parámetros reológicos del hormigón similares intentan adquirir los valores de corte relacionados con valores del gradiente de velocidad de giro. Este equipo presenta como diferencia la geometría del recipiente contenedor del hormigón fresco sometido a ensayo y la geometría de las palas de mezclado, especialmente diseñadas para unos hormigones de tamaño máximo 22 mm. El dispositivo está registrado en el BOPI con el n° ES 1075008 U/U 201130692.

### 2.5.6 Medición de la trabajabilidad del hormigón en los camiones hormigonera

Es conocido en el sector del hormigón preparado que se puede utilizar el camión hormigonera para conocer la docilidad y consistencia del hormigón que transporta, mediante la lectura de los valores del manómetro de presión a una determinada velocidad de rotación de la cuba. Una masa de hormigón, a medida que su asentamiento en cono de Abrams aumenta, provoca el descenso de la presión del aceite hidráulico del reductor, al tener que realizar menor fuerza la bomba que lo mueve.

Desde 1929 (Lichtenberg 1929), diversos procedimientos relativos a la medida de la trabajabilidad del hormigón directamente tomadas del camión hormigonera han si-

do patentados. Un resumen de los mismos es realizado por Amziane *y col.* (2006b). Entre los mismos podemos señalar la patente de *Construction Equipment Parts Inc.* de 2002, la patente n° 4900154 del 13 de febrero de 1990 de Waitzinger *y col.* (1990) o la patente n° 3924447 del 9 de diciembre de 1975 de Garison (1975).



**Figura 2.28:** Algunas patentes de dispositivos de medida en la cuba de la trabajabilidad del hormigón (Amziane *y col.* 2006b).

Ninguno de estos métodos propuestos relacionan las propiedades reológicas del modelo de Bingham o cualquier otro modelo reológico con las medidas de los dispositivos patentados. Todos ellos intentan relacionar la trabajabilidad con el asentamiento en cono de Abrams.

Daczko (2000) fue uno de los primeros en investigar la medida de las propiedades reológicas directamente en el camión hormigonera. La característica principal de su investigación fue la aparente buena correlación entre la curva de flujo obtenida por el reómetro IBB (Beaupré 1994) y el camión hormigonera equipado con un medidor de asiento que no es más que un equipo que mide la presión al girar la cuba del camión hormigonera.

Para utilizar un camión hormigonera como reómetro se deben medir dos parámetros: la velocidad de rotación del tambor de mezclado (que está relacionada con el grado de cizallamiento del hormigón) y el consumo de energía o el momento torsor de la mezcladora durante la rotación. Daczko (2000) describe el método de medición del grado de cizallamiento del hormigón detalladamente.

Para girar la cuba en el camión hormigonera vacío se necesita energía, que puede ser medida en función de la presión ejercida en el sistema hidráulico encargado de la rotación de la cuba. Pero la presión que nos interesa conocer, es la ejercida

sobre el hormigón, no la necesaria para girar la cuba cuando el camión hormigonera está vacío. Por tanto, al valor de presión obtenido cuando la cuba está llena de hormigón, se le debe restar la presión necesaria para rotar la cuba del camión hormigonera cuando este está vacío.

La anterior relación puede cuantificarse de acuerdo con la fórmula propuesta por Ferraris *y col.* (2007):

$$P_T = P_e + P_c = (a + b \cdot v) + (G_t + H_t \cdot v) = (a + G_t) + (b + H_t) \cdot v \quad (2.46)$$

donde:

- $P_T$  es la presión total necesaria para girar la cuba cuando el camión hormigonera está lleno en  $kPa$ .
- $P_e$  es la presión necesaria para girar la cuba cuando el camión hormigonera está vacío en  $kPa$ .
- $P_c$  es la presión ejercida sobre el hormigón cuando el camión hormigonera está lleno en  $kPa$ .
- $a$  y  $b$  son dos constantes que relacionan la presión y la velocidad de rotación de la cuba en  $kPa$  y  $kPa \cdot s/rad$ .
- $v$  es la velocidad de rotación de la cuba en  $rad/s$ .
- $H_t$  es la viscosidad plástica de Bingham en  $kPa \cdot s/rad$ .
- $G_t$  es la tensión umbral de cizallamiento en  $kPa$ .

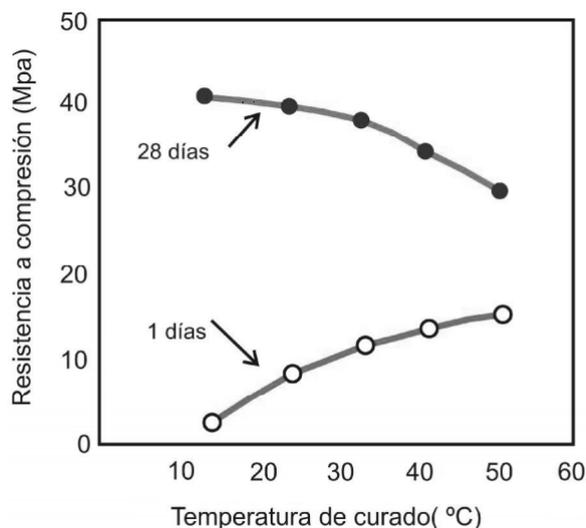
Las constantes  $a$  y  $b$  pueden ser obtenidas correlacionando los datos de velocidad de rotación de la cuba y la presión obtenida para el caso del camión hormigonera vacío, y así, de esta forma calcular los valores de  $G_t$  y  $H_t$  con la fórmula anterior y compararlos con los valores obtenidos en el reómetro, según el modelo de Bingham. En esta comparativa, Ferraris *y col.* (2007) obtuvieron unos coeficientes de correlación de 0,85 y 0,09 para los valores de la tensión umbral y la viscosidad plástica respectivamente, llegando a la conclusión de que no se podía establecer una relación aceptable para los valores de la viscosidad plástica si estos eran medidos directamente en el camión hormigonera. Para el caso de la tensión umbral del modelo de Bingham, la utilización de los valores de presión sobre el hormigón medidos en el camión hormigonera según la ecuación anterior sí que resultan una buena aproximación en la mayoría de mezclas de hormigón ensayadas.

Aún así, finalmente determinan que los resultados de su estudio no son concluyentes, dado que el uso del camión hormigonera como reómetro es una idea difícil de implementar actualmente. En este mismo trabajo también se indica que la presión

hidráulica en el reductor de la cuba hace años que se viene utilizando como indicador aproximado del asiento en cono de Abrams ya que existe una correlación entre el cono de Abrams y la presión medida a una determinada velocidad de rotación de la cuba.

## 2.6 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

La temperatura puede influir de modo importante en la resistencia del hormigón, sobre todo a edades tempranas, y es una de las variables que más afectan a la evolución resistente a lo largo del tiempo (Commission42-CEA 1981). Los hormigones fabricados, puestos en obra o curados a temperaturas elevadas alcanzan normalmente menor resistencia a edades avanzadas, aunque mayor a edades tempranas (*ACI Recommended Practice for Hot Weather Concreting (ACI 305-72)*, 1971).

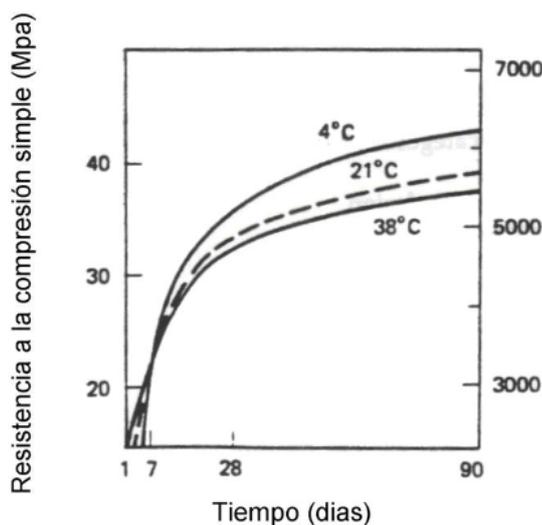


**Figura 2.29:** Influencia de la temperatura en la resistencia del hormigón a compresión (Verbeck y Helmuth 1968) (Neville 1995).

La fabricación de hormigones en condiciones climáticas extremas, tanto de altas como de bajas temperaturas, influye de manera directa en las características del hormigón y ello constituye una preocupación tanto para los fabricantes como para los usuarios dadas las consecuencias negativas que conlleva sobre los aspectos técnicos y económicos.

Dentro del sector de la construcción son conocidas las pérdidas de resistencia que se dan en climas cálidos a altas temperaturas. Una alta temperatura ambiental

provoca una mayor demanda de agua del hormigón y un incremento de la temperatura de dicho hormigón en estado fresco. Esto tiene como consecuencia un incremento en la velocidad de pérdida de fluidez y una hidratación más rápida del cemento, lo que conduce a un aceleramiento en el fraguado y a una menor resistencia del hormigón (Neville 1995).



**Figura 2.30:** Influencia de la temperatura inicial de curado en la resistencia final del hormigón (Jalali y Abyaneh 1995).

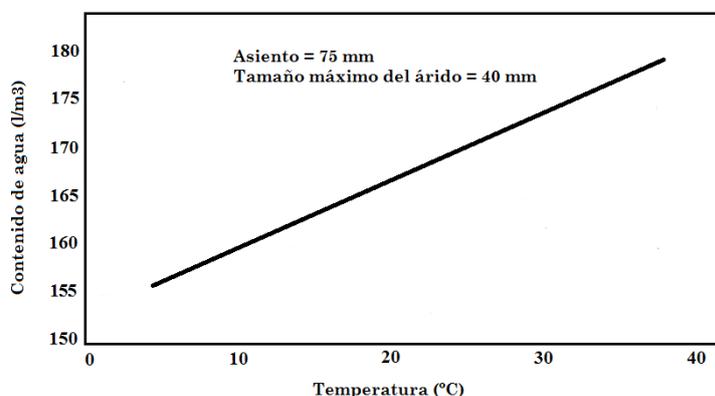
Además de lo anterior, el calor generado por la hidratación del cemento incrementa la temperatura del hormigón. El efecto conjunto de las condiciones térmicas ambientales y el calor de hidratación del cemento en climas cálidos agrava las consecuencias perjudiciales sobre la resistencia a compresión final del hormigón.

La consistencia del hormigón fresco está controlada por la cantidad de agua adicionada a la mezcla, que a su vez depende de factores tales como las propiedades de los áridos (forma de partículas y distribución de tamaños, textura superficial y angularidad), la cantidad y finura del cemento utilizado y la presencia o no de aditivos. Es bien sabido que bajo condiciones de clima cálido, se requiere mayor cantidad de agua, a igualdad de otros factores, para una determinada consistencia o asentamiento, y la resistencia decrece con el aumento de la relación agua/cemento. Para medir la consistencia existen varios procedimientos como el cono de Abrams, la mesa de sacudidas y el consistómetro Vebe. El procedimiento más universal en obra es el cono de Abrams, debido a su sencillez y rapidez.

Zivkovic (1992) mostró que al aumentar la temperatura del hormigón aumentaba la demanda de agua, o bien disminuía el asiento en cono de Abrams. Soroka (1993), basado en datos experimentales indica que un aumento de 10 °C en la temperatura del hormigón tiene como consecuencia una disminución en el asentamiento de

25mm aproximadamente, o lo que es lo mismo, de 4 a 6  $kg/m^3$  de agua adicional para mantener un mismo asentamiento. El efecto de la temperatura en la demanda de agua es consecuencia de su efecto en la velocidad de hidratación del cemento y también en la tasa de evaporación del agua. Además, el hormigón en estado fresco se va rigidizando con el tiempo y perdiendo trabajabilidad como consecuencia del consumo de agua de la mezcla por la hidratación del cemento, la evaporación del agua de amasado y la absorción de agua por los áridos.

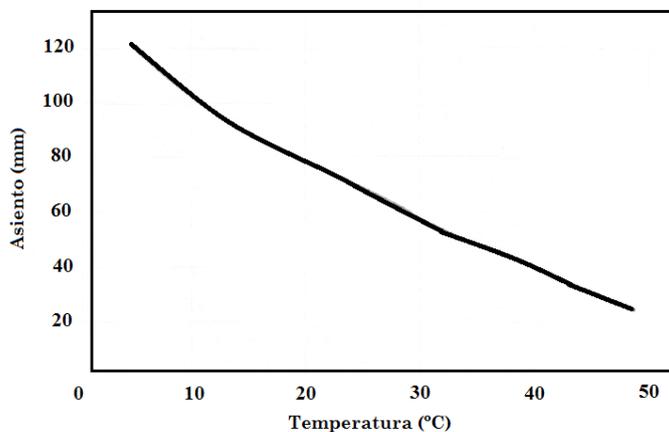
La temperatura juega un papel muy importante en la trabajabilidad del hormigón, es bien sabido que bajo condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada consistencia o asentamiento, como podemos observar en la figura 2.31, o bien a cantidad de agua constante, decrece el asiento al aumentar la temperatura como se observa en la figura 2.32 (Vaquero 2003).



**Figura 2.31:** Efecto de la temperatura en la demanda de agua del hormigón. Adaptado de Vaquero (2003).

La temperatura tiene efectos sobre la resistencia del hormigón debido a efectos sobre la velocidad de hidratación, la naturaleza de la estructura del hormigón, la velocidad de evaporación y el resultante secado del hormigón. Bajo temperaturas elevadas, la resistencia a edades tempranas mejora, pero a edades posteriores empeora como consecuencia de que la porosidad de la pasta de cemento es mayor y menos uniforme (Soroka 1993).

Según Commission42-CEA (1981), Detwiler *y col.* (1991), Kjellsen y Detwiler (1992), Jalali y Abyaneh (1995), etc. si se eleva la temperatura del hormigón, se acelera el fraguado y la hidratación y, así, aumenta la resistencia inicial; pero se forman densas membranas de hidratos en torno a las fases anhidras del cemento, que pueden reducir la movilidad iónica y el grado final de hidratación alcanzado. Además, y este parece ser el motivo más importante de los efectos negativos de las temperaturas elevadas (Commission42-CEA 1981), aumentan la porosidad, el volumen de poros de mayor tamaño y la continuidad del sistema poroso en los



**Figura 2.32:** Efecto de la temperatura en la consistencia del hormigón. Adaptado de Vaquero (2003).

espacios intersticiales, pues los productos hidratados carecen del tiempo necesario para difundirse de modo más o menos uniforme en tales espacios.

Algunos estudios experimentales han tratado de determinar los efectos de la temperatura en la resistencia del hormigón buscando evidencias de si es la adición de agua la responsable de la pérdida de resistencia, o bien son las variaciones en las cinéticas de hidratación. Mouret *y col.* (2003) por ejemplo, realizaron un estudio de resistencia en el hormigón, medida en probetas de control con las siguientes conclusiones:

- No existe efecto de la temperatura del cemento en la resistencia del hormigón y esta resistencia es independiente de como el incremento de la temperatura del hormigón es alcanzado.
- Un incremento en la temperatura inicial de la mezcla provoca una pérdida de trabajabilidad, y si la consistencia de la mezcla es mantenida por medio de adición de agua se observa una reducción en la resistencia. Además, se encontró que aumentar la dosificación de aditivo reductor de agua en verano era una buena solución.

En la bibliografía (Comella *y col.* 2002) (Ortiz 2005) (Cánoves 2012) se observa que los resultados estadísticos de ensayos realizados en hormigones de resistencia característica 25 y 30  $N/mm^2$  durante el periodo de tiempo del año 2000 al 2011 nos dan resistencias características a 28 días menores en los meses de junio, julio y agosto, pudiendo no llegar a alcanzar la resistencia mínima característica. Estos meses se corresponden con los meses en los que la temperatura ambiente es mayor. En cuanto a resistencias a edades tempranas (3 días), en los meses de mayor

temperatura se desarrolla una mayor resistencia y en lo que se refiere a resistencias a edades intermedias (7 días), la resistencia es similar en todo el año. Este efecto, es denominado efecto cruzado (*crossover effect*) por Alexander y Taplín (1962) y se observa en numerosas investigaciones (Ortiz 2005) (Cánoves 2012).

Mouret *y col.* (1999) obtuvieron como resultado de su investigación que la resistencia a compresión del hormigón se reducía alrededor del 16% al incrementar la temperatura de curado de 20 a 35 °C.

Gómez y Vidal (2006) realizaron una investigación en hormigones de resistencias 20, 25 y 30 MPa sometidos a temperaturas de curado entre 5 y 35 °C, obteniendo la conclusión de que para hormigones de resistencias características de 20, 25 y 30 MPa se obtienen menores resistencias a 28 días con respecto a 7 días tal y como aumenta la resistencia con respecto al patrón a 20 °C, y sin embargo se obtienen mayores resistencias a 7 días con respecto a 28 días si disminuye la temperatura con respecto al patrón a 20 °C. Un resumen de los resultados obtenidos se muestra en la tabla siguiente:

Resistencia Hormigón (MPa)	$f_{c7}/f_{c28}(10\text{ °C})$	$f_{c7}/f_{c28}(20\text{ °C})$	$f_{c7}/f_{c28}(35\text{ °C})$
20	0,97	1	1,04
25	0,993	1	1,007
30	0,98	1	1,02

**Tabla 2.17:** Relación de resistencias en función de la temperatura y la resistencia característica del hormigón en el estudio de Gómez y Vidal (2006).

Estos mismos autores (Gómez y Vidal 2006) analizaron la resistencia a compresión de probetas cúbicas de hormigón confeccionadas a diferente hora del día y para un intervalo de temperaturas de entre 15 y 20 °C. Los resultados obtenidos indican que las probetas confeccionadas a la tarde entre las 16:30 y las 19:30 tienen incrementos de resistencia con respecto a las probetas confeccionadas a la mañana entre las 7:30 y las 10:30 horas y esto para hormigones de idéntica resistencia característica, de 20 y 30 MPa. Sin embargo, para los de 25 MPa la menor resistencia se produce en el intervalo de 13:30 a 16:30 horas.

Otros autores también han documentado la disminución de la resistencia a compresión del hormigón a edades no tempranas al aumentar la temperatura de curado. García Toledano (2011), por ejemplo, realizó un estudio experimental en el que la conclusión resultante fue que una temperatura de 36 °C durante las primeras 36 horas de curado provocaba una disminución en la resistencia a compresión a largo plazo de un 6% aproximadamente respecto a 20 °C.

Cánoves (2012) en su tesis doctoral obtuvo resultados de la resistencia a compresión a 28 días en función de la hora de hormigonado, obteniendo valores superiores a última hora de la jornada laboral, entre las 16:00 y las 17:00 horas, para invierno.

En verano, sin embargo, los resultados difieren de un hormigón HA-25 a un HA-30 como se puede observar en la figura 5.79. Estos resultados están en parte en sintonía con los observados por Gómez y Vidal (2006) para hormigones de 20 y 30 MPa, no así para los de 25 MPa, pero sin embargo, contradicen los valores obtenidos en la tesis doctoral desarrollada por Ortiz (2005) para la estación invernal, que presenta valores decrecientes de resistencia en invierno y crecientes en verano, tal y como transcurre la jornada laboral diurna y se puede observar en la figura 5.80.

Como conclusión, podemos afirmar que los resultados de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días son superiores en la estación, mes y hora de hormigonado que nos ocasione menor temperatura. Esta conclusión está de acuerdo con los resultados de las respectivas investigaciones llevadas a cabo por Soroka (1993), Mouret *y col.* (1999), Gómez y Vidal (2006) y Cánoves (2012).

Soroka y Ravina (1998) y De la Fuente y Palomo (2004), en base a un estudio sobre el comportamiento de hormigones con diferentes tipos de aditivos (lignosulfonatos, melaninas, naftalenos o policarboxilatos), conservados a 40 °C durante 72 horas y comparados con el de referencia a 20 °C, y datos recogidos en la bibliografía (Soroka y Ravina 1998), observan que ninguno de los aditivos comerciales habituales resuelven el problema del descenso en las resistencias a compresión que se producen en periodos estivales. Aún así, es evidente que con la utilización de aditivos se reduce la relación agua/cemento considerablemente y la resistencia final se ve afectada positivamente tanto a 20 °C como a 40 °C. La conclusión final que De la Fuente y Palomo (2004) extrajeron de su estudio fue que la utilización de la mayoría de aditivos comerciales no corregía las alteraciones mecánico-resistentes que se producen en los hormigones por efecto del curado a temperaturas superiores a las estándar.

Debido a las pérdidas de resistencia existentes en condiciones climáticas de altas temperaturas, las soluciones habituales que se toman en las plantas de hormigón consisten en dosificar mayor cantidad de cemento que la habitual, la cual puede venir apoyada por una mayor dosificación de aditivo reductor de agua.

Otro factor que incide directamente sobre los resultados estadísticos de resistencia a compresión de manera importante, es el debido a los ensayos de control utilizados tradicionalmente; las condiciones atmosféricas de elevadas temperaturas, bajas humedades relativas y vientos secos, son mucho más perjudiciales para las probetas por su pequeño tamaño. Los resultados obtenidos de probetas directamente expuestas a la acción del viento o del sol, presentan resultados que pueden dejar de ser representativos, con lo que en tiempo caluroso habrá que aumentar la frecuencia de ensayo de propiedades tales como la consistencia (Vaquero 2003). En el caso de las probetas fabricadas para controlar la resistencia del hormigón, deben extremarse las precauciones, ya que pueden resultar seriamente afectadas por el tiempo caluroso. La norma UNE 83301:1991 vigente al inicio de los ensayos utilizados en esta tesis que en la actualidad ha sido sustituida por la UNE-EN12390-2: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*", determina que: *con el fin de evitar la desecación de la*

masa de hormigón, las probetas recién fabricadas se mantengan en sus moldes con la superficie cubierta de arpillera húmeda o similar, protegidas de la intemperie de tal forma que la temperatura alrededor de las mismas esté comprendida entre 16 y 27° C. La EHE-08 en su artículo 86.3.2 propone que cuando la temperatura del aire alrededor de las probetas no esté comprendida entre 15 °C y 35 °C, se debe de habilitar un recinto en el que las temperaturas se mantengan dentro de dicho margen.

En las condiciones medioambientales que en España se suelen dar, suele ser suficiente cubrir las probetas recién fabricadas, aún en sus moldes, con arpillera húmeda e introducirlas en bolsas de plástico que se deben cerrar herméticamente para que constituyan un recinto estanco y conservar dichas bolsas con las probetas en ellas contenidas a la sombra y en un ambiente lo menos caluroso posible. También se debe cubrir la probeta con arpilleras húmedas para su traslado, después de extraerla del molde, hasta la cámara de curado normalizada.

## 2.7 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

Las propiedades mecánicas del hormigón dependen de varios parámetros ligados tanto a la repartición del sistema granular como a las propiedades físico-químicas de la matriz cementicia.

La resistencia mecánica está ligada a la relación  $x$  entre el volumen de los hidratos con respecto a la suma del volumen de hidratos más la porosidad capilar, tal y como define el modelo empírico de Powers - Bronwnyard (Powers 1962):

$$x = \frac{V_{gel}}{V_{gel} + V_{pc}} = \frac{0,66\alpha}{0,32\alpha + (a/c)} \quad (2.47)$$

Y la resistencia a compresión del hormigón  $f_c$  está ligada a la relación gel/espacio ( $x$ ) mediante la ecuación siguiente:

$$f_c = A \cdot x^n \quad (2.48)$$

siendo  $n$  un parámetro que toma valores entre 2,6 y 3.

Powers (1962) llegó a la siguiente expresión para la resistencia a compresión:

$$f_c = 234 \cdot x^3 \quad (2.49)$$

independientemente de la edad de hormigón o de la dosificación del mismo. El valor 234 de la fórmula anterior representa la resistencia intrínseca del gel para el tipo de cemento y de espécimen utilizado.

La anterior relación empírica muestra la importancia del grado de hidratación  $\alpha$  y de la relación agua/cemento ( $a/c$ ) en la resistencia mecánica del hormigón. Diversos modelos han venido siendo utilizados para relacionar la resistencia mecánica del hormigón con la cantidad de cemento y la porosidad capilar que proviene esencialmente de la adición de agua. Los modelos más utilizados que relacionan la resistencia a compresión de un hormigón  $f_c$  con los volúmenes de cemento  $V_c$ , de agua  $V_a$  y de vacíos  $V_h$  contenidos en un metro cúbico de hormigón endurecido, son los de Féret (1892), Bolomey (1935) y Abrams (1919).

Féret inicialmente había dado la fórmula:

$$f_c = K \cdot \left( \frac{c}{a + V_h} - 0,3 \right) \quad (2.50)$$

donde  $c$  y  $a$  son las cantidades de cemento y agua en peso, y  $V_h$  el volumen de huecos.

Más tarde la modificó por:

$$f_c = K \cdot \left( \frac{V_c}{V_c + V_a + V_h} \right)^2 \quad (2.51)$$

donde  $V_c$ ,  $V_a$  y  $V_h$  vienen en volúmenes reales.

Para un hormigón de consistencia plástica con un contenido en aire menor del 3%, la anterior ecuación 2.51 puede escribirse como (Cazacliu y Ventura 2010):

$$f_c = K \cdot \frac{1}{(1,25 + \rho \cdot (a/c))^2} \quad (2.52)$$

donde  $\rho$  es la densidad del cemento, generalmente  $3,15 \text{ t/m}^3$ .

Bolomey recogió la misma fórmula primitiva de Féret, elevando el sustraendo a 0,5 y eliminando el volumen de huecos  $V_h$  para hormigones con volúmenes de aire del 2%.

$$f_c = K \cdot \left( \frac{c}{a} - 0,5 \right) \quad (2.53)$$

Independientemente de la “escuela europea”, Abrams fue de los primeros autores en describir en 1919 la dependencia de la resistencia del hormigón con la relación agua/cemento, proponiendo la ecuación exponencial siguiente que en la actualidad

se suele presentar de la siguiente manera con dos parámetros ajustables (del Campo 1963) (Harrison 2003) (Jancovic *y col.* 2011):

$$f_c = \frac{A}{B^{a/c}} \quad (2.54)$$

siendo  $f_c$  la resistencia a compresión del hormigón,  $A$  y  $B$  dos parámetros experimentales dependientes de las características de los materiales, la edad del hormigón y las condiciones de curado, y  $a/c$  es la relación agua/cemento en peso.

La anterior ecuación de Abrams también se suele presentar como:

$$f_c = A \cdot B^{a/c} \quad (2.55)$$

Popovics y Popovics (1995) proponen  $A \simeq 147$  y  $B \simeq 0,0779 MPa$ .

Popovics (1990) propone una modificación de la fórmula de Abrams (ecuación 2.54) donde incluye la cantidad de cemento:

$$\log f_c = A + B \cdot (a/c) + C \cdot c \quad (2.56)$$

con  $A$ ,  $B$  y  $C$  tres parámetros experimentales.

Schiller (1958) propuso la siguiente función logarítmica para relacionar la resistencia a compresión del hormigón con la relación agua/cemento:

$$f_c = A - \log[(a/c)^B] \quad (2.57)$$

Otros autores que han propuesto fórmulas en función de la relación  $a/c$  o su inversa ( $c/a$ ) son:

- Dutron: 
$$f_c = K \cdot \left(\frac{c}{a}\right)^{1,5} \quad (2.58)$$

- Graf: 
$$f_c = \frac{K}{(a/c)^2} \quad (2.59)$$

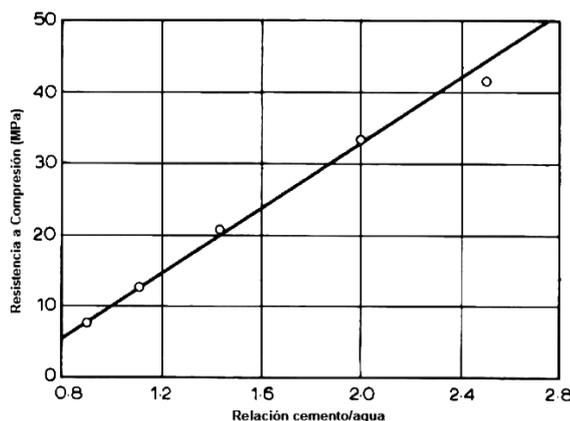
- De la Peña 
$$f_c = \frac{((c/a) - 0,5)}{K} \quad (2.60)$$

Neville (1995), afirma que la ecuación que relaciona la resistencia a la compresión del hormigón y la relación agua/cemento es la siguiente:

$$f_c = \frac{K}{a/c} = K \cdot \left(\frac{c}{a}\right) \quad (2.61)$$

siendo la ecuación anterior aplicable a hormigones convencionales de distintas edades y elaborados con cualquier tipo de áridos.

La linealidad de la relación entre la resistencia a compresión del hormigón y la relación cemento/agua deja de producirse a partir del valor 2,56 (tal y como se aprecia en la figura 2.33), correspondiente a una relación agua/cemento de 0,39, ya que para relaciones agua/cemento menores se dan hidrataciones del cemento inferiores a la máxima posible. Este valor de 0,39 es la relación  $a/c$  crítica propuesta por Brouwers (2004) para cementos tipo I (CEM I) y se refiere a aquella que limita que el cemento sea hidratado completamente.



**Figura 2.33:** Resistencia a 7 días en función de la relación  $c/a$  para hormigones elaborados con cemento Portland de altas resistencias iniciales (Neville 1995).

Posteriormente a Fétet, se ha encontrado que la influencia de los huecos es menor que la del agua. En 1934, Becerril propuso una fórmula análoga a la de Fétet donde el volumen de huecos venía afectado por un valor  $\alpha$  que tenía que ser del orden de 0,5 a 0,66 (Mallol 1946).

Más tarde, ensayos sistemáticos facilitados por Mathias (2005) muestran que una división por 2 del término aire mejora la precisión de la fórmula de Fétet, con lo que el término  $V_h$  se reemplaza por  $0,5 V_h$ , quedando la fórmula, tal y como se indica en 2.62.

$$f_c = K \cdot \left(\frac{V_c}{V_c + V_a + 0,5 V_h}\right)^2 \quad (2.62)$$

El valor de  $K$  difiere en las anteriores fórmulas, aunque depende principalmente de la resistencia del conglomerante hidráulico a una edad determinada. Las expresiones anteriores presentan una forma diversa que sorprende a primera vista. Sin embargo, para valores de relaciones  $a/c$  entre 0,5 y 1, la diferencia entre las mismas es inferior al 15 % (Faury 1958). Trabajos recientes como los de Nagaraj y Shashiprakash (1990) confirman que la resistencia del hormigón depende de la relación  $a/c$  independientemente del tipo de cemento con el que esté fabricado.

Lyse (Jee *y col.* 2004) establece la siguiente fórmula:

$$f_c = A + B \cdot (c/a) \quad (2.63)$$

donde  $c/a$  es la relación cemento/agua y  $A$  y  $B$  son dos constantes empíricas.

El modelo desarrollado en el LCPC propone una versión simplificada que es una ecuación de Feret generalizada y que puede ser utilizada cuando las propiedades de los áridos son desconocidas:

$$f_c = K_g \cdot R_{c28} \cdot \left( \frac{V_c}{V_c + V_a + V_h} \right)^2 \cdot EMP^{-0,13} \quad (2.64)$$

donde  $R_{c28}$  es la resistencia verdadera del cemento a 28 días;  $V_c$ ,  $V_a$  y  $V_h$  los volúmenes del cemento, agua y aire respectivamente;  $EMP$  es el espesor máximo de pasta, introducido por de Larrard y Tondat (1993); y  $K_g$  es una constante función de los áridos utilizados que debe ser calibrada mediante los resultados de ensayos.

El  $EMP$  representa la distancia máxima entre dos granos grandes cuando se somete el hormigón a una dilatación constante y se obtiene de la ecuación siguiente:

$$EMP = D_{max} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad (2.65)$$

siendo  $D_{max}$  el diámetro máximo del árido,  $g$  el volumen de árido en una unidad de volumen de hormigón y  $g^*$  la compacidad del hormigón.

$D_{max}$  y  $g$  son fácilmente deducibles de la composición de la mezcla y  $g^*$  puede medirse o calcularse con el Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC) (de Larrard 2000).

La precisión de esta ecuación es menos buena que si se calcula la resistencia siguiendo el modelo completo, aunque es mucho más fácilmente utilizable.

Teniendo en cuenta en la anterior fórmula 2.64 los ensayos facilitados por Mathias (2005), si el término  $V_h$  se sustituye por  $0,5 V_h$ , se mejora la precisión de la misma.

## 2.8 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON EL TIEMPO

Una gran cantidad de factores intervienen en el proceso de endurecimiento del hormigón, con lo que es difícil predecir la resistencia a una edad a partir de los resultados obtenidos a edades más tempranas, o viceversa.

La instrucción española EHE (1999) en su tabla 30.4.b, reproducida en la tabla 2.18, proporciona unos valores estimativos de la resistencia a compresión a la edad de "j" días en relación con la resistencia a 28 días.

Edad del hormigón (días)	3	7	28	90	360
<b>Hormigones de endurecimiento normal</b>	0,40	0,65	1	1,20	1,35
<b>Hormigones de endurecimiento rápido</b>	0,55	0,75	1	1,15	1,20

**Tabla 2.18:** Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con la edad (EHE-99).

Tomando la expresión facilitada por el Código Modelo DEB-FIP (1990) y la EHE (2008) se tiene:

$$f_c(j) = \beta_{cc}(j) \cdot f_{c28} \quad (2.66)$$

donde  $\beta_{cc}(j)$  es un coeficiente de valor:

$$\beta_{cc}(j) = e^{[s(1-\sqrt{\frac{28}{j}})]} \quad (2.67)$$

siendo:

$f_c(j)$  la resistencia a compresión a la edad  $j$ .

$f_{c28}$  la resistencia a compresión a la edad de 28 días.

$s$  un coeficiente que depende del tipo de cemento y que adopta los valores:

- 0,20 para cementos de endurecimiento rápido y de alta resistencia (CEM 42,5R y CEM 52,5).
- 0,25 para cementos de endurecimiento normal o rápido (CEM 32,5R y CEM 42,5N).

- 0,38 para cementos de endurecimiento lento (CEM 32,5).

La evolución de la resistencia del hormigón depende también de la temperatura de conservación, evolucionando más rápidamente cuanto mayor es la temperatura, dado que la temperatura actúa como catalizador de las reacciones de hidratación del cemento. Para relacionar la evolución de la resistencia con la temperatura se suele utilizar el concepto de madurez, producto de la temperatura por el tiempo de actuación de la misma (Perepérez y Barberá 2004) (Vázquez-Herrero *y col.* 2012) (Mendoza *y col.* 2014).

Otras normas, como la ECP (2009) proporcionan otros diferentes valores estimativos de la resistencia a compresión a la edad de "j" días en relación a la de 28 días.

Edad del hormigón (días)	3	7	28	90	360
<b>Hormigones de endurecimiento normal</b>	0,40	0,75	1	1,176	1,33
<b>Hormigones de endurecimiento rápido</b>	0,556	0,8363	1	1,111	1,176

**Tabla 2.19:** Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con la edad. Adaptada de ECP (2009).

En la última versión de esta norma los coeficientes que consideran la resistencia con la edad han sido omitidos.

Delibes (1993) obtuvo la siguiente expresión analítica de correlación estadística entre las resistencias a 7 y a 28 días de probetas de hormigones fabricados con cemento Portland con adiciones, tomadas en obra y curadas en condiciones normalizadas:

$$f_{c28} = 1,10 \cdot f_{c7} + 5,4 \quad (2.68)$$

A igualdad de condiciones y componentes del hormigón, se detecta una apreciable aceleración del endurecimiento con las mezclas más ricas en cemento. Esta diferencia es análoga a la observada al modificar la categoría del cemento.

W.A. Slater en 1925, después de un estudio realizado con gran cantidad de muestras de hormigón, propuso la siguiente ecuación que proporciona predicciones satisfactorias de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ , en base a la resistencia a 7 días  $f_{c7}$  (Davis *y col.* 1964) (Waddell y Dobrowolsky 1997):

$$f_{c28} = f_{c7} + 30 \cdot \sqrt{f_{c7}} \quad (2.69)$$

En Alemania, la relación entre la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  y a 7 días  $f_{c7}$  viene representada por la siguiente ecuación (Shetty 2006):

$$f_{c28} = 1,7 \cdot f_{c7} + 5,86 \quad (2.70)$$

Otra fórmula propuesta en la bibliografía, en este caso por Neville en 1982 (Pacheco y col. 2007), es la siguiente:

$$f_{c28} = K_2 \cdot (f_{c7})^{K_1} \quad (2.71)$$

donde  $f_{c7}$  y  $f_{c28}$  son las resistencias a 7 y 28 días respectivamente, y  $K_1$  y  $K_2$  son dos coeficientes que varían para diferentes cementos y condiciones de curado. El rango de valores que toma  $K_1$  es de 0,3 a 0,8 y  $K_2$  de 3 a 6.

En la bibliografía (Popovics 1998) así como en las normas francesas de hormigón armado y pretensado, BAEL (1999) y BPEL (1999) respectivamente, se propone un método empírico, de tipo hiperbólico, que la experiencia corrobora que es apto para describir el endurecimiento de hormigones en condiciones de curado normalizadas, entre 1 y 28 días, independientemente del tipo de dosificación. En BétonlabPro 3 (2007) se adopta un modelo como el siguiente:

$$f_{c(t)} = \frac{A \cdot (t - t_0)}{1 + B \cdot (t - t_0)} \quad \text{para } t \geq (t_0, 1) \quad (2.72)$$

donde  $f_{c(t)}$  es la resistencia a compresión a la edad  $t$ , siendo  $t_0$ ,  $A$  y  $B$  tres constantes ajustables. La constante  $t_0$ , supuestamente universal, ha sido calculada sobre los datos de la bibliografía tomando un valor igual a  $t_0 = -0,92$  (de Larrard 2000).  $A$  y  $B$  se determinan a partir de las resistencias a 7 y 28 días.

Aïtcin y col. (1994) en un estudio realizado sobre probetas cilíndricas de hormigones de resistencias 35, 90 y 120 MPa llegan a una ecuación similar a la anterior:

$$f_{c(t)} = A \cdot \frac{t}{t + B} \quad (2.73)$$

donde  $A$  y  $B$  son parámetros ajustables función de la resistencia a 28 días y del tipo de curado, siendo  $A$  un parámetro asociado a la resistencia a edad infinita (MPa) y  $B$  un parámetro asociado a la forma de la curva de ganancia de resistencia (días).

Metwally (2013) proponen el siguiente modelo presentado en 2.74 para predecir la resistencia a compresión del hormigón basándose en datos experimentales existentes de los valores de resistencia a distintas edades de diferentes hormigones.

$$f_{c(t)} = A \cdot \ln t + B \quad (2.74)$$

donde  $f_{c(t)}$  es la resistencia a compresión a la edad de  $t$  días y  $A$  y  $B$  son dos constantes que dependen de las propiedades características de cada hormigón.  $A$  introduce un ratio de aumento de resistencia, y  $B$  introduce una corrección. Los valores de las anteriores constantes se pueden determinar por diversos métodos para cada hormigón.

Otra ecuación utilizada (Cánoves *y col.* 2012) para el cálculo de la evolución de la resistencia a compresión del hormigón con el tiempo es:

$$\frac{f_{c(t)}}{f_{c28}} = A \cdot \ln t + B \quad (2.75)$$

siendo  $f_{c(t)}$  y  $f_{c28}$  las resistencias a compresión a la edad de  $t$  y 28 días respectivamente, y  $A$  y  $B$  dos constantes que dependen de las propiedades características de cada hormigón. Cánoves *y col.* (2012) obtienen en su artículo diferentes valores de  $A$  y  $B$  en función de la resistencia característica del hormigón y de la temperatura ambiente  $T_{amb}$  ( $^{\circ}C$ ) a la que se realiza la probeta. A esta temperatura se le suele denominar, también, temperatura inicial de curado.

Datos a regresar	Ecuación de cálculo: $f_{c(t)}/f_{c28} = A \ln t + B$					
	HA-25			HA30		
	A	B	R <sup>2</sup>	A	B	R <sup>2</sup>
Toda la muestra	0,156187	0,481345	99,94	0,114894	0,622245	98,23
5 °C < T <sub>amb</sub> ≤ 10 °C	0,173653	0,420555	96,81	0,180419	0,479839	96,92
10 °C < T <sub>amb</sub> ≤ 15 °C	0,157298	0,475318	99,99	0,141952	0,571603	99,12
15 °C < T <sub>amb</sub> ≤ 20 °C	0,16699	0,476716	99,70	0,137207	0,588356	98,63
20 °C < T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C	0,153865	0,490947	99,52	0,08925	0,673626	99,89
25 °C < T <sub>amb</sub> ≤ 30 °C	0,147706	0,496372	99,92	0,0707754	0,722895	54,70
30 °C < T <sub>amb</sub> ≤ 35 °C	0,102778	0,567204	91,91	0,0263511	0,863989	96,19

**Tabla 2.20:** Valores de las constantes  $A$  y  $B$  para el cálculo de la resistencia a compresión del hormigón según la temperatura inicial de curado (Cánoves *y col.* 2012).

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

$$f_{c(t)} = \frac{t}{a + b \cdot t} \cdot f_{c28} \quad (2.76)$$

siendo  $f_{c28}$  la resistencia a 28 días y  $a$  y  $b$  dos constantes.

Las normas francesas de hormigón armado BAEL (1999) y de hormigón pretensado BPEL (1999) proponen para los hormigones no tratados térmicamente una fórmula

	$a$	$b$
CEM I	4	0,85
CEM III	2,3	0,92

**Tabla 2.21:** Valores de las constantes  $a$  y  $b$  según el modelo ACI 209R-92 para condiciones medias de curado.

como la anterior 2.76, donde las constantes  $a$  y  $b$  toman los valores de la tabla siguiente:

	$a$	$b$
$f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$	4,76	0,83
$f_{c28} > 40 \text{ MPa}$	1,40	0,95

**Tabla 2.22:** Valores de las constantes  $a$  y  $b$  según las normas francesas de hormigón (BAEL y BPEL).

## 2.9 MODELOS PREDICTIVOS: APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

El problema de la dosificación de las mezclas de hormigón es un problema para ser resuelto en un espacio de soluciones de 10, 20 o incluso más dimensiones donde las relaciones entre las variables son complejas y muchas veces no lineales.

Diversos autores coinciden en definir la inteligencia artificial (IA) como una ciencia que tiene por objeto el diseño y la construcción de máquinas capaces de imitar el comportamiento inteligente de los seres humanos. Según Ponce (2010), la IA reúne una serie de técnicas aplicadas en el ordenador para realizar funciones de aprendizaje y autocorrección, mediante algoritmos o códigos de programación computacional para resolver diversos problemas, de forma similar a como lo haría el ser humano. La literatura especializada reporta que el campo de la IA está conformado por diversas técnicas conocidas como paradigmas. Los principales paradigmas de la IA aplicados en técnicas relacionadas con el diseño de mezclas de hormigón son:

- Redes neuronales artificiales (RNA).
- Algoritmos evolutivos.
- Lógica difusa.

También se han venido conformando aplicaciones híbridas, principalmente de modelos neuronales artificiales y de modelos evolutivos.

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

El carácter de aproximaciones universales de las redes neuronales artificiales (Hornik 1989) (Hagan *y col.* 1996) las convierte en una herramienta muy útil de cara a la modelización de procesos en los que no interesan las relaciones entre las variables implicadas y sí, la obtención de un resultado a partir de unos datos iniciales (Devaux *y col.* 1996).

Aunque su aplicación a los hormigones no estaba todavía muy extendida, los últimos años ha aumentado considerablemente y podemos encontrar en la bibliografía diversos resultados en campos como la predicción de varias de sus propiedades, la dosificación o diseño de la mezcla, la optimización, el control de calidad o la validación de resultados de investigación experimental (Gonzalez-Salcedo 2012).

En el campo de la predicción de propiedades del hormigón, nos encontramos con:

- Estimación de propiedades reológicas en estado fresco (Yeh 1999) (Maruyama *y col.* 2002) (Noguchi *y col.* 2003) (Agrawal y Sharma 2010) (Suryadi *y col.* 2011).
- Estimación de propiedades mecánicas en estado endurecido (Yeh 1999) (Kim y Kim 2002) (Noguchi *y col.* 2003) (Gupta *y col.* 2006) (Özgan y Öztürk 2007) (Tefamariam y Najjaran 2007) (Karahan *y col.* 2008) (Alshihri *y col.* 2009) (Nezhad *y col.* 2010).
- Estimación de propiedades de durabilidad en estado endurecido (Peng *y col.* 2002) (Noguchi *y col.* 2003) (Hewayde *y col.* 2007) (Ukrainczyk *y col.* 2007) (Nezhad *y col.* 2010) (Bakhary *y col.* 2010) (Ghassemzadeh *y col.* 2010).

En cuanto a las propiedades del hormigón en estado endurecido, es la resistencia a compresión del hormigón la característica que más interesa conocer en función de los materiales componentes y sus proporciones. Se encuentran en la bibliografía varias aplicaciones de RNA encaminadas a predecir la resistencia a compresión.

Konderla y Mokanet (2000) y otros muchos autores comparan métodos estadísticos y RNA para predicción de la resistencia a compresión del hormigón a distintas edades en función de la dosificación de sus componentes, así como el problema inverso, obteniéndose mejores resultados con las RNA.

Zain *y col.* (2010) presentaron un estudio basado en modelos matemáticos de regresión múltiple no lineal para predecir la resistencia del hormigón a partir de las propiedades de sus constituyentes y sus proporciones en la mezcla. Zain *y col.* (2011) propusieron también un modelo basado en la regresión no lineal para la predicción de la resistencia del hormigón a diferentes edades a partir de las proporciones de los constituyentes en la mezcla. Obtuvieron unos coeficientes de correlación razonablemente buenos para las predicciones a 7 y 28 días respectivamente, concluyendo que estos modelos resultan ser una poderosa herramienta a tener en cuenta para la predicción y análisis del comportamiento en hormigones.

Utilizando un análisis ANOVA para desarrollar un modelo de regresión lineal, son Shamsad y Saeid (2014) quienes estudian la optimización de la mezcla de constituyentes para el hormigón. Para ello elaboran una serie de ensayos sobre un total de 27 hormigones y tres muestras de cada uno de ellos (81 ensayos en total), variando en cada uno de ellos distintas variables como la relación agua/cemento, contenido total de áridos, cantidad de cemento, etc. y concluyen que la variable más significativa del modelo en cuanto a la resistencia final del hormigón es la relación agua/cemento.

En el trabajo de Setián *y col.* (2003) se presenta la aplicación práctica de una RNA al problema de la dosificación de hormigones en planta. Para entrenar dicha red se realizan una serie de amasadas de prueba donde los parámetros de entrada son el asiento del cono de Abrams y la resistencia característica a 28 días, siendo los parámetros de salida, la cantidad de cemento, áridos, adiciones, agua y aditivo reductor de agua. Se realizan 30 amasadas de prueba y 4 de referencia, y entre otras, obtiene una de las más importantes conclusiones: las redes neuronales con una capa oculta funcionan mejor que sin ella.

Bilgehan y Turgut (2010) presentaron un trabajo basado en la aplicación de las redes neuronales artificiales para la estimación de la resistencia a compresión del hormigón. Para su estudio, se utilizó como variable principal de entrada la densidad del hormigón, obtenida experimentalmente mediante ensayos no destructivos (pulsos ultrasónicos) en estructuras de hormigón armado de distintas características y edades, y aprendizaje basado en un algoritmo de gradiente descendiente. De esta manera, se consiguió una red neuronal capaz de predecir la resistencia a compresión del hormigón partiendo de su densidad y que también, puede ser utilizada como método no destructivo para la monitorización de la salud y estado de durabilidad del hormigón. En este trabajo se obtuvieron los mejores valores del coeficiente  $R^2$  para 50 neuronas en la capa oculta.

Realizado por Vahid y Mohammad (2009) se publicó un estudio sobre la predicción de la resistencia a 28 días del hormigón usando RNA. De un total de 432 muestras

de hormigón, se utilizaron 300 para la fase de aprendizaje, 66 para validación y 66 para el testeo final de la red, y se utilizó la una estructura básica o *MISO* (Multi Input, Single Output) con diferentes algoritmos. Una de las características más importantes del trabajo fue la introducción de la resistencia del hormigón a 3 días como variable de entrada del modelo, con lo que se obtuvieron coeficientes de correlación  $R$  entre 98,38 % y 99,40 %.

Özturan *y col.* (2008) presentaron un estudio del uso de RNA para la predicción de la resistencia del hormigón a los 28 días. Como variables de entrada usaron tanto datos de los componentes del hormigón, como de las propiedades del hormigón fresco y la resistencia a corto plazo. Construyeron un total de 5 modelos de red neuronal diferentes y compararon sus resultados con los modelos de regresión lineal. La principal conclusión a la que llegaron fue que la inclusión de la resistencia a 7 días como dato de entrada mejoraba la precisión y los tiempos de aprendizaje de la red. Los coeficientes de determinación  $R^2$  para las RNA oscilan entre 42,3 % y 91,9 % dependiendo de las variables de entrada y la arquitectura de la red. Para modelos de regresión múltiple con las mismas variables explicativas que las variables de entrada de las RNA estos valores de  $R^2$  están entre 55,0 % y 90,3 %, siendo para la ley de Abrams  $R^2 = 35,1$  %.

Un estudio presentado por Mostafa y Hossam (2007) utilizaba la técnica de las redes neuronales artificiales para predecir el comportamiento del hormigón. En la fase de aprendizaje se utilizaron un total de 64 hormigones distintos, fabricados con los dos tipos más comunes de cemento utilizados en Egipto: CEM I 32,5 R y CEM I 42,5 N. Este estudio arrojó como resultado el hecho de que la implementación de las redes neuronales artificiales permite identificar relaciones entre distintos parámetros de la fabricación del hormigón y las propiedades de este, tales como la relación entre el asentamiento y la resistencia a compresión.

Gupta (2013) publicó su trabajo referente a la utilización de RNA para el diseño de mezclas de hormigones. Utilizando 5 variables de entrada como la cantidad de cemento, arena, árido grueso, agua y módulos de finura procedentes de 55 hormigones distintos, y el algoritmo de aprendizaje *backpropagation*, estableció una red para predecir la resistencia a compresión del hormigón a 7, 14 y 28 días. Concluye que el uso de RNA para el diseño de mezclas de hormigón se convierte en una poderosa herramienta para los ingenieros gracias a su capacidad de establecer relaciones complejas no lineales entre los distintos parámetros y constituyentes del hormigón, mejorando la precisión de los modelos ya existentes.

En el trabajo realizado por Wankhade y Kambekar (2013) se establece la necesidad de una metodología rápida y eficiente para el cálculo de la resistencia a compresión en hormigones, tanto para el diseño de mezclas, como para el control en obra. Para ello proponen el uso y aplicación de las RNA en contraposición a los métodos usuales, más laboriosos y menos precisos. Para la fase de aprendizaje utilizaron el algoritmo estándar *backpropagation* y los algoritmos de Jordan-Elman y obtuvieron aproximaciones entre el 91 y 98 % de precisión.

Yeh (2006b) presentó su trabajo sobre la utilización de RNA para la predicción del asiento en cono de Abrams en hormigones a base de cenizas volantes y escorias de alto horno. Utilizando como variables de entrada las cantidades de cemento, cenizas volantes, escorias de alto horno, agua, superfluidificante y áridos, llegó a la conclusión de la mejor aproximación al comportamiento real del hormigón mediante redes neuronales frente a los modelos basados en regresiones no lineales.

Ashu *y col.* (2006) publicaron su trabajo basado en la modelización y el análisis del asentamiento del hormigón usando redes neuronales artificiales, demostrando la superioridad de estos modelos frente a los comunmente usados de regresión. Observaron que las RNA eran capaces de encontrar relaciones complejas y no lineales entre los constituyentes del hormigón y sus propiedades tales como el asiento de una manera muy eficiente. Los resultados que obtuvieron sugieren que existen unos niveles críticos de constituyentes a partir de los cuales se producen grandes cambios en el comportamiento del hormigón, aunque por otra parte y de forma general, el asiento del hormigón aumenta con la cantidad de pasta de cemento y disminuye con la cantidad de arena en los áridos.

En el trabajo realizado por Ni y Wang (2000) se estudió la predicción de la resistencia a compresión a los 28 días del hormigón usando redes neuronales multicapa de propagación hacia adelante (*feedforward*). Se utilizaron 11 variables de entrada y datos correspondientes a 100 muestras de distintos hormigones. Para la fase de aprendizaje se utilizó el criterio de parada por número de iteraciones, tomándose 5000 iteraciones en cada etapa. Se simuló los efectos de algunos factores en la resistencia a compresión, obteniéndose como una de las conclusiones más importante que la resistencia es proporcional a la dosificación de cemento para una cantidad de agua dada. Además, la relación lineal entre resistencia y cantidad de cemento depende del módulo de finura de la arena, del tipo resistente de cemento y de la relación arena/grava.

Supriya y Kishor (2014) presentaron su estudio para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón, también basado en el uso de RNA. Construyeron el modelo para varios tipos distintos de hormigón con un total de 9 variables de entrada correspondientes a todos los constituyentes del hormigón así como las adiciones, y dos variables de salida: el asentamiento del hormigón fresco y la resistencia a 7 y 28 días. Las conclusiones del estudio fueron similares a todas las anteriores, el uso de las RNA para la predicción de la resistencia de los hormigones resulta ser un método mucho más preciso que los métodos estadísticos de regresión lineal.

Lee (2003) desarrolló un sistema basado en la utilización de RNA para, a partir de suficientes datos o variables de entrada, predecir la resistencia a compresión del hormigón. Inicialmente, su modelo construido con la arquitectura de una red neuronal básica, arrojó errores de aproximación elevados en los casos en que la temperatura ambiente de curado variaba significativamente de la media. Para solucionar este problema, se propuso una red neuronal modular más compleja, compuesta por 5 redes neuronales básicas, mejorando así la fase de aprendizaje y minimizando el

error obtenido. De esta forma, el modelo se volvió muy eficiente y adecuado para la predicción de la resistencia en hormigones.

En el caso de hormigones de altas prestaciones, Yeh (1998) también utilizó las RNA para predecir y determinar la resistencia a compresión del hormigón en función de las cantidades y características de sus constituyentes. Utilizando como variables de entrada las cantidades de cemento, agua, ceniza volante, escoria de alto horno, superfluidificante, árido grueso y árido fino se evaluaron un total de 1000 hormigones, un 70 % de ellos fabricados con cemento Portland ordinario, y se realizaron 3000 iteraciones para la fase de aprendizaje. Los resultados obtenidos poniendo a prueba la red neuronal en 17 experimentos con hormigones y comparando estos con los obtenidos con un modelo de regresión, se llegó a la conclusión de que las RNA son un sistema de predicción para la resistencia a compresión del hormigón más exacto y de fácil implementación con grandes posibilidades y opciones de futuro.

Muthupriya *y col.* (2011) estudiaron también el uso de RNA para el cálculo de la resistencia a compresión en hormigones de altas prestaciones, incluyendo además, parámetros de durabilidad. Se construyeron dos modelos de redes neuronales distintos, uno con una sola capa oculta, y otro con dos capas ocultas. Para el aprendizaje de los modelos se utilizaron un total de 5000 iteraciones a partir de datos experimentales de 140 muestras de hormigón correspondientes a 7 dosificaciones diferentes, fabricados a base de cementos con adiciones puzolánicas, ceniza volante y humo de sílice, evaluándose las resistencias a 3, 7, 28, 56 y 90 días. Según los resultados, se concluyó que el modelo con dos capas ocultas era más preciso que el de una sola.

Por su parte, Agrawal y Sharma (2010) también estudiaron la aplicación de las RNA para la predicción del asiento en cono de Abrams de hormigones de altas prestaciones. Determinaron como variables de entrada las cantidades de cemento, ceniza volante, árido fino, árido grueso, agua, superplastificante y la relación agua/cemento, y para el entrenamiento de la red, usaron datos de 349 hormigones distintos fabricados en planta. Testeando y comparando los resultado del modelo con ensayos de hormigón realizados en dos plantas diferentes, obtuvieron un error cuadrático medio (*MSE*) decreciente y un coeficiente de determinación  $R^2$  creciente tal y como aumentaban el número de iteraciones. En función de que se comparen los resultados con los ensayos de la planta utilizada en el aprendizaje o en una segunda diferente, el valor de  $R^2$  pasa de 99,85 % a 91,84 % para 800 iteraciones, concluyendo que el uso de RNA permite predecir resultados muy precisos de consistencia en hormigones.

En el artículo publicado por Hakim *y col.* (2011) se estudia la aplicación de una red neuronal artificial para predecir la resistencia a compresión del hormigón de alta resistencia a los 28 días. Para el aprendizaje de la red, se utilizaron datos de un total de 368 estudios técnicos y 8 variables o datos de entrada: cantidad de cemento, agua, árido fino, árido grueso, humo de sílice, superfluidificante, ceniza volante y escorias de alto horno. Entre las distintas combinaciones de capas, número de neuronas, ratio de aprendizaje y funciones de activación o transferencia estudiadas,

se determinó que la arquitectura óptima del modelo se corresponde con una 8-10-6-1, es decir, con dos capas ocultas de 10 y 6 neuronas respectivamente, y se obtuvieron valores de error relativo medio del 7,02 % y 12,64 % para los datos de entrenamiento y test respectivamente, consiguiendo una aproximación aceptable.

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

También en el ámbito de la durabilidad, Haj-Ali *y col.* (2001) utilizaron RNA para modelizar la expansión del hormigón por exposición prolongada al ataque de sulfatos, utilizando como variables de entrada el tiempo, la relación  $a/c$  y el contenido de  $C_3A$  del cemento. Glass *y col.* (1997) estudiaron la concentración de iones de cloruro en morteros y pastas de cemento utilizando como variables de entrada las características del cemento (químicas y de finura), la relación  $a/c$ , los aditivos, etc, junto con la historia de la exposición al ambiente (temperaturas, tiempos, humedades, grados de hidratación, etc.).

Destaca la elaboración de RNA para estimar la resistencia a compresión mediante ensayos no destructivos a partir de valores de propagación de la velocidad de ultrasonidos y a partir de la resistencia eléctrica (Hola y Schabowicz 2005) (Bilgehan y Turgut 2010). Lizarazo y Gómez Cortés (2007) también aplican redes neuronales artificiales en la predicción de la resistencia del hormigón en función de su densidad y velocidad de pulso ultrasónico. La anterior investigación también busca predecir la resistividad eléctrica del hormigón mediante la densidad, la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia a compresión, y aunque se verifica la mejora de la predicción con RNA con respecto a la regresión lineal, los valores de  $R^2$  continúan siendo bajos.

Se han desarrollado también modelos basados en RNA para resolver problemas de optimización en diseños de mezclas de hormigón, fundamentalmente en 2 aspectos: en la optimización de la mezcla para una propiedad buscada, como es el cumplimiento de la resistencia a compresión o el asentamiento en cono de Abrams (Oh *y col.* 1997) (Yeh 1999) (Maruyama *y col.* 2002) (Garg 2003) (Noguchi *y col.* 2003) (Wang *y col.* 2003) (Yeh 2006a) (Özgan y Öztürk 2007) (Jamil *y col.* 2009) (Lee y Yoon 2009) (Yeh 2009) (Nezhad *y col.* 2010), o bien la optimización de un componente en particular (Bektas y Demirel 2008) (Chen 2010).

Por ejemplo, Salim *y col.* (2010) usaron en sus estudios las RNA no para predecir la resistencia de los hormigones, sino para calcular las cantidades de los constituyentes necesarias para la dosificación. De esta forma, utilizaron como variables de entrada para el modelo de la red neuronal, el asiento en cono de Abrams y resistencia deseadas, los módulos de finura o módulos granulométricos de los áridos disponibles

y, como variables de salida, la cantidad de cemento, arena, grava y agua en la dosificación. Para la fase de aprendizaje utilizaron 443 mezclas de hormigón, y otras 50 para la fase de testeo. A partir de los resultados, concluyeron que este método de dosificación basado en las RNA era más preciso y rápido que los métodos experimentales comunmente usados.

Basma *y col.* (1999) utilizan RNA para predecir el grado de hidratación de mezclas de cemento con relaciones  $a/c$  entre 0,2 y 0,6 sometidas a periodos de curado entre 0,25 y 90 días y con temperaturas entre 3 y 48 °C. Las variables de entrada utilizadas fueron las tres anteriores y la medida experimental se basaba en la medida del agua no evaporable de la muestra. La solución óptima encontrada constaba de dos capas ocultas con 3 neuronas por capa.

También los hormigones autocompactables han sido estudiados mediante RNA; por ejemplo, Nehdi *y col.* (2001) han tratado de predecir las propiedades y características como resistencia, segregación, capacidad de relleno o tiempo de flujo, utilizando como variables de entrada las dosificaciones de los componentes del hormigón, incluso las adiciones. Se utilizó una RNA para cada variable de salida estimada. En el estudio de Raheman y Modani (2013) se estudió la predicción de las propiedades de estos hormigones usando RNA. Además de la resistencia a 7 y 28 días, su modelo introdujo también la resistencia a 90 días y valores de ensayos específicos para hormigones autocompactantes. Utilizando esta arquitectura para el modelo de red, consiguieron obtener un coeficiente de correlación  $R$  de 0,999 entre las propiedades del hormigón obtenidas mediante ensayos, y su predicción mediante la RNA, demostrando la precisión y ventaja de este tipo de modelos frente cualquier otro usado hasta la fecha.

## Capítulo 3

# MATERIALES, NORMATIVA, PROCEDIMIENTOS, INSTALACIONES Y ENSAYOS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se relacionan y describen los materiales utilizados en los estudios realizados en la presente tesis doctoral: cementos, áridos, arena normalizada para el ensayo de determinación de la resistencia mecánica del cemento, agua, aditivos plastificantes y superplastificantes y fibras.

En el presente capítulo, también se encuentran los ensayos realizados para la caracterización de dichos materiales constituyentes y de los hormigones, así como se describe la normativa utilizada.

En el apartado 3.5. se describe el procedimiento y las instalaciones industriales utilizadas para la fabricación de los hormigones estudiados. Para finalizar, se explica y se facilitan los datos obtenidos en la realización en el año 2014 del Plan de Ensayos Interlaboratorios que han sido realizados, en lo que respecta a la Comunidad Valenciana, en la planta utilizada en la presente tesis doctoral.

## 3.2 MATERIALES UTILIZADOS

### 3.2.1 Cementos

A continuación se presenta una lista con los 27 cementos empleados en este estudio según la codificación empleada:

1. VASSILIKO - CEM I 42,5 R - Fabricado por VASSILIKO CEMENT WORKS LTD en Larnaka (Chipre).
2. LA UNIÓN - CEM I 42,5 N - Fabricado por CEMENTOS LA UNIÓN S.A. en Ribarroja de Turia (Valencia).
3. BUZZI - CEM I 42,5 R - Fabricado por BUZZI UNICEMEN SPA en Augusta (Italia).
4. CEMEX - CEM I 52,5 R - Fabricado por CEMEX ESPAÑA S.A. en Buñol (Valencia).
5. ASLAND - CEM I 42,5 R/SR - Fabricado por LAFARGE ASLAND S.A. en Sagunto (Valencia).
6. TOPCEMEN - CEM I 42,5 R - Fabricado en Grecia e importado por TOPCEMEN.
7. ASLAND - CEM I 52,5 R - Fabricado por LAFARGE ASLAND S.A. en Sagunto (Valencia).
8. BUZZI - CEM II/A-LL 42,5 R - Fabricado por BUZZI UNICEMEN SPA en Augusta (Italia).
9. ASLAND - CEM II/B-V 42,5 R - Fabricado por LAFARGE ASLAND S.A. en Sagunto (Valencia).
10. CEMENTVAL - CEM II/A-L 42,5 R - Fabricado por CEMENTVAL S.L. en Sagunto (Valencia).
11. LA UNIÓN - CEM II/A-L 52,5 N - Fabricado por CEMENTOS LA UNIÓN S.A. en Ribarroja de Turia (Valencia).
12. LA UNIÓN - CEM I 42,5 R/SR - Fabricado por CEMENTOS LA UNIÓN S.A. en Ribarroja de Turia (Valencia).
13. BURSA - CEM I 42,5 N - Fabricado por BURSA CEMENT FACTORY en Bursa (Turquía).
14. LA UNIÓN - CEM II/A-L 42,5 R - Fabricado por CEMENTOS LA UNIÓN S.A. en Ribarroja de Turia (Valencia).

15. LA UNIÓN - CEM II/B-M (S-L) 42,5 R - Fabricado por CEMENTOS LA UNIÓN S.A. en Ribarroja de Turia (Valencia).
16. CEMENTVAL - CEM I 42,5 R - Fabricado por CEMENTVAL S.L. en Sagunto (Valencia).
17. CEMENTVAL - CEM II/A-L 42,5 R - Fabricado por CEMENTVAL S.L. en Sagunto (Valencia).
18. LA CRUZ - CEM II/B-M (S-L) 42,5 R - Fabricado por CEMENTOS LA CRUZ S.L. en Albanilla (Murcia).
19. HOLCIM - CEM II/B-M (S-V) 42,5 N - Fabricado por HOLCIM ESPAÑA S.A. en Carboneras (Almeria).
20. HOLCIM - CEM III/A 42,5 N - Fabricado por HOLCIM ESPAÑA S.A. en Carboneras (Almeria) y en Gador (Almeria).
21. HOLCIM - CEM II/A-V 42,5 R - Fabricado por HOLCIM ESPAÑA S.A. en Carboneras (Almeria) y en Gador (Almeria).
22. COLACEN - CEM II/A-LL 42,5 R - Fabricado por COLACEN S.P.A. en Modica (Italia).
23. ELITE - CEM II/A-L 42,5 R - Fabricado por ELITE CEMENTS S.L. en Grao de Castellón (Castellón).
24. ASLAND - CEM II/A-V 42,5 R - Fabricado por LAFARGE CEMENTOS S.A. en Sagunto (Valencia).
25. BUZZI - CEM II/B-LL 42,5 R - Fabricado por BUZZI UNICEMEN SPA en Augusta (Italia).
26. CEMEX - CEM II/A-V 42,5 R - Fabricado por CEMEX ESPAÑA S.A. en Buñol (Valencia).
27. CIMSA - CEM I 42,5 R - Fabricado por ÇIMSA en Turquía.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan las características físicas y químicas facilitados por los fabricantes de los cementos empleados en el estudio, así como la superficie específica Blaine de los mismos. Se indica el rango en el que se encuentran los valores facilitados. Cuando no se dispone de valores figura escrito n.d. (no disponible).

Código CEMENTO	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS				CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
	Cloruros (%)	Sulfatos (%)	Pérdida por calcificación (%)	Residuo insoluble (%)	Principio de fraguado (min)	Final de fraguado (min)	Expansión (mm)
1	n.d.	0 - 3,41	2,03 - 3,79	0,57 - 3,47	130 - 225	190 - 260	0
2	0,01 - 3,48	2,64 - 3,07	1,54 - 3,48	0,33 - 2,68	160 - 190	205 - 250	0,3 - 1,2
3	0,04	2,9	3,03 - 3,39	0,28 - 0,50	165 - 190	210 - 270	0
4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
5	0,01 - 0,02	2,9 - 3,03	1,54 - 2,75	0,65 - 2,27	124 - 160	224 - 273	0 - 1
6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
7	0,01 - 0,03	3,37 - 3,89	1,53 - 2,88	0,52 - 1,68	90 - 200	160 - 265	0,6 - 2
8	0,03	2,94	5,2 - 7,21	0,4 - 2,91	145 - 170	195 - 250	n.d.
9	0,01 - 0,04	2,69 - 3,32	1,22 - 4,39	n.d.	100 - 291	170 - 382	0,2 - 1
10	0,01 - 0,1	1,5 - 4	n.d.	n.d.	98 - 250	153 - 295	0,5 - 2,5
11	0,1	2,2 - 2,9	n.d.	n.d.	130 - 160	190 - 220	0,14 - 0,22
12	0,1	2,5 - 2,6	2,82	0,4	170 - 175	210 - 240	0,53
13	0,004 - 0,01	2,38 - 2,71	2,12 - 3,01	0,2 - 0,45	110 - 135	160 - 240	1 - 2
14	0,01 - 3,48	2,28 - 3,33	4,5 - 7,68	0,66 - 1,83	149 - 194	205 - 269	0,18 - 0,9
15	0,02 - 0,07	2,76 - 3,30	n.d.	n.d.	148 - 173	204 - 239	0,17 - 0,37
16	0,01 - 0,03	1,18 - 3,36	1,64 - 2,73	0,38 - 0,94	103 - 272	147 - 316	0,5 - 2,1
17	0,01	2,37 - 2,8	n.d.	n.d.	166 - 213	210 - 240	0 - 2,5
18	0,03 - 0,06	3,09 - 3,49	n.d.	n.d.	124 - 172	188 - 231	0,2 - 1
19	0,03 - 0,05	2,16 - 2,5	n.d.	n.d.	135 - 244	205 - 323	0,4 - 0,8
20	0,05 - 0,07	2,51 - 3,20	1,02 - 2,1	0,29 - 0,88	130 - 280	145 - 338	0,3 - 0,4
21	0,4 - 0,5	2,34 - 2,5	n.d.	n.d.	149 - 220	211 - 275	0,5 - 1,1
22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	115 - 165	175 - 225	n.d.
23	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
24	0,02 - 0,03	2,81 - 3,07	1,28 - 1,35	n.d.	157 - 246	246 - 351	0 - 1,07
25	0,05	2,7	7,44 - 10,13	0,5 - 2,54	90 - 150	145 - 210	n.d.
26	0,05 - 0,06	3,26 - 3,39	n.d.	n.d.	98 - 206	159 - 285	0,2 - 0,3
27	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

**Tabla 3.1:** Características de los cementos empleados en el estudio (Cuadro elaborado a partir de datos facilitados por los fabricantes).

Cemento	1	2	3	8	10	15	21	24	25
Superficie específica BLAINE (cm <sup>2</sup> /gr)	3660	2854 - 3500	3400	3840	3700 - 4045	5637 - 5739	3385	3369 - 4041	4700

**Tabla 3.2:** Resultados del ensayo de superficie específica Blaine en los cementos empleados en el estudio (Cuadro elaborado a partir de datos facilitados por los fabricantes).

### 3.2.2 Áridos

Los áridos empleados para la fabricación del hormigón en la planta de HORMIGONES CARLET S.L., que ha sido la utilizada en el estudio y que está convenientemente explicada en el apartado 3.5, han sido suministrados por GRAVERAS DEL RÍO MAGRO S.L. y su origen es calizo. La actividad extractiva viene ori-

ginada por la existencia de un depósito detrítico cuaternario (y en menor medida terciario) en superficie, formado como consecuencia de la actividad fluvial del río Magro y constituido por gravas y arenas, de calidad excelente para ser utilizadas como áridos en construcción. Los materiales encontrados en la gravera son bastante uniformes y se corresponden a terrazas que tienen composición similar al aluvial del cauce del río Magro. Se trata generalmente de gravas calcáreas con un tamaño de grano entre 50 y 100 mm con arena calcárea, dolomítica y silícea. Presentan lentejones de limos arcillosos y arenas limosas de colores grises a ocre. Los materiales se presentan poco compactados y se disponen horizontalmente dando lugar a estratificación cruzada y formas de canal, debido al ambiente sedimentario principalmente fluvial en el cual se han depositado. El sistema de explotación empleado es el de extracción a cielo abierto mediante arranque mecánico realizado con retroexcavadora de cadenas.

La sociedad GRAVERAS DEL RÍO MAGRO S.L. posee una larga experiencia en el sector minero, habiendo llevado a cabo la explotación desde el 1963, con el registro nº1039 de la Sección A) de la Ley de Minas en parcelas de las partidas *Dels Molins* y *Massalet* en los términos municipales de Carlet y Catadau (Valencia). La producción a extraer viene determinada por la demanda de materia prima de la planta de hormigón anexa, fijándose en unas 160000 t anuales de material aprovechable. Se dispone de una planta de tratamiento de áridos, debidamente autorizada, ubicada en la partida *Dels Molins* del término municipal de Carlet, concretamente en las parcelas 36, 194 y 507 del polígono 19. En dicha planta se vienen realizando las operaciones de trituración, lavado y clasificación de los áridos extraídos en la propia explotación y estas instalaciones son colindantes a la planta de fabricación de hormigón.



**Figura 3.1:** Instalación tratamiento de áridos.

Los áridos utilizados se corresponden con dos áridos finos (AF):

- Arena triturada AF-0/4-T

- Arena lavada AF-0/4-R

y cinco áridos gruesos (AG):

- Gravilla GR-4/8-M
- Gravilla GR-6/12-M
- Grava GR-10/16-M
- Grava GR-16/25-M
- Grava GR-20/32-M

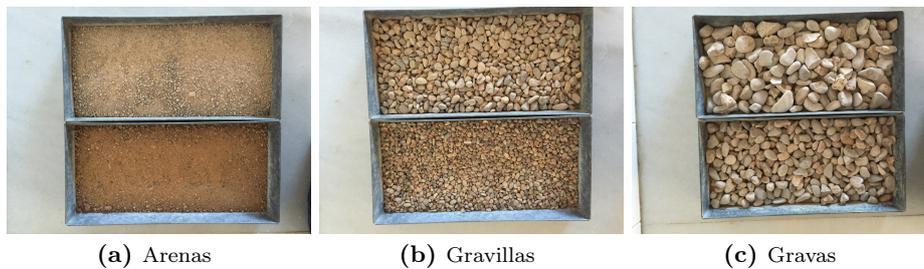


Figura 3.2: Áridos.

Tal y como indica la designación de los áridos se dispone de dos arenas, una triturada y otra natural lavada de canto rodado y cinco gravas que por el proceso de tratamiento son una mezcla de triturado y rodado, aunque hay poco porcentualmente de triturado, como se puede apreciar en las figuras 3.2 y 3.3.

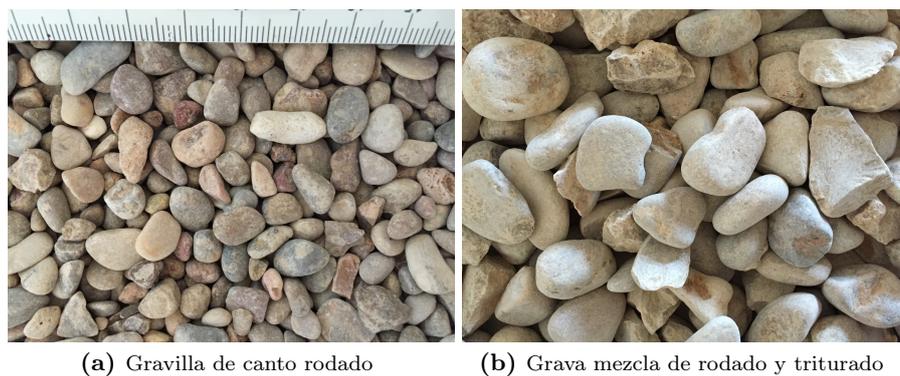


Figura 3.3: Áridos gruesos.

### 3.2.3 Arena normalizada

La arena empleada para la determinación de la resistencia mecánica de los cementos ha sido arena normalizada CEN según el artículo 5.1.3 de la norma UNE-EN196-1: (2005).



(a) Arena normalizada E. TORROJA

(b) Arena normalizada NORMENSAND

Figura 3.4: Arenas normalizadas.

### 3.2.4 Agua

El agua utilizada para el lavado en la planta de tratamiento de áridos, así como para la fabricación del hormigón, es agua potable proveniente de pozos propios existentes en la propia instalación.

### 3.2.5 Aditivos Plastificantes/Superplastificantes

Los aditivos reductores de agua empleados en el estudio se corresponden con los siguientes grupos atendiendo a su función principal:

- Función principal Plastificantes/Reductores de agua:
  - 1-LUBRICON 600
  - 2-POZZOLITH 375NE
  - 3-POZZOLITH 390N
  - 4-POZZOLITH 477N
  - 5-POZZOLITH 651N
  - 6-POLYHEDD 750

- 7-POLYHEDD 759NE
  - 8-POLYHEDD 921
  - 9-MELCRET PF75
  - 10-MELCRET PF77
  - 11-MELCRET PF90
  - 12-SIKAPLAST 360
  - 14-REHOBUILD 570
  - 15-CHRYSOPLAST 950
  - 16-KHEME PLAST 1820
  - 18-CHRYSOPLAST 810
- Función principal Superplastificantes/Reductores de agua de alta actividad:
- 13-GLENIUM SKY 549
  - 17-CONPLAST SP365

La naturaleza química de los mismos es diversa, aunque la mayor frecuencia de utilización se corresponde con plastificantes en base a lignosulfonatos tal y como se puede observar en la tabla 4.3. Esto es así por cuestiones económicas y de mantenimiento de cono, dado que en algunos casos los tiempos de transporte son considerables. En la tabla 3.3 se pueden apreciar las características facilitadas por los fabricantes, de los aditivos utilizados en el estudio. Cuando no se dispone de datos figura en blanco la celda correspondiente.

Adi	Efecto secundario	Densidad relativa (20°C)(gr/cm <sup>3</sup> )	Extracto seco(%)	Aspecto físico	pH	Dosis recomendada (%)	Descripción química
1	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,23 ± 0,03	47 ± 2,4	Líquido homogéneo marrón oscuro	8 ± 1	0,2 - 0,5	Lignosulfonato
2	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,22 ± 0,03	47 ± 2,4	Líquido homogéneo marrón oscuro	8 ± 1	0,2 - 0,5	Lignosulfonato
3	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,16 ± 0,03	36 ± 1,8	Líquido homogéneo marrón oscuro	4 ± 1	0,5 - 1,5	Lignosulfonato
4	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,2 ± 0,03	40 ± 2	Líquido homogéneo marrón oscuro	5 ± 1	0,4 - 0,8	Lignosulfonato
5	Retrasa el fraguado a dosis elevadas						
6	Retrasa el fraguado a dosis elevadas						
7	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,036 ± 0,02	11,1 ± 1,1	Líquido homogéneo turbio incoloro	9,2 ± 1	0,5 - 1,5	Polisacáridos
8	Retrasa el fraguado a dosis elevadas						
9	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,18 ± 0,03		Líquido marrón oscuro	5 ± 1	0,5 - 1	Lignosulfonato
10	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,2 ± 0,03	40 ± 2	Líquido homogéneo marrón oscuro	7 ± 1	0,4 - 0,8	
11	Retrasa el fraguado a dosis elevadas						
12	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,08	18	Líquido verdoso	5	0,5 - 1,8	Polímeros modificados
13	Riesgo de disgregación a dosis elevadas	1,056 ± 0,02	25 ± 1,3	Líquido turbio pardo claro	6,5 ± 1	0,6 - 1,2	Policarboxilatos
14	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,213 ± 0,03	42,5 ± 2	Líquido marrón oscuro	8,5 ± 1	0,5 - 1,2	
15	Retrasa el fraguado a dosis elevadas	1,2		Líquido marrón	7	0,2 - 0,4	Compuestos hidroxílicos modificados
16	Retrasa el fraguado a dosis elevadas						
17	Retrasa el fraguado	1,2 ± 0,01	47 ± 2,4	Líquido marrón oscuro	3,5 ± 1	0,5 - 0,6	Mezcla polímeros orgánicos
18		1,1		Líquido marrón	7	0,4 - 1,2	Compuestos hidroxílicos modificados

**Tabla 3.3:** Características de los aditivos utilizados (Cuadro elaborado a partir de datos facilitados por los fabricantes).

### 3.2.6 Fibras

Las fibras utilizadas son fibras de polipropileno, fibras de acero y una mezcla de fibras de acero y polipropileno. Tanto las fibras de polipropileno como las de acero se pueden ver en la figura siguiente:

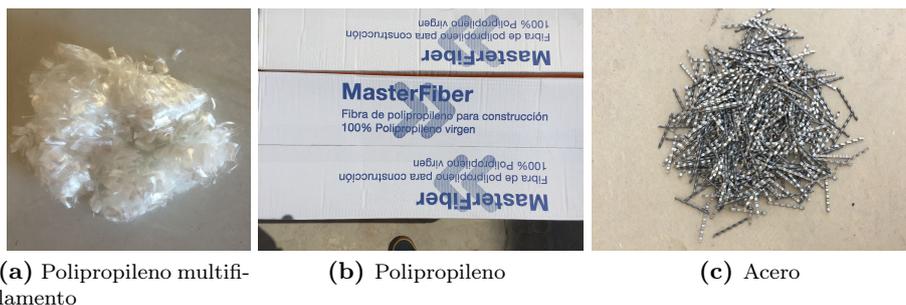


Figura 3.5: Fibras utilizadas en la fabricación de hormigones.

Las fibras de polipropileno se presentan en bolsas autodestruibles de 600 gr, mientras que las de acero vienen en cajas de 20 kg. Las fibras de polipropileno monofilamento utilizadas se corresponden con el nombre comercial MasterFiber 022 y sus propiedades facilitadas por el fabricante se pueden observar en la tabla 3.4.

Propiedades	
Material:	Polipropileno 100% (color blanco).
Longitud de fibra:	12 mm
Diámetro de fibra:	31 – 35 micras.
Densidad:	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Frecuencia de fibra:	Aprox. 102 mio/kg.
Elongación a rotura:	80 - 140%.
Punto de fusión:	162 - 165° C.
Contenido álcalis:	Ninguno.
Contenido sulfatos:	Ninguno.
Contenido cloruros:	Ninguno.
Absorción:	Ninguna.
Resistencia a ácidos/álcalis	Excelente.
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	

Tabla 3.4: Propiedades de las fibras de polipropileno facilitadas por el fabricante.

Las fibras metálicas utilizadas son fibras onduladas de nombre comercial fibradurmet con un contenido en carbono menor al 0,09 %, con una resistencia a tracción

superior a  $900 \text{ N/mm}^2$ , un alargamiento en rotura del  $2,5\% \pm 0,2\%$  y las características geométricas relacionadas en la tabla 3.5.

<b>Geometría</b>	
Longitud ( $l$ ) ( $mm$ )	$50 \pm 1$
Diámetro ( $d_f$ ) ( $mm$ )	$1 \pm 0,07$
Esbeltez ( $\lambda$ )	$48 \pm 0,5$
Número de fibras/ $kg$	$3095 \pm 10$
Número de ondulaciones	$6,4 \pm 0,5$
Profundidad onda ( $mm$ )	$1,6 \pm 0,2$
Metros de fibras/ $kg$	$154,8 \pm 1$

**Tabla 3.5:** Valores de geometría de las fibras onduladas de acero para hormigón obtenidos de la ficha técnica facilitada por el fabricante.

### 3.3 **NORMATIVAS HORMIGÓN**

La norma UNE-EN206-1: (2008) no se trata de una norma armonizada y en ningún caso de una norma de obligado cumplimiento en nuestro país. Las únicas disposiciones que son obligatorias, en todas las obras de hormigón realizadas en España, son las establecidas en la EHE (2008). Esta instrucción EHE-08, que adopta un enfoque prestacional, es el marco reglamentario de aplicación a todas las estructuras y elementos de hormigón estructural, de edificación o de ingeniería civil, con las excepciones indicadas en el Art. 2 de la propia instrucción.

Uno de los requisitos básicos para proyectar una construcción de hormigón es el identificar el tipo de ambiente que define la agresividad a la cual va a estar sometida dicha construcción. El tipo de ambiente al que está sometido un elemento estructural viene definido por el conjunto de condiciones físicas y químicas a las que está expuesto, y que puede llegar a provocar la degradación como consecuencia de efectos diferentes a los de las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural. El tipo de ambiente viene definido por la combinación de:

- Una de las clases generales de exposición, frente a la corrosión de las armaduras.
- Las clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación que procedan para cada caso.

En el caso de que un elemento estructural esté sometido a alguna clase específica de exposición, en la designación del tipo de ambiente se deberán reflejar todas las clases, unidas mediante el signo de adición  $\ll + \gg$ .

La dosificación y los componentes elegidos para la preparación de las mezclas de hormigón destinadas a la construcción de estructuras o elementos estructurales deberá estudiarse previamente, con el fin de asegurarse de que es capaz de proporcionar hormigones cuyas características mecánicas, reológicas y de durabilidad satisfagan las exigencias del proyecto, y esto considerando las condiciones reales de la obra.

La docilidad del hormigón será la necesaria para que, con los métodos previstos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan coqueas.

La docilidad del hormigón se valorará determinando su consistencia por medio del ensayo de asentamiento, según UNE-EN12350-2: (2009). Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono, serán los siguientes:

Tipo de consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancia (cm)
Seca (S)	0 - 2	0
Plástica (P)	3 - 5	$\pm 1$
Blanda (B)	6 - 9	$\pm 1$
Fluida (F)	10 - 15	$\pm 2$
Líquida (L)	16 - 20	$\pm 2$

**Tabla 3.6:** Consistencias y valores límite de asentamiento (Adaptada EHE-08).

Se evitará el empleo de las consistencias seca y plástica, salvo en aplicaciones que así lo requieran y el empleo de la consistencia líquida exige el uso de aditivos superplastificantes. El 92 % de los hormigones fabricados en el año 2013 en España se corresponden a consistencias blanda y fluida (ERMCO 2014).

A los efectos de la EHE-08, la resistencia del hormigón a compresión se refiere a los resultados obtenidos en ensayos de rotura a compresión a 28 días, efectuados sobre probetas fabricadas y curadas según UNE-EN12390-2: (2009). Todos los métodos de cálculo y las especificaciones de esta instrucción se refieren a características del hormigón endurecido obtenidas mediante ensayos sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm. La EHE-08 permite también la determinación de la resistencia a compresión mediante probetas cúbicas de 15 cm de arista y de 10 cm bajo ciertas condiciones. En cualquiera de los dos casos de probetas cúbicas, los resultados se deben afectar por el correspondiente factor de conversión. Por su parte, la norma UNE-EN 206-1 propone diversas clases resistentes en base a la resistencia característica a 28 días sobre probeta cilíndrica de 15x30 cm o bien sobre probeta cúbica de 15 cm.

En cuanto a la resistencia característica especificada, según la EHE-08, se recomienda utilizar para el hormigón estructural, la siguiente serie:

20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100

donde las cifras indican la resistencia característica especificada del hormigón a compresión a los 28 días, expresada en  $N/mm^2$ .

Con los siguientes factores a tener en cuenta:

- La resistencia de  $20 N/mm^2$  se limita para utilización en hormigones en masa y en los hormigones estructurales, la resistencia de proyecto  $f_{ck}$  no será inferior a  $20 N/mm^2$  en hormigones en masa, ni a  $25 N/mm^2$  en hormigones armados o pretensados. Los hormigones con resistencia característica de proyecto  $f_{ck}$  superior a  $50 N/mm^2$ , se denominan hormigones de alta resistencia.
- Se consideran hormigones de endurecimiento rápido los hormigones fabricados con cemento de clase resistente 42,5 R, 52,5 N o 52,5 R siempre que su relación agua/cemento sea menor o igual a 0,60; los fabricados con cemento de clase resistente 32,5 R o 42,5 N siempre que su relación agua/cemento sea menor o igual a 0,5 o bien aquellos en los que se utilicen acelerantes de fraguado. En cuanto al resto de los casos se consideran hormigones de endurecimiento normal.

La tipificación de los hormigones se realiza de acuerdo con el siguiente formato:

$$T - R/C/TM/A$$

donde:

- $T$  será el tipo de hormigón:
  - HM para hormigón en masa.
  - HA para hormigón armado.
  - HP para hormigón pretensado.
- $R$  es la resistencia característica especificada, en  $N/mm^2$ .
- $C$  es el tipo de consistencia.
- $TM$  es el diámetro o tamaño máximo del árido en  $mm$ .

- A es la designación del ambiente.

En lo referente a la elaboración y puesta en obra del hormigón, el Artículo 71 de la EHE-08 marca un punto de inflexión respecto a instrucciones anteriores al especificar que el hormigón estructural debe de estar fabricado en centrales con instalaciones para el almacenamiento y la dosificación de los materiales componentes y el amasado de los mismos. Con respecto al amasado de los componentes, indica que se debe de conseguir una mezcla íntima y homogénea, mediante equipos constituidos por amasadoras fijas o móviles capaces de mezclar los componentes del hormigón de modo que se obtenga una mezcla homogénea y completamente amasada, capaz de satisfacer los dos requisitos del Grupo A y al menos dos de los del Grupo B, de la tabla 71.2.4.

ENSAYOS		Diferencia máxima tolerada entre los resultados de los ensayos de dos muestras tomadas de la descarga del hormigón (1/4 y 3/4 de la descarga)
Grupo A	1. Consistencia (UNE-EN 12350-2) Si el asiento medio es igual o inferior a 9 cm	3 cm
	Si el asiento medio es superior a 9 cm	4 cm
	2. Resistencia (*) En porcentajes respecto a la media	7,5 %
Grupo B	3. Densidad del hormigón (UNE-EN 12350-6) En kg/m <sup>3</sup>	16 kg/m <sup>3</sup>
	4. Contenido de aire (UNE-EN 12350-7) En porcentaje respecto al volumen del hormigón	1 %
	5. Contenido de árido grueso (UNE 7295) En porcentaje respecto al peso de la muestra tomada	6 %
	6. Módulo granulométrico del árido (UNE 7295)	0,5

**Tabla 3.7:** Comprobación de la homogeneidad del hormigón (Tabla 71.2.4 de la EHE-08).

Respecto a la UNE-EN206-1: (2008) indica solamente que las amasadoras deben ser capaces de conseguir una mezcla uniforme de los materiales constituyentes y una consistencia homogénea del hormigón y esto para un tiempo y capacidad de amasado dados. Por lo que respecta a los camiones hormigonera o equipos agitadores, indica que los mismos deben ser capaces de suministrar el hormigón en un estado de mezcla homogéneo.

En cuanto a la conformidad de los materiales que componen el hormigón, la EHE-08, define que será suficiente el marcado CE para la comprobación de su con-

formidad. Los materiales constituyentes del hormigón deben cumplir la siguiente normativa:

- Para el cemento, la norma UNE-EN197-1: (2011) "*Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*".
- Los áridos la norma UNE-EN12620:2003+A1: (2009) "*Áridos para hormigón*".
- El agua la norma UNE-EN1008: (2007) "*Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, los ensayos de evaluación y aptitud al uso incluyendo las aguas de lavado de las instalaciones de reciclado de la industria del hormigón, así como el agua de amasado para hormigón*".
- Los aditivos la norma UNE-EN934-2:2010+A1: (2012) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Definiciones y requisitos. Conformidad. Marcado y etiquetado*".
- Y las adiciones, si es el caso, las correspondientes normas según el artículo 5.1.6 de la UNE-EN206-1: (2008).

La EHE-08 sustituye el ensayo de control del hormigón denominado "Control reducido" por el ensayo de "Control indirecto", con la condición de que esta modalidad de control sólo es aplicable en hormigones que poseen un distintivo de calidad oficialmente reconocido.

En el control estadístico de la resistencia del hormigón durante el suministro, la obra se dividirá en lotes de acuerdo a la tabla 3.8.

Límite superior	TIPO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES		
	Elementos o grupos de elementos que funcionan fundamentalmente a compresión (pilares, pilas, muros portantes, pilotes, etc.)	Elementos o grupos de elementos que funcionan fundamentalmente a flexión (vigas, forjados de hormigón, tableros de puente, muros de contención, etc.)	Macizos (zapatas, estribos de puente, bloques, etc.)
Volumen de hormigón	100 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>
Tiempo de hormigonado	2 semanas	2 semanas	1 semana
Superficie construida	500 m <sup>2</sup>	1.000 m <sup>2</sup>	---
Número de plantas	2	2	---

**Tabla 3.8:** Tamaño máximo de los lotes de control de la resistencia, para hormigones sin distintivo de calidad oficialmente reconocido (Tabla 86.5.4.1 de la EHE-08).

Si el hormigón suministrado posee un distintivo oficialmente reconocido podrá aumentarse su tamaño multiplicando los valores de la tabla anterior 3.8 por 5 o por 2, en función de que el nivel de garantía para el que se ha efectuado el reconocimiento sea conforme con el apartado 5.1 o 6 del Anejo n°19.

La conformidad del lote en relación con la resistencia se comprobará a partir de los valores medios obtenidos sobre dos probetas tomadas para cada una de las  $N$  amasadas controladas, de acuerdo con la tabla siguiente:

Resistencia característica especificada en proyecto $f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Hormigones con distintivos de calidad oficialmente reconocido con nivel de garantía conforme con el apartado 5.1 del Anejo 19	Otros casos
$f_{ck} \leq 30$	$N \geq 1$	$N \geq 3$
$35 \leq f_{ck} \leq 50$	$N \geq 1$	$N \geq 4$
$f_{ck} > 50$	$N \geq 2$	$N \geq 6$

**Tabla 3.9:** Conformidad del lote en función de la resistencia (Tabla 86.5.4.2 de la EHE-08).

En cuanto a los criterios de aceptación o rechazo de la resistencia del hormigón en la modalidad de control estadístico, la EHE-08 contempla tres situaciones diferentes según la tabla 3.10:

- Caso 1: Hormigones con distintivo de calidad.
- Caso 2: Hormigones sin distintivo.
- Caso 3: Hormigones sin distintivo, fabricados de forma continua en central de obra o suministrados de forma continua por la misma central de hormigón preparado, en las que se controlan en la obra más de 36 amasadas del mismo tipo de hormigón.

donde:

- $f(\bar{x})$  y  $f(x)$  son funciones de aceptación.
- $x_i$  son cada uno de los valores medios obtenido en las determinaciones de resistencia para cada una de las amasadas.
- $\bar{x}$  es el valor medio de los resultados obtenidos en las  $N$  amasadas ensayadas.
- $\sigma$  es la desviación típica correspondiente a la producción del tipo de hormigón suministrado, en N/mm<sup>2</sup>, y certificado en su caso por el distintivo de calidad.

Caso de control estadístico	Criterio de aceptación	Observaciones
Control de identificación		
1	$x_i \geq f_{ck}$	
Control de recepción		
2	$f(\bar{x}) = \bar{x} - K_2 r_N \geq f_{ck}$	
3	$f(x_{(1)}) = x_{(1)} - K_3 s_{35}^* \geq f_{ck}$	A partir de la amasada 37 <sup>a</sup> 2 ≤ N ≤ 6 A las amasadas anteriores a la 37 <sup>a</sup> , se les aplicará el criterio nº2

**Tabla 3.10:** Criterios para la aceptación del lote (Tabla 86.5.4.3a de la EHE-08).

- $\delta$  es el coeficiente de variación de la producción del tipo de hormigón suministrado y certificado en su caso por el distintivo de calidad.
- $f_{ck}$  es la resistencia característica especificada en el proyecto.
- $K_2$  y  $K_3$  son coeficientes que toman valor según la tabla 86.5.4.3b.
- $x_{(1)}$  es el valor mínimo de los resultados obtenidos en las últimas  $N$  amasadas.
- $x_{(N)}$  es el valor máximo de los resultados obtenidos en las últimas  $N$  amasadas.
- $r_N$  es el valor del recorrido muestral definido como:

$$r_N = x_{(N)} - x_{(1)} \quad (3.1)$$

- $s$  es el valor de la desviación típica definido como:

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

- $s_{35}^*$  es el valor de la desviación típica muestral, correspondiente a las últimas 35 amasadas.

Coeficiente	Número de amasadas controladas (N)			
	3	4	5	6
$K_2$	1.02	0.82	0.72	0.66
$K_3$	0.85	0.67	0.55	0.43

**Tabla 3.11:** Criterios para la aceptación del lote (Tabla 86.5.4.3b de la EHE-08).

La UNE-EN206-1: (2008) establece por su parte una serie de criterios estadísticos relativos a la resistencia a compresión del hormigón: criterio de aceptabilidad tanto para la producción inicial como continua, criterio de identificación o verificación de la pertenencia de un cierto volumen de hormigón a una población conforme y criterio de confirmación de la pertenencia de un miembro individual a una cierta familia de hormigones. En M7-ACHE (2003) se concluye un juicio negativo sobre el uso de la herramienta de las familias de hormigones para el control de conformidad como prevé dicha norma que por otra parte se utiliza prácticamente en toda Europa y en otros países como Argelia por ejemplo. La norma EN 206-1(2000)+A1(2004)+A2(2005) (UNE-EN206-1: 2008) propone para fabricación continua y un número  $n$  de ensayos de resistencia a compresión en el grupo igual o superior a 15, el siguiente criterio de conformidad para la resistencia a compresión:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1,48 \cdot \sigma \quad (3.3)$$

donde  $f_{cm}$  es la resistencia media de los  $n$  resultados,  $f_{ck}$  la resistencia característica y  $\sigma$  la desviación típica de la población.

La utilización de la norma UNE-EN206-1: (2008) se debe realizar teniendo en cuenta el anexo nacional que figura en la misma, que en el caso de España sustituye la ecuación 3.3 por la siguiente ecuación 3.4 para el criterio de conformidad de la resistencia a compresión del hormigón:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1,645 \cdot \sigma \quad (3.4)$$

La norma americana ACI318 (2005) propone una resistencia media a la compresión  $f_{cm}$  cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra  $\sigma$ :

- Si  $f_{ck} \leq 35MPa$  el mayor valor obtenido de las ecuaciones siguientes:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1,34 \cdot \sigma \quad (3.5)$$

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 2,33 \cdot \sigma - 3,5 \quad (3.6)$$

- Si  $f_{ck} > 35MPa$  el mayor valor obtenido de las ecuaciones siguientes:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 1,34 \cdot \sigma \quad (3.7)$$

$$f_{cm} \geq 0,9 \cdot f_{ck} + 2,33 \cdot \sigma \quad (3.8)$$

### 3.4 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

#### 3.4.1 Ensayos caracterización de cementos

##### *Resistencia mecánica*

La resistencia de los cementos utilizados se determina de acuerdo a la norma UNE-EN196-1: (2005), "Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas".



**Figura 3.6:** Realización de morteros para determinación de resistencias mecánicas cementos.



**Figura 3.7:** Probetas para determinación de resistencias mecánicas cementos.

### ***Superficie específica Blaine***

La superficie específica Blaine se determina de acuerdo a la norma UNE80122: (1991) "*Métodos de ensayo de cementos, determinación de la finura*".

### ***Otros ensayos de caracterización***

La pérdida por calcinación se determina de acuerdo a la norma UNE-EN196-2: (2014) "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos*".

La cantidad de residuo insoluble se determina de acuerdo a la norma UNE-EN196-2: (2014) "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos*".

El contenido de sulfatos se determina de acuerdo a la norma UNE-EN196-2: (2014) "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos*".

El contenido en cloruros se determina de acuerdo a la norma UNE-EN196-2: (2014) "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos*".

El tiempo de fraguado y la expansión se determinan de acuerdo a la norma UNE-EN196-3: (2005) "*Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen*".

## **3.4.2 Ensayos caracterización de áridos**

### ***Determinación de la granulometría***

La granulometría de todos los áridos utilizados en el estudio se ha realizado mediante tamizado y de acuerdo con las prescripciones establecidas en la norma UNE-EN933-1: (2012) "*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas, método del tamizado*".

### ***Determinación de la densidad y la absorción***

La densidad y la absorción de los áridos empleados en este estudio se determinaron mediante el procedimiento descrito en la norma UNE-EN1097-6: (2014) "*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua*".

### ***Determinación de la humedad***

Para determinar la humedad que tienen los áridos empleados se ha seguido el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1097-5: (2009) "*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido en agua por secado en estufa*".

### ***Otros ensayos de caracterización - Árido fino***

- Condiciones físico-químicas:

Determinación del equivalente de arena según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN933-8:2012+A1: (2015) "*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de finos. Ensayo del equivalente de arena*".

Determinación de los terrones de arcilla según el procedimiento establecido en la norma UNE7133:1958 (1958) "*Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones*".

Determinación del material retenido por el tamiz 0,063 y que flota en un líquido de peso específico 2 según el procedimiento establecido en la norma UNE7050-3: (1997) "*Tamices y tamizado de ensayo*".

Determinación de compuestos totales de azufre según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

Determinación de sulfatos solubles en ácidos según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

Determinación de cloruros según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

Determinación del contenido en humus según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

### **Otros ensayos de caracterización - Árido grueso**

- Condiciones físico-químicas:

Determinación de terrones de arcilla según el procedimiento establecido en la norma UNE7133:1958 (1958) "*Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones*".

Determinación de partículas blandas según el procedimiento establecido en la norma UNE7134: (1958) "*Determinación de partículas blandas en áridos gruesos y hormigones*".

Determinación del material retenido por el tamiz 0,063 y que flota en un líquido de peso específico 2 según el procedimiento establecido en la norma UNE7050-3: (1997) "*Tamices y tamizado de ensayo*".

Determinación de compuestos totales de azufre según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

Determinación de sulfatos solubles en ácidos según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

Determinación de cloruros según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1744-1:2010+A1: (2013) "*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*".

- Condiciones físico-mecánicas:

Determinación del coeficiente de forma y el índice de lajas según las normas UNE-EN933-3: (2012) "*Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas*".

Determinación del coeficiente de Los Ángeles según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN1097-2: (2010) "*Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*".

### 3.4.3 Ensayos caracterización de aditivos

Se han realizado los siguientes ensayos para su caracterización:

- Marcado y etiquetado según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN934-2:2010+A1: (2012) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Definiciones y requisitos. Conformidad. Marcado y etiquetado*".
- Determinación del peso específico según el procedimiento establecido en la norma UNE83226: (2005) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación del peso específico de aditivos líquidos*".
- Determinación del PH según el procedimiento establecido en la norma UNE83227: (2005) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación del PH*".
- Determinación del extracto seco según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN480-8: (2013) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 8: Determinación del extracto seco convencional*".
- Determinación de cloruros según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN480-10: (2010) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 10: Determinación del contenido de cloruros solubles en agua*".
- Determinación de alcalinos según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN480-12: (2006) "*Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 12: Determinación del contenido de alcalinos en los aditivos*".

## 3.5 PROCEDIMIENTO INDUSTRIAL PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES DE PLANTA

### 3.5.1 Introducción

En el presente apartado se van a describir las instalaciones industriales en las que se han fabricado los hormigones ensayados. Se trata de la planta de producción de hormigón que posee la mercantil HORMIGONES CARLET S.L. en Carlet (Valencia) y que se abastece de los áridos que se producen en las instalaciones anexas. Los áridos son almacenados en silos de hormigón prismáticos tal y como son producidos y la planta de hormigón está diseñada para una capacidad de producción de 25000 m<sup>3</sup> mensuales.

### 3.5.2 Almacenamiento

El objetivo del almacenamiento es conservar las propiedades de los constituyentes del hormigón, facilitar la extracción de los mismos y asegurar la continuidad de la producción. Los métodos de almacenamiento son específicos para cada constituyente.

En el caso de la central de hormigón del estudio, los áridos se almacenan en silos de hormigón en forma de torre prismática. En la parte inferior de los silos se dispone de unas tolvas metálicas en forma de pirámide de vaciado equipadas en el fondo con bocas de salida con cierres de cascos que alimentan cintas pesadoras. En las tolvas metálicas se disponen vibradores.

Los silos de almacenamiento de los áridos y las cintas pesadoras se disponen en forma de T según se observa en la figuras 3.8, 3.9 y 3.10, existiendo tres cintas pesadoras de 7500 kg de capacidad cada una. Estas tres cintas pesadoras descargan en una cinta extractora de 1200 mm de ancho que alimenta la mezcladora según se puede ver en la figura 3.8(b). La capacidad de almacenamiento de los áridos está prevista para poder fabricar 1500 m<sup>3</sup> de hormigón.

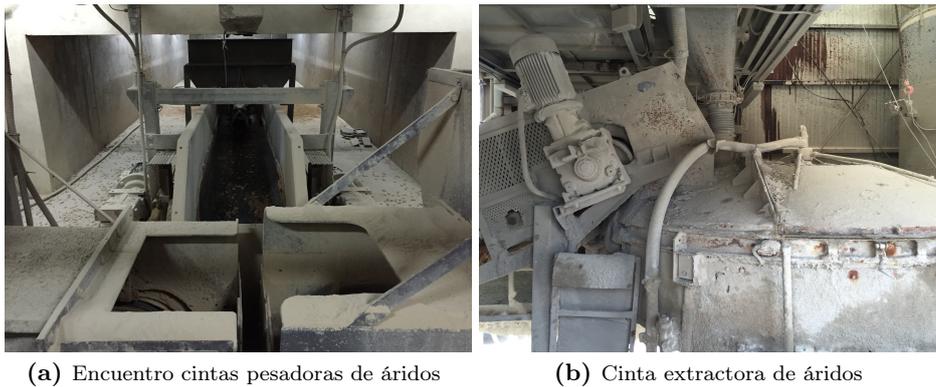


Figura 3.8: Cintas pesadoras y cinta extractora de áridos.

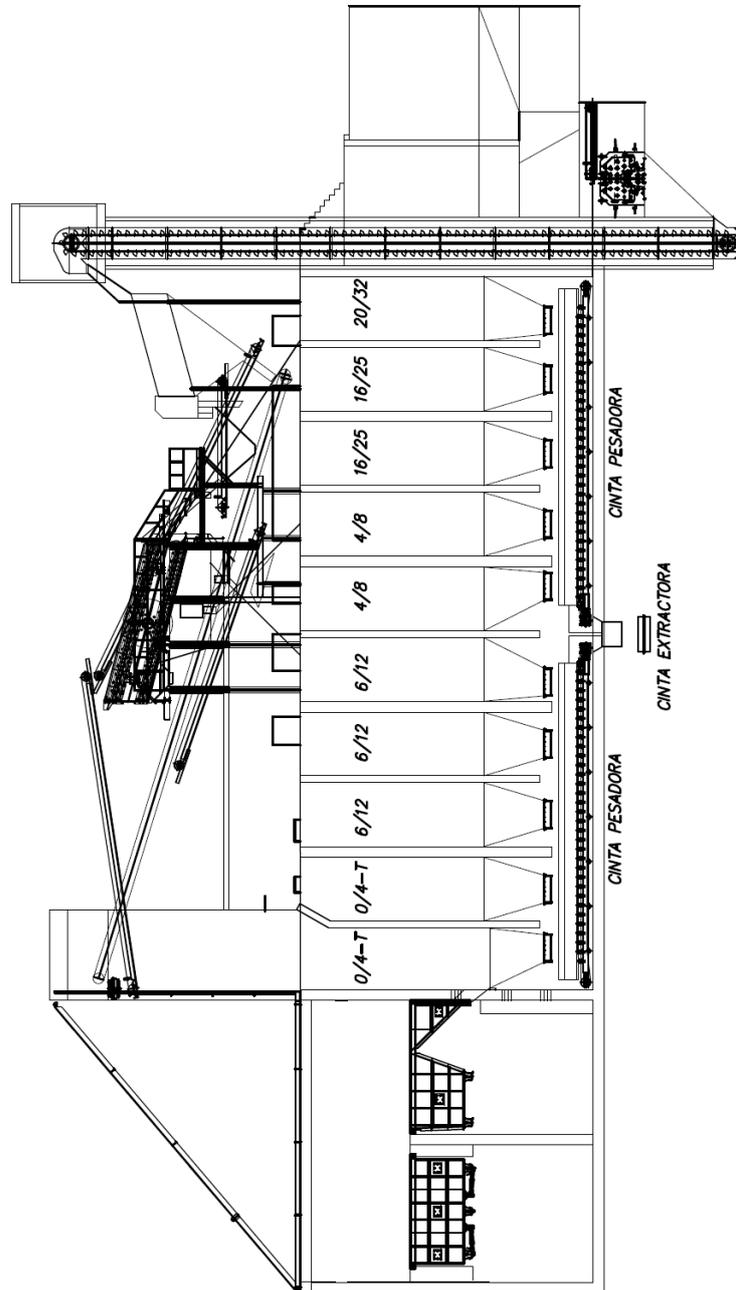


Figura 3.9: Esquema de almacenamiento y descarga de áridos a cinta extractora (1).

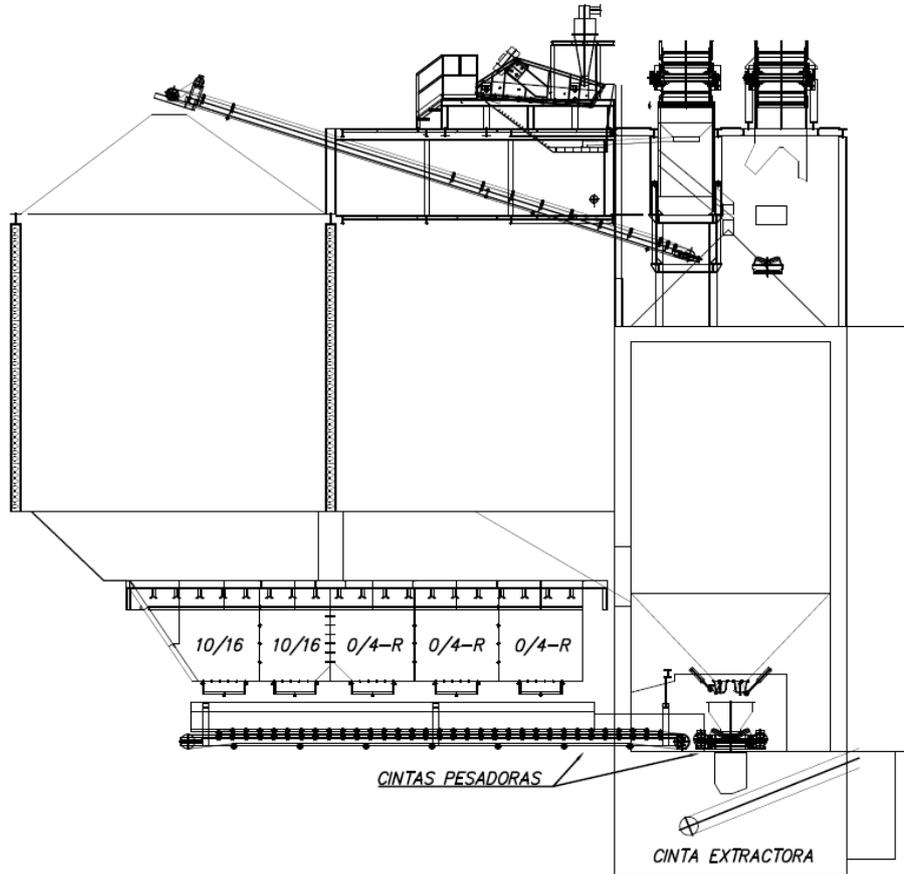


Figura 3.10: Esquema de almacenamiento y descarga de áridos a cinta extractora (2).

En cuanto al almacenamiento del cemento, este se realiza mediante 5 silos metálicos verticales con una capacidad total de 2100 toneladas: 3 silos de 600 t y 2 silos de 150 t. El transporte del cemento desde la base de los silos hasta la báscula de cemento se realiza mediante tornillos sin-fin de diámetro entre 300 y 350 mm.

El aditivo se almacena en dos depósitos de 10000 L dispuestos en una zona contigua a la mezcladora.



Figura 3.11: Elementos de almacenamiento y dosificación de cemento.

### 3.5.3 Dosificación

La dosificación es el conjunto de operaciones que permiten cargar los materiales constituyentes del hormigón en la mezcladora de tal forma que las proporciones nominales fijadas en las fórmulas sean respetadas. En la práctica, las cantidades reales de materiales utilizados en una amasada, fluctúan siempre por debajo de unas tolerancias fijadas por la normativa vigente (UNE-EN206-1: 2008).

La dosificación de los áridos, cemento, agua y aditivos en la instalación se realiza por peso mediante básculas con sus correspondientes células de carga.

Como hemos visto en el apartado anterior, en la parte inferior de los silos de los áridos, se disponen unas tolvas metálicas con bocas de salida con cierres de cascos que alimentan 3 cintas pesadoras de 7500 *kg* cada una. Estas cintas pesadoras disponen de 6 células de carga cada una. Los cinco silos de cemento tienen sus correspondientes tornillos sin-fin para extraer el cemento. Los sin-fines de los 2 silos de 150 *t* descargan directamente a la báscula de cemento. Los 3 silos de 600 *t* descargan a una tolva intermedia de la que sale un sin-fin de 350 *mm* de diámetro que descarga a la báscula de cemento de 1500 *kg* de capacidad, tal y como se ve en la figura 3.11(b).

El aditivo se dosifica por peso en la báscula correspondiente y se descarga en la báscula del agua para que se mezcle convenientemente con la misma. El agua se dosifica también por peso mediante la báscula del agua de 1000 *kg* de capacidad, una vez incorporado en la misma el aditivo.



**Figura 3.12:** Elementos de dosificación en planta.

Hay una pequeña parte de agua de limpieza y de dilución que se dosifica mediante un contador volumétrico.

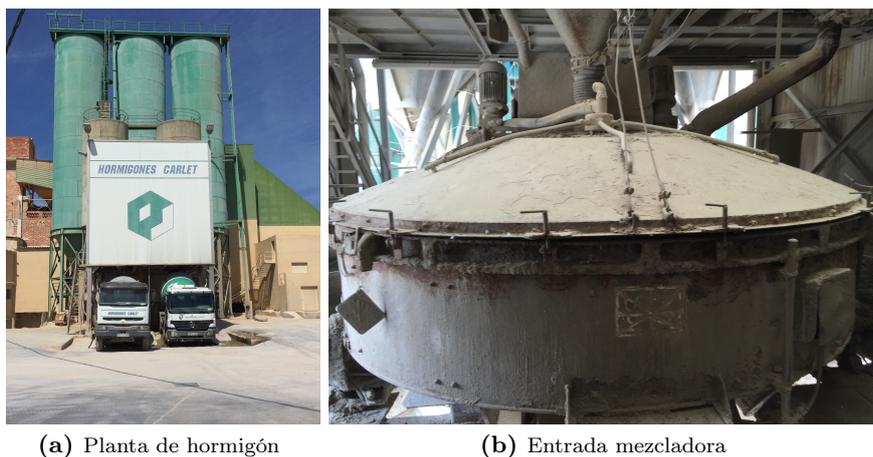
### 3.5.4 Mezclado

Una vez dosificados los materiales constituyentes, son cargados en la mezcladora y mezclados mediante un sistema de palas. La mezcladora que se dispone en la instalación es una turbomezcladora ALQUEZAR 4500/3000 de capacidad técnica de diseño de  $3 m^3$  de hormigón fresco amasado. Esta amasadora ha sido convenientemente modificada para que pueda producir  $3,5 m^3$  de hormigón fresco amasado. Mediante el mezclado, se pretende conseguir un hormigón homogéneo y como es sabido, el mezclado tiene una gran influencia en las características del hormigón resultante. El ciclo de la mezcladora es el siguiente:

- Carga de los materiales constituyentes con una duración de 30 a 35 segundos. Durante este tiempo entran los áridos en la mezcladora. En el intervalo inicial de 10 a 12 segundos entra el cemento y el agua con el aditivo.
- Mezclado de los materiales con una duración de unos 20 segundos aproximadamente desde que están todos los materiales en el interior de la mezcladora.
- Descarga del hormigón durante unos 30 segundos. En los 10 primeros segundos, la compuerta se abre progresivamente mediante 3 posiciones.
- Tiempo de espera entre el fin de la descarga y el inicio de la carga de los materiales del siguiente ciclo, aproximadamente unos 5 segundos.

Así pues, la duración del ciclo sería de unos 90 segundos con lo que la capacidad nominal de la planta es de  $120 m^3$  a la hora. Señalar que la mezcladora tiene una

doble salida de descarga con la finalidad de que no existan tiempos muertos de posicionamiento de los camiones hormigonera. Durante todo el ciclo la mezcladora se encuentra en operación.



**Figura 3.13:** Planta de hormigón y mezcladora.

La medida de la potencia consumida por la mezcladora de la planta utilizada en la fabricación de los hormigones ensayados permite la estimación de la consistencia del hormigón y esta medida, se limita al conocimiento de la intensidad consumida por el motor de la mezcladora mediante un amperímetro (figura 3.14). La lectura del amperímetro de la mezcladora para una amasada de  $3,5 m^3$  nos da los siguientes valores: 62-65 A en vacío, 150-160 A como pico y una estabilización a 125 y 110 A para un asiento en cono de Abrams de 8 y 10 cm respectivamente.

### 3.5.5 Verificación de la trabajabilidad del hormigón en los camiones hormigonera

Una vez finalizado el ciclo en la central, la amasadora descarga el hormigón mediante una de las dos bocas de descarga al camión hormigonera. Como es conocido, mediante la lectura de los valores del manómetro de presión a una determinada velocidad de rotación de la cuba, podemos conocer la consistencia, y en definitiva la trabajabilidad del hormigón. Evidentemente estos valores del manómetro de presión a una determinada velocidad también dependen del volumen de hormigón y del modelo de cuba, así como del estado de las espiras helicoidales.

La flota de camiones hormigonera utilizados por la empresa donde se ha realizado el estudio disponen de un mando en el que se tiene integrado el control de giro constante del tambor o cuba, la selección de la visualización de las vueltas del tambor o la presión de trabajo, tal y como se puede apreciar en las figuras 3.15,



(a) Mezcladora de hormigón

(b) Amperímetro mezcladora

Figura 3.14: Interior de la mezcladora y amperímetro.



(a) Mando de control del tambor

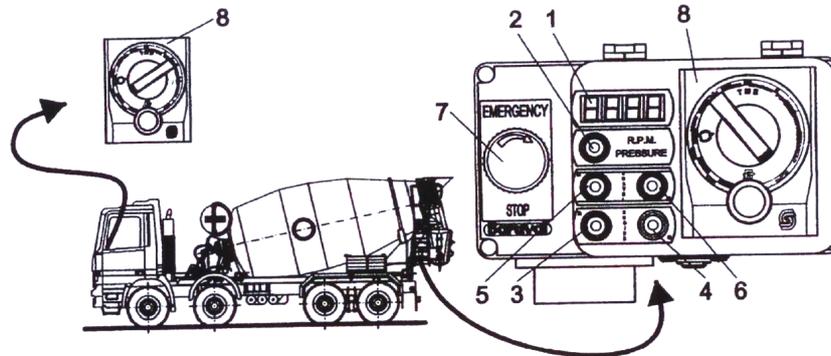
(b) Sensores de presión y velocidad

Figura 3.15: Mando de control y sensores del tambor del camión hormigonera.

3.16 y 3.17. De esta manera se realiza un segundo control de la consistencia, adicional al realizado mediante la lectura del amperímetro de la mezcladora.

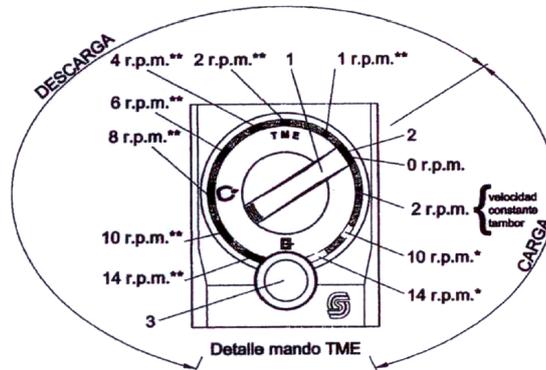
En la figura 3.16 tenemos:

1. Display r.p.m. del tambor/presión de trabajo.
2. Selector de visualización de r.p.m. del tambor/presión de trabajo.
3. Aumento r.p.m. del vehículo.
4. Disminución r.p.m. del vehículo.



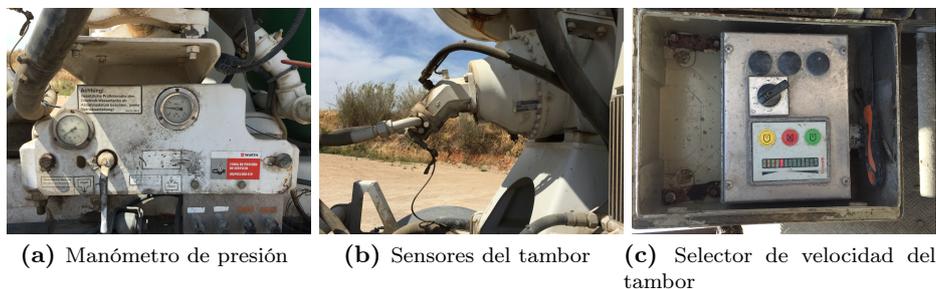
**Figura 3.16:** Mando de control del tambor del camión hormigonera (Baryval 2004).

- 5. Elevación canal giratoria de descarga (OPCIONAL).
- 6. Descenso canal giratoria de descarga (OPCIONAL).
- 7. “Seta” paro de emergencia.
- 8. Selector “Constant Speed Drive”.



**Figura 3.17:** Detalle del selector de velocidad del tambor “Constant Speed Drive” (Baryval 2004).

Si los camiones hormigonera no vinieran equipados con la posibilidad de obtener la lectura de los valores del manómetro de presión de la cuba a una determinada velocidad de rotación de la misma, no se podría tener un mecanismo de control de la consistencia adicional al del amperímetro de la mezcladora (figura 3.18).



**Figura 3.18:** Manómetro de presión, sensores y selector de velocidad del tambor.

## 3.6 ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES

### 3.6.1 Fabricación, curado y preparación de probetas

En todo el estudio llevado a cabo se han utilizado probetas cilíndricas de 15x30 *cm* fabricadas en moldes de acero calibrados. Para la fabricación de las mismas, se siguió el procedimiento establecido por las normas UNE-EN12390-1 (2013) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medida y otras características de las probetas y moldes*" y UNE-EN12390-2: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*".

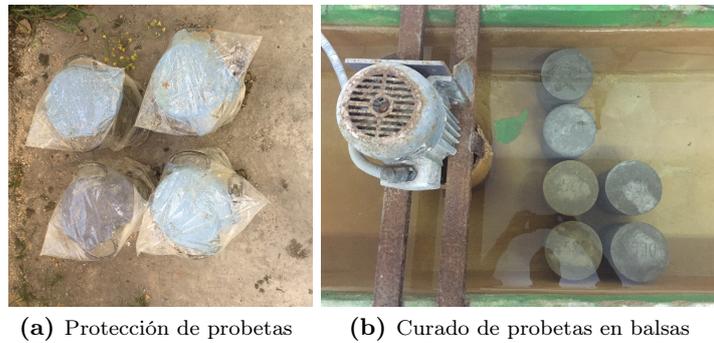
Los moldes se rellenaron con hormigón proveniente de entre 1/4 y 3/4 de la descarga del camión y se rellenaron mediante 3 capas, compactándose cada capa mediante 25 golpes de la barra circular metálica. Con objeto de eliminar las burbujas de aire ocluido y las depresiones ocasionadas en la superficie por la barra de picar, después de compactar cada capa, se golpeó cuidadosamente el molde con un mazo de goma. Una vez finalizado el proceso, se enrasaban y nivelaban con la ayuda de una llana.

Una vez enrasadas las probetas, se procede a proteger las mismas frente a la deshidratación mediante bolsa de plástico con cierre hermético y arpillera previamente humedecida. Las probetas se protegen convenientemente del sol, se recogen a las 24 horas de su confección y se trasladan a las balsas existentes en el laboratorio para su curado normalizado a 20-22 °C como se aprecia en la figura 3.20, ya que la conservación en obra más de 24 horas produce una disminución de la resistencia del hormigón que se constata a todas las edades.

Garín *y col.* (2012) muestran mediante comprobación experimental que el curado al 100% de humedad aumenta de una manera considerable la resistencia a compresión tanto a 7 como a 28 días si se compara con un curado al 50% de humedad. La diferencia entre una probeta curada al 50% de humedad y una al 100% es



**Figura 3.19:** Fabricación y elaboración de probetas.



**Figura 3.20:** Protección y curado de probetas.

únicamente la retracción y en la revisión bibliográfica (García y Horstmann 1985) (Soler 2009) se encuentra que la aparición de fisuras superficiales y la creación de tensiones internas es lo que altera las resistencias mecánicas de una manera significativa. También se observa en Garín *y col.* (2012) que al aumentar la relación  $a/c$ , aumenta la resistencia a compresión al 100 % de humedad en el curado.

Para la realización del ensayo de resistencia a compresión se refrentó la cara superior de las probetas con mortero de azufre para asegurar el paralelismo entre caras y su perpendicularidad respecto al eje de la probeta. Las probetas permanecen en ambiente de laboratorio durante 4 horas antes de la realización del ensayo.

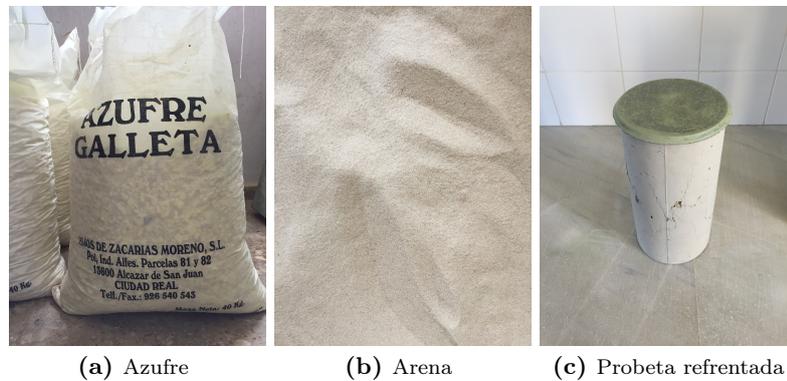


Figura 3.21: Refrentado de probetas.

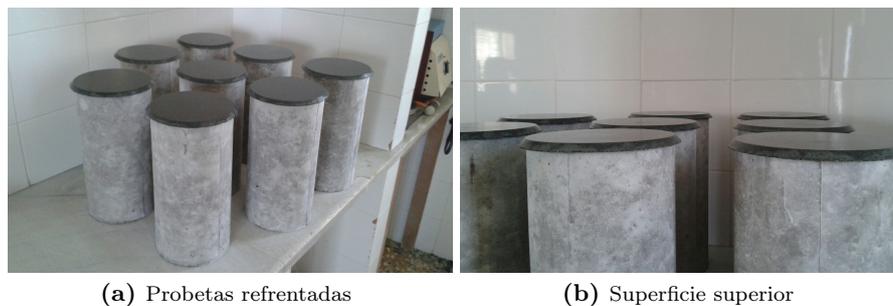


Figura 3.22: Grupo de probetas refrentadas.

### 3.6.2 Determinación de la consistencia del hormigón

La determinación de la consistencia del hormigón se realiza mediante el asentamiento en cono de Abrams, ensayo más conocido y utilizado a nivel mundial y cuyo procedimiento viene descrito en la norma UNE-EN12350-2: (2009). Tal y como se explica en el apartado 2.5.3, el ensayo se realiza de una muestra de hormigón proveniente de entre 1/4 y 3/4 de la descarga del camión, hormigón que servirá también para la realización de las cuatro probetas a ensayar a compresión, dos a 7 y dos a 28 días. En cada una de las muestras, se ha tomado el tiempo transcurrido desde el amasado del hormigón hasta la realización del ensayo de consistencia, así como la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón fresco.

### 3.6.3 Determinación de la densidad del hormigón

#### *Densidad en estado fresco*

Se determina la densidad del hormigón en estado fresco siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN12350-6: (2009) "*Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad*", pesando los moldes vacíos de las probetas antes de su llenado y después de su llenado y compactación. De esta forma se obtiene un valor de la densidad en estado fresco con cada probeta.

#### *Densidad en estado endurecido*

Se determina la densidad del hormigón en estado endurecido siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN12390-7: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*". Se determina la masa y el volumen de las probetas de hormigón endurecido y se calcula la densidad. La determinación de la masa  $m_r$  se realiza en condiciones de recepción y el volumen mediante cálculo. Las probetas se pesan antes de su rotura anotándose su masa  $m_r$  en gramos.

### 3.6.4 Determinación de la resistencia a compresión del hormigón

La resistencia a compresión se determinó según el procedimiento establecido en la norma UNE-EN12390-3: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*".

De cada muestra de hormigón se dispone de 4 probetas (2 para rotura a 7 días y 2 para rotura a 28 días). Transcurridas las 3 horas desde el refrentado de las probetas, y una vez pesadas las mismas para determinar la masa, se realiza el ensayo. Para ello se coloca la probeta en la prensa de ensayos y se aplica una precarga del 10% de la carga máxima del ensayo con el propósito de que el plato superior apoye uniformemente en la cara superior de la probeta. Una vez realizado este paso, se inicia la aplicación de la carga a la velocidad indicada por la norma. Finalizado el ensayo, se lee directamente la tensión máxima de rotura del registro electrónico del equipo.

En la figura 3.23 puede observarse la prensa utilizada en los ensayos. Esta se trata de una máquina de ensayos hidráulica de 1500 kN de capacidad, marca *SUZPECAR-CODEIN*, modelo CME-150, número de serie 1995. La transmisión de la fuerza al equipo se realiza a través de un captador de presión. La conexión entre el equipo de medida y el captador es móvil tanto en el equipo como en el captador. La máquina dispone de un módulo de control MPCA que permite la ejecución totalmente automática de los ensayos.

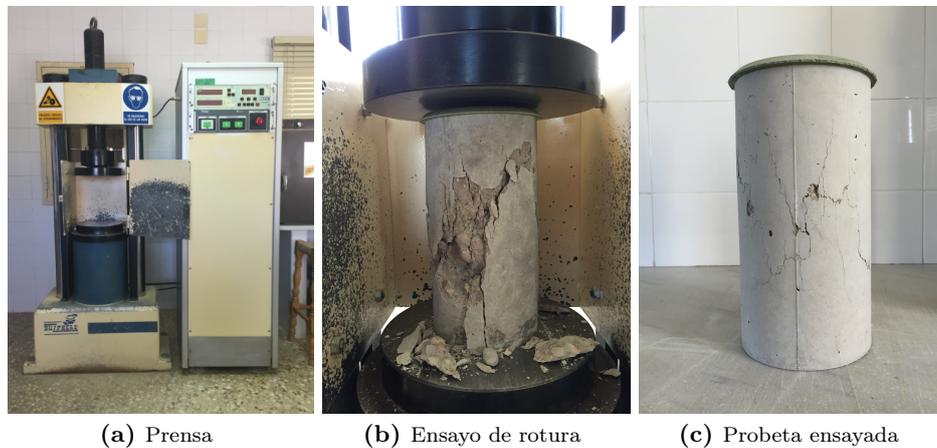


Figura 3.23: Prensa de rotura de probetas.

El módulo de control para máquinas de ensayo automáticas de hormigones MPCA, es un equipo electrónico controlado por microprocesador, que gestiona la máquina de ensayos, valiéndose de un transductor de presión para obtener la fuerza ejercida por el pistón de la máquina sobre la probeta, y de una servoválvula proporcional para poder controlar esta fuerza.

La velocidad de aplicación de la fuerza está servocontrolada por el módulo MPCA y puede variarse mediante los correspondientes botones del frontal, si bien por defecto, al conectar el equipo está establecida en la velocidad indicada por la norma para las probetas cilíndricas de 15x30 cm, es decir, a 885 kg/s, correspondientes a 5 kg/s por  $cm^2$  en probetas de 176,7  $cm^2$  de superficie.

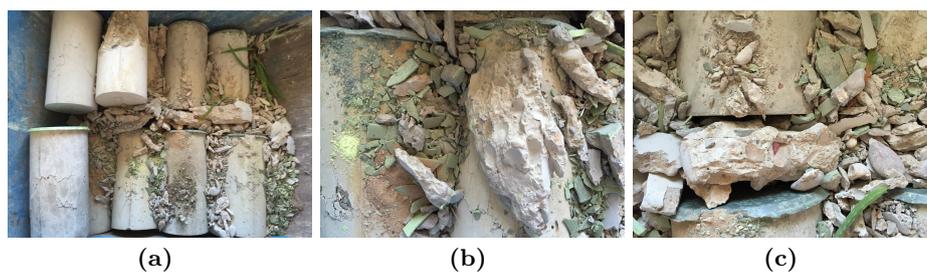


Figura 3.24: Detalle probetas ensayadas.

### 3.7 ENSAYOS INTERLABORATORIOS

El objetivo de los ensayos interlaboratorios es la comparación y evaluación del desempeño del máximo número de laboratorios en la determinación de la densidad, consistencia mediante el asentamiento en cono de Abrams y resistencia a compresión a 7 y 28 días de un hormigón tipo HA-25/B/20/IIa, para unas condiciones de producción y ensayo dadas. Al mismo tiempo, de los resultados de estos ensayos, podríamos evaluar el funcionamiento y la identificación de posibles problemas de los métodos de ensayo de caracterización.

Por iniciativa de la Subcomisión Administrativa para la Calidad de la Edificación (SACE), órgano dependiente de la Comisión para la Calidad de la Edificación (CICE), se ha iniciado la realización de un Plan de Ensayos Interlaboratorios a nivel estatal (EILA-PLAN 2014) de materiales utilizados en las estructuras de edificación, entre ellos el hormigón fresco, y con una duración de 5 años.

El Plan de Contraste se concreta en los aspectos siguientes, evaluados con el cumplimiento de las normas UNE que se indican:

- Toma de muestras de hormigón fresco, según UNE-EN12350-1: (2009) "*Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras*".
- Consistencia del hormigón fresco, según UNE-EN12350-2: (2009) "*Ensayos de hormigón. Parte 2: Ensayo de asentamiento*".
- Fabricación de probetas, según UNE-EN12390-2: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*".
- Resistencia a compresión del hormigón 7 y 28 días, según UNE-EN12390-3: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*".
- Densidad del hormigón, según UNE-EN12390-7: (2009) "*Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*".

Para la organización y desarrollo del Plan, según el mismo, se ha considerado lo indicado en la norma UNE:66543-1IN (1999) y en la norma UNE:66543-2IN (1999) de "*Ensayos de aptitud por intercomparación de laboratorios*". No obstante, cabe señalar que las anteriores normas han sido anuladas por la UNE-EN-ISO/TEC17043: (2010).

Con el señalado Plan de Contraste de Hormigón Fresco, se pretende por una parte la realización de una evaluación técnica de los laboratorios en los ensayos y mediciones habituales y la identificación de los posibles problemas existentes, y por otra parte, la evaluación de las características de funcionamiento de los mé-

todos de ensayo y la determinación de valores de referencia a tener en cuenta en procedimientos concretos.

El hormigón para la realización del ensayo será un hormigón tipo HA-25/B/20/IIa, con una dosificación de cemento de  $275 \text{ kg/m}^3$ , relación agua/cemento de 0,60, tamaño máximo del árido  $20 \text{ mm}$  y consistencia blanda. El cemento dispondrá de distintivo de calidad, los áridos y aditivos utilizados dispondrán de Mercado CE y el agua será de red pública o se dispondrá de ensayos que garanticen el cumplimiento de las exigencias de la EHE (2008). La Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado (ANEFHOP) seleccionará las centrales de cada comunidad autónoma encargadas de la fabricación del hormigón necesario para los ensayos.

El hormigón fabricado se cargará en camión hormigonera, incluso si la central dispone de amasadora fija. Una vez homogeneizado el hormigón en el camión, las muestras se tomarán por todos los laboratorios entre  $1/4$  y  $3/4$  de la descarga, vertiendo el hormigón sobre cada una de las carretillas de los laboratorios. Una vez homogeneizadas las muestras de cada uno de los laboratorios, estos realizarán en primer lugar 2 ensayos de asentamiento mediante cono de Abrams y posteriormente confeccionarán 4 probetas cilíndricas normalizadas de  $15 \times 30 \text{ cm}$ .

Los laboratorios deberán disponer de arpilleras u otro sistema que evite la deshidratación de las probetas hasta su desmoldeo y las mismas se recogerán a las 24 horas de su confección, procediéndose a su traslado hasta las instalaciones de cada laboratorio para su curado normalizado. Cada laboratorio realizará la conservación de probetas tal y como lo realiza habitualmente (curado en cámara húmeda o en balsas), así como refrentará o pulirá las mismas siguiendo su metodología habitual.

Una vez conservadas las probetas conforme a la norma UNE-EN12390-3: (2009), cada laboratorio ensayará a compresión 2 probetas a 7 días y 2 a 28 días, emitiendo las correspondientes Actas de resultados de ensayo con el valor de la resistencia en  $N/mm^2$  y del asentamiento en  $cm$ .

En el ejercicio interlaboratorios del año 2014 (EILA 2014) han participado 145 laboratorios y 18 centrales de hormigón distribuidos entre las 15 comunidades autónomas participantes. En lo que se refiere a la Comunidad Valenciana (Comunidad 13 en el ejercicio) se han realizado todos los ensayos en la central de hormigón de HORMIGONES CARLET S.L., que es donde se han realizado todos los hormigones estudiados en los trabajos de esta tesis, y han participado 15 laboratorios de control. Además, el laboratorio propio de la central, laboratorio en el que se han realizado los ensayos del presente trabajo de investigación, también tomó muestras.

Los resultados obtenidos por cada uno de los 15 laboratorios participantes se pueden ver en la tabla 3.13, en la que se han añadido los valores obtenidos por el laboratorio propio. Con respecto a los resultados de rotura a compresión del hor-

hormigón, tenemos valores medios que oscilan entre  $25,75 \text{ N/mm}^2$  y  $32,30 \text{ N/mm}^2$  a 28 días y entre  $21,30 \text{ N/mm}^2$  y  $26,20 \text{ N/mm}^2$  a 7 días entre los diferentes laboratorios, tal y como se observa en dicha tabla. Además, el laboratorio que da una mayor resistencia a 7 días no se corresponde con el que da una mayor resistencia a 28 días.

Los valores medios del ensayo en cono de Abrams varían entre 6 y 10 *cm*, no encontrándose correlación alguna entre el descenso en cono de Abrams y la resistencia a compresión del hormigón. La densidad del hormigón en estado fresco varía de  $2395 \text{ kg/m}^3$  a  $2450 \text{ kg/m}^3$ .

El laboratorio codificado como 142 da resultados cuestionables en cuanto al ensayo de asentamiento en cono de Abrams y de resistencia a compresión a 28 días. Los valores estadísticos de la resistencia media a 7 y 28 días y sus respectivas desviaciones típicas se puede observar en la tabla 3.12.

Valores estadísticos	Resistencia media $f_{cm}$	Desviación típica $\sigma$
Resistencia a 7 días	24,15	1,509
Resistencia a 28 días	29,90	1,863

**Tabla 3.12:** Valores estadísticos ensayos interlaboratorios.

A la vista de los resultados obtenidos y de las diferencias observadas, tanto en las resistencias como en la consistencia, podría plantearse si el origen del problema pudiera radicar en los propios ensayos de caracterización. Estudiando los coeficientes de variación, estos nos dan un valor de 0,062 tanto para las resistencias a 7 como a 28 días. Garrido (2003) citado por Cánoves (2012) considera aceptables valores del coeficiente de variación  $<0,14$  para resultados de 35 ensayos para una misma central de hormigón. En los resultados obtenidos en nuestro estudio, que se presentan en el apartado 5.4.6, se puede observar que los coeficientes de variación de la resistencia a 28 días son de 0,092 y 0,090 para los HA-25 y HA-30 respectivamente. Sin embargo, en la tesis doctoral de Cánoves (2012), estos coeficientes de variación aumentan a valores superiores a 0,14. Exactamente, se tienen valores del coeficiente de variación para la resistencia de 0,147 y 0,146 para los HA-25 y HA-30/B/20/IIa respectivamente y en el caso de la resistencia a 7 días el valor llega a 0,161 para los HA-25/B/20/IIa. Estos valores del coeficiente de variación, entendemos que son elevados aún considerando que la base de datos está realizada con ensayos correspondientes a diferentes centrales.

L	CH	Cemento		Cono Abrams			Probetas rotura 7 días			Probetas rotura 28 días			Recurrir o relativo (%)	IN		
		Tipo	Marca	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Valor 1 (cm)	Valor 2 (cm)	Valor medio	Valor 1 (N/mm <sup>2</sup> )	Valor 2 (N/mm <sup>2</sup> )	Valor medio (N/mm <sup>2</sup> )	Valor 1 (N/mm <sup>2</sup> )	Valor 2 (N/mm <sup>2</sup> )			Valor medio (N/mm <sup>2</sup> )	
99	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2422	6	7	6,5	25,50	25,50	25,50	32,00	31,00	31,50	3,00	*	
100	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2418	9	9	9	25,80	26,60	26,20	31,40	31,20	31,30	0,00	-	
101	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2430	10	9	9,5	23,00	22,50	23,00	30,50	31,50	31,00	3,20	-	
102	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2450	8	8	8	24,50	24,40	24,45	31,50	30,60	31,10	0,03	-	
103	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2424	9	9	9	26,00	25,40	25,70	29,60	29,90	29,75	1,00	-	
104	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2430	9	9	9	24,60	23,50	24,10	28,50	27,80	28,10	2,50	0,7	
105	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2421	8	8	8	23,13	22,25	22,69	26,46	28,42	27,44	3,60	-	
138	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2395	8	9	8,5	24,00	23,30	23,65	30,80	30,80	30,80	0,00	-	
139	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2430	8	8,5	8	25,00	25,50	25,25	32,00	31,00	31,50	1,87	U=+-1,0 N/mm <sup>2</sup>	
140	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2420	8	8	8	25,00	25,00	25,00	30,00	29,00	29,50	2,79	U=+-1,0 N/mm <sup>2</sup>	
141	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2440	11	9	10	22,70	22,80	22,75	-	28,40	30,00	28,20	-	
142	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2395	6	6	6	22,00	22,50	22,25	2,00	25,50	26,00	25,75	3,00	1,1
143	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2420	7	8	8	22,50	23,50	23,00	4,30	29,50	29,50	29,50	0,00	-
144	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	2427	7	7	7	25,80	26,00	25,90	-	31,60	32,10	31,90	-	-
145	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	-	8	8	8	21,40	21,20	21,30	1,00	27,70	27,90	27,80	1,00	-
L.P.	1	II/A-V 42,5R	Hoicim	-	8	8	8	25,70	25,30	25,50	-	32,20	32,40	32,30	-	-

Tabla 3.13: Resultados enviados por los laboratorios y laboratorio propio L.P.

## Capítulo 4

# RESULTADOS DE ENSAYOS Y BASES DE DATOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de los ensayos de caracterización realizados, tanto a los materiales como al hormigón, así como las bases de datos construidas con dichos ensayos. Se realizan ensayos a los cementos, aditivos, áridos y al hormigón fabricado.

En lo que se refiere al hormigón, se elaboran dos bases de datos: una general con 2413 muestras de hormigón tomadas desde el 14/07/2004 hasta el 03/02/2014 y una reducida con 16 muestras tomadas entre el 18/05/2015 y el 22/05/2015.

### 4.2 HORMIGÓN

La base de datos construida correspondiente a los ensayos de hormigón, así como a sus características y dosificaciones, consta de 2413 muestras de hormigón con dos roturas a 7 días y dos a 28 días por muestra. Un extracto de esta base de datos se encuentra en el Anexo A. En ella se puede observar la siguiente información (por columnas de izquierda a derecha):

- Identificación de la muestra - *IF*.
- Fecha realización probetas - *FechaFabPro*.
- Tipo de hormigón - *TipoHor*.

- Contenido de cemento teórico -  $CemTeo$  ( $kg/m^3$ ).
- Tipo de cemento -  $TipoCem$ .
- Resistencia verdadera del cemento -  $ResisVerdCem$  ( $N/mm^2$ ).
- Medida de la consistencia. Descenso en el cono de Abrams -  $ConA$  ( $cm$ ).
- Tiempo transcurrido a la realización del ensayo -  $trCA$  ( $minutos$ ).
- Temperatura ambiente -  $Tamb$  ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura del hormigón -  $Thorm$  ( $^{\circ}C$ ).
- Hora de fabricación de la probeta -  $HoraFabPro$ .
- Tipo de aditivo -  $TipAd$ .
- Contenido de aditivo sobre el peso del cemento -  $AdiTeo$  -  $AdiReal$  (%).
- Edades rotura -  $DiasEP1$  -  $DiasEP2$  (días).
- Peso de las probetas -  $Pes01$  : 4 ( $gr$ ).
- Resistencia a 28 y a 7 días -  $f_{c28}$  y  $f_{c7}$  ( $N/mm^2$ ).
- Tipo de fibras empleadas -  $Fib$ .
- Peso de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos -  $kg1$  : 7 ( $kg/m^3$ ).
- Contenido real de cemento -  $kg0$  ( $kg/m^3$ ).
- Peso de la mezcla sin agua ni aditivo -  $kgTotal$  ( $kg/m^3$ ).
- Contenido de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos en la dosificación según Bolomey -  $tb_i$  (%).
- Contenido de cemento en la dosificación -  $tb0$  (%).
- Tamaño máximo de la mezcla -  $D_{max}$  ( $mm$ ).
- Módulos granulométricos de los áridos -  $mg_i$ .
- Contenido de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos en la dosificación según Fuller -  $t_i$  (%).
- Módulo granulométrico de la mezcla -  $MG$ .

Las cuatro primeras columnas se refieren a la identificación de la muestra mediante un código numérico de cuatro dígitos correlativos, la fecha de realización de las probetas, el tipo de hormigón al que se corresponde la muestra y el contenido

de cemento teórico en  $kg/m^3$ . En las dos columnas siguientes se indica el tipo de cemento empleado en el hormigón correspondiente a la muestra y la resistencia verdadera del mismo. Cuando se realizan los ensayos sobre el hormigón, primero se realiza el ensayo de asentamiento en cono de Abrams y a continuación se realizan cuatro probetas para ensayar dos a 7 días y dos a 28 días, anotándose el tiempo transcurrido desde la finalización del mezclado hasta la realización de las probetas, así como la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón y la hora de fabricación de las probetas.

Las siguientes columnas se corresponden con el tipo de aditivo utilizado y el contenido de aditivo en peso del cemento en %. Después se anotan las fechas a las que se realizan realmente las roturas, ya que estas pueden ser diferentes a 7 o 28 días por razones obvias. Después se han anotado el peso de las cuatro probetas ensayadas y el valor de la resistencia de cada probeta ensayada.

La columna siguiente tiene que ver con las fibras en la dosificación. *Fib0* se corresponde con la no existencia de fibras en la dosificación, *Fib1* indica 10 bolsas de 600 gr de fibras de polipropileno para 10  $m^3$  de hormigón, *Fib2* se corresponde con 5 cajas de 20 kg de fibras de acero para 10  $m^3$  de hormigón y *Fib3* nos indica una mezcla de 10 bolsas de 600 gr de fibras de polipropileno más 5 cajas de 20 kg de fibras de acero cada 10  $m^3$  de hormigón.

Las columnas a continuación nos indican los pesos reales medidos por las básculas de dosificación para cada una de las siete fracciones granulométricas posibles, el peso real del cemento dosificado y el peso total de los componentes sólidos (sin agua ni aditivo). Después tenemos los contenidos de las diferentes fracciones granulométricas y del cemento en porcentaje en la dosificación según Bolomey, el tamaño máximo de la mezcla, los módulos granulométricos de las diferentes fracciones empleadas, el contenido de las mismas en la dosificación según Fuller y el módulo granulométrico de la mezcla. Evidentemente las variables anteriores están algunas de ellas relacionadas.

De las anteriores variables son todas ciertas, salvo la resistencia verdadera del cemento ( $N/mm^2$ ) y los módulos granulométricos de los áridos y de la mezcla que son variables estimadas. Para la resistencia verdadera del cemento se han tomado los datos facilitados por los fabricantes para los diferentes periodos de suministro. En cuanto a los módulos granulométricos de los áridos se han estimado de los ensayos granulométricos correspondientes a cada periodo. El módulo granulométrico de la mezcla  $MG$  se corresponde a la mezcla sin cemento  $MG_{Mezcla\ sin\ C.}$ , y se ha calculado con los contenidos de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos en la dosificación según Fuller  $t_i$  (%) y los módulos granulométricos de los áridos  $mg_i$  estimados.

Posteriormente se ha elaborado una base de datos reducida con el objetivo de analizar también la influencia de la relación agua/cemento, ya que este dato no figura en la base de datos general, dado que como se ha venido señalando, el conocimiento exacto de la relación agua/cemento implica una serie de inconvenientes

en la producción industrial de hormigones de planta, con lo que generalmente no se dispone de información para el conocimiento exacto de esta relación. Esta base de datos reducida consta de 16 muestras de hormigón y se encuentra detallada en su totalidad en el Anexo A. En esta, no se indica la hora de fabricación de la probeta y se pueden observar la siguiente información adicional a la de la base de datos general (por columnas de izquierda a derecha):

- Contenido de agua de la dosificación sin tener en cuenta la humedad de los áridos -  $a$  ( $l$ ).
- Humedad de la arena lavada -  $H.AL$  (%).
- Humedad de la arena triturada -  $H.AT$  (%).
- Relación agua total/cemento -  $a/c$ .
- Relación cemento/agua total -  $c/a$ .

Como se ha señalado, de la base de datos general, se presentan 35 ensayos correspondientes a los identificados como 8525-1 hasta 8564-1 (fechas de realización del 29/11/2012 al 3/12/2014) en el Anexo A, en 58 columnas en presentación vertical (ocupando las columnas de la A a la BF).

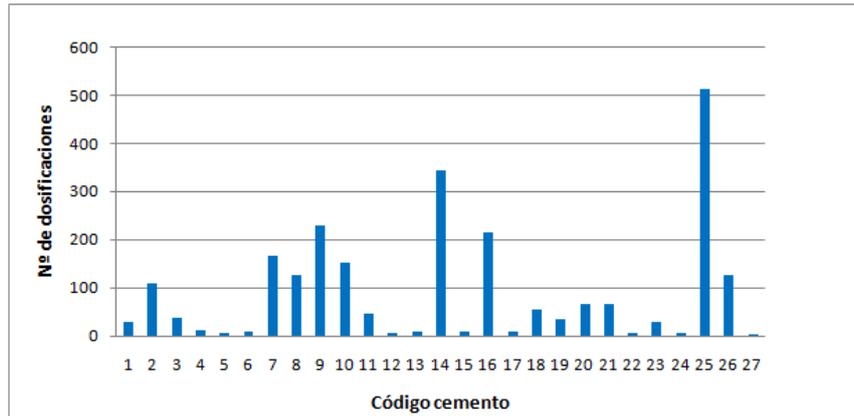
La base de datos reducida, correspondiente a los ensayos identificados como 8571-1 hasta 8587-1 (ensayos realizados entre el 18/05/2015 y el 22/05/2015), se presenta completa en el Anexo A, en 62 columnas en presentación horizontal (ocupando las columnas de la A a la BJ).

### 4.3 CEMENTOS

De todos los componentes del hormigón, el más importante e influyente sobre sus propiedades mecánicas es el cemento. En general, a mayores contenidos de cemento en las dosificaciones, se obtienen mayores resistencias a compresión. También aumentan las resistencias, para la misma cantidad de cemento, si aumenta la resistencia verdadera del cemento. Los 27 cementos empleados en este estudio son los que se presentan en la lista del apartado 3.2.1 Cementos, con sus correspondientes códigos asignados.

En la figura 4.1 se muestra la distribución de frecuencias de cada cemento empleado en las dosificaciones de la base de datos general construida, observándose cierta desigualdad en el uso de los cementos. Esto anterior es debido a diferentes razones entre las que se encuentra el amplio período de tiempo en el se ha realizado la base de datos, las diferentes circunstancias del sector cementero con dificultades de aprovisionamiento entre el 2004 y el 2007 y la posibilidad de almacenamiento de cemento de la central con una capacidad total de 2100  $t$  que permite mayor flexibilidad en el aprovisionamiento. Así pues, nos encontramos con diferentes

cementos adquiridos o bien por cuestiones económicas o bien por cuestiones de aprovisionamiento.



Código	Frecuencia	Porcentaje
1	29	1,2
2	109	4,5
3	38	1,6
4	13	,5
5	5	,2
6	8	,3
7	166	6,9
8	125	5,2
9	228	9,4
10	153	6,3
11	47	1,9
12	5	,2
13	8	,3
14	344	14,3
15	9	,4
16	215	8,9
17	9	,4
18	56	2,3
19	34	1,4
20	65	2,7
21	65	2,7
22	5	,2
23	28	1,2
24	7	,3
25	514	21,3
26	126	5,2
27	2	,1
Total	2413	100,0

Figura 4.1: Recuento de dosificaciones realizadas con cada cemento.

Señalar que 8 cementos de los 27 utilizados se corresponden con cementos de importación. El cemento codificado como n°25 se trata de un cemento de importación ampliamente utilizado y en el que los hormigones fabricados con el mismo han sido sometidos a mayores ensayos por lógica precaución.

En la figura siguiente 4.2 se muestra la distribución de frecuencias de cada tipo de cemento según la norma UNE-EN197-1: (2011) empleado, en forma de histograma:

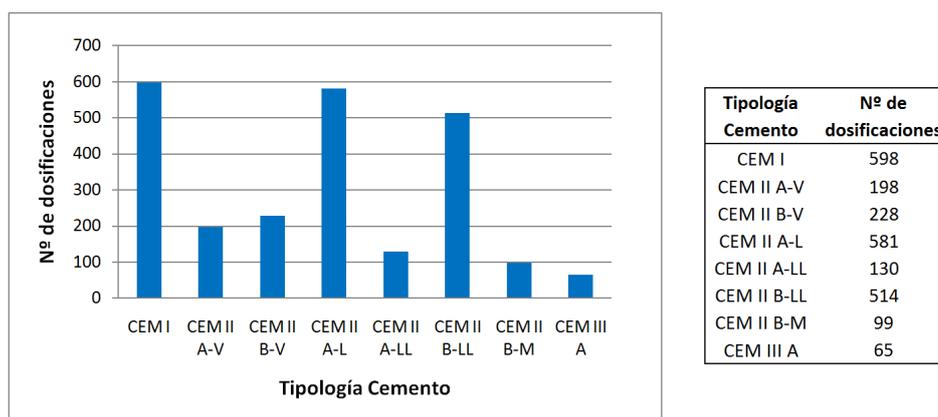


Figura 4.2: Nº de dosificaciones de cada tipo de cemento empleado.

La distribución de frecuencias en función de la clase resistente del cemento en forma de histograma, es la siguiente (figura 4.3):

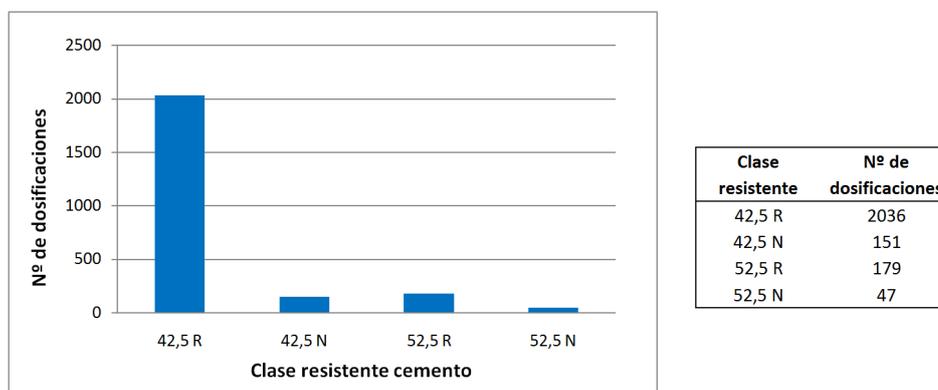


Figura 4.3: Nº de dosificaciones de cada clase resistente.

De las dos figuras anteriores 4.2 y 4.3, se deduce que durante el período de tiempo en el que se han realizado los ensayos, el cemento tipo II se ha utilizado en el 72,52% de las dosificaciones y el tipo I en el 24,78%, siendo la clase resistente más utilizada la 42,5 con el 90,63% y no habiéndose utilizado la clase resistente 32,5.

Tipos principales	Designación y denominación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)	Composición (proporción en masa <sup>b</sup> )													Componentes minoritarios adicionales			
		Componentes principales																
		Clinker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana natural	Puzolana natural calcinada	Ceniza volcánica silícea	Ceniza volcánica calcárea	Esquisto calcinado	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza	Caliza				
K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL	L	LL	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con escoria	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	80-94	-	-	-	21-35	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con esquisto calcinado	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con caliza	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con caliza	80-88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland compuesto <sup>c</sup>	65-79	<----->	<----->	12-20	<----->	<----->	<----->	<----->	21-35	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	0-5
	Cemento de horno alto	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento puzolánico <sup>c</sup>	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento puzolánico <sup>c</sup>	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento compuesto <sup>c</sup>	65-89	-	<----->	11-35	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	0-5
	Cemento compuesto <sup>c</sup>	45-64	-	<----->	36-55	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	0-5
	Cemento compuesto <sup>c</sup>	40-64	18-30	-	<----->	18-30	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	0-5
Cemento compuesto <sup>c</sup>	20-38	31-49	-	<----->	31-49	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	<----->	0-5	

Tabla 4.1: Composición de los distintos tipos de cementos comunes según la norma UNE-EN197-1: (2011).

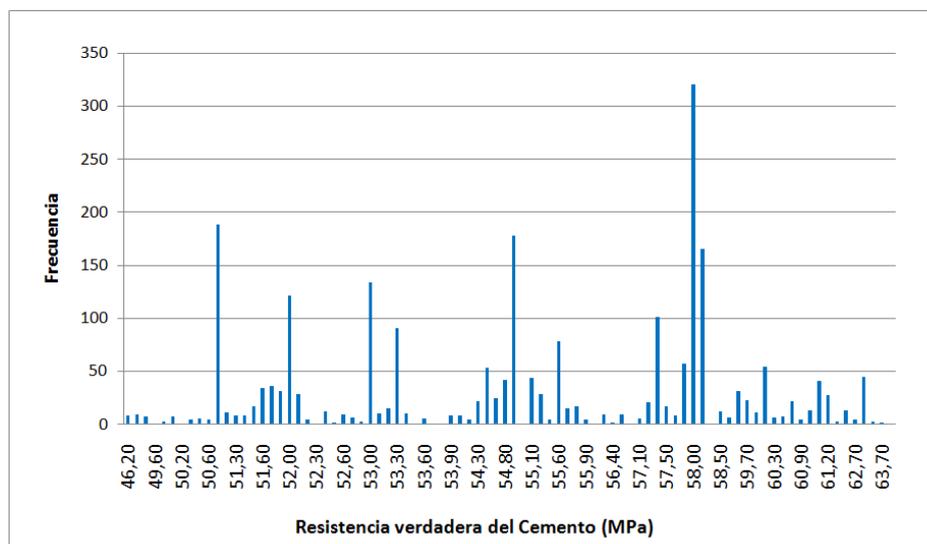
a Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.

b La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.

c En los cementos Portland compuestos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en los cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B, en los cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del clinker se deben declarar en la designación del cemento (véanse los ejemplos en el capítulo 8).

Esto anterior es coherente con lo visto en el análisis del sector, teniendo en cuenta que en las centrales de hormigón preparado se utiliza un porcentaje superior al uso medio en España de cemento tipo II y que el cemento de clase resistente 32,5 se utiliza en albañilería y fabricación de suelo cemento y el 52,5 en prefabricación principalmente.

En la figura 4.4 observamos el histograma de frecuencias y parámetros estadísticos de la resistencia verdadera de los cementos, pudiéndose apreciar diferentes campanas gaussianas que se corresponden con los diferentes tipos de cemento.

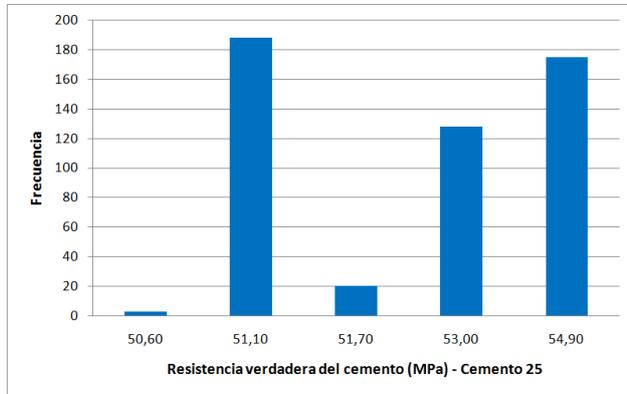


Estadístico	Valor
Media	55,5892
Mediana	55,1000
Desv. tip.	3,29543
Rango	17,70
Mínimo	46,20
Máximo	63,90

Figura 4.4: Resistencia verdadera de los cementos utilizados.

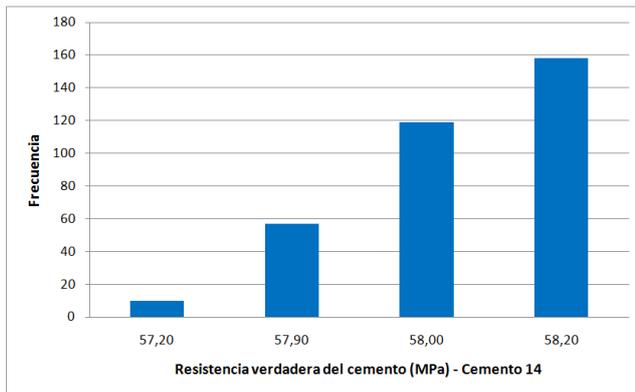
En la figura 4.5 y en las dos siguientes 4.6 y 4.7, se puede observar el histograma de frecuencias y los parámetros estadísticos particularizados para tres cementos, correspondientes con los codificados con los números 25, 14 y 7.

Ya se ha comentado que la resistencia verdadera del cemento es una variable estimada, dado que se ha tomado el valor medio de los ensayos facilitados por el fabricante teniendo en cuenta los valores de su laboratorio propio y los valores del laboratorio de contraste, para cada período de suministro de cemento discre-



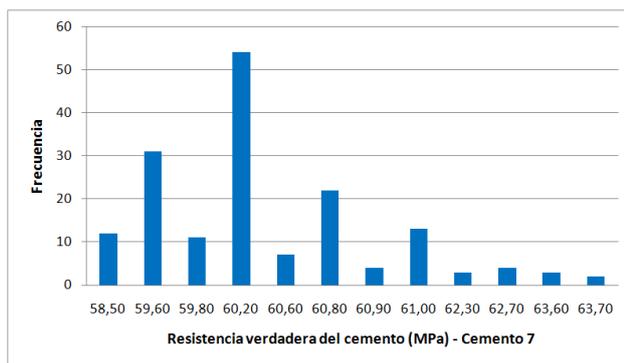
Estadístico	Valor
Media	52,8874
Mediana	53,0000
Desv. típ.	1,62521
Rango	4,30
Mínimo	50,60
Máximo	54,90

Figura 4.5: Resistencia verdadera del cemento N° 25.



Estadístico	Valor
Media	58,0520
Mediana	58,0000
Desv. típ.	,18982
Rango	1,00
Mínimo	57,20
Máximo	58,20

Figura 4.6: Resistencia verdadera del cemento N° 14.



Estadístico	Valor
Media	60,3183
Mediana	60,2000
Desv. típ.	,99113
Rango	5,20
Mínimo	58,50
Máximo	63,70

Figura 4.7: Resistencia verdadera del cemento N° 7.

tizado; generalmente se han tomado los valores medios mensuales. Nosotros por nuestra cuenta hemos realizado ensayos de resistencia mecánica del cemento periódicamente, obteniendo sistemáticamente valores inferiores a los facilitados por el fabricante para cada cemento ensayado, no manteniéndose la diferencia entre los datos facilitados por los fabricantes y los propios constante. Como muestra se facilita la tabla 4.2 correspondiente al cemento empleado en los ensayos recogidos en la base de datos reducida. En este caso se trata de un cemento tipo CEM II/A-V 42,5R cuya resistencia a compresión facilitada por el fabricante es de  $52 \text{ N/mm}^2$ , siendo la resistencia promedio obtenida en los ensayos de caracterización de este cemento en concreto inferior a  $45 \text{ N/mm}^2$ , tal y como se puede observar en dicha tabla 4.2 (resultados entre  $44,0$  y  $45,6 \text{ N/mm}^2$ , con  $44,53 \text{ N/mm}^2$  de media).

Id. Probeta	Tipo Cemento	Fecha Muestra	Resistencia Fabricante ( $\text{N/mm}^2$ )	Fecha Rotura	Resistencia ( $\text{N/mm}^2$ )	Rresistencia Promedio ( $\text{N/mm}^2$ )
F - 43 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	18/05/2015	52,0	24/09/2015	43,2	44,0
F - 43 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	18/05/2015	52,0	24/09/2015	45,6	
F - 43 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	18/05/2015	52,0	24/09/2015	46,0	45,0
F - 43 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	18/05/2015	52,0	24/09/2015	44,0	
F - 43 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	18/05/2015	52,0	24/09/2015	44,5	44,4
F - 43 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	18/05/2015	52,0	24/09/2015	44,4	
F - 44 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	19/05/2015	52,0	24/09/2015	46,0	45,7
F - 44 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	19/05/2015	52,0	24/09/2015	45,5	
F - 44 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	19/05/2015	52,0	24/09/2015	46,0	45,6
F - 44 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	19/05/2015	52,0	24/09/2015	45,2	
F - 44 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	19/05/2015	52,0	24/09/2015	45,0	45,2
F - 44 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	19/05/2015	52,0	24/09/2015	45,5	
F - 45 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	20/05/2015	52,0	24/09/2015	44,5	44,5
F - 45 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	20/05/2015	52,0	24/09/2015	44,6	
F - 45 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	20/05/2015	52,0	24/09/2015	44,3	44,2
F - 45 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	20/05/2015	52,0	24/09/2015	44,1	
F - 45 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	20/05/2015	52,0	24/09/2015	44,2	44,2
F - 45 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	20/05/2015	52,0	24/09/2015	44,3	
F - 46 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	21/05/2015	52,0	24/09/2015	44,1	44,1
F - 46 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	21/05/2015	52,0	24/09/2015	44,2	
F - 46 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	21/05/2015	52,0	24/09/2015	44,1	44,1
F - 46 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	21/05/2015	52,0	24/09/2015	44,2	
F - 46 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	21/05/2015	52,0	24/09/2015	44,0	44,3
F - 46 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	21/05/2015	52,0	24/09/2015	44,7	
F - 47 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	22/05/2015	52,0	24/09/2015	44,2	44,3
F - 47 - 1	CEM II/A-V 42,5 R	22/05/2015	52,0	24/09/2015	44,5	
F - 47 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	22/05/2015	52,0	24/09/2015	44,6	44,3
F - 47 - 2	CEM II/A-V 42,5 R	22/05/2015	52,0	24/09/2015	44,1	
F - 47 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	22/05/2015	52,0	24/09/2015	44,3	44,1
F - 47 - 3	CEM II/A-V 42,5 R	22/05/2015	52,0	24/09/2015	44,0	

Tabla 4.2: Resultados ensayos resistencia cemento.

#### 4.4 ADITIVOS

En la tabla 4.3 observamos la frecuencia y porcentaje de cada uno de los tipos de aditivos empleados en el estudio.

Tipo aditivo	Frecuencia	Porcentaje
0	2	,1
1	2031	84,2
2	314	13,0
3	1	,0
4	3	,1
5	1	,0
6	5	,2
7	2	,1
8	2	,1
9	10	,4
10	15	,6
11	3	,1
12	1	,0
14	10	,4
15	1	,0
16	2	,1
17	8	,3
18	1	,0
19	1	,0
Total	2413	100,0

**Tabla 4.3:** Frecuencia de aditivos utilizados.

Como ya se ha comentado con anterioridad, el aditivo 1 y el 2 son un aditivo idéntico al que se le modificó en su día el nombre comercial, según la versión del fabricante. El aditivo 19 es la suma de dos aditivos y el aditivo 13 es un éter policarboxílico modificado que se ha utilizado para fabricar hormigones autocompactables y que, evidentemente, se han eliminado de la base de datos, con lo que no figura ninguna dosificación fabricada con este aditivo en nuestro estudio.

Tal y como se vio en el capítulo correspondiente del estado del conocimiento, los aditivos plastificantes y superplastificantes no fluidifican idénticamente con diferentes cementos. A tal efecto se han realizado diferentes ensayos del cono de Marsh para pastas de cemento elaboradas con cementos diferentes. En las dos tablas siguientes 4.4 y 4.5 se presentan los resultados del ensayo del cono de Marsh realizados con dos cementos CEM II/A-V 42,5R de dos fabricantes diferentes, siendo el aditivo plastificante tipo lignosulfonato POZZOLITH 375NE, que como se ha indicado es el que mayor frecuencia de utilización presenta.

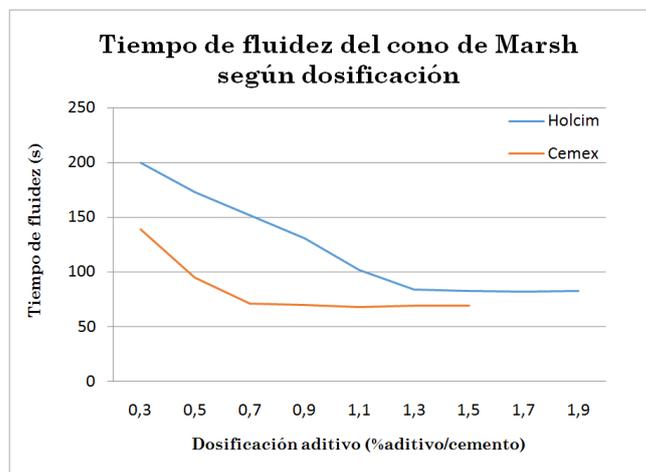
Cemento <b>Holcim CEM II/A-V 42,5 R</b>	DOSIFICACIONES (g)									
	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	% DOSIFICACIÓN DE ADITIVO									
<b>MasterPozzolith 375-NE</b>	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	
AGUA ADITIVO	3	5	6	8	10	12	14	16	18	
AGUA AÑADIDA	997	995	994	992	990	988	986	984	982	
AGUAS TOTAL	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
	CARACTERÍSTICAS DE FLUIDEZ (Cono de Marsh)									
Tiempo de vaciado (s)	200	173	152	131	102	84	83	82	83	

**Tabla 4.4:** Ensayo del cono de Marsh para el cemento CEM II/A-V 42,5R de Holcim.

Cemento <b>Cemex CEM II/A-V 42,5 R</b>	DOSIFICACIONES (g)							
	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	% DOSIFICACIÓN DE ADITIVO							
<b>MasterPozzolith 375-NE</b>	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	
AGUA ADITIVO	3	5	6	8	10	12	14	
AGUA AÑADIDA	997	995	994	992	990	988	986	
AGUAS TOTAL	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
	CARACTERÍSTICAS DE FLUIDEZ (Cono de Marsh)							
Tiempo de vaciado (s)	139	95	71	70	68	69	69	

**Tabla 4.5:** Ensayo del cono de Marsh para el cemento CEM II/A-V 42,5R de Cemex.

En la figura 4.8 se representan los valores del tiempo de fluidez en función del porcentaje de aditivo con respecto al peso del cemento, para cada uno de los dos cementos ensayados.



**Figura 4.8:** Tiempo de fluidez del cono de Marsh para los cementos CEM II/A-V 42,5R Holcim y Cemex.



Figura 4.9: Ensayo del cono de Marsh.

## 4.5 ÁRIDOS

### 4.5.1 Granulometrías y módulos granulométricos

El módulo granulométrico se obtiene sumando el porcentaje retenido y acumulado en los tamices 0,125 , 0,25 , 0,5 , 1 , 2 , 4 , 8 , 16 , 31,5 , 63 y 125 y dividiendo por 100. El módulo granulométrico cuantifica el área limitada por la curva granulométrica, el eje de ordenadas y la paralela al eje de abscisas por el punto 100 %, en escala semilogarítmica.

Para ejemplificar el procedimiento de cálculo, mostraremos una gráfica granulométrica y el cálculo del módulo granulométrico correspondiente para un ensayo de cada una de las fracciones granulométricas empleadas en el estudio.

#### *Arena triturada AF-0/4-T*

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	88
0,125	85
0,25	79
0,5	70
1	55
2	27
4	0
6,3	0
8	0
10	0
12,5	0
14	0
16	0
20	0
25	0
31,5	0

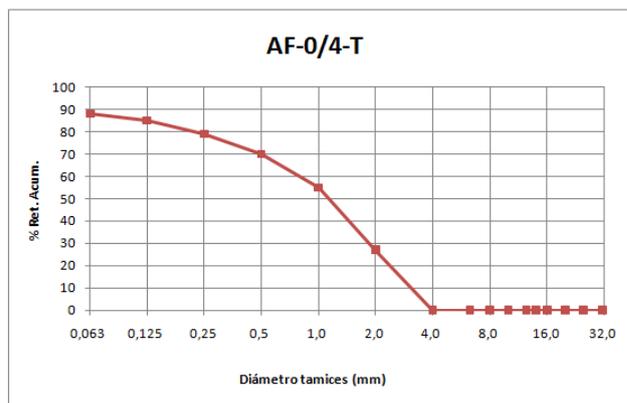


Figura 4.10: Curva granulométrica AF-0/4-T.

$$mg_1 = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 3,16 \quad (4.1)$$

*Arena lavada AF-0/4-R*

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	97
0,125	94
0,25	85
0,5	62
1	41
2	23
4	2
6,3	0
8	0
10	0
12,5	0
14	0
16	0
20	0
25	0
31,5	0

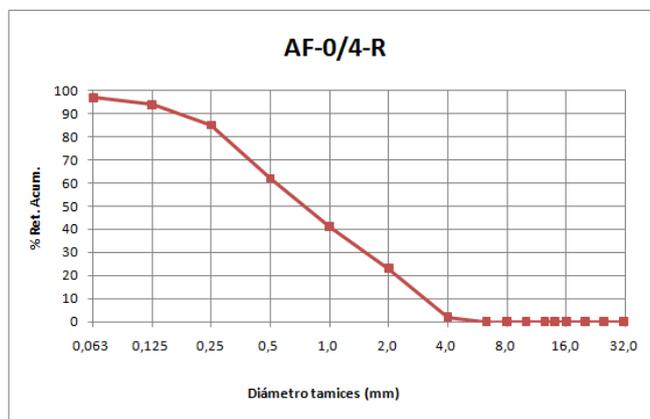


Figura 4.11: Curva granulométrica AF-0/4-R.

$$mg_2 = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 3,07 \quad (4.2)$$

*Gravilla GR-4/8-M*

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	100
0,125	100
0,25	100
0,5	100
1	100
2	100
4	96
6,3	24
8	0
10	0
12,5	0
14	0
16	0
20	0
25	0
31,5	0

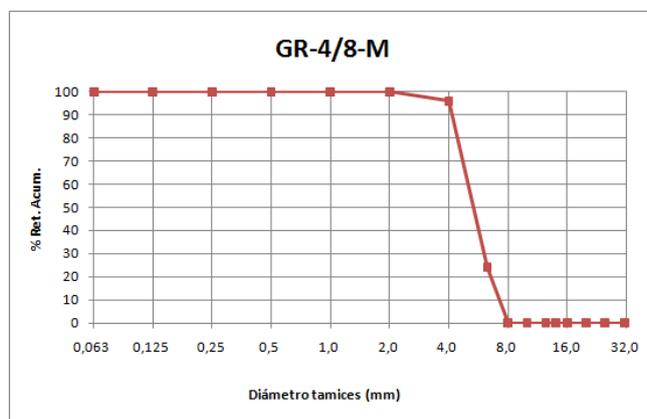


Figura 4.12: Curva granulométrica GR-4/8-M.

$$mg_3 = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 5,96 \quad (4.3)$$

**Gravilla GR-6/12-M**

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	100
0,125	100
0,25	100
0,5	100
1	100
2	100
4	100
6,3	95
8	68
10	12
12,5	0
14	0
16	0
20	0
25	0
31,5	0

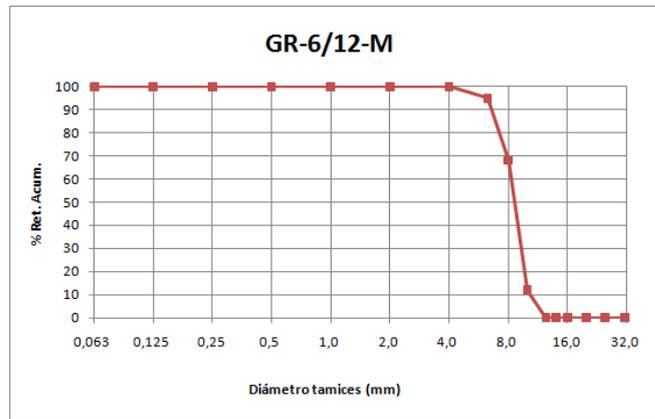


Figura 4.13: Curva granulométrica GR-6/12-M.

$$m_{g4} = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 6,68 \quad (4.4)$$

**Grava GR-10/16-M**

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	100
0,125	100
0,25	100
0,5	100
1	100
2	100
4	100
6,3	100
8	100
10	99
12,5	93
14	75
16	7
20	0
25	0
31,5	0

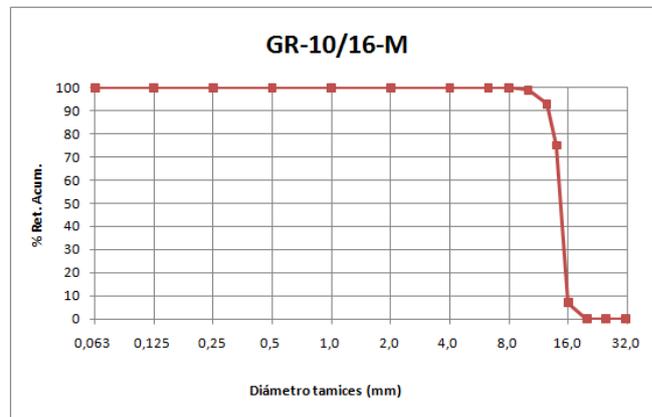
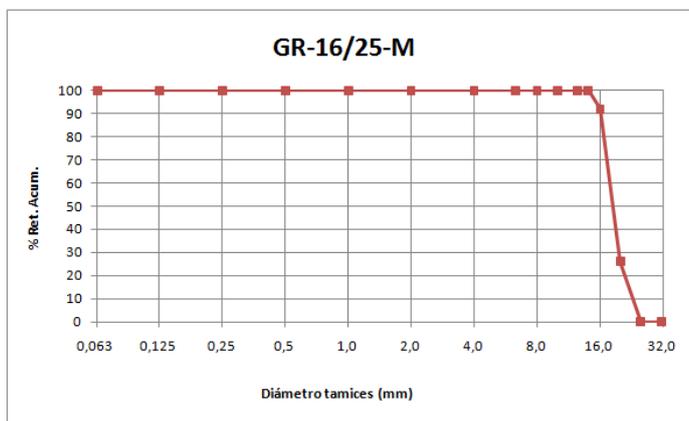


Figura 4.14: Curva granulométrica GR-10/16-M.

$$m_{g5} = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 7,07 \quad (4.5)$$

**Grava GR-16/25-M**

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	100
0,125	100
0,25	100
0,5	100
1	100
2	100
4	100
6,3	100
8	100
10	100
12,5	100
14	100
16	92
20	26
25	0
31,5	0

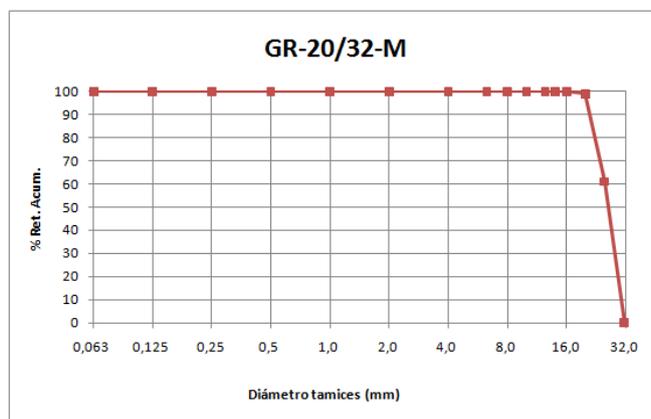


**Figura 4.15:** Curva granulométrica GR-16/25-M.

$$mg_6 = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 7,62 \quad (4.6)$$

**Grava GR-20/32-M**

Tamiz normalizado (mm)	% Retenido acumulado
0,063	100
0,125	100
0,25	100
0,5	100
1	100
2	100
4	100
6,3	100
8	100
10	100
12,5	100
14	100
16	100
20	99
25	61
31,5	0



**Figura 4.16:** Curva granulométrica GR-20/32-M.

$$mg_7 = \frac{\sum_{0,125}^{125} \% Ret}{100} = 8 \quad (4.7)$$

Dado que es imposible conocer exactamente el módulo granulométrico de cada fracción para cada una de las dosificaciones ensayadas, estos valores  $mg_i$  de la base de datos son valores estimados y por consiguiente también lo es el módulo granulométrico  $MG$  obtenido para la mezcla. En nuestro estudio procederemos a asignar valores de los módulos granulométricos obtenidos de las diferentes fracciones por fechas, según los ensayos granulométricos correspondientes.

#### 4.5.2 Resumen valores de los ensayos de caracterización de los áridos

A continuación se presentan resumidos mediante tablas los valores de los ensayos de caracterización de los áridos llevados a cabo y que son relevantes o necesarios para los estudios realizados en la presente tesis doctoral.

Primeramente se presentan los parámetros estadísticos de los valores de los módulos granulométricos de los áridos empleados en el estudio. Se agrupan en dos tablas que se corresponden, la primera a los áridos gruesos y la segunda a las arenas. Se aprecia un mayor rango y variación en las arenas, tal y como era de esperar.

Posteriormente se presentan los parámetros estadísticos del valor del equivalente de arena (EA) de las arenas. Se aprecia, en algunos casos, valores bajos para la arena triturada. La experiencia nos indica que esto es así en las arenas de la zona y debido a este motivo, entre otros, se utilizan arenas naturales lavadas conjuntamente con las arenas trituradas. También se presentan, a continuación, los parámetros estadísticos del valor de humedad de las arenas empleadas en las dosificaciones ensayadas y recogidas en la base de datos general. Como vemos las arenas lavadas presentan valores de humedad excepcionalmente elevados y un gran rango de variación. Esto incide de manera importante en la dosificación del agua a añadir en la amasadora. En la base de datos reducida, se mide la humedad de las arenas de cada dosificación ensayada tal y como se explica en los apartados correspondientes.

Finalmente se presentan las tablas correspondientes a los ensayos de densidades y coeficiente de absorción, así como sus parámetros estadísticos, correspondientes a cada fracción granulométrica. Los valores del coeficiente de absorción en % se corresponden con los relativos a las 24 horas.

<i>Parámetros estadísticos</i>	GR - 4/8	GR - 6/12	GR - 10/16	GR - 16/25	GR - 20/32
Media	5,995	6,869	7,074	7,888	8
Mediana	6	6,86	7,08	7,89	8
Desv. Típica	0,027	0,059	0,022	0,013	0
Máximo	6,04	6,9	7,1	7,93	8
Rango	0,12	0,33	0,10	0,12	0
Mínimo	5,92	6,57	7	7,81	8
Coef. Variación (%)	2,067	3,36	1,754	0,932	0
Nº de ensayos	239	242	246	194	1

**Tabla 4.6:** Parámetros estadísticos del módulo granulométrico de los áridos gruesos empleados en el estudio.

<i>Parámetros estadísticos</i>	AF - 0/4 - T	AF - 0/4 - L
Media	3,098	3,051
Mediana	3,14	3,06
Desv. Típica	0,191	0,2
Máximo	3,92	3,73
Rango	1,74	1,5
Mínimo	2,18	2,23
Coef. Variación (%)	14,071	13,69
Nº de ensayos	2415	2415

**Tabla 4.7:** Parámetros estadísticos del módulo granulométrico de las arenas empleadas.

<i>Parámetros estadísticos</i>	AF - 0/4 - T	AF - 0/4 - L
Media	65,87	76,36
Mediana	65,00	77,0
Desv. Típica	6,992	5,34
Máximo	89,0	90,0
Rango	41,0	28,0
Mínimo	48,0	62,0
Nº de ensayos	273	306

**Tabla 4.8:** Parámetros estadísticos del valor del equivalente de arena (EA) de las arenas empleadas.

<i>Parámetros estadísticos</i>	AF - 0/4 - T	AF - 0/4 - L
Media	0,972	12,081
Mediana	0,90	12,33
Desv. Típica	0,389	2,83
Máximo	2,90	17,90
Rango	2,73	13,86
Mínimo	0,17	4,04
Nº de ensayos	273	306

**Tabla 4.9:** Parámetros estadísticos del valor de la humedad de las arenas empleadas.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,72	2,76	2,67	2,69	2,67	2,71	2,7	2,7	2,71
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,63	2,68	2,61	2,62	2,62	2,62	2,63	2,62	2,62
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,66	2,71	2,63	2,65	2,64	2,65	2,65	2,65	2,66
Coef. Absorción de agua (%)	1,3	1,05	0,91	1	0,68	1,2	1,1	1,2	1,3

**Tabla 4.10:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido fino AF-0/4-T.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,70	0,027	2,76	2,67
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,63	0,020	2,68	2,61
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,66	0,022	2,71	2,63
Coef. Absorción de agua (%)	1,08	0,201	1,3	0,68

**Tabla 4.11:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido fino AF-0/4-T.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,72	2,62	2,63	2,64	2,62	2,65	2,67	2,68	2,69
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,63	2,57	2,58	2,58	2,58	2,59	2,62	2,62	2,63
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,66	2,59	2,6	2,6	2,59	2,61	2,64	2,64	2,66
Coef. Absorción de agua (%)	1,3	0,77	0,8	0,8	0,61	0,9	0,8	0,9	0,8

**Tabla 4.12:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido fino AF-0/4-L.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,66	0,035	2,72	2,62
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,60	0,024	2,63	2,57
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,62	0,029	2,66	2,59
Coef. Absorción de agua (%)	0,85	0,188	1,3	0,61

**Tabla 4.13:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido fino AF-0/4-L.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,72	2,79	2,78	2,76	2,72	2,75	2,75	2,74	2,73
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,64	2,74	2,73	2,7	2,65	2,7	2,69	2,68	2,66
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,67	2,76	2,75	2,72	2,68	2,72	2,71	2,7	2,69
Coef. Absorción de agua (%)	1,1	0,67	0,69	0,8	1	0,7	0,8	0,9	1

**Tabla 4.14:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-4/8-M.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,75	0,025	2,79	2,72
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,69	0,034	2,74	2,64
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,71	0,030	2,76	2,67
Coef. Absorción de agua (%)	0,85	0,156	1,1	0,67

**Tabla 4.15:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-4/8-M.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,72	2,78	2,76	2,75	2,72	2,74	2,75	2,75	2,74
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,64	2,74	2,72	2,7	2,66	2,7	2,71	2,71	2,69
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,67	2,75	2,73	2,72	2,68	2,71	2,73	2,72	2,71
Coef. Absorción de agua (%)	1,1	0,59	0,58	0,7	0,8	0,6	0,5	0,6	0,7

**Tabla 4.16:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-6/12-M.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,75	0,019	2,78	2,72
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,70	0,030	2,74	2,64
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,71	0,025	2,75	2,67
Coef. Absorción de agua (%)	0,69	0,178	1,1	0,5

**Tabla 4.17:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-6/12-M.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,72	2,8	2,78	2,79	2,71	2,75	2,74	2,75	2,75
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,65	2,76	2,75	2,76	2,65	2,72	2,7	2,72	2,72
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,67	2,78	2,76	2,77	2,67	2,73	2,72	2,73	2,73
Coef. Absorción de agua (%)	0,98	0,49	0,45	0,4	0,76	0,4	0,5	0,4	0,5

**Tabla 4.18:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-10/16-M.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,75	0,030	2,8	2,71
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,71	0,042	2,76	2,65
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,73	0,039	2,78	2,67
Coef. Absorción de agua (%)	0,54	0,198	0,98	0,4

**Tabla 4.19:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-10/16-M.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,71	2,78	2,77	2,75	2,68	2,76	2,75	2,74	2,73
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,64	2,75	2,74	2,7	2,64	2,73	2,72	2,72	2,71
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,67	2,76	2,75	2,72	2,65	2,74	2,73	2,71	2,72
Coef. Absorción de agua (%)	1	0,36	0,41	0,7	0,63	0,4	0,4	0,3	0,3

**Tabla 4.20:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-16/25-M.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,74	0,031	2,78	2,68
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,71	0,040	2,75	2,64
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,72	0,036	2,76	2,65
Coef. Absorción de agua (%)	0,50	0,233	1	0,3

**Tabla 4.21:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-16/25-M.

<i>Propiedades/Ensayos</i>	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,71	2,78	2,77	2,75	2,68	2,76	2,75	2,74	2,73
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,64	2,75	2,74	2,7	2,64	2,73	2,72	2,72	2,71
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,67	2,76	2,75	2,72	2,65	2,74	2,73	2,71	2,72
Coef. Absorción de agua (%)	1	0,36	0,41	0,7	0,63	0,4	0,4	0,3	0,3

**Tabla 4.22:** Densidades y absorción de agua obtenidas para el árido grueso GR-20/32-M.

<i>Propiedades/Parámetros</i>	Media	Desv. Típica	Máx.	Mín.
Densidad aparente ( $g/cm^3$ )	2,74	0,031	2,78	2,68
Densidad real tras secado en estufa ( $g/cm^3$ )	2,71	0,040	2,75	2,64
Densidad real de la muestra saturada con superficie seca ( $g/cm^3$ )	2,72	0,036	2,76	2,65
Coef. Absorción de agua (%)	0,50	0,233	1	0,3

**Tabla 4.23:** Parámetros estadísticos de densidades y absorción de agua obtenidos para el árido grueso GR-20/32-M.

## Capítulo 5

# ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realiza un análisis y discusión de los resultados obtenidos en el trabajo de investigación. Primeramente se comprueba la metodología empleada en la dosificación de los hormigones de planta estudiados y se presenta un procedimiento para el cálculo del agua. Seguidamente se analiza mediante un estudio estadístico clásico, la significación de los diferentes parámetros y factores tecnológicos-ambientales en la resistencia a compresión, en la evolución de la misma con el tiempo y en la consistencia del hormigón. Se ha verificado, también, el ajuste de los datos experimentales a diferentes modelos existentes y a nuevos modelos de comportamiento propuestos. En cuanto a la estadística, se ha utilizado el análisis de regresión lineal simple y múltiple, el análisis de varianza (ANOVA) y el análisis multivariante.

Posteriormente se han elaborado redes neuronales artificiales (RNA) con el propósito de predecir la resistencia a compresión o la consistencia de un hormigón en función de unas variables de entrada. También se utilizan redes neuronales artificiales para obtener modelos predictivos de la resistencia a compresión del hormigón en función de diferentes variables.

Por último señalar que dado que es en este capítulo donde se analizan y discuten los resultados obtenidos, se ha incluido un apartado que sintetiza los fundamentos teóricos de las redes neuronales artificiales y se mencionan las aplicaciones informáticas empleadas, tanto en el análisis y tratamiento de los resultados mediante métodos estadísticos como en las RNA, con el objetivo de que puedan ser usados estos recursos en posteriores trabajos de investigación.

## 5.2 METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES DE PLANTA

El inicio de la actividad de producción de hormigón preparado en la empresa productora de los hormigones empleados en el estudio se remonta a los inicios de la década de los años 80. Posteriormente, a principios del año 2000, las instalaciones de producción sufren cambios y mejoras significativas, quedando la central prácticamente como se encuentra en la actualidad.

En lo que respecta a la instalación de producción de áridos, la misma está concebida para aprovechar la máxima cantidad de áridos naturales rodados que provienen del frente sin someterlos a un proceso de trituración. Estos áridos naturales rodados se almacenan en silos después de un proceso de lavado y clasificación. Los áridos que por su granulometría excesiva no se pueden utilizar como naturales rodados, se trituran en la instalación. Como productos finales se tienen dos áridos finos y cinco áridos gruesos, tal y como se describe en el apartado 3.2.2. De las arenas, una es natural lavada de canto rodado y la otra triturada. Con respecto a las gravas, aunque estas son una mezcla de rodado y triturado, las granulometrías inferiores son áridos rodados y solo en las granulometrías superiores se pueden apreciar áridos triturados mezclados con rodados, tal y como se puede observar en las figuras 3.2 y 3.3. En la figura 3.24 se observa rotura por la interfase pasta-árido en las probetas ensayadas, como consecuencia de los áridos de cantos rodados.

Una de las primeras inquietudes surgidas fue la de conocer la metodología de dosificación empleada en los distintos hormigones fabricados en la planta. Generalmente, y salvo casos puntuales y de pequeña importancia, la instalación de tratamiento de áridos fabrica la totalidad de los mismos como materia prima para la fabricación de hormigones en la planta anexa. Además, existe una uniformidad en cuanto a características de los áridos, contando los mismos con el correspondiente marcado CE.

El laboratorio de la empresa realiza ensayos periódicos de control de producción y calidad de los áridos, además de recurrir a laboratorios homologados exteriores. Debido a esto anterior, las dosificaciones en cuanto a las diferentes fracciones granulométricas de los áridos se ha constatado que se mantienen en el tiempo a partir del año 2004, año que se corresponde a los datos y resultados iniciales del estudio. Puntualmente, y debido a ajustes por causas de producción o bien por desear resultados con diferentes dosificaciones, se modifican las dosificaciones típicas empleadas.

Así pues, la situación es que tenemos dosificaciones típicas para los diferentes tipos de hormigón en cuanto a lo referente a los áridos. En lo que se refiere a la cantidad de cemento, la misma es variable y depende de la resistencia característica del hormigón a fabricar, de la resistencia verdadera del cemento empleado, del tamaño máximo del árido, de la consistencia del hormigón, de la clase general y específica de exposición y de la época del año. La consistencia del hormigón va a afectar a

la relación agua/cemento empleada y a la cantidad de aditivo reductor de agua. Aunque en el estudio se han empleado diferentes aditivos, hasta un número de 19, la práctica totalidad de los ensayos (exactamente un 97,2% de los mismos) se han realizado con un mismo plastificante reductor de agua en base a lignosulfonatos (se corresponde con los aditivos tipo 1 y 2). De hecho, el POZZOLITH 375NE ha sido el aditivo que ha sustituido en el mercado al LUBRICON 600, teniéndose evidencias de que es idéntico aditivo. En la Ficha de Seguridad de ambos aditivos se indica en la descripción química que es un preparado en solución acuosa de sal de calcio del ácido lignosulfónico.

Inicialmente vamos a realizar un estudio para verificar el grado de ajuste de las curvas granulométricas de las dosificaciones teóricas y reales empleadas con algunas de las curvas granulométricas de referencia más conocidas.

Las curvas granulométricas de referencia que vamos a utilizar son la propuesta por Fuller y Thompson (1907) (ecuación 2.22) con  $q = 0,5$ , la misma sustituyendo el valor de  $q$  por  $q = 0,37$  (Andreasen y Andersen 1930) y la propuesta por Bolomey (1926) (ecuación 2.24) con un valor de  $a = 11$  que se corresponde con un hormigón con áridos rodados y consistencia blanda. Estas curvas granulométricas se representan en las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 para tamaños máximos de árido de 16, 20, 25 y 31,5 mm respectivamente.

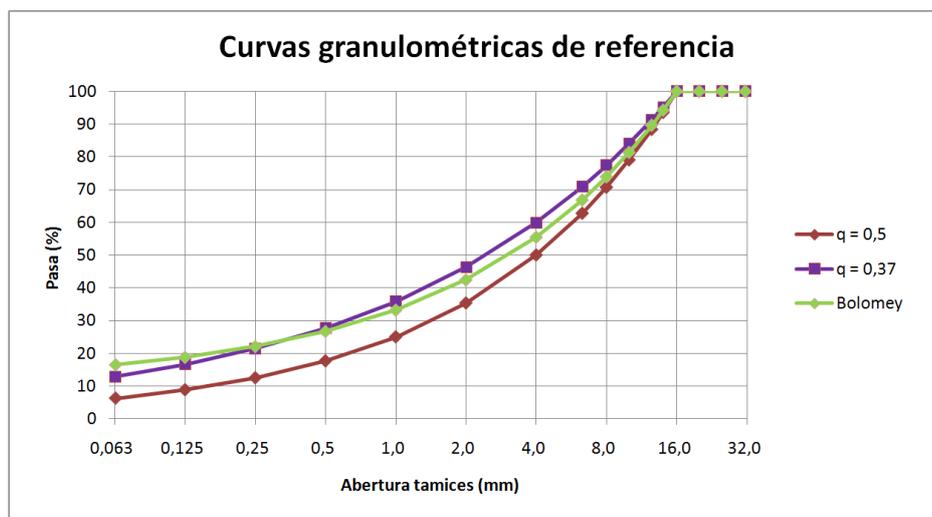


Figura 5.1: Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 16 mm.

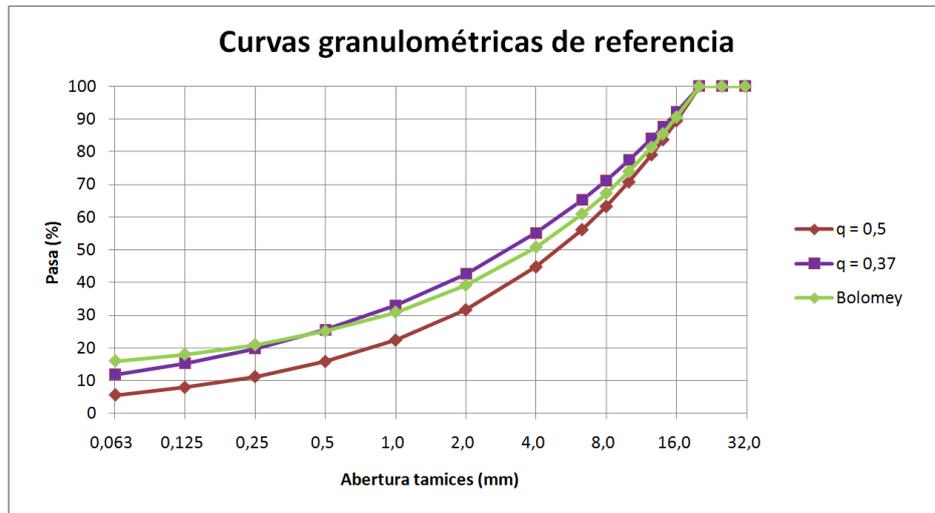


Figura 5.2: Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 20 mm.

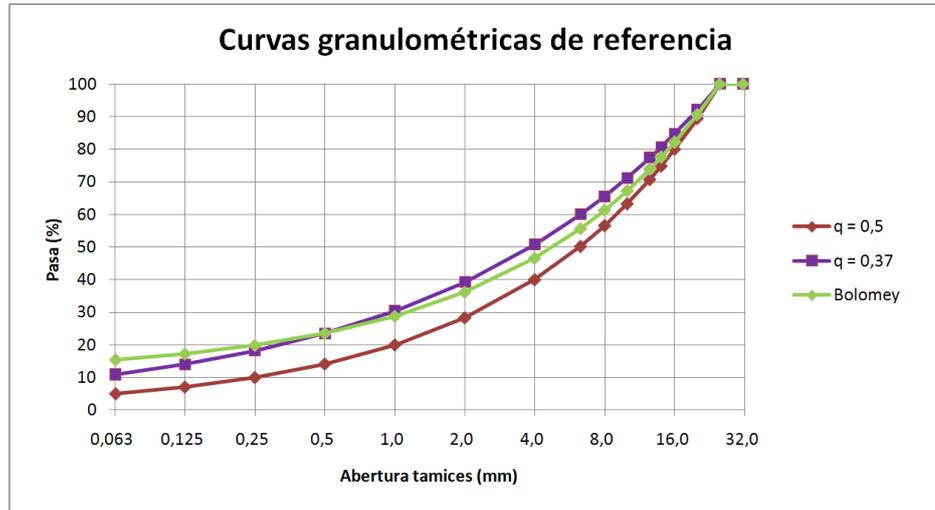
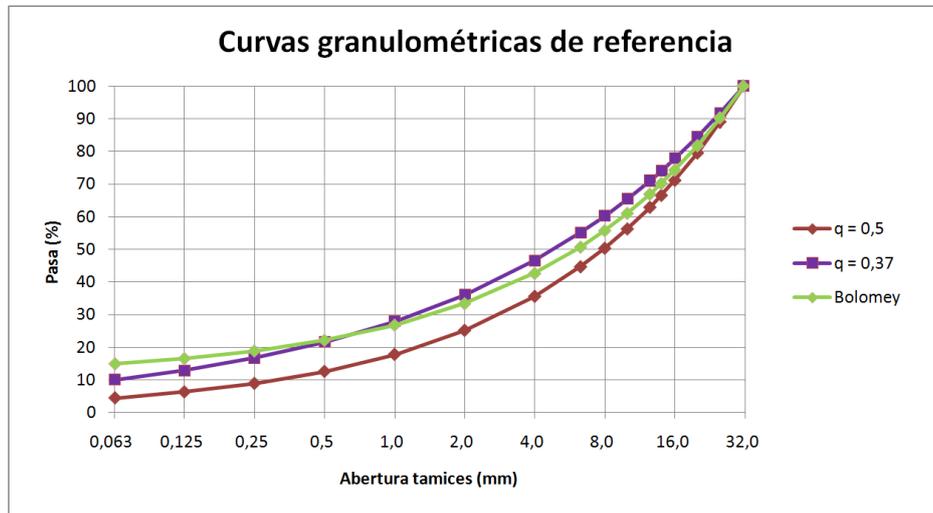


Figura 5.3: Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 25 mm.



**Figura 5.4:** Curvas granulométricas de referencia para tamaño máximo 31,5 mm.

Estas curvas anteriores representan solamente una aproximación de la curva granulométrica ideal, dado que el volumen de vacíos después de la compactación de un hormigón depende de la forma, de la angularidad y de la rugosidad de la superficie de los áridos, así como del método de compactación. Áridos de canto rodado con superficies lisas y áridos de forma cúbica proporcionan un esqueleto más denso que los áridos que contienen partículas lajosas.

En las figuras que siguen a continuación, se va a verificar el ajuste de nuestras curvas granulométricas reales a las ideales propuestas anteriormente. Tenemos para cada tamaño máximo de árido dos ajustes, el ajuste de la mezcla sin cemento a las curvas de Fuller con  $q = 0,5$  y teórica con  $q = 0,37$  (Andreasen y Andersen 1930) y el ajuste de la mezcla con cemento a la curva de Bolomey. Así pues tenemos, las figuras 5.5 y 5.6 para el tamaño máximo de árido de 16 mm, las figuras 5.7 y 5.8 para el tamaño máximo de árido de 20 mm, las figuras 5.9 y 5.10 para el tamaño máximo de árido de 25 mm y las figuras 5.11 y 5.12 para el tamaño máximo de árido de 31,5 mm.

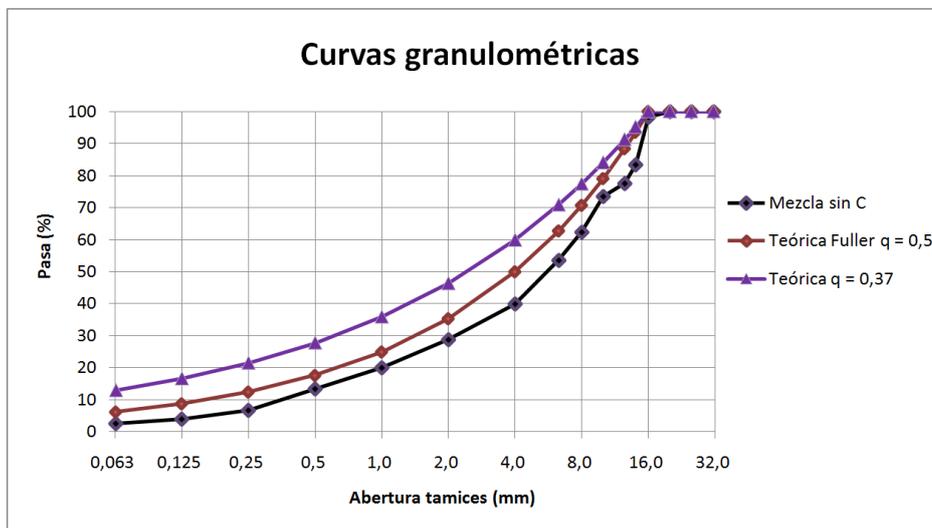


Figura 5.5: Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 16 mm a las curvas de Fuller con  $q = 0,5$  y Teórica con  $q = 0,37$ .

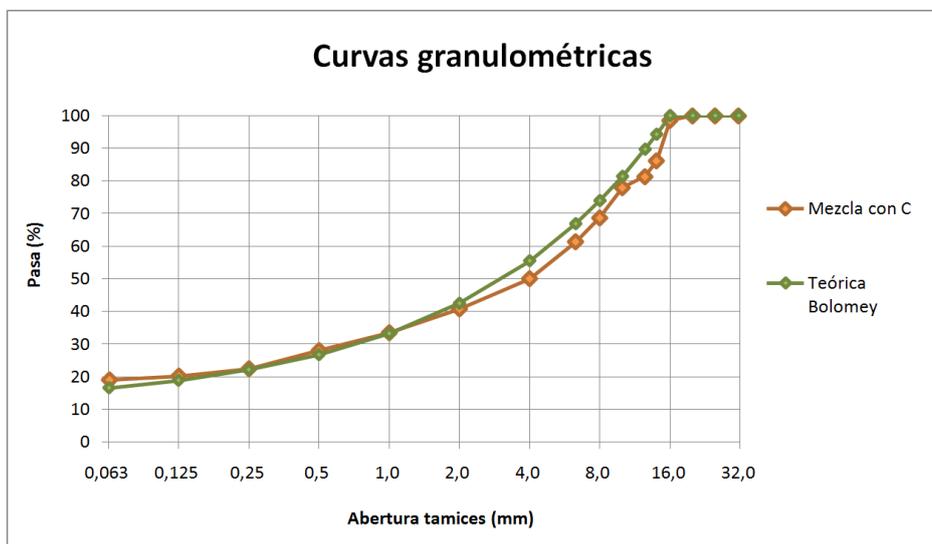


Figura 5.6: Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 16 mm a la curva de Bolomey.

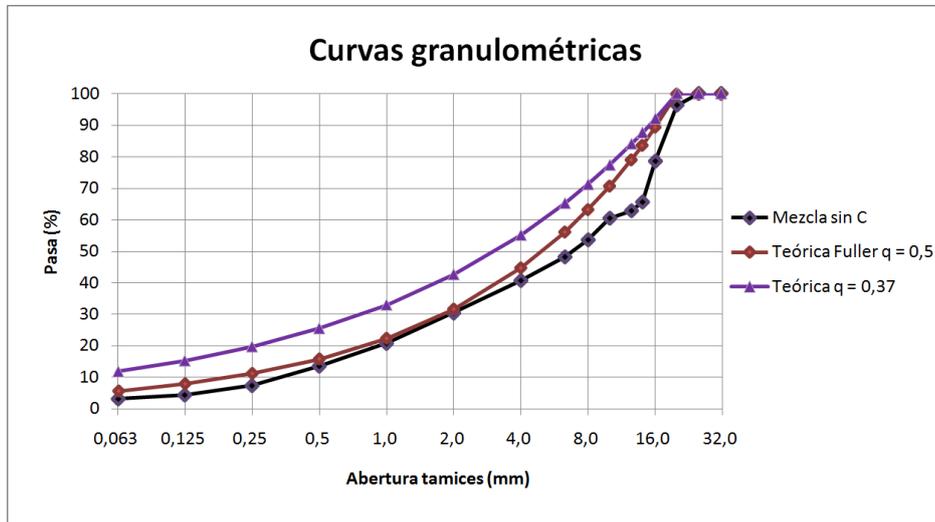


Figura 5.7: Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 20 mm a las curvas de Fuller con  $q = 0,5$  y Teórica con  $q = 0,37$ .

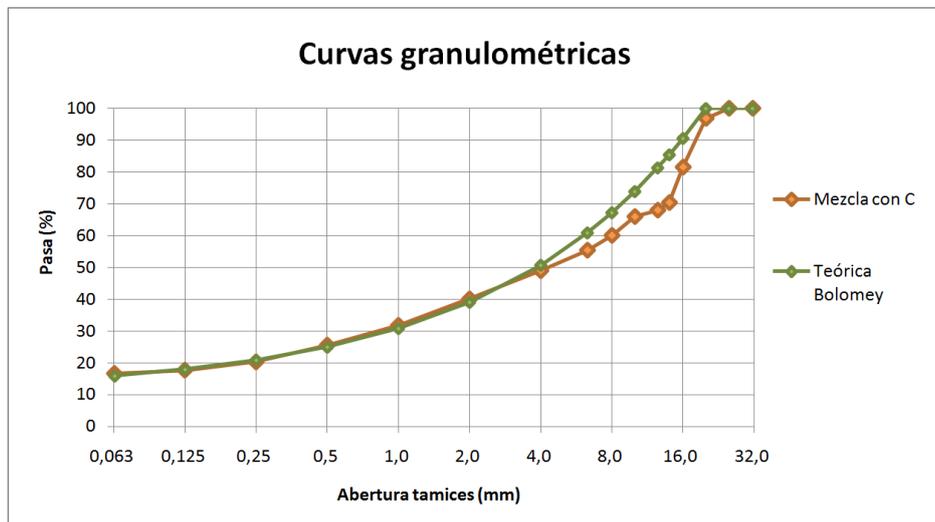


Figura 5.8: Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 20 mm a la curva de Bolomey.

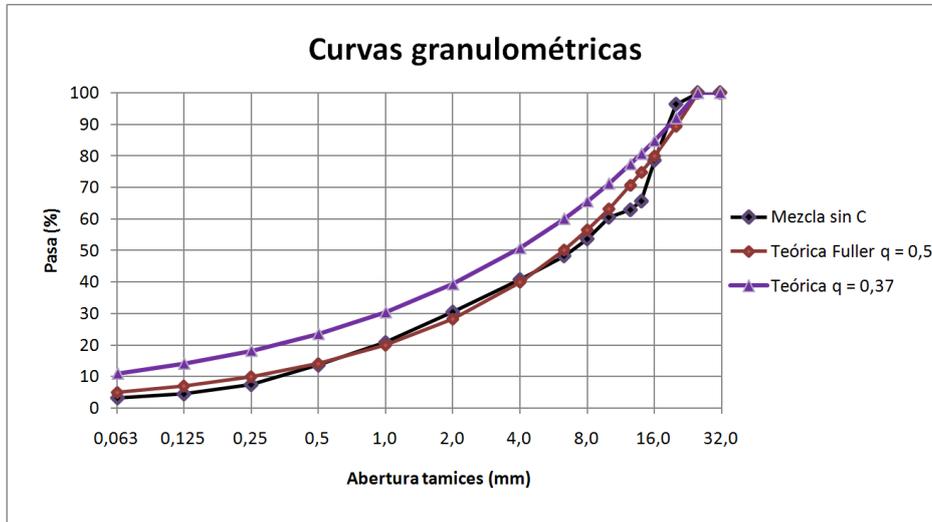


Figura 5.9: Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 25 mm a las curvas de Fuller con  $q = 0,5$  y Teórica con  $q = 0,37$ .

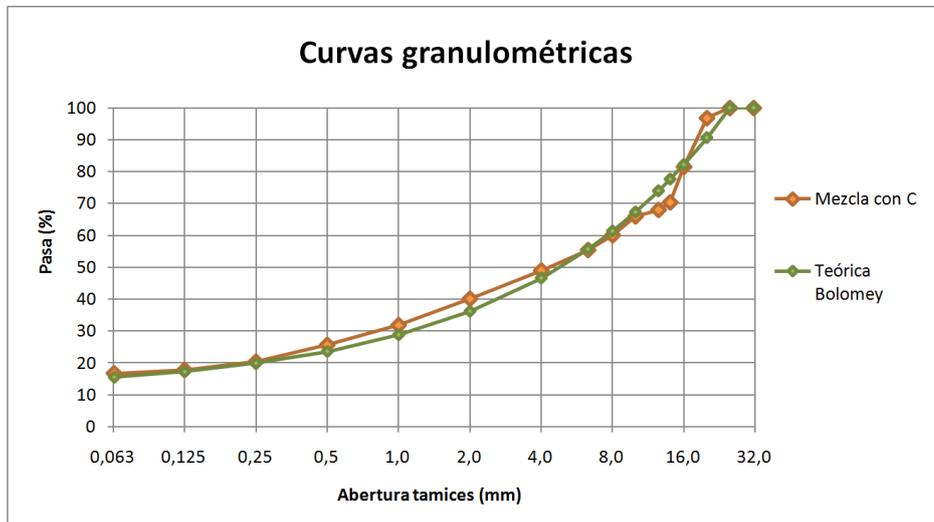
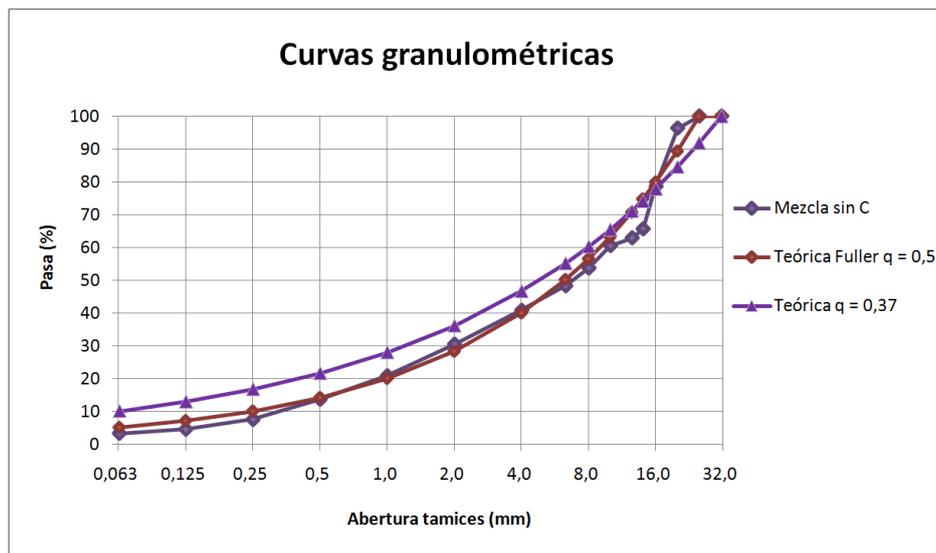
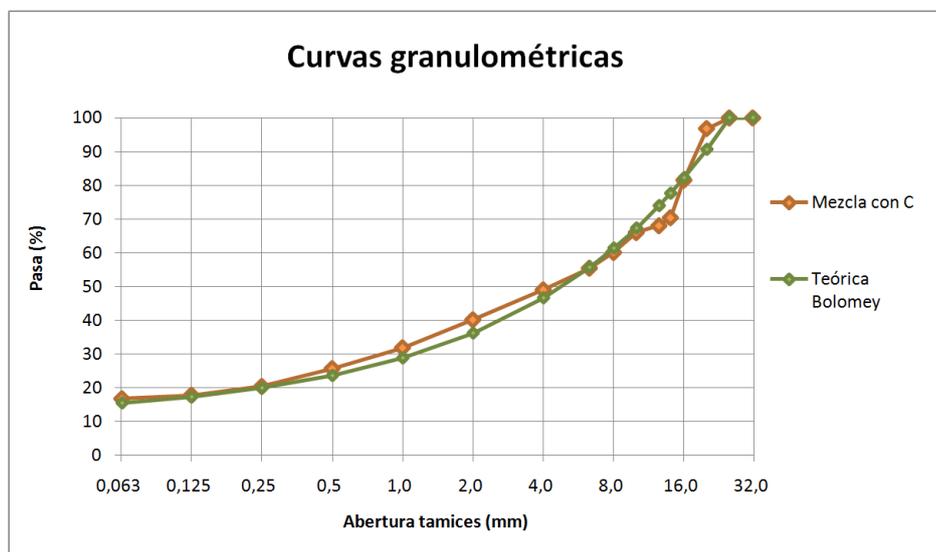


Figura 5.10: Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 25 mm a la curva de Bolomey.



**Figura 5.11:** Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 31,5 mm a las curvas de Fuller con  $q = 0,5$  y Teórica con  $q = 0,37$ .



**Figura 5.12:** Ajuste granulométrico del hormigón de tamaño máximo 31,5 mm a la curva de Bolomey.

Del análisis de las figuras anteriores 5.5, 5.7, 5.9 y 5.11, se observa mejores ajustes de las curvas granulométricas de la mezcla sin cemento a la curva de Fuller y Thompson (1907) con  $q = 0,5$  que a la de Andreasen y Andersen (1930) con  $q = 0,37$ . En las figuras 5.6, 5.8, 5.9 y 5.12, se observa un ajuste razonablemente bueno de las curvas granulométricas de la mezcla con cemento a la curva propuesta por Bolomey (1926).

Tal y como se puede consultar en el apartado 2.4, no es necesario ceñirse a una curva granulométrica teórica y basta con que el modulo granulométrico de la mezcla coincida con el de la curva teórica adoptada. Dado que en nuestra base de datos no se pueden tratar curvas granulométricas, pero sí modulos granulométricos, vamos a comprobar la coincidencia de los módulos granulométricos de la mezcla con los de las curvas teóricas. Dado que como hemos visto los ajustes de las granulometrías de las mezclas son buenos a la curva de Fuller con  $q = 0,5$  para las mezclas sin cemento y a la de Bolomey para las mezclas con cemento, se calculan los módulos granulométricos correspondientes a las curvas teóricas correspondientes,  $MG_{Fuller}$  y  $MG_{Bolomey}$  para cada tamaño máximo de árido. También calculamos el valor del módulo granulométrico correspondiente a la curva propuesta por Andreasen y Andersen (1930) con  $q = 0,37$ ,  $MG_{q=0,37}$ , para cada tamaño máximo del árido. Estos módulos granulométricos se pueden consultar en la tabla 5.1, en la que se han representado los valores de los módulo granulométricos de las mezclas sin y con cemento,  $MG_{Mezcla\ sin\ C.}$  y  $MG_{Mezcla\ con\ C.}$  para los ensayos correspondientes a cada tamaño máximo convenientemente identificados en dicha tabla.

Tamaño máximo D = 16 mm del hormigón	D = 20 mm	D = 25 mm	D = 31,5 mm
Id. Ensayo	6675	6603	6735
$MG_{Fuller}$	4,799	5,137	5,439
$MG_{q=0,37}$	4,148	4,453	4,734
$MG_{Mezcla\ sin\ C.}$	5,263	5,500	5,684
$MG_{Bolomey}$	4,271	4,572	4,841
$MG_{Mezcla\ con\ C.}$	4,379	4,736	4,928

**Tabla 5.1:** Módulos granulométricos obtenidos en función del tamaño máximo del hormigón.

### 5.3 CÁLCULO DEL AGUA PARA HORMIGONES DE PLANTA PRODUCIDOS INDUSTRIALMENTE

Se procede al cálculo del volumen de agua necesario en la producción industrial de los hormigones correspondientes a la base de datos reducida mediante el método de cálculo sintetizado por Klein (2012) y presentado en el apartado 2.2.3. El agua y su papel en el hormigón.

En la base de datos reducida que figura en el Anexo A y en los correspondientes ensayos de caracterización se presenta la dosificación de los hormigones producidos industrialmente y las propiedades influyentes, según el modelo propuesto anterior, en el cálculo del volumen de agua necesario. También se presenta el volumen de agua total (suma del volumen aportado en los áridos, el agua aportada en la amasadora y el agua añadida directamente en el camión hormigonera si es el caso). Los coeficientes de absorción de los áridos a las 24 horas  $A_{\rho 24}$ , se han obtenido de los ensayos de caracterización de los áridos y los valores del parámetro  $K$  de la bibliografía correspondiente según la tabla 5.2. Los valores del coeficiente de absorción de cada árido para los diferentes tiempos, se calculan según la ecuación siguiente:

$$A_{\rho t} = A_{\rho 24}(1 - e^{-60K\sqrt{t}}) \quad (5.1)$$

Árido	$A_{\rho 24}$ (%)	K	$A_{\rho t}$ (%)				
			t = 0,8333	t = 1	t = 1,1666	t = 1,25	t = 1,3333
AF - 0/4 - T	1,08	0,03	0,87	0,90	0,93	0,94	0,94
AF - 0/4 - L	0,85	0,03	0,69	0,71	0,73	0,74	0,74
GR - 4/8 - M	0,85	0,04	0,75	0,77	0,79	0,79	0,80
GR - 6/12 - M	0,69	0,04	0,61	0,63	0,64	0,64	0,65
GR - 10/16 - M	0,54	0,05	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52
GR - 16/25 - M	0,50	0,05	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48
GR - 20/32 - M	0,50	0,05	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48

**Tabla 5.2:** Coeficientes de absorción de las diferentes fracciones granulométricas de los áridos.

El cemento Portland utilizado es del tipo CEM II A-V 42,5 R, cuya superficie específica Blaine es igual a  $338,5 \text{ m}^2/\text{kg}$ , se ha utilizado un aditivo plastificante del tipo lignosulfonato (concretamente el tipo 2, POZZOLITH 375NE) y se ha considerado como tiempo transcurrido entre la producción y la puesta en obra del hormigón el valor correspondiente a  $trCA$ . La consistencia se corresponde con la medida mediante cono de Abrams y se estima un porcentaje de aire ocluido del 3,5%. El cálculo del agua necesaria a la absorción  $V_{abs}$ , se calcula teniendo en cuenta el tiempo entre la producción y la puesta en obra del hormigón, que oscila entre 50 y 80 minutos, y la dosificación empleada. Los valores calculados del coeficiente de absorción  $A_{\rho t}$  para las diferentes fracciones granulométricas de los áridos y para cada tiempo se presentan en la tabla 5.2.

Tanto para el caso del cálculo del agua de mojado como para el agua de fluidificación se debe de realizar el cálculo referente al conjunto granular de las pastas.

Además, el cálculo anterior se refiere a un volumen de  $1 \text{ m}^3$ , con lo que se debe de corregir el valor resultante por el volumen de pasta existente en el hormigón.

Para el cálculo del volumen de agua de mojado del cemento se han asumido dos compacidades iguales a 0,55 y 0,60, ya que no es probable que la compacidad de la mezcla sea superior a 0,60 en ningún caso. A partir de los anteriores valores de compacidad supuestos para la mezcla, se determina el espesor equivalente de agua de mojado  $e_{eq\ moj}$  según la figura 2.5, tomando un valor de  $0,054R_{eq}$  para compacidad igual a 0,55 y de  $0,117R_{eq}$  para compacidad 0,6. Mediante la ecuación siguiente:

$$V_{moj} = e_{eq\ moj} \times K_{moj} \times A_{sup} \quad (5.2)$$

se calcula el volumen de agua de mojado  $V_{moj}$ , tomando un valor de  $K_{moj}$  en función del porcentaje de aditivo plastificante añadido a la mezcla. Como el porcentaje de aditivo plastificante añadido a la mezcla se encuentra entre el 0,44 % y el 0,54 % en peso de cemento (tal y como se puede observar en el Anexo A), se toma un valor de  $K_{moj}$  igual a 1.8 para todos los casos.  $A_{sup}$  en  $\text{m}^2$  se calcula mediante el producto de la cantidad de cemento en  $\text{kg}/\text{m}^3$  dosificada y la superficie específica Blaine en  $\text{m}^2/\text{kg}$ . El cálculo del agua de mojado para cada familia y compacidad se presenta en la tabla 5.4.

Para calcular el volumen de agua de fluidificación  $V_{fluid}$  de la pasta de cemento utilizada, se determinan los valores de  $V_B$  y  $V_p$  en base a la figura 2.6 y, evidentemente, para las dos compacidades supuestas 0,55 y 0,60. Posteriormente, se determina el volumen total de agua necesaria para rellenar los poros efectivos  $V_{p(total)}$  mediante las ecuaciones 2.15 y 2.16.

Compacidad	$V_B$	$V_p$	$V_{p(total)}$ ( $\text{l}/\text{m}^3$ )Pasta
0,55	$7,576R_{eq}^3$	$2,793R_{eq}^3$	368,7
0,60	$7,001R_{eq}^3$	$1,350R_{eq}^3$	192,8

**Tabla 5.3:** Cálculo  $V_B$ ,  $V_p$  y  $V_{p(total)}$ .

El volumen de agua correspondiente al espesor formado alrededor de los granos necesario al distanciamiento de los mismos en la pasta, así como el propio espesor se calcula según las ecuaciones 2.17 y 2.18. En la ecuación 2.18 la constante de Hamaker es igual a  $1,6 \cdot 10^{-20} \text{ J}$  para el cemento Portland cuando las partículas están en contacto (Flatt 2004) y el número de coordinación se determina según el modelo de Iwata y Homma (1974) que relaciona el número de coordinación con la fracción volumétrica de los sólidos para conjuntos de esferas del mismo tamaño.

Para la estimación de la tensión umbral  $\tau_0$ , podemos recurrir al modelo propuesto por Flatt y Bowen (2007) para distribuciones granulométricas similares a las

empleadas en hormigones, llamado YODEL (*yield stress model*). En la tesis doctoral de Klein (2012) se presenta que para hormigones convencionales, el volumen de agua  $V_{D(min)}$  es despreciable frente a  $V_{p(total)}$ . Se observa, además, que la dosificación de cemento influye muy poco en el volumen de agua necesario para distanciar las partículas y la diferencia del volumen final de agua de fluidificación  $V_{fluid}$  proviene de los diferentes volúmenes de pasta que componen los hormigones estudiados en la base de datos reducida.

El cálculo del agua de fluidificación también se presenta en la tabla 5.4 para cada familia y compacidad. Por último se calcula el agua total y se compara con la real de las dosificaciones fabricadas, observándose que los volúmenes de agua calculados a partir del método presentado no son iguales a los volúmenes experimentales, aunque en algunos casos son bastante próximos.

IF	$V_{abs}$	$V_{moj}$		$V_{fluid}$		$V_{agua\ total}$		$V_{real}$
		C = 0,55	C = 0,60	C = 0,55	C = 0,60	C = 0,55	C = 0,60	
8571-1	12,37	46,09	99,85	112,02	58,57	170,48	170,79	167,45
8572-1	12,41	46,02	99,70	110,43	57,74	168,86	169,85	163,82
8573-1	12,41	46,09	99,85	111,31	58,21	169,81	170,47	165,81
8574-1	12,44	46,02	99,70	110,43	57,74	168,89	169,88	163,90
8576-1	11,97	46,03	99,72	108,62	56,79	166,62	168,48	159,55
8577-1	12,77	39,47	85,51	103,86	54,31	156,10	152,59	162,25
8578-1	12,50	39,45	85,46	112,79	58,98	164,74	156,94	183,43
8579-1	12,96	47,69	103,33	112,31	58,73	172,96	175,02	164,71
8580-1	12,84	39,48	85,55	102,02	53,35	154,34	151,74	157,85
8581-1	12,44	39,44	85,44	107,77	56,36	159,65	154,24	171,53
8582-1	12,78	39,52	85,63	103,38	54,06	155,68	152,47	160,96
8583-1	13,72	29,57	60,07	87,86	45,94	131,15	119,73	145,32
8584-1	11,92	45,29	98,13	118,17	61,79	175,38	171,84	183,75
8585-1	12,22	45,29	98,13	110,46	57,76	167,97	168,11	165,51
8586-1	12,14	45,22	97,99	105,60	52,22	162,96	162,35	154,11
8587-1	12,50	47,94	103,86	112,49	58,82	172,93	175,18	164,70

**Tabla 5.4:** Cálculo volumen agua y volumen real ( $l/m^3$ ).

## 5.4 ESTUDIO ESTADÍSTICO CLÁSICO

### 5.4.1 Introducción

Se analiza mediante un estudio estadístico la significación de parámetros tales como el contenido de cemento, la resistencia verdadera del cemento, el tipo de cemento, la consistencia medida a un cierto tiempo mediante el asentamiento en cono de Abrams, la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón, la cantidad y tipo de aditivo, la curva granulométrica y el tamaño máximo del árido en la resistencia a compresión del hormigón, tanto a 7 como a 28 días.

En el tratamiento y análisis estadístico de los resultados se han utilizado las siguientes aplicaciones informáticas:

- Microsoft Office Excel 2007 (12.0.6425.1000) SP2 MSO + Complemento SOLVER de análisis de funciones.
- Minitab 17.1.0, Minitab Inc.
- IBM SPSS Statistics 20, IBM Corp.

En la tabla siguiente 5.5 se recoge la distribución de los hormigones por clase resistente ensayados en el periodo de tiempo de la campaña experimental correspondiente a la base de datos general confeccionada, confirmándose una clara tendencia al empleo de hormigón de resistencia característica  $25 N/mm^2$ .

Hormigón	Nº dosificaciones	%
HA - 25	2069	85,74
HA - 30	255	10,56
Otros	89	3,70

**Tabla 5.5:** Hormigones empleados en la campaña experimental.

La base de datos general consta de 2413 muestras de hormigón tomadas desde el 14/07/2004 hasta el 03/12/2014, con 4 roturas por muestra: dos a 7 días y dos a 28 días. La base de datos reducida consta de 16 muestras tomadas entre el 18/05/2015 y el 22/05/2015, también con 4 roturas por muestra, dos a 7 y dos a 28 días.

En el tratamiento estadístico de la muestra de hormigón correspondiente se toman los valores correspondientes a 7 días  $f_{c7}$  y a 28 días  $f_{c28}$ . Las resistencias de las roturas realizadas a edades diferentes a 7 y 28 días se corrigen convenientemente según la ecuación 2.66 facilitada por el *Código Modelo CEB-FIP 1990* y recogida en la EHE (2008) con  $s = 0,20$  (cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido) y en ese caso se habla de resistencias corregidas.

En el apartado 5.4.6 se se realiza un análisis estadístico descriptivo de la resistencia a compresión para los hormigones de resistencia característica  $25 \text{ N/mm}^2$  y  $30 \text{ N/mm}^2$  a 28 días. En las figuras 5.47 y 5.50 se observa un resumen de todos los estadísticos de la resistencias a 28 días  $f_{c28}$ , para las dos resistencias características. También se pueden consultar las gráficas de normalidad en las figuras 5.51 y 5.52.

En una base de datos reducida se analiza también, como podemos observar en el apartado 5.4.5, la influencia de la relación agua/cemento. Esto es así, porque tal y como se explicó en el procedimiento industrial seguido para la producción de los hormigones preparados en la planta objeto del estudio, el conocimiento de la relación agua/cemento es aproximado como consecuencia de los errores de medida sobre todo en las sondas de humedad dispuestas en las arenas y como consecuencia del tiempo de mezclado tan estricto para la obtención de los rendimientos de producción deseados. Esto no presenta problemas de calidad, ya que la lectura del amperímetro de la mezcladora nos da una indicación de la consistencia del hormigón fabricado, tal y como vimos en el apartado 2.3.5. Para cada amasada, antes del vaciado al camión hormigonera, se verifica que la consistencia es estable y que se ha alcanzado el valor requerido de la misma mediante el amperímetro que mide el consumo del motor de la amasadora como se explica en el apartado 3.5.4. Además, la consistencia se verifica mediante la lectura del manómetro de presión del reductor de la cuba a una velocidad determinada como se ve en 3.5.5.

Se realiza un análisis de regresión de las variables para lo cuál se realizan inferencias acerca de modelos lineales simples o múltiples en el apartado 5.4.2 y se obtienen medidas del coeficiente de correlación al cuadrado  $R^2$ , también denominado coeficiente de determinación. Primeramente, se intenta explicar cada variable de respuesta en función de aquella variable independiente con la que se encuentra más correlacionada. No obstante es posible explicar un mayor porcentaje de la variabilidad aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva.

En el apartado 5.4.3 se presenta la influencia de la temperatura ambiente y del hormigón en la resistencia a compresión y en el asentamiento en cono de Abrams. Se incluyen gráficas de la temperatura ambiente a la que se realizan los ensayos, de las resistencias a 7 y a 28 días, del asentamiento en cono de Abrams y del porcentaje de cemento en función del mes de fabricación durante todo el período de estudio, y esto para los hormigones de resistencia característica  $25 \text{ N/mm}^2$  (4136 pares de probetas a 7 y 28 días) y para los HA-25/B/20 sin fibras y aditivo 1 y 2 (3478 pares de probetas a 7 y 28 días). Los valores representados son la media de los datos existentes en el período de estudio y referentes al mes de fabricación.

La evolución de la resistencia a compresión con el tiempo se analiza en el apartado 5.4.4 viendo el ajuste de los datos experimentales de la base de datos general a modelos existentes y a nuevos modelos propuestos. En este caso se toman exclusivamente valores de resistencias a 7 y a 28 días sin ningún tipo de corrección.

Cabe señalar que la bondad del ajuste se evalúa mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ , que se interpreta como la proporción de variación de la variable de

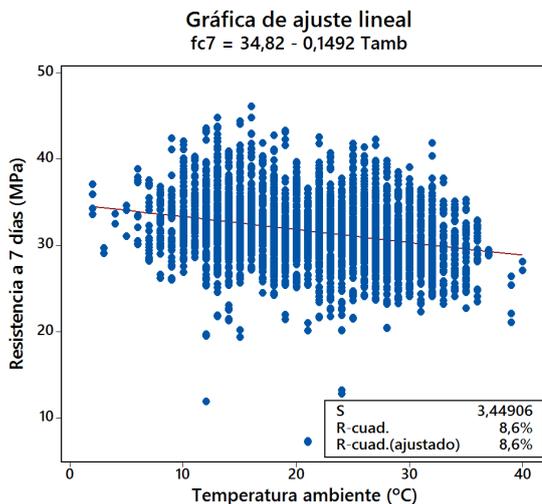
respuesta explicada mediante el modelo de regresión lineal, es decir, el coeficiente  $R^2$  es la proporción de la variabilidad explicada por el modelo (Draper y Smith 1999) (Yepes y col. 2009).

Finalmente se realiza el análisis de varianza y el análisis multivariante o de componentes principales en los dos últimos apartados.

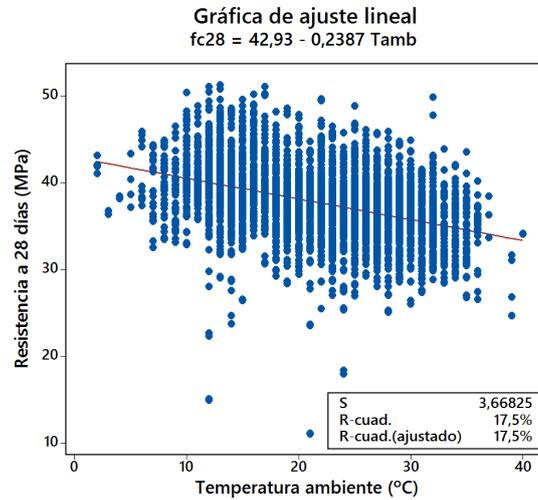
### 5.4.2 Resistencia a compresión del hormigón. Influencia de diferentes variables y modelos estadísticos

En el siguiente apartado se realiza un análisis de regresión de las variables de la resistencia a compresión del hormigón. Para ello se realizan inferencias acerca de modelos lineales simples o múltiples y se obtienen medidas cuantitativas del grado de relación de las variables a través del coeficiente de determinación  $R^2$ . Los modelos lineales se ajustan por mínimos cuadrados de forma que la variable de respuesta se encuentre suficientemente explicada con un número no excesivamente grande de variables explicativas.

En primer lugar, se intenta explicar cada variable de respuesta en función de aquella variable independiente con la cual se encuentra más correlacionada. Primariamente se toma como variable independiente la temperatura ambiente existente en el momento de la toma de la muestra de hormigón correspondiente y como variable de respuesta la resistencia a hormigón a 7 y 28 días. En las figuras 5.13 y 5.14 tenemos las gráficas de ajuste lineal de las resistencias a 7 y a 28 días en función de la temperatura ambiente para todos los ensayos de la base de datos general.

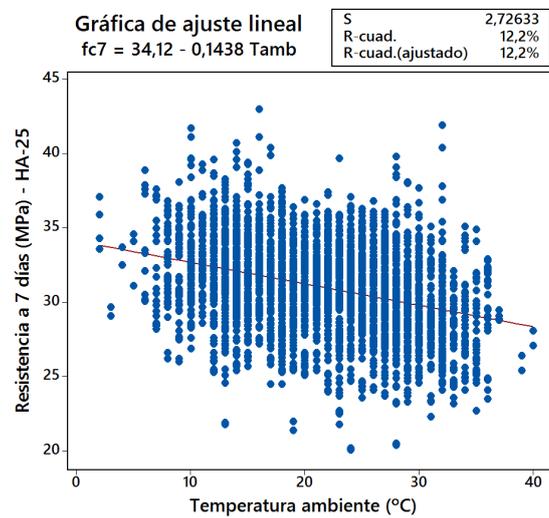


**Figura 5.13:** Resistencia a compresión a 7 días en función de la temperatura ambiente (Todos los ensayos).

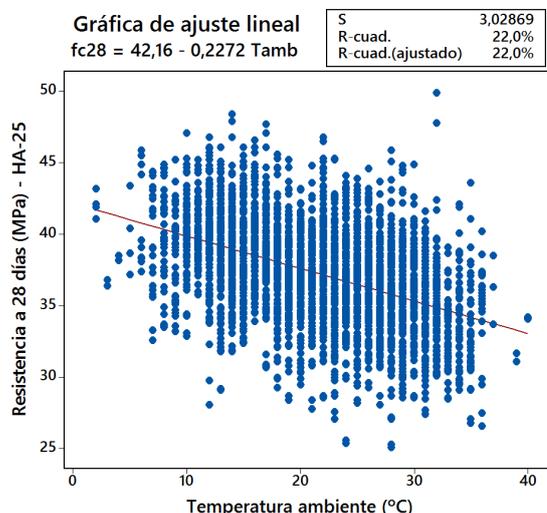


**Figura 5.14:** Resistencia a compresión a 28 días en función de la temperatura ambiente (Todos los ensayos).

La temperatura ambiente disminuye la resistencia a compresión del hormigón de forma más clara a 28 días ( $R^2 = 17,5\%$ ) que a 7 días ( $R^2 = 8,6\%$ ). Se comprueba una disminución media de la resistencia a 28 días del 12,51% cuando la temperatura pasa de 20 a 40 °C.



**Figura 5.15:** Resistencia a compresión a 7 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-25).

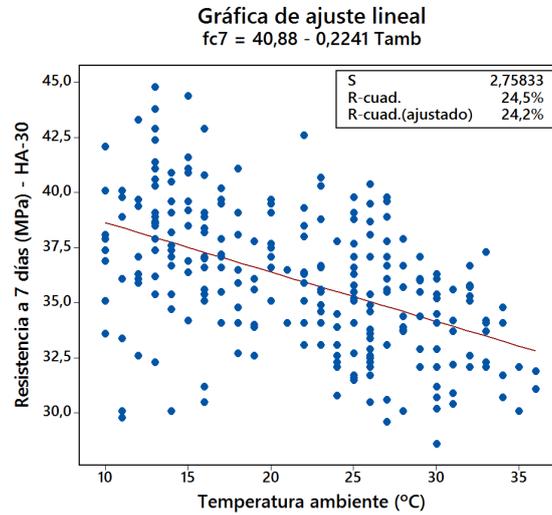


**Figura 5.16:** Resistencia a compresión a 28 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-25).

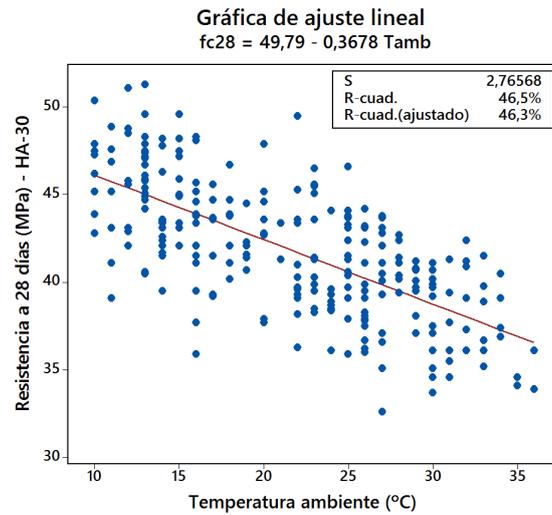
En las figuras 5.15 y 5.16 se observa la variación de las resistencias a 7 y 28 días respectivamente en función de la temperatura, únicamente para las muestras correspondientes a hormigones de  $25 \text{ N/mm}^2$  de resistencia característica. Se aprecia que la temperatura ambiente disminuye de forma más clara la resistencia a compresión del hormigón a 28 días ( $R^2 = 22,0\%$ ) que a 7 días ( $R^2 = 12,2\%$ ). Idénticamente sucede para las muestras de hormigones de resistencia característica  $30 \text{ N/mm}^2$ , tal y como se observa en las figuras 5.17 y 5.18, en las que se aprecia mayor disminución de la resistencia a 28 días ( $R^2 = 46,5\%$ ) con respecto a la temperatura ambiente que a 7 días ( $R^2 = 24,5\%$ ). Diversos autores han concluido mayores disminuciones de la resistencia a 28 días que a 7 días tal y como crece la temperatura ambiente (Alexander y Taplín 1962) (Ortiz 2005) (Gómez y Vidal 2006) (Cánoves 2012).

La cantidad de cemento hace crecer la resistencia a compresión del hormigón de forma más acusada a 7 días ( $R^2 = 24,4\%$ ) que a 28 días ( $R^2 = 14,1\%$ ) como se puede observar en las figuras 5.19 y 5.20. La cantidad de cemento viene expresada en porcentaje en peso del cemento con respecto al total de componentes sólidos. Un incremento en el porcentaje de la cantidad de cemento del  $20\%$  provoca un incremento del  $10,89\%$  en la resistencia a compresión a 7 días y del  $7,73\%$  en la resistencia a 28 días. En las figuras 5.19 y 5.20 se aprecia que para hormigones con porcentajes en peso de cemento por debajo del  $12\%$  las resistencias tanto a 7 como a 28 días se encuentran mal explicadas por la recta.

Si se observan las figuras 5.21 y 5.22, se aprecia que un modelo cuadrático para las resistencias a compresión en función del porcentaje de cemento, mejora muy poco

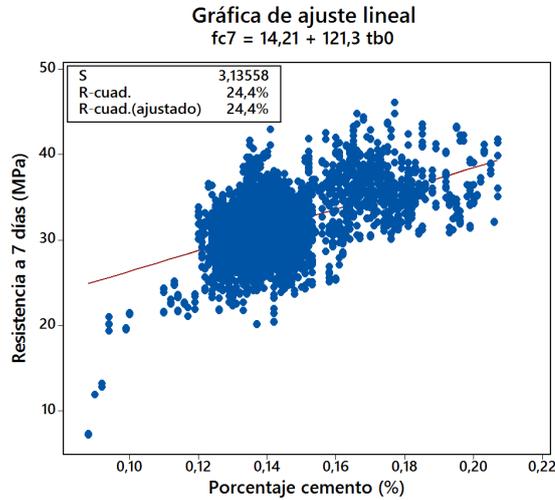


**Figura 5.17:** Resistencia a compresión a 7 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-30).

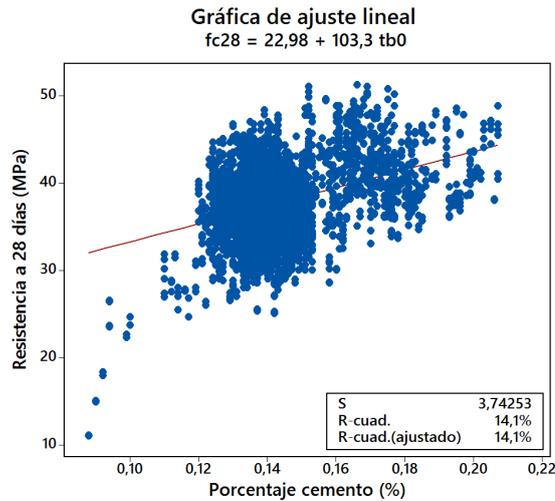


**Figura 5.18:** Resistencia a compresión a 28 días en función de la temperatura ambiente (Para hormigones HA-30).

el coeficiente de determinación  $R^2$  con respecto al modelo lineal, pasando de 24,4 % a 25,1 % y de 14,1 % a 14,9 % en las resistencias a 7 y a 28 días respectivamente.

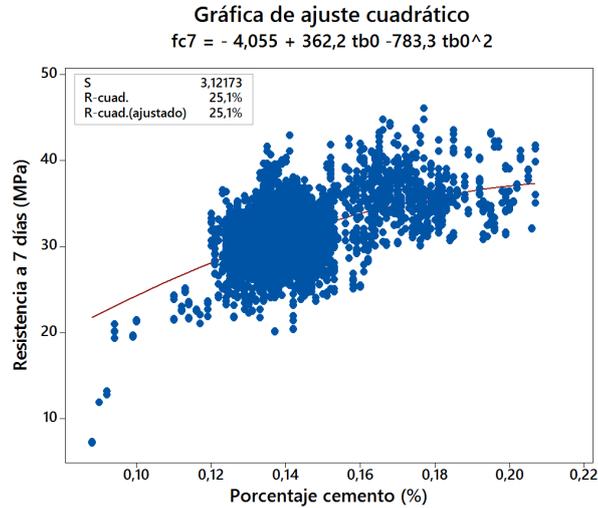


**Figura 5.19:** Resistencia a compresión a 7 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos).

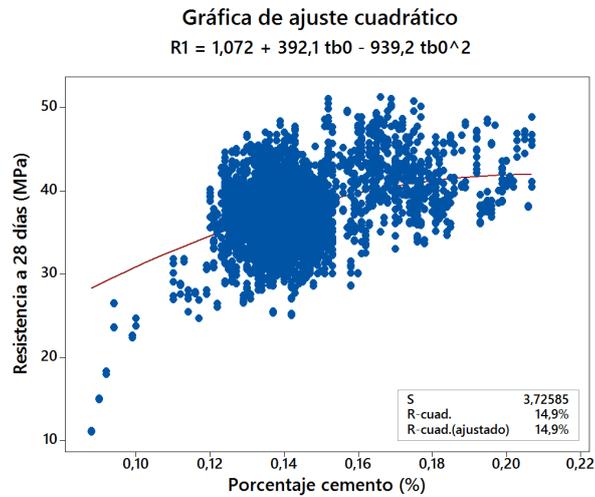


**Figura 5.20:** Resistencia a compresión a 28 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos).

A mayor asiento en el cono de Abrams, menor resistencia a compresión tanto a 7 días ( $R^2 = 2,7\%$ ) como a 28 días ( $R^2 = 3,4\%$ ). Si aumenta el descenso en el cono 1 cm, la resistencia a 7 días disminuye un 1,28% y la resistencia a 28 días un 1,34%, tal y como se puede observar en las figuras 5.23 y 5.24.

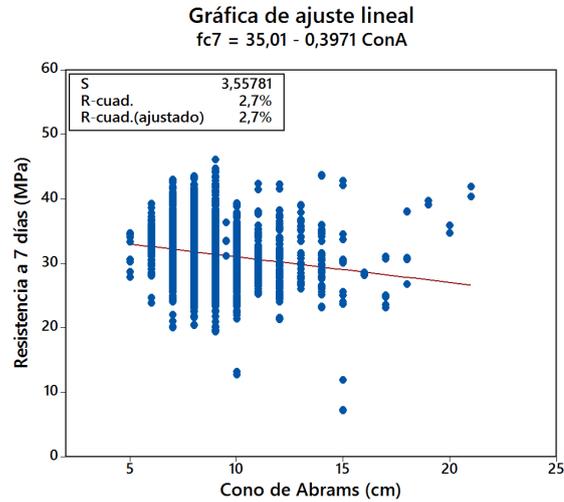


**Figura 5.21:** Modelo cuadrático resistencia a compresión a 7 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos).

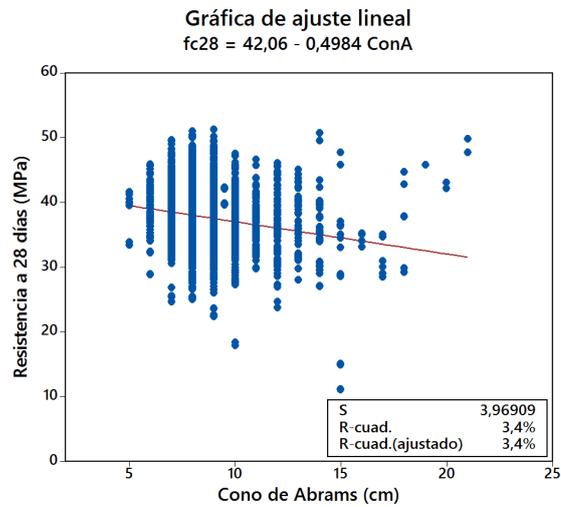


**Figura 5.22:** Modelo cuadrático resistencia a compresión a 28 días en función del porcentaje de cemento (Todos los ensayos).

Como vemos hasta ahora los coeficientes de determinación  $R^2$  obtenidos con los modelos de regresión lineal simple son bajos y consecuentemente no se explica bien el fenómeno, con lo que debemos de hablar más bien de tendencias. La explicación



**Figura 5.23:** Resistencia a compresión a 7 días en función del cono de Abrams (Todos los ensayos).



**Figura 5.24:** Resistencia a compresión a 28 días en función del cono de Abrams (Todos los ensayos).

a estos  $R^2$  tan bajos tiene que ver con el gran número de variables que intervienen en la respuesta en bases de datos como la utilizada.

Cánoves (2012) analiza la resistencia a compresión de 5505 lotes ensayados de hormigón HA-25/B/20/IIa y 1317 lotes de hormigón HA-30/B/20/IIa producidos

en la provincia de Valencia del año 2001 al 2011 y del 2003 al 2011 respectivamente, obteniendo coeficientes  $R^2$  menores a los de nuestro estudio. En la tabla 5.6 se presentan los valores para los hormigones HA-25/B/20/IIa fabricados únicamente con cemento tipo I.

Variable explicativa	$R^2$ (%)
Contenido en cemento	3,97
Temperatura ambiente	1,37
Consistencia (6-10 <i>cm</i> )	30,28
Relación a/c	40,92
Resistencia $f_{c7}$	61,62

**Tabla 5.6:** Valores de  $R^2$  de ecuaciones de regresión simple para  $f_{c28}$  y distintas variables explicativas de Cánoves (2012) para HA-25.

En la tabla 5.7 se presentan los valores obtenidos por Cánoves (2012) para los hormigones HA-30/B/20/IIa fabricados únicamente con cemento tipo I, observándose, también, valores de  $R^2$  bajos y por consiguiente capacidad predictiva muy deficiente.

Variable explicativa	$R^2$ (%)
Contenido en cemento	3,39
Temperatura ambiente	2,12
Consistencia (6-10 <i>cm</i> )	28,64
Relación a/c	30,42
Resistencia $f_{c7}$	61,62

**Tabla 5.7:** Valores de  $R^2$  de ecuaciones de regresión simple para  $f_{c28}$  y distintas variables explicativas de Cánoves (2012) para HA-30.

No obstante, es posible explicar un porcentaje mayor de la variabilidad aplicando modelos de regresión múltiple aditiva. Se trata de aumentar el coeficiente de determinación  $R^2$  incorporando variables independientes explicativas mediante el proceso *stepwise* de pasos sucesivos (Hocking 1976) (Yepes *y col.* 2009), consistente en introducir las variables una por una y comprobar si la variable permanece o sale del modelo. Tomamos como criterio de entrada en el modelo un incremento de la varianza explicada significativo al 5% ( $F=0,05$ ) mientras que para la salida se considera un decremento del 10% ( $F=0,10$ ). La primera variable que se introduce es la que tiene un coeficiente de correlación  $R$  más alto. A continuación se vuelven a calcular todas las correlaciones eliminando la influencia de aquella que ya ha entrado en el modelo, y se introduce la siguiente variable con mayor  $R$ ,

consiguiéndose de esta forma que las variables que entren en el modelo no sean dependientes de las que ya figuraban.

Realizando el proceso de pasos sucesivos para la variable de respuesta resistencia a 28 días  $f_{c28}$ , tenemos 12 modelos como se puede observar en la tabla 5.8. En cada uno de los doce modelos se incorpora una variable y no sale ninguna. El orden de incorporación de variables es el siguiente: temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), porcentaje de cemento ( $tb0$ ), cono de Abrams ( $ConA$ ), tiempo transcurrido a la realización del ensayo ( $trCA$ ), tipo de fibras empleadas ( $Fib$ ), hora de fabricación de la probeta ( $HoraFabPro$ ), tipo cemento ( $TipoCem$ ), temperatura del hormigón ( $Thorm$ ), contenido de aditivo sobre peso cemento ( $AdiReal$ ), tipo de aditivo ( $TipoAd$ ), módulo granulométrico de la mezcla ( $MG$ ) y tamaño máximo de la mezcla ( $Dmax$ ).

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error t <sub>íp.</sub> de la estimación
1	,418 <sup>a</sup>	,175	,175	3,668249
2	,655 <sup>b</sup>	,429	,429	3,052005
3	,690 <sup>c</sup>	,476	,476	2,923007
4	,700 <sup>d</sup>	,489	,489	2,886550
5	,707 <sup>e</sup>	,501	,500	2,855465
6	,710 <sup>f</sup>	,505	,504	2,843642
7	,712 <sup>g</sup>	,507	,507	2,836522
8	,715 <sup>h</sup>	,511	,510	2,827546
9	,717 <sup>i</sup>	,514	,513	2,817432
10	,718 <sup>j</sup>	,516	,515	2,813597
11	,719 <sup>k</sup>	,517	,516	2,810341
12	,720 <sup>l</sup>	,518	,517	2,807810

Tabla 5.8: Pasos sucesivos para la variable  $f_{c28}$ .

Un modelo lineal múltiple con tres factores es capaz de explicar el 47,64% de la variabilidad de la resistencia a compresión a 28 días, siendo los factores más influyentes de mayor a menor los siguientes: temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), porcentaje de cemento ( $tb0$ ) y cono de Abrams ( $ConA$ ). Con un factor adicional como es el tiempo al que se realiza el cono de Abrams y las probetas ( $trCA$ ) el  $R^2$  pasa a ser del 48,95%. En la tabla 5.9 se observan las ecuaciones de regresión para estas cuatro variables explicativas, pudiéndose apreciar una mayor influencia de la temperatura ambiente que del porcentaje de cemento.

Si pasamos de cuatro a doce variables explicativas, mejoramos el coeficiente de determinación  $R^2$  tan solamente de 48,9% a 51,8% como podemos observar en la tabla 5.8

Si se realiza el proceso de pasos sucesivos para la variable de respuesta resistencia a 7 días  $f_{c7}$ , tenemos también 12 modelos como se puede observar en la tabla 5.10. En cada uno de los doce modelos se incorpora una variable y no sa-

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c28} = 49,933 - 0,23869 Tamb$	17,50
$f_{c28} = 22,976 + 103,27 tb0$	14,13
$f_{c28} = 24,067 - 0,3173 Tamb + 143,56 tb0$	42,91
$f_{c28} = 27,929 - 0,31176 Tamb + 151,41 tb0 - 0,5932 ConA$	47,64
$f_{c28} = 29,434 - 0,30824 Tamb + 153,64 tb0 - 0,5947 ConA - 0,02937 trCA$	48,95

**Tabla 5.9:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c28}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio.

le ninguna. El orden de incorporación de variables es el siguiente: porcentaje de cemento ( $tb0$ ), temperatura ambiente ( $Tamb$ ), cono de Abrams ( $ConA$ ), tiempo transcurrido a la realización del ensayo ( $trCA$ ), tipo de fibras empleadas ( $Fib$ ), hora de fabricación de la probeta ( $HoraFabPro$ ), resistencia verdadera del cemento ( $ResisVerdCem$ ), temperatura del hormigón ( $Thorm$ ), tipo de cemento ( $TipoCem$ ), contenido de aditivo sobre peso cemento ( $AdiReal$ ), tipo de aditivo ( $TipoAd$ ) y módulo granulométrico de la mezcla ( $MG$ ).

Resumen del modelo				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,494 <sup>a</sup>	,244	,244	3,135640
2	,661 <sup>b</sup>	,437	,437	2,707236
3	,696 <sup>c</sup>	,485	,484	2,590069
4	,704 <sup>d</sup>	,496	,495	2,561920
5	,708 <sup>e</sup>	,502	,501	2,547044
6	,712 <sup>f</sup>	,507	,507	2,533031
7	,715 <sup>g</sup>	,512	,511	2,522106
8	,716 <sup>h</sup>	,513	,512	2,518436
9	,718 <sup>i</sup>	,515	,514	2,513978
10	,719 <sup>j</sup>	,517	,516	2,509449
11	,720 <sup>k</sup>	,519	,518	2,505285
12	,721 <sup>l</sup>	,519	,518	2,503519

**Tabla 5.10:** Pasos sucesivos para la variable  $f_{c7}$ .

En lo que se refiere a la resistencia a compresión a 7 días, un modelo lineal múltiple con tres factores es capaz de explicar el 48,47% de la variabilidad, siendo en este caso los factores más influyentes de mayor a menor los siguientes: porcentaje de cemento ( $tb0$ ), temperatura ambiente ( $Tamb$ ) y cono de Abrams ( $ConA$ ). También es importante resaltar que el porcentaje de cemento ( $tb0$ ) influye más en la resistencia a 7 que a 28 días, y la temperatura ambiente ( $Tamb$ ) a la inversa. Si adicionamos el factor tiempo al que se realiza el cono de Abrams y las probetas ( $trCA$ ) el  $R^2$  pasa a ser del 49,59%. En la tabla 5.11 se observan las ecuaciones de regresión para estas cuatro variables explicativas y se puede apreciar, además, mayor influencia del porcentaje de cemento que de la temperatura ambiente.

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c7} = 14,212 + 121,31 tb0$	24,44
$f_{c7} = 34,819 - 0,14923 Tamb$	8,58
$f_{c7} = 15,009 - 0,23177 Tamb + 150,74 tb0$	43,69
$f_{c7} = 18,475 - 0,22680 Tamb + 157,79 tb0 - 0,5323 ConA$	48,47
$f_{c7} = 19,721 - 0,22388 Tamb + 159,63 tb0 - 0,5336 ConA - 0,02432 trCA$	49,59

**Tabla 5.11:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c7}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio.

Si pasamos de cuatro a doce variables explicativas, mejoramos el coeficiente de determinación  $R^2$  tan solamente de 49,6 % a 51,9 % como podemos observar en la tabla 5.10

Factores como la hora a la que se han fabricado las probetas o la existencia de fibras no afectan significativamente a las resistencias a compresión ni a 7 ni a 28 días. También en nuestro estudio, factores como el % de aditivo, la resistencia verdadera del cemento, el tamaño máximo del árido o el módulo granulométrico tienen una incidencia baja.

En las tablas 5.12 y 5.13 podemos consultar otras ecuaciones de regresión con sus correspondientes coeficientes de determinación  $R^2$  para las variables de respuesta  $f_{c28}$  y  $f_{c7}$ , en función de diferentes variables explicativas. Después de este análisis de regresión múltiple y de la revisión bibliográfica, se concluye que estos modelos con  $R^2$  tan bajos obligan a la búsqueda de modelos predictivos mejores y más potentes.

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c28} = 42,886 - 0,23851 Tamb + 0,075 HoraFabPro$	17,48
$f_{c28} = 27,62 - 0,32591 Tamb + 164,24 tb0 - 0,5910 ConA + 2,578 \%AdiReal$	47,84
$f_{c28} = 27,63 - 0,32746 Tamb + 145,31 tb0 - 0,5921 ConA + 3,027 \%AdiReal - 0,04272 TipoAditivo$	47,88
$f_{c28} = 27,925 - 0,31364 Tamb + 151,61 tb0 - 0,5867 ConA - 1,849 Fib$	48,68
$f_{c28} = 25,386 - 0,30968 Tamb + 150,16 tb0 - 0,5839 ConA + 0,0467 Resist.verd.Cem$	47,78
$f_{c28} = 30,74 - 0,31271 Tamb + 153,61 tb0 - 0,5936 ConA - 0,566 MG$	47,67
$f_{c28} = 27,089 - 0,31256 Tamb + 152,60 tb0 - 0,5916 ConA + 0,027 Dmax$	47,66
$f_{c28} = 29,13 + 116,01 tb0 - 0,6559 ConA - 0,03630 trCA$	21,92
$f_{c28} = 23,24 + 113,73 tb0 - 0,6334 ConA - 0,03654 trCA + 0,1086 Resis.verd.Cem$	22,69
$f_{c28} = 30,287 + 112,84 tb0 - 0,6339 ConA - 0,03708 trCA - 0,05515 Tipo$	22,96

**Tabla 5.12:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c28}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio.

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c7} = 34,762 - 0,14914 T_{amb} + 0,098 \text{ HoraFab.Pro}$	8,57
$f_{c7} = 18,287 - 0,2354 T_{amb} + 154,64 tb0 - 0,5309 ConA + 1,567 \%AdiReal$	48,56
$f_{c7} = 18,297 - 0,23689 T_{amb} + 153,75 tb0 - 0,5320 ConA + 1,998 \%AdiReal - 0,0453 TipoAditivo$	48,60
$f_{c7} = 18,473 - 0,22802 T_{amb} + 157,92 tb0 - 0,5281 ConA - 1,202 Fib$	49,02
$f_{c7} = 14,632 - 0,22366 T_{amb} + 155,90 tb0 - 0,5183 ConA + 0,0706 Resist.verd.Cem$	48,87
$f_{c7} = 12,52 - 0,22479 T_{amb} + 153,11 tb0 - 0,5314 ConA + 1,20 MG$	48,62
$f_{c7} = 16,557 - 0,22862 T_{amb} + 160,52 tb0 - 0,5286 ConA + 0,0617 Dmax$	48,60
$f_{c7} = 19,50 + 132,30 tb0 - 0,5780 ConA - 0,02935 trCA$	31,71
$f_{c7} = 13,239 + 129,88 tb0 - 0,5541 ConA - 0,02961 trCA + 0,1155 Resis.verd.Cem$	32,81
$f_{c7} = 20,535 + 129,47 tb0 - 0,5583 ConA - 0,03005 trCA - 0,04931 Tipo$	32,75

**Tabla 5.13:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c7}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio.

Si planteamos modelos lineales múltiples para la base de datos reducida, donde los ensayos se han realizado en un periodo de tiempo muy reducido, con el mismo cemento y controlando exactamente la cantidad de agua existente en la mezcla, tenemos que tanto a 7 como a 28 días la temperatura ambiente no tiene incidencia en la resistencia a compresión del hormigón, siendo el factor más importante la relación cemento/agua. Esta nos explica el 81,23 % de la variabilidad ( $R^2 = 81,23\%$ ) para la resistencia a 28 días y el 87,82 % de la variabilidad ( $R^2 = 87,82\%$ ) para la resistencia a 7 días. En su defecto, el factor más importante sería el porcentaje de cemento con valores de  $R^2$  de 65,18 % y 75,33 % para resistencia a 28 y 7 días respectivamente. Esto anterior se observa en las tablas 5.14 y 5.16.

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c28} = -4,72 + 23,7 c/a$	81,23
$f_{c28} = -0,68 + 270,2 tb0$	65,18
$f_{c7} = -9,42 + 22,82 c/a$	87,82
$f_{c7} = -6,63 + 269,0 tb0$	75,33

**Tabla 5.14:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c28}$  y  $f_{c7}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio (Base de datos reducida).

Planteando un modelo lineal únicamente con dos factores: porcentaje de cemento ( $tb0$ ) y cono de Abrams ( $ConA$ ), este modelo es capaz de explicar el 81,26 % de la variabilidad de la resistencia a compresión a 28 días, y el 89,49 % de la variabilidad de la resistencia a 7 días, tal y como se puede observar en la tabla 5.15. Esto nos permite explicar un porcentaje superior de variabilidad con una regresión lineal con dos variables explicativas, cantidad de cemento y cono de Abrams, frente a la regresión con la sola variable relación cemento/agua. Esto tiene una importancia significativa, ya que como sabemos, la relación  $c/a$ , es un dato difícil de obtener

de manera exacta en la producción industrial de hormigones, no así en pruebas de laboratorio.

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c28} = 5,29 - 0,584 \text{ ConA} + 265,9 \text{ tb0}$	81,26
$f_{c7} = -1,44 - 0,5072 \text{ ConA} + 265,3 \text{ tb0}$	89,49

**Tabla 5.15:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c28}$  y  $f_{c7}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio (Base de datos reducida).

Factores como el % de aditivo, el tamaño máximo del árido o el módulo granulométrico tienen una incidencia prácticamente nula. También cabe resaltar que la densidad en estado endurecido es un factor que afecta relativamente a la resistencia en la base de datos reducida. Esto anterior se puede visualizar en la tabla 5.16.

Ecuación de regresión	$R^2$ (%)
$f_{c28} = 32,24 + 0,033 \text{ Tamb}$	0,17
$f_{c28} = -5,07 + 23,8 \text{ tb0} + 22,06 \text{ c/a}$	81,34
$f_{c28} = -378 + 0,0321 \text{ Peso1}$	18,68
$f_{c28} = 15,6 + 24,59 \text{ c/a} - 4,16 \text{ MG}$	82,04
$f_{c28} = 38,73 - 0,621 \text{ ConA}$	18,21
$f_{c7} = 25,48 + 0,064 \text{ Tamb}$	0,77
$f_{c7} = -10,33 + 61,3 \text{ tb0} + 18,59 \text{ c/a}$	88,72
$f_{c7} = -507 + 0,04171 \text{ Peso3}$	42,48
$f_{c7} = -5,5 + 23,0 \text{ c/a} - 0,81 \text{ MG}$	87,85
$f_{c7} = 31,93 - 0,544 \text{ ConA}$	16,32

**Tabla 5.16:** Ecuaciones de regresión para  $f_{c28}$  y  $f_{c7}$  y valores de  $R^2$  para los distintos modelos de estudio (Base de datos reducida).

En Vilanova (2009) se presenta la relación lineal entre la resistencia a compresión y la relación cemento/agua,  $f_c = 2,626 + 25,132 \cdot c/a$ , de los hormigones autocompactables recopilados en una base de datos, siendo el valor de  $R^2 = 54\%$ . Dicha base de datos estudiada contiene 627 dosificaciones y fue construida consultando 138 referencias bibliográficas.

Namyong y col. (2004) consideran una base de datos compuesta por 1442 ensayos a compresión de hormigones entre 18 y 27 MPa, una relación  $a/c$  entre 0,32 y 0,62, un tamaño máximo de árido de 25 mm y un asentamiento en cono de Abrams de 12 a 15 cm y obtienen una regresión lineal simple para la resistencia a 28 días con la variable explicativa  $c/a$  con  $R^2 = 47\%$  y si la variable explicativa es la cantidad de cemento, entonces  $R^2 = 39,5\%$ .

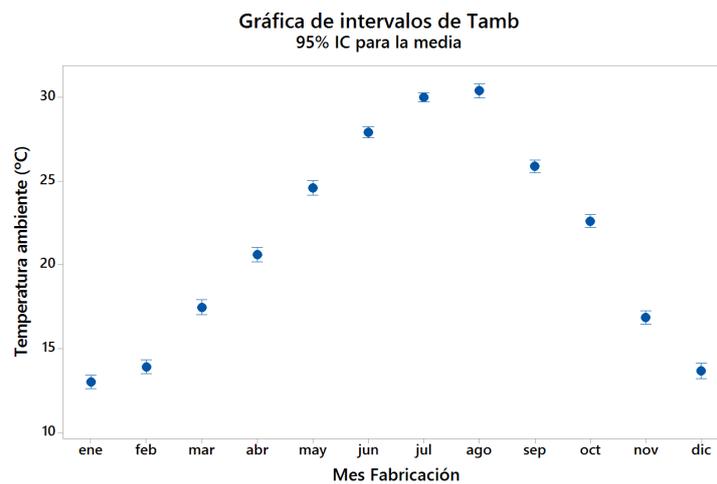
Estos valores bajos del coeficiente de determinación  $R^2$  encontrados en las referencias bibliográficas para las regresión lineal cuando la variable explicativa es

la relación  $c/a$ , pueden ser consecuencia, entre otros factores, de la dificultad de conocer el valor exacto de  $c/a$ .

### 5.4.3 Influencia de la temperatura en la resistencia a compresión del hormigón

La influencia en la resistencia a compresión y en la pérdida de trabajabilidad del hormigón, de la temperatura ambiente y del hormigón elevadas, es bien conocida y está adecuadamente documentada.

Se sabe que temperaturas ambientes y del hormigón elevadas producen reducciones del valor de la resistencia a compresión a 28 días pudiendo aumentar la resistencia a edades tempranas, así como incrementos en la velocidad de pérdida de fluidez, es decir, pérdidas más rápidas de docilidad y trabajabilidad en el hormigón en estado fresco.



**Figura 5.25:** Evolución de la temperatura ambiente durante el estudio (HA-25).

Como consecuencia de las pérdidas de resistencia a compresión en condiciones climáticas de alta temperatura, en periodo estival, algunas plantas de hormigón entre las que se encuentra la empleada en el estudio, dosifican mayor cantidad de cemento como se puede ver en las figuras 5.34 y 5.35, que puede apoyarse con una mayor dosificación de aditivo reductor de agua. El objetivo de esto anterior radica en conseguir mantener el cono como se observa en las figuras 5.28 y 5.33 y que se cumplan las resistencias características establecidas para cada tipo de hormigón.

Se ha realizado un estudio estadístico sobre la evolución de la temperatura ambiente en el momento de realización de las probetas, de la cantidad de cemento de la dosificación ensayada y del valor de la resistencia a compresión del hormi-

gón tanto a 7 como a 28 días a lo largo del año, así como del asentamiento en cono de Abrams. Un primer estudio se ha realizado sobre todos los hormigones de resistencia característica  $25 \text{ N/mm}^2$ , es decir, no se han filtrado los datos ni por consistencia, ni por tamaño máximo, ni por clase de exposición, ni por contener o no fibras, ni siquiera por tipo de aditivo.

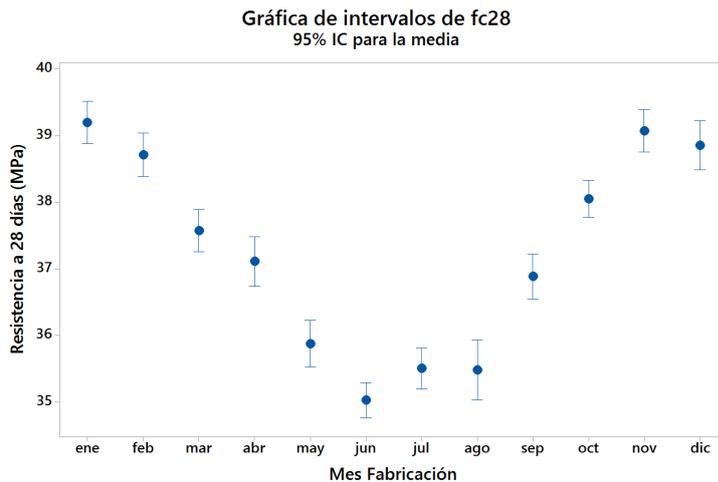


Figura 5.26: Evolución de la resistencia a 28 días por meses durante el estudio (HA-25).

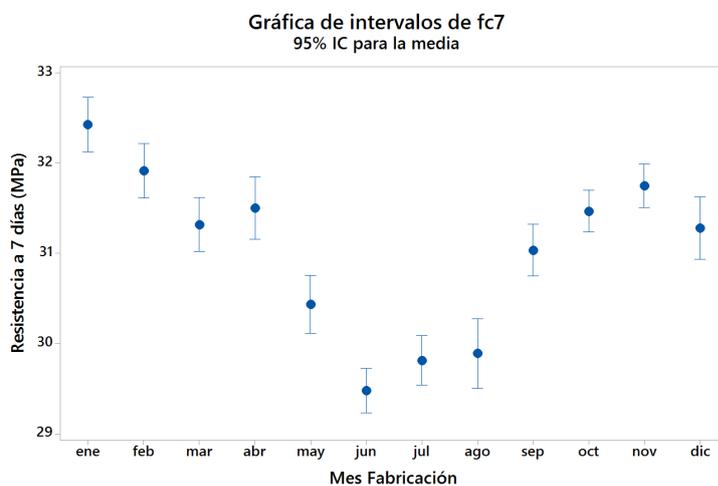
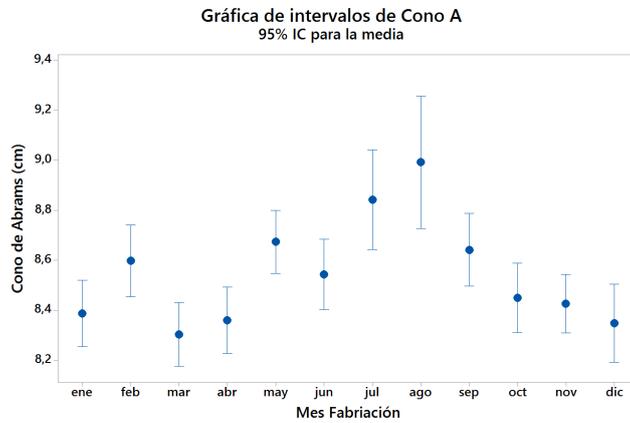


Figura 5.27: Evolución de la resistencia a 7 días por meses durante el estudio (HA-25).

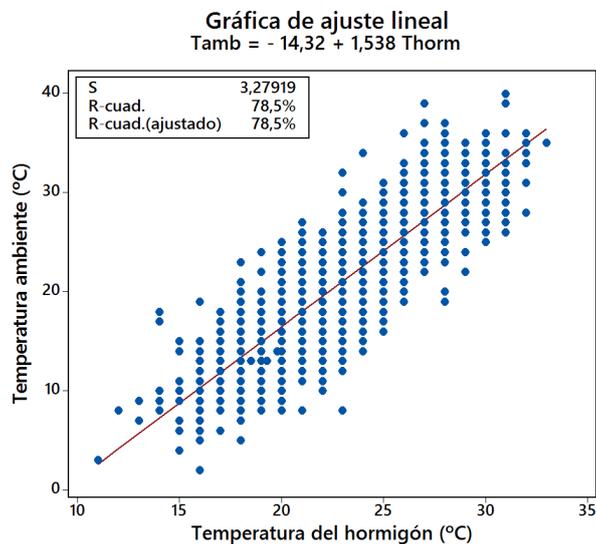
La temperatura, tal y como se ha señalado anteriormente, corresponde a la temperatura ambiente existente a la realización de las probetas y el ensayo en cono de Abrams. En cuanto a la cantidad de cemento, se refiere al porcentaje en peso del



**Figura 5.28:** Evolución del cono de Abrams por meses durante el estudio (HA-25).

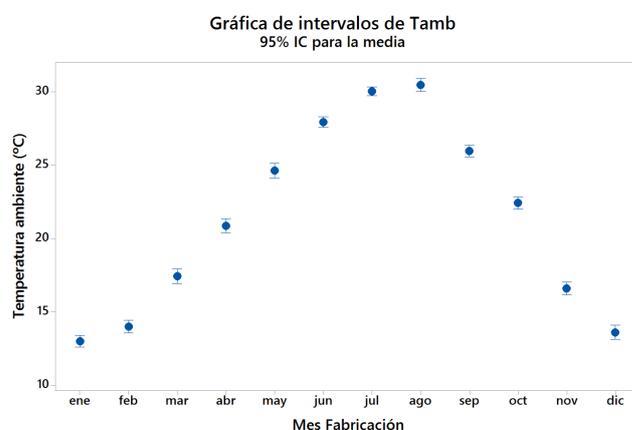
cemento con respecto al total de componentes sólidos (es decir, ni agua ni aditivo). El valor de la resistencia a compresión se corresponde con las resistencias tanto a 7 como a 28 días de cada familia.

En la figura 5.29 vemos la correlación existente entre la temperatura del hormigón y la temperatura ambiente. El modelo lineal presenta ajustes con  $R^2 = 78,5\%$  a la recta  $T_{amb} = -14,32 + 1,538 \cdot T_{horm}$ .

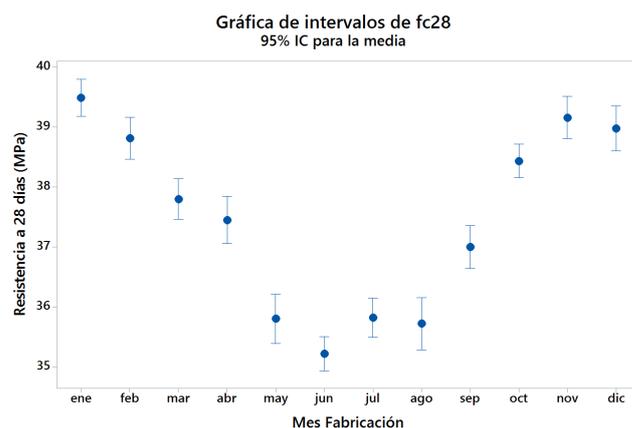


**Figura 5.29:** Relación entre la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón.

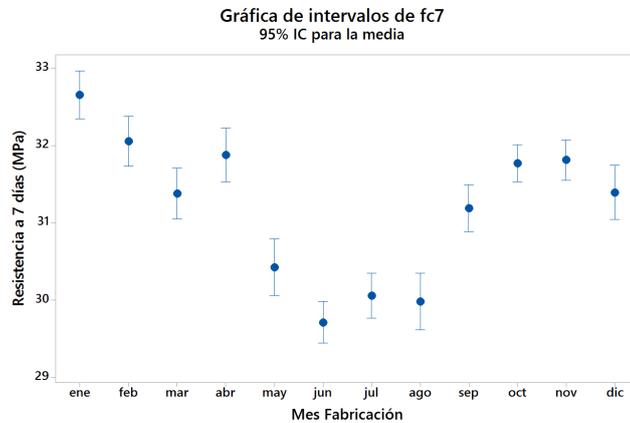
Posteriormente se particulariza el estudio a los hormigones sin fibras tipo HA-25/B/20 fabricados con el aditivo a base de lignosulfonatos. Se realiza el estudio de las temperaturas, cantidad de cemento, asentamiento en cono de Abrams y resistencias mecánicas a 7 y 28 días para los ensayos correspondientes al hormigón HA-25/B/20, es decir, para el hormigón de resistencia característica 25 MPa, de tamaño máximo 20 mm y consistencia blanda. Dado que la EHE-08 propone en su tabla 86.5.2.1 una tolerancia de  $\pm 1$  cm en el asiento para las consistencias blandas, el intervalo resultante de asiento para dicha consistencia resulta 5-10 cm. En consecuencia hemos considerado todos los ensayos correspondientes a este intervalo de asiento.



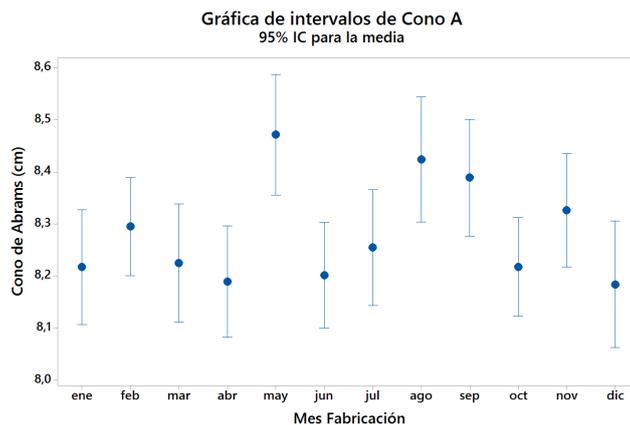
**Figura 5.30:** Evolución de la temperatura ambiente durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2).



**Figura 5.31:** Evolución de la resistencia a 28 días por meses durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2).



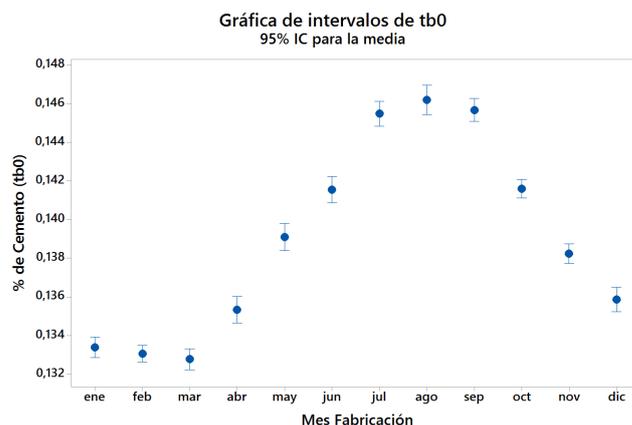
**Figura 5.32:** Evolución de la resistencia a 7 días por meses durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2).



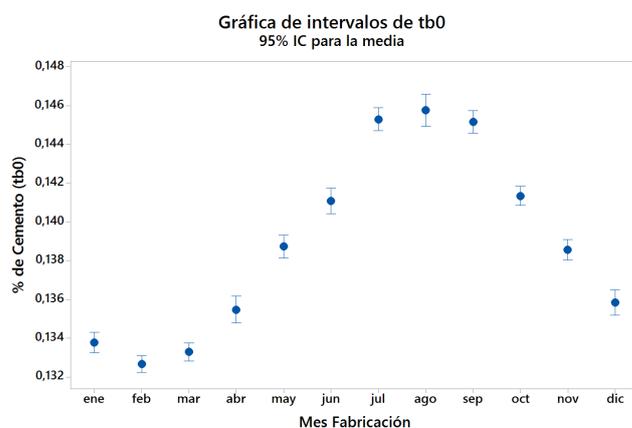
**Figura 5.33:** Evolución del cono de Abrams por meses durante el estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2).

En lo que se refiere a las temperaturas ambiente existentes a la realización del ensayo, en la base de datos se presentan valores máximos para los meses de julio y agosto (generalmente entre 25 y 35 °C con algún caso extremo de 40 °C) y valores mínimos en diciembre, enero y febrero (con valores entre 10 y 15 °C con algunos casos de hasta 20 °C). En las figuras 5.25 y 5.30 se representan las temperaturas ambiente medias durante el periodo de duración del estudio en función de los meses y esto para los ensayos de los hormigones HA-25 y HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2. Se ve claramente el aumento de la temperatura ambiente media en época estival y su consecuencia en cuanto a la disminución de resistencia tanto a 7 días (figuras 5.27 y 5.32) como a 28 días (5.26 y 5.31) y esto incluso con un aumento de la dosificación de cemento.

Hay diversos autores que han estudiado también la influencia de la hora de hormigonado en las resistencias a compresión a 28 días obtenidas y esto, tanto para invierno como para verano, tal y como se comenta en el apartado 2.6.



**Figura 5.34:** Evolución del porcentaje de cemento por meses durante la duración del estudio (HA-25).



**Figura 5.35:** Evolución del porcentaje de cemento por meses durante la duración del estudio (HA-25/B/20 sin fibras y aditivos 1 y 2).

En cuanto a la cantidad de cemento, se observa en las figuras 5.34 y 5.35 que se dosifica mayor cantidad de cemento en los meses estivales para paliar la disminución de resistencias en el hormigón como consecuencia del aumento de la temperatura a la que se realiza el ensayo. Para hormigones HA-25/B/20, aumentos de cemento del 5,46 % ( $tb_0 = 0,1337$  y  $tb_0 = 0,1410$  para enero y junio respectivamente) suponen caídas de resistencia de un 12,09 % ( $f_{c28} = 39,48$  MPa y  $f_{c28} = 35,22$  MPa para enero y junio respectivamente) entre los meses de enero a junio.

#### 5.4.4 Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo

Como es bien sabido, es difícil predecir la resistencia a compresión del hormigón a partir de resultados obtenidos a otras edades dada la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso de endurecimiento del hormigón, como son el tipo y la cantidad de cemento, la relación agua/cemento, la consistencia del hormigón, la incorporación de aditivos y las condiciones de curado, sobre todo la temperatura (Cánoves 2012). En el apartado 2.8 se ha estudiado el estado del conocimiento y en este apartado se va verificar el ajuste de nuestros datos experimentales a los diferentes modelos existentes y a nuevos modelos de comportamiento propuestos.

Tomando la base de datos general con las 2413 muestras con cuatro roturas por muestra, de hormigones fabricados en la misma planta, se obtiene la media de las resistencias tomadas a 7 días  $f_{c7}$  y a 28 días  $f_{c28}$ , no teniéndose en cuenta valores a edades diferentes, obteniendo el valor del cociente entre dichas medias:

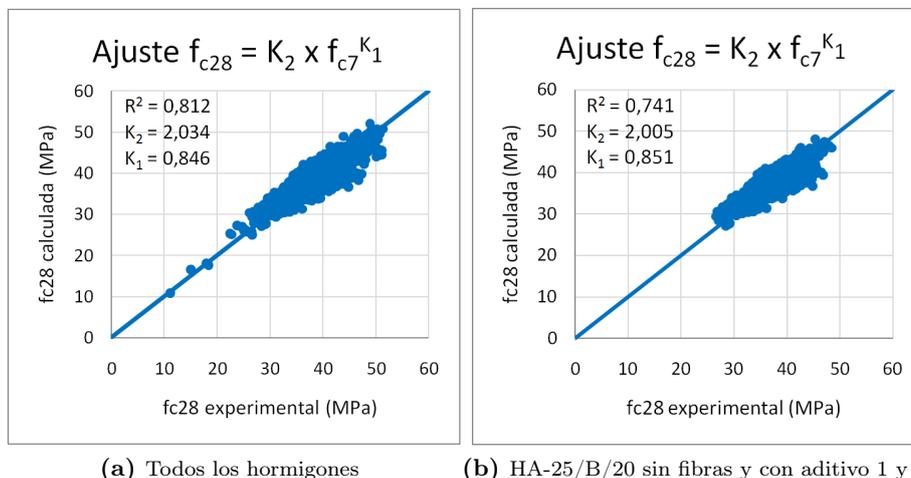
$$\frac{f_{c7}}{f_{c28}} = 0,8367$$

Este valor es prácticamente idéntico al propuesto por ECP (2009) que es 0,8363 y diferente al propuesto por la EHE (1999) para hormigones de endurecimiento rápido y el Código Modelo CEB-FIP (1990) y la EHE (2008) para cementos de endurecimiento rápido y de alta resistencia (CEM 42,5R y CEM 52,5), que proponen valores de 0,75 y 0,81873 respectivamente.

Seguidamente obtenemos mediante la aplicación SOLVER de Excel los valores de los coeficientes  $K_1$  y  $K_2$  de la fórmula 2.71 propuesta por Neville (Pacheco y col. 2007) que minimicen la suma de los errores cuadráticos, siendo los mismos  $K_1 = 0,84627168$  y  $K_2 = 2,03392507$  para todos los hormigones (4388 ensayos con roturas a 7 y 28 días), y  $K_1 = 0,85127956$  y  $K_2 = 2,00497774$  para los hormigones HA-25/B/20 sin fibras y con aditivos tipo 1 y 2 (3168 ensayos con roturas a 7 y 28 días). En la figura 5.36 se puede apreciar el ajuste de dicho modelo a los valores experimentales obtenidos en el estudio, con coeficientes de determinación  $R^2 = 81,2\%$  y  $R^2 = 74,1\%$ . Como vemos, estos valores de los coeficientes  $K_1$  y  $K_2$  no están dentro del rango propuesto por Neville, que propuso valores de  $K_1$  entre 0,3 y 0,8 y de  $K_2$  entre 3 y 6. Sin embargo, los valores obtenidos en nuestro estudio se encuentran cercanos a los de la campaña de ensayos realizada por Pacheco y col. (2007) para hormigones HA-25 y HA-30, que fueron  $K_1 = 0,801$  y  $K_2 = 2,524$  con un valor de  $R^2 = 77,6\%$ .

El comité ACI (ACI 209R-92) propuso la fórmula 2.76 para la resistencia a compresión en función del tiempo que si se particulariza para 7 días resulta:

$$f_{c7} = \frac{7}{a + b \cdot 7} \cdot f_{c28} \quad (5.3)$$



(a) Todos los hormigones

(b) HA-25/B/20 sin fibras y con aditivo 1 y 2

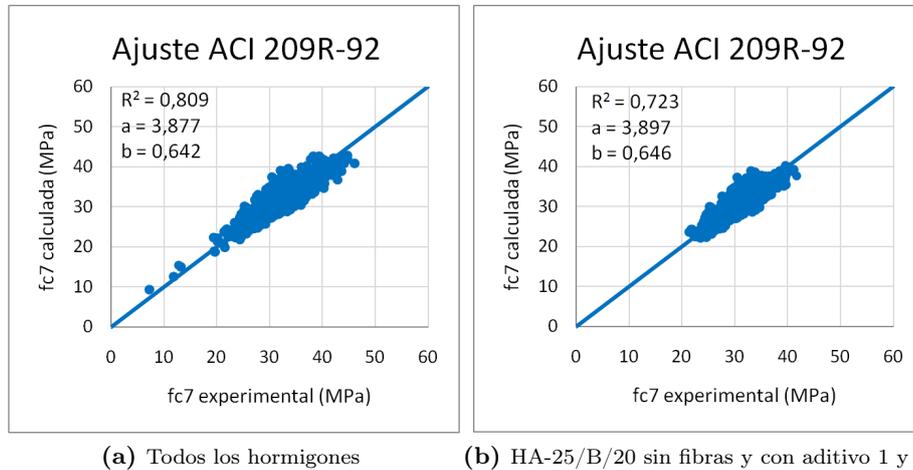
**Figura 5.36:** Ajuste del modelo Neville a los valores experimentales obtenidos en el estudio (solo ensayos a 7 y 28 días).

Hormigón	$K_1$	$K_2$	$R^2$
Todos los hormigones	0,846	2,034	81,2 %
HA-25/B/20 sin fibras y con aditivo 1 y 2	0,851	2,005	74,1 %
Pacheco y col. (2007) para HA-25 y HA-30	0,801	2,524	77,6 %

**Tabla 5.17:** Ajustes para el modelo Neville de relación entre las resistencias del hormigón a 7 y 28 días.

Mediante la aplicación SOLVER de Excel, obtenemos los valores de las constantes  $a$  y  $b$  de la ecuación anterior 5.3 que minimicen la suma de los errores cuadráticos, siendo los mismos  $a = 3,876847417$  y  $b = 0,642031562$  para todos los hormigones, y  $a = 3,897206299$  y  $b = 0,645917319$  para hormigones HA-25/B/20 sin fibras y con aditivos tipo 1 y 2. El ajuste de los datos experimentales a este modelo se observa en la figura 5.37, siendo los coeficientes de determinación  $R^2 = 80,9\%$  y  $72,3\%$ . Los valores de  $a$  y  $b$  obtenidos difieren de los propuestos por el propio ACI para el cemento CEM I, que son  $a = 4$  y  $b = 0,85$ , como se observa en la tabla 2.21.

Estos valores obtenidos para  $a$  y  $b$ , también son diferentes a los propuestos por las normas francesas BAEL y BPEL ( $a = 4,76$  y  $b = 0,83$ ) para hormigones con  $f_{c28} \leq 40 MPa$  que figuran en la tabla 2.22. En la figura 5.38 se ve como las resistencias experimentales a 7 días  $f_{c7}$  de nuestra base de datos son superiores a

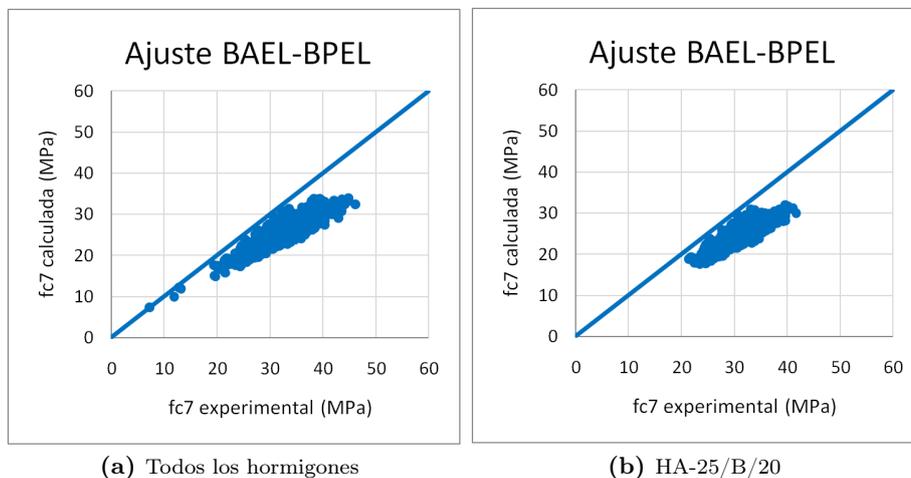


**Figura 5.37:** Ajuste del modelo ACI 209R-92 a los valores experimentales obtenidos en el estudio (solo ensayos a 7 y 28 días).

Hormigón	$a$	$b$	$R^2$
Todos los hormigones	3,877	0,642	80,9 %
HA-25/B/20 sin fibras y con aditivo 1 y 2	3,897	0,646	72,3 %
Pacheco <i>y col.</i> (2007) para HA-25 y HA-30	3,300	0,850	80,6 %

**Tabla 5.18:** Ajustes para los modelos ACI 209R-92 y BAEL-BPEL de relación entre las resistencias del hormigón a 7 y 28 días.

las calculadas con el modelo propuesto por las normas francesas. También ocurre con el modelo propuesto por ACI 209R-92. Así pues, los valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  encontrados en la bibliografía (ACI 209R-92 y normas francesa BAEL Y BPEL), nos dan valores de la resistencia a compresión del hormigón a 7 días prevista menor que la real, es decir del lado de la seguridad. Esto ocurre para los valores de nuestra base de datos y también para los obtenidos por Pacheco *y col.* (2007) para sus datos, ya que son  $a = 3,30$  y  $b = 0,85$  con  $R^2 = 72,3\%$ . El conocimiento de la resistencia real a 7 días nos puede producir una disminución de costes soportados por la empresa constructora al poder reducir los plazos de ejecución. En nuestro caso, es evidente que salvo la norma egipcia ECP (2009), todos los demás modelos encontrados en la normativa y bibliografía están muy del lado de la seguridad, aumentando los plazos de ejecución y encareciendo la construcción.



**Figura 5.38:** Ajuste del modelo BAEL-BPEL a los valores experimentales obtenidos en el estudio (solo ensayos a 7 y 28 días).

Continuando con el estudio estadístico clásico, se comprueba una alta relación lineal entre la resistencia a compresión a 7 y 28 días de la base de datos general, tal y como se aprecia en la figura 5.39. El modelo lineal presenta un ajuste con  $R^2 = 81,1\%$  a la recta:

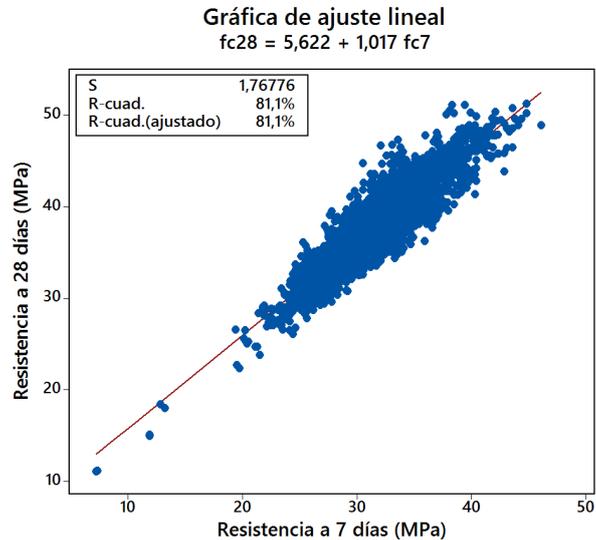
$$f_{c28} = 1,017 \cdot f_{c7} + 5,622 \quad (5.4)$$

Si particularizamos para ciertos tipos de cemento, el ajuste mejora por ejemplo para los cementos 14 y 7 ( $R^2 = 84,6\%$  y  $R^2 = 84,2\%$  respectivamente) y empeora para el cemento 25 ( $R^2 = 74,7\%$ ) entre otros, tal y como se observa en las siguientes figuras, 5.40, 5.41 y 5.42. Además, se detecta una aceleración o deceleración en el endurecimiento de las mezclas al modificar el tipo de cemento.

Namyong *y col.* (2004) de su base de datos compuesta de 1442 ensayos a compresión de hormigones con las características ya especificadas en el apartado 5.4.2, obtienen una relación lineal entre la resistencia a compresión a 7 y 28 días con un  $R^2 = 68\%$ : El modelo lineal obtenido es el siguiente:

$$f_{c28} = 0,967 \cdot f_{c7} + 8,148 \quad (5.5)$$

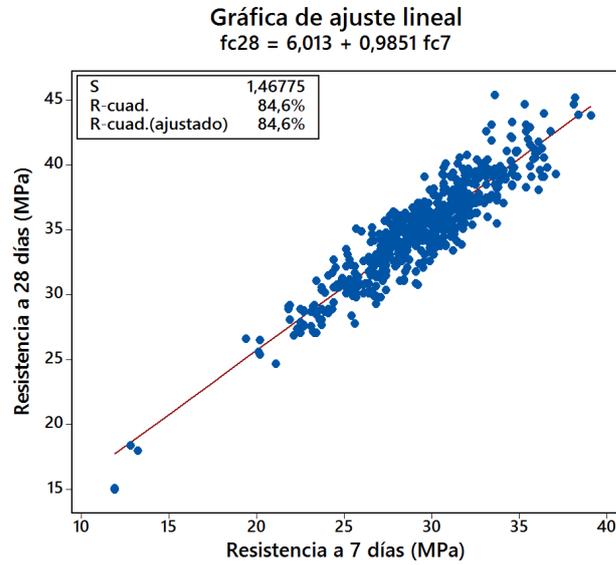
Cánoves (2012) en su análisis de la evolución de la resistencia a compresión de una muestra representativa de 5505 lotes ensayados de hormigón HA-25/B/20/IIa producido entre el año 2001 al 2011 en la provincia de Valencia y de 1317 lotes



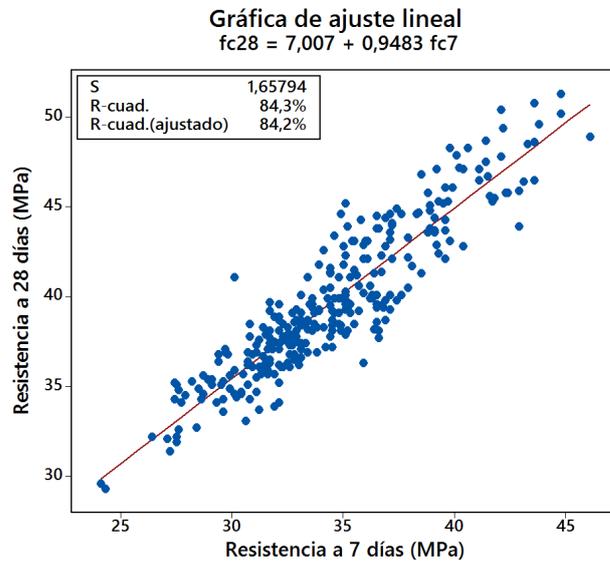
**Figura 5.39:** Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días).

de hormigón HA-30/B/20/IIa producido del 2003 al 2011, concluye que el tipo de cemento no es una variable significativa para la resistencia a 7 días pero si lo es para 28 días, y esto mediante el método de ANOVA. También obtiene un coeficiente de 0,8166 para la media de los valores de la resistencia a 7 días  $f_{c7}$  y a 28 días  $f_{c28}$  de los hormigones HA-25/B/20/IIa, que aumenta a 0,85 para los hormigones HA-30/B/20/IIa. En cuanto a la relación lineal entre la resistencias a compresión a 7 y a 28 días, Cánoves (2012) obtiene valores de  $R^2$  más bajos que en nuestro estudio, exactamente  $R^2 = 59,92\%$  y  $R^2 = 42,38\%$  para los hormigones de  $25 \text{ N/mm}^2$  y  $30 \text{ N/mm}^2$  respectivamente de resistencia característica.

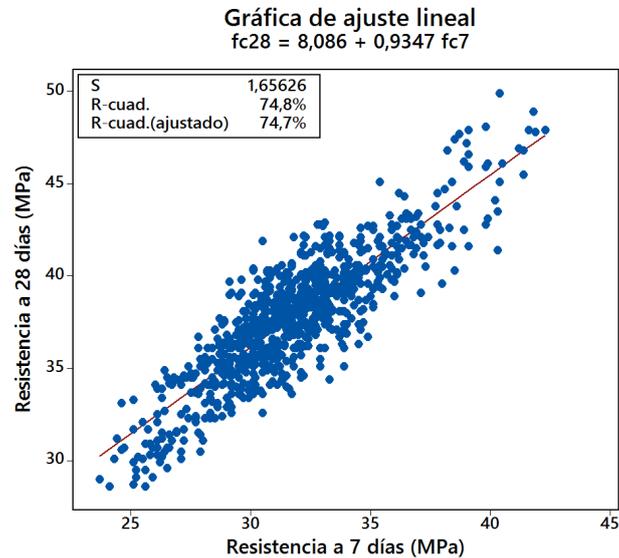
En nuestro caso, tal y como se puede ver en el apartado 3.2.1, tenemos que el cemento 7 es un CEM I 52,5R y los cementos 14 y 25 son un CEM II/A-L 42,5R y un CEM II/B-LL 42,5R respectivamente. En las figuras 4.5 4.6 y 4.7 se observa que la resistencia verdadera media para cada cemento es de  $52,89 \text{ MPa}$  para el cemento 25, de  $58,05 \text{ MPa}$  para el cemento 14 y de  $60,32 \text{ MPa}$  para el cemento 7. De las figuras 5.40, 5.41 y 5.42, podemos observar que para una resistencia a compresión a 28 días de  $33 \text{ MPa}$  en el caso del cemento 25 tendríamos  $26,65 \text{ MPa}$  a 7 días y en el caso de los cementos 14 y 7, tendríamos  $27,40 \text{ MPa}$  y  $27,41 \text{ MPa}$  a 7 días respectivamente. También se observa en la figura 5.42 que para valores de resistencia a 28 días por debajo de  $33 \text{ MPa}$  el cociente entre la resistencia a 7 y a 28 días es menor, es decir, a resistencias a 28 días mayores se consiguen ganancias de resistencia a 7 días mayores.



**Figura 5.40:** Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días y cemento 14).



**Figura 5.41:** Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días y cemento 7).



**Figura 5.42:** Relación entre la resistencia a 7 y a 28 días (solo ensayos a 7 y 28 días y cemento 25).

#### 5.4.5 Influencia de la relación cemento/agua en la resistencia a compresión del hormigón

Es conocido que la relación entre la resistencia a compresión del hormigón a cualquier edad y la relación cemento/agua es aproximadamente lineal en el rango de valores entre 1,2 y 2,56 para la relación cemento/agua. Esta relación lineal ha sido sugerida por diversos autores como Neville (1995) y es consecuencia directa de la regla de Abrams (1919) y de la regla de Féret (1892), similar a la regla de Abrams. Neville relaciona la resistencia a compresión del hormigón  $f_c$  para cualquier tipo de árido y a cualquier edad, con la relación  $(c/a)$  como se puede comprobar en la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{K}{a/c} = K \cdot \left(\frac{c}{a}\right) \quad (5.6)$$

Si se representa gráficamente  $f_c$  en función de  $(a/c)$  tenemos una hipérbola y si por el contrario representamos  $f_c$  en función de  $(c/a)$  tenemos una recta, esto evidentemente para un cemento dado.

Lyse (Jee *y col.* 2004) estableció la siguiente fórmula para la resistencia a compresión del hormigón:

$$f_c = A + B \cdot (c/a) \quad (5.7)$$

donde  $c/a$  es la relación cemento/agua y  $A$  y  $B$  son dos constantes empíricas.

Se muestra el comportamiento de la resistencia a compresión a 7 días (figura 5.43) y a 28 días (figura 5.44) con respecto a la relación cemento/agua para todas las dosificaciones de la base de datos reducida, teniendo en cuenta que el cemento empleado en las mismas es idéntico.

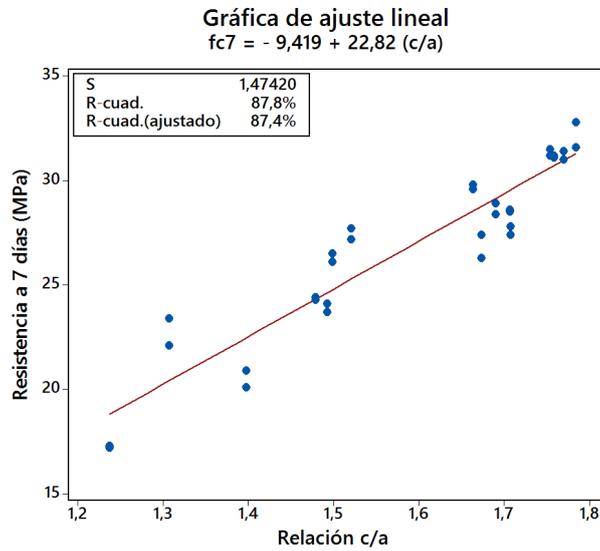
En la figura 5.45 se muestra el comportamiento de la resistencia a compresión a 28 días con respecto a la relación cemento/agua para diferentes cantidades de cemento, siendo el cemento empleado idéntico en todos los casos. El comportamiento de la resistencia a compresión a 28 días en función de la relación cemento/agua para una cantidad de cemento dada, en este caso  $tb0 = 0,13$ , se puede observar en la figura 5.46 con su recta de ajuste y el valor del coeficiente  $R^2$ .

Las relaciones cemento/agua están entre 1,237 y 1,784 que se corresponden a relaciones agua/cemento de entre 0,561 y 0,808. La relación agua/cemento de 0,808 se corresponde con un hormigón de limpieza. Los porcentajes en peso del cemento con respecto al total de componentes sólidos varían del 8,5% al 13,8%. Esto anterior se puede apreciar convenientemente en la figura 5.45.

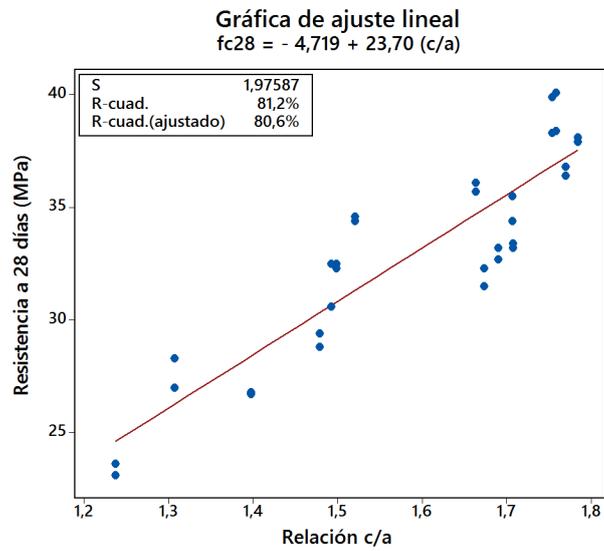
Del estudio estadístico de la base de datos reducida, que consta de 16 muestras de hormigones realizadas con el mismo cemento, se deduce una alta relación lineal entre la resistencia a compresión del hormigón y la relación cemento/agua. El modelo lineal presenta los ajustes que se observan en la tabla siguiente a la recta  $f_c = A + B \cdot (c/a)$ :

	$A$	$B$	$R^2$
$f_{c7}$	-9,419	22,82	87,82 %
$f_{c28}$	-4,719	23,70	81,23 %

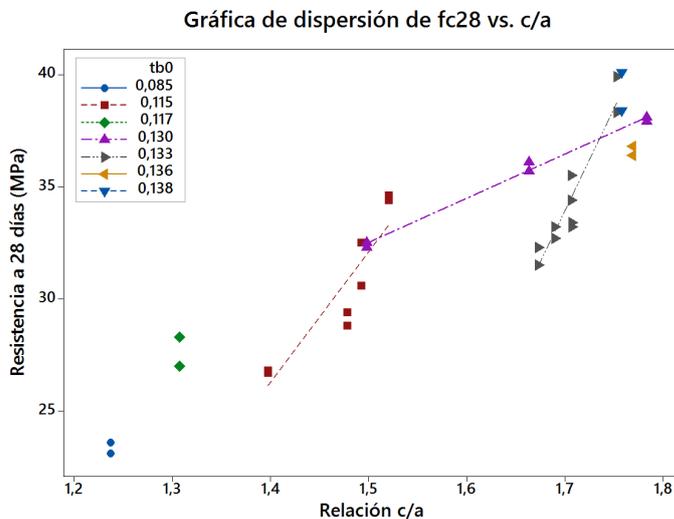
**Tabla 5.19:** Ajustes para el modelo de relación entre las resistencias del hormigón a 7 y 28 días y la relación cemento/agua.



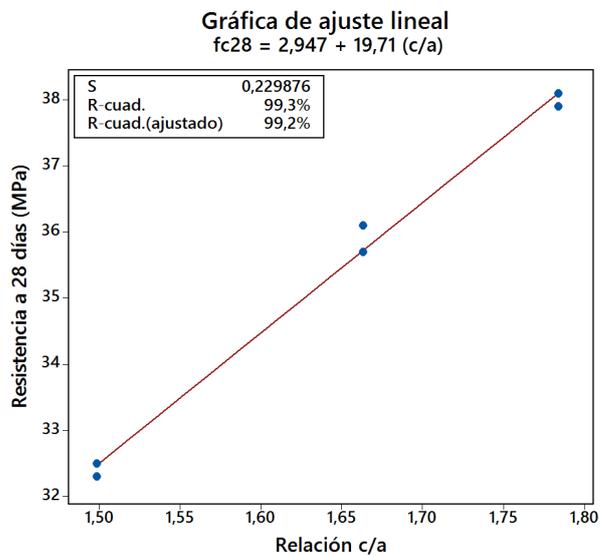
**Figura 5.43:** Resistencia a 7 días en función de la relación  $c/a$  para todas las muestras.



**Figura 5.44:** Resistencia a 28 días en función de la relación  $c/a$  para todas las muestras.



**Figura 5.45:** Resistencia a 28 días en función de la relación  $c/a$  para diferentes cantidades de cemento.



**Figura 5.46:** Resistencia a 28 días en función de la relación  $c/a$  para  $tb0 = 0,13$ .

De las gráficas de la figuras anteriores se obtiene el siguiente modelo para la resistencia a compresión a cualquier edad:

$$f_c = A + B \cdot (c/a) + C \cdot tb0 \tag{5.8}$$

En las tablas 5.14 y 5.16 se puede observar una mejora del coeficiente de determinación  $R^2$  en el modelo de la ecuación 5.8 con respecto al de la ecuación 5.7, superior para resistencias a 7 días que a 28 días, pasando de  $R^2 = 87,82\%$  a  $88,72\%$  para este último caso.

#### 5.4.6 Análisis estadístico descriptivo de la resistencia a compresión

Primeramente realizamos un análisis estadístico de la resistencias obtenidas a 28 días en hormigones HA-25 de la base de datos general según se puede ver en la figura 5.47, observándose una resistencia media a 28 días de  $37,26 \text{ N/mm}^2$ . Sin embargo, si tomamos los ensayos realizados en los meses de junio y julio, está resistencia media a 28 días obtenida desciende hasta  $35,03$  y  $35,51 \text{ N/mm}^2$  respectivamente, tal y como se puede observar en las figuras 5.48 y 5.49, con lo que se aprecia una dependencia de la temperatura.

Se procede seguidamente al análisis estadístico de las resistencias a 28 días obtenidas en los hormigones de tipo HA-30 de la base de datos general, obteniéndose una resistencia media de  $41,84 \text{ N/mm}^2$ , tal como se puede ver en la figura 5.50. En las figuras 5.51 y 5.52 se puede observar que en los hormigones HA-25 el 95% de los ensayos presentan una resistencia superior a  $31,62 \text{ N/mm}^2$ , que en los HA-30 es de  $35,64 \text{ N/mm}^2$ .

#### Informe de resumen de fc28 HA-25

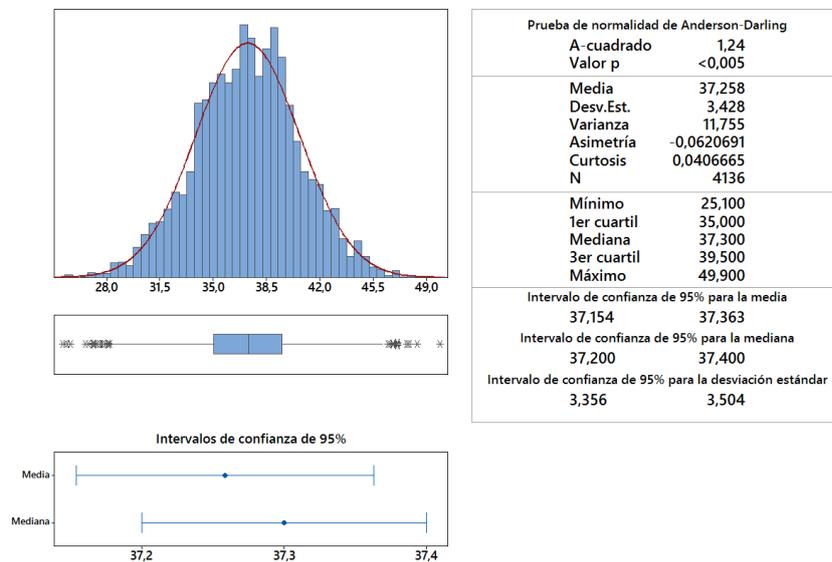
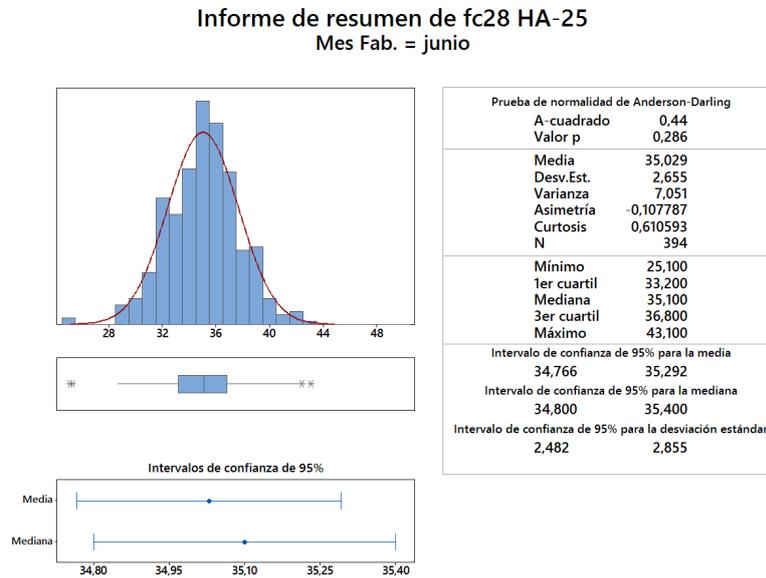
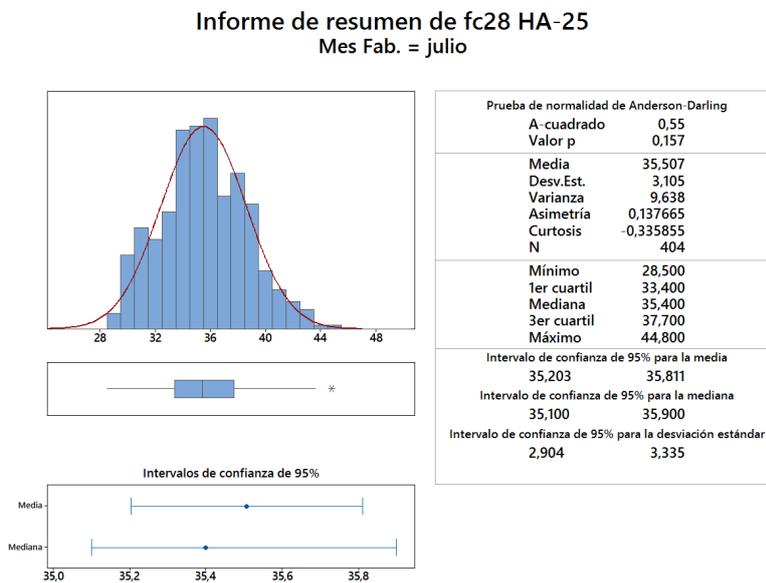


Figura 5.47: Resumen estadístico descriptivo para  $f_{c28}$  en hormigones HA-25.



**Figura 5.48:** Resumen estadístico descriptivo para  $f_{c28}$  en hormigones HA-25 (mes de junio).



**Figura 5.49:** Resumen estadístico descriptivo para  $f_{c28}$  en hormigones HA-25 (mes de julio).

Informe de resumen de  $f_{c28}$  HA-30

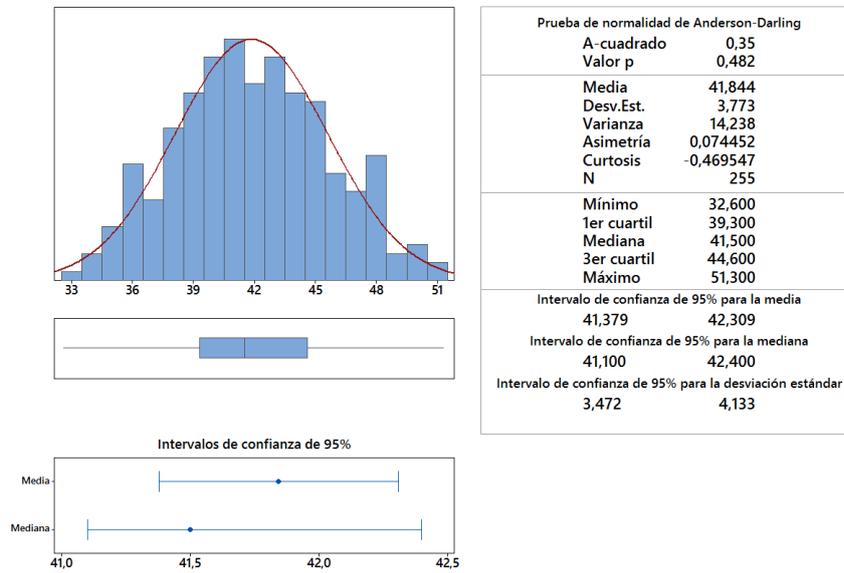


Figura 5.50: Resumen estadístico descriptivo para  $f_{c28}$  en hormigones HA-30.

Gráfica de probabilidad de  $f_{c28}$  HA-25  
Normal

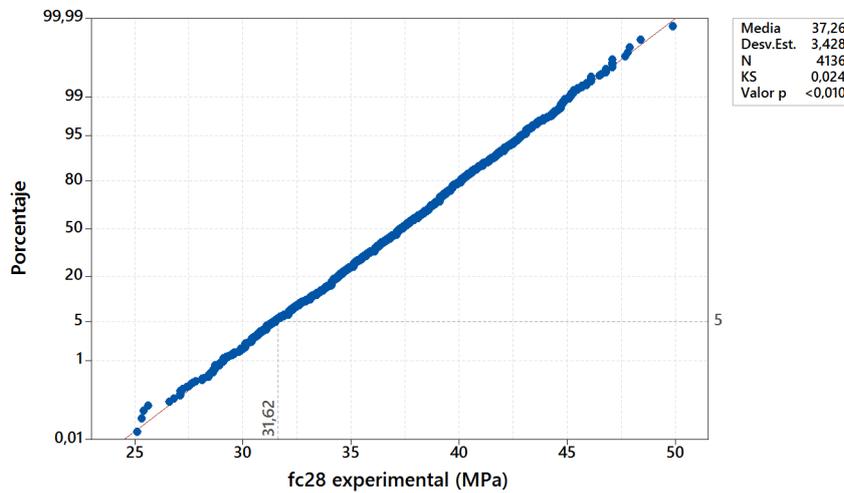
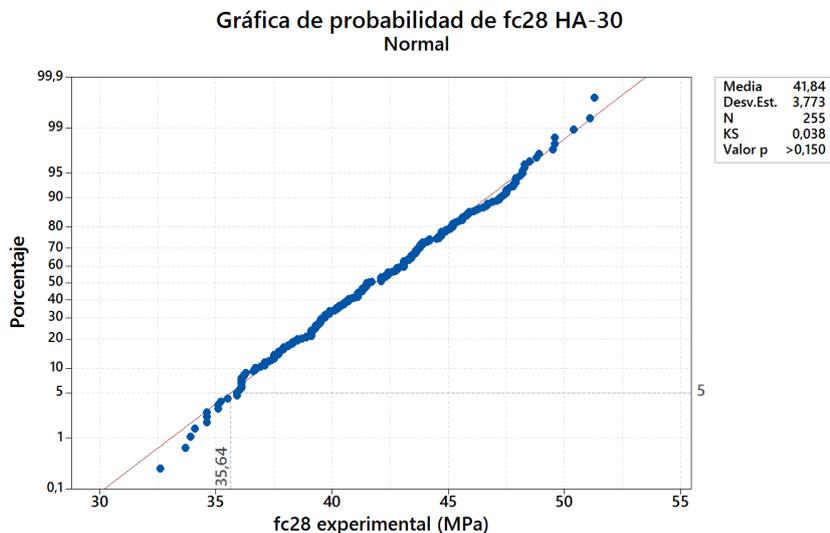


Figura 5.51: Gráfica de normalidad para la resistencia a 28 días en hormigones HA-25.



**Figura 5.52:** Gráfica de normalidad para la resistencia a 28 días en hormigones HA-30.

Cánoves (2012) realiza un tratamiento estadístico de la resistencia a compresión de muestras de hormigones producidos en la provincia de Valencia durante el período 2001 al 2011 para el HA-25/B/20/IIa y del 2003 al 2011 para el HA-30/B/20/IIa, obteniendo una resistencia media de 32,98 MPa y 38,86 MPa respectivamente. Los valores de la desviación típica son 4,843 y 5,674 para el HA-25 y HA-30 respectivamente, cumpliendo estrictamente los hormigones HA-25 e incumpliendo los HA-30 la ecuación 3.2 de la EHE-08. Para los valores de nuestro estudio, sin embargo, se cumplen los criterios de aceptación de la resistencia de la EHE-08 tanto para los hormigones HA-25 (figuras 5.47 y 5.51) como para los HA-30 (figuras 5.50 y 5.52), siendo los valores de las desviaciones típicas 3,428 y 3,773 respectivamente. La distribución no es normal para los HA-30 ( $p > 0,15$ ) y normal para los HA-25 ( $p < 0,01$ ), ya que se considera que una distribución es normal o gaussiana para valores de  $p$  inferiores a 0,05.

#### 5.4.7 Análisis de varianza

El análisis de varianza (ANOVA) de un factor sirve para comparar varios grupos en una variable cuantitativa. A la variable categórica o cualitativa que define los grupos que se desea comparar la llamamos independiente o factor de estudio, y a la variable cuantitativa en la que deseamos comparar los grupos la llamamos dependiente (Wackerly y col. 2008).

Las variables independientes o factores que definen los grupos que deseamos estudiar son tres: el tipo de cemento, el tipo de aditivo y las fibras. En cuanto a la

variable dependiente en la que deseamos comparar los diversos grupos, esta será la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  o bien a 7 días  $f_{c7}$ .

Para el análisis de varianza (ANOVA) utilizaremos el programa SPSS Statistics. Primeramente obtendremos los estadísticos descriptivos cuya información se muestran en las tablas 5.20, 5.21 y 5.22, únicamente para la resistencia a 28 días. Las gráficas de intervalos sí que se presentan tanto para la resistencia a 28 como a 7 días, tal y como se puede observar en las figuras desde la 5.53 hasta 5.58.

En el análisis de varianza se observa, tal y como se puede apreciar en la tabla 5.20 y en las figuras 5.53 y 5.56, que el tipo de cemento provoca diferencias significativas en la resistencia a compresión del hormigón, tanto a 7 como a 28 días, aunque es evidente que esto puede ser consecuencia de la influencia de otros parámetros. Como ejemplo de esto anterior, el tipo 12 de cemento (CEM 12) provoca una mejora significativa de la resistencia con una resistencia verdadera de  $57,1 N/mm^2$ , pero con dosificaciones elevadas de cemento (15,1 % en peso de media).

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
CEM1	58	40,09138	4,476068	0,587737	38,91446	41,2683	31,3	46,4
CEM2	218	38,90642	2,981611	0,20194	38,50841	39,30444	30,1	46
CEM3	76	41,98947	2,643865	0,303272	41,38532	42,59362	35,1	47,9
CEM4	26	38,1	2,964591	0,581404	36,90258	39,29742	30,1	42,4
CEM5	10	38,61	2,277645	0,720255	36,98067	40,23933	34,4	41,6
CEM6	16	34,16875	3,023402	0,75585	32,55769	35,77981	29,6	39,7
CEM7	332	39,86837	4,087036	0,224305	39,42713	40,30962	29,3	51,3
CEM8	250	37,6648	3,492235	0,220868	37,22979	38,09981	25,1	47,6
CEM9	456	37,84232	3,297743	0,154431	37,53884	38,14581	30,7	48,9
CEM10	306	38,44412	2,861075	0,163557	38,12228	38,76596	31,4	46,4
CEM11	94	39,52447	3,91187	0,403479	38,72324	40,3257	32,1	46,9
CEM12	10	46,06	3,497364	1,105964	43,55814	48,56186	39,1	49,6
CEM13	16	31,04375	2,617115	0,654279	29,64919	32,43831	27	36,9
CEM14	686	35,13426	3,766158	0,143793	34,85193	35,41658	15	45,4
CEM15	18	37,43889	5,784985	1,363534	34,56208	40,31569	31,5	48,6
CEM16	430	39,68047	3,54922	0,171159	39,34405	40,01688	28,4	49,1
CEM17	18	34,15556	1,906713	0,449417	33,20737	35,10374	30	36,7
CEM18	112	35,91161	4,165122	0,393567	35,13173	36,69149	11,1	43,7
CEM19	68	40,05441	3,5415	0,42947	39,19719	40,91164	34,1	49,7
CEM20	130	41,88846	3,371279	0,295681	41,30345	42,47347	32,3	51,1
CEM21	130	38,09769	4,395425	0,385504	37,33496	38,86042	25,5	47,8
CEM22	10	40,66	1,335997	0,422479	39,70429	41,61571	38,9	43,1
CEM23	56	33,41964	6,028641	0,805611	31,80516	35,03412	22,4	43,8
CEM24	14	33,39286	2,101452	0,561637	32,17952	34,6062	30,4	36,6
CEM25	1028	37,70253	3,330835	0,103886	37,49868	37,90638	28,1	49,9
CEM26	252	34,55992	2,735764	0,172337	34,22051	34,89933	28,6	41,6
CEM27	4	31,3	0,60553	0,302765	30,33647	32,26353	30,4	31,7
Total	4824	37,76992	4,038261	0,058142	37,65594	37,88391	11,1	51,3

Tabla 5.20: Estadísticos descriptivos para la variable tipo de cemento.

En cuanto a las fibras, se observa claramente en la tabla 5.21 y en las figuras 5.54 y 5.57, que la no inclusión de fibras presenta resistencias a compresión más elevadas que la inclusión de fibras. Los hormigones con fibras de polipropileno presentan resistencias a compresión bajas. Esto anterior es debido fundamentalmente a que la inclusión de fibras se realiza con el objetivo de mejorar ciertas propiedades en hormigones utilizados en soleras, y consecuentemente estos hormigones son de resistencias menores. Los hormigones con una mezcla de fibras de polipropileno y acero (FIB3) y a los que únicamente se les ha adicionado fibras de polipropileno (FIB1) no presentan diferencias significativas en cuanto a resistencia a compresión a 28 días. También se observa que los hormigones con inclusión de fibras de acero (FIB2) presentan resistencias a compresión superiores a los de fibras de polipropileno y mezcla de polipropileno y acero, tanto a 7 como a 28 días y cercanas a las de los hormigones sin fibras (SINFIB o FIB0), aunque algo menores.

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
SINFIB	4770	37,81493	4,007849	0,05803	37,70116	37,92869	11,1	51,3
FIB1	18	31,43333	6,83744	1,6116	28,03315	34,83351	22,4	46,5
FIB2	20	36,51	1,848726	0,413388	35,64477	37,37523	33,6	40,2
FIB3	16	33,05625	2,132282	0,53307	31,92004	34,19246	28,1	36,2
Total	4824	37,76992	4,038261	0,058142	37,65594	37,88391	11,1	51,3

**Tabla 5.21:** Estadísticos descriptivos para la variable fibras.

En cuanto al aditivo, se observan en la tabla 5.22 y en las figuras 5.55 y 5.58, unas resistencias bajas cuando no se incorpora aditivo a la dosificación, consecuencia también de que estos hormigones no son estructurales. Se puede observar, además y entre otros aspectos, que las resistencias son similares para los aditivos 1 y 2 que como ya hemos señalado es el mismo aditivo y que se ha utilizado en el 97,2% de las dosificaciones. Obviando del análisis los aditivos con frecuencias muy reducidas, vemos que aditivos plastificantes similares no influyen significativamente en la resistencia del hormigón.

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
AD0	4	18,8	4,332051	2,166026	11,90674	25,69326	15	22,7
AD1	4062	37,91595	3,877081	0,060832	37,79669	38,03522	11,1	51,3
AD2	626	37,03514	4,778081	0,190971	36,66012	37,41017	18	51,1
AD3	2	45,7	0,141421	0,1	44,42938	46,97062	45,6	45,8
AD4	6	38,93333	3,080043	1,257422	35,70103	42,16564	34,5	41,8
AD5	2	36,85	0,353553	0,25	33,67345	40,02655	36,6	37,1
AD6	10	35,04	1,817324	0,574688	33,73996	36,34004	32,9	38,5
AD7	4	35,35	0,967815	0,483908	33,80999	36,89001	34,2	36,2
AD8	4	33,5	1,296148	0,648074	31,43754	35,56246	32,1	34,7
AD9	20	36,62	3,944163	0,881942	34,77407	38,46593	30,1	45,8
AD10	30	38,78667	2,740216	0,500293	37,76345	39,80988	35,1	43,6
AD11	6	37,18333	2,154453	0,879552	34,92237	39,44429	34,6	39,9
AD12	2	36,8	0,424264	0,3	32,98814	40,61186	36,5	37,1
AD14	20	37,76	2,238985	0,500652	36,71212	38,80788	33,9	42,3
AD15	2	35,05	0,777817	0,55	28,06159	42,03841	34,5	35,6
AD16	4	35,65	0,597216	0,298608	34,6997	36,6003	35,1	36,5
AD17	16	37,1375	4,29618	1,074045	34,84823	39,42677	29,8	44,9
AD18	2	39,05	0,212132	0,15	37,14407	40,95593	38,9	39,2
AD19	2	35,45	1,202082	0,85	24,64973	46,25027	34,6	36,3
Total	4824	37,76992	4,038261	0,058142	37,65594	37,88391	11,1	51,3

Tabla 5.22: Estadísticos descriptivos para la variable tipo de aditivo.

Gráfica de intervalos de  $f_{c28}$   
95% IC para la media

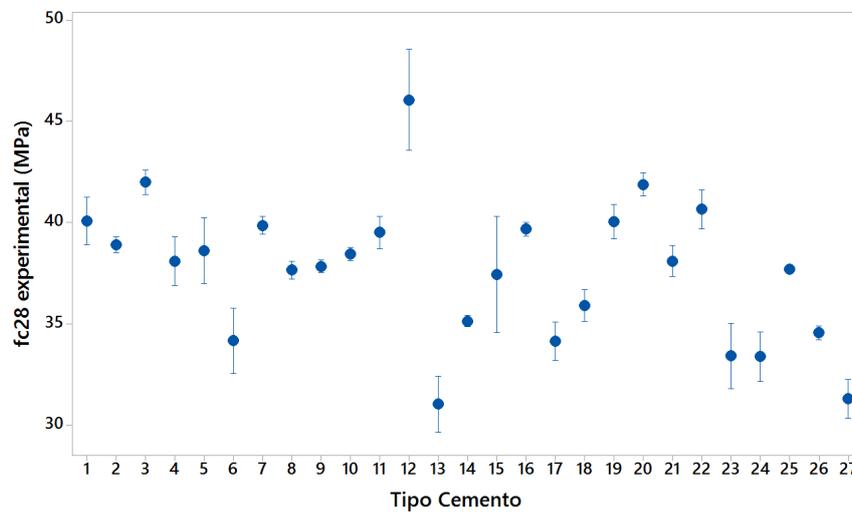
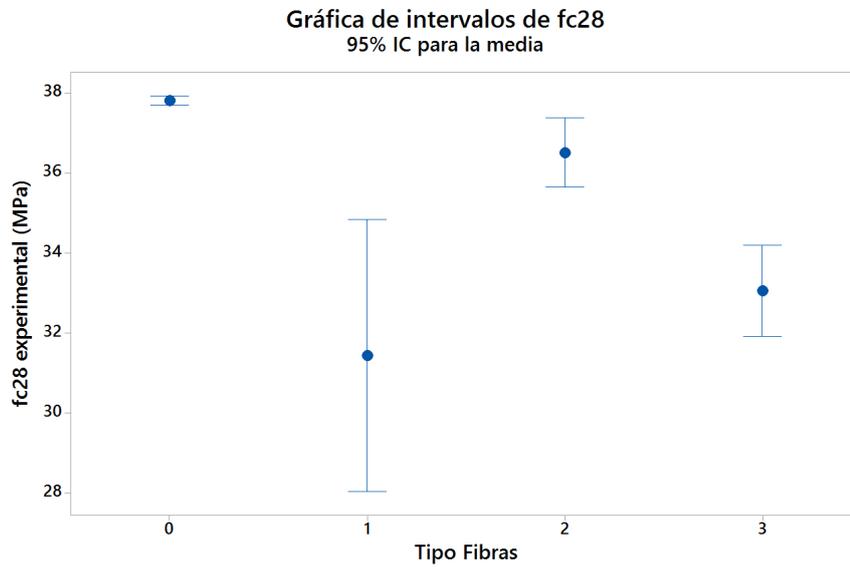
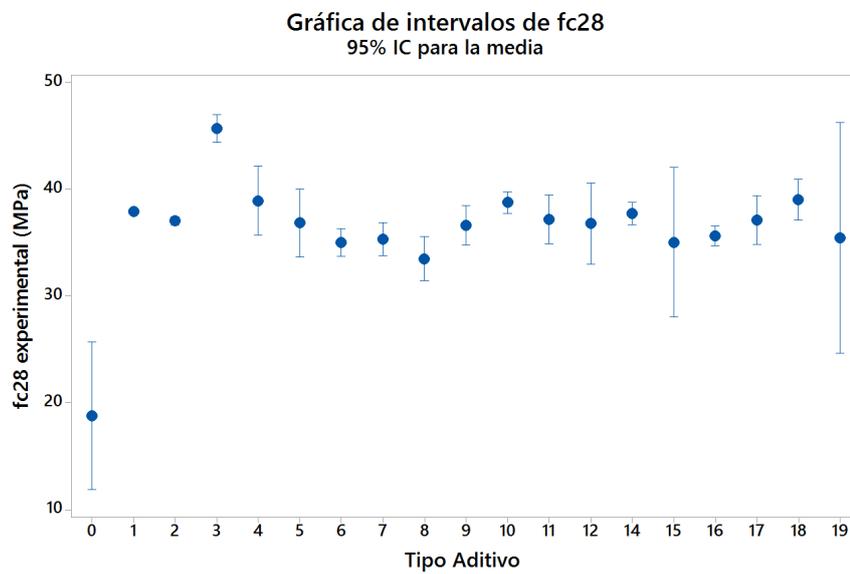


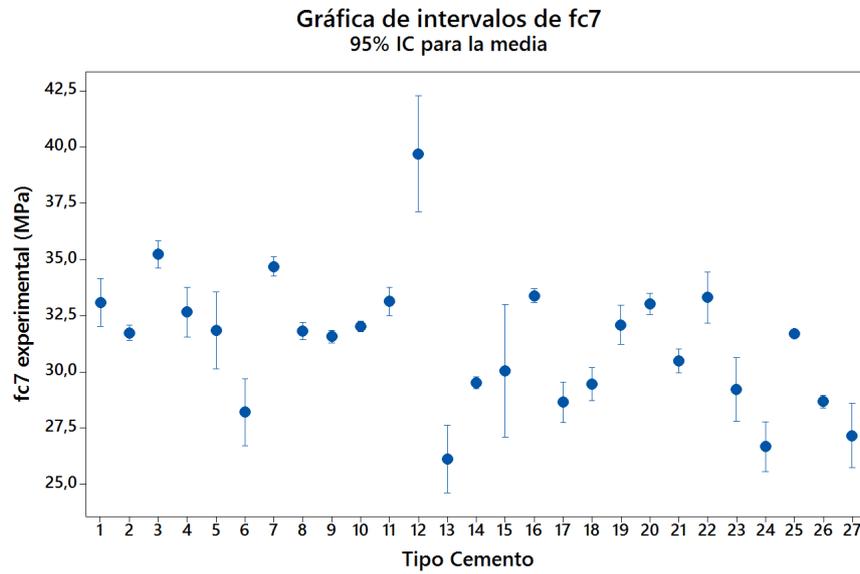
Figura 5.53: Influencia del tipo de cemento en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ .



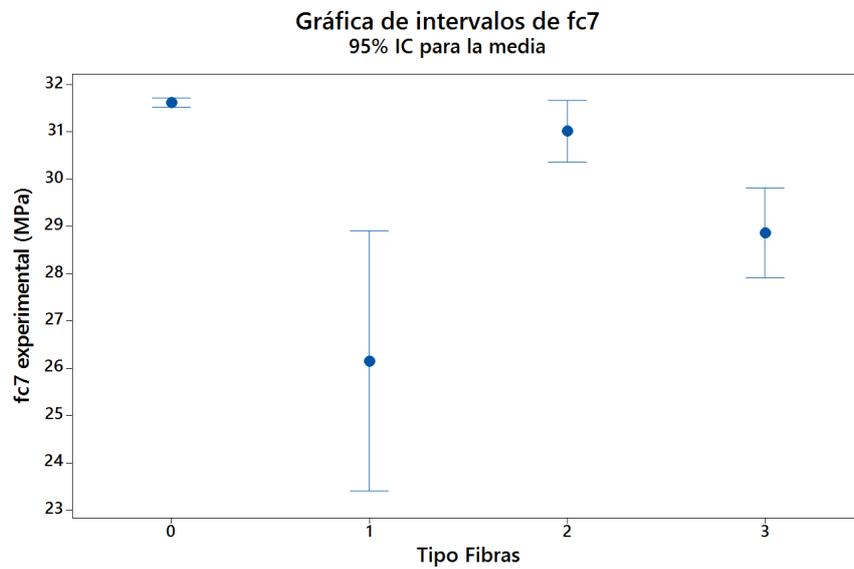
**Figura 5.54:** Influencia del tipo de fibras en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ .



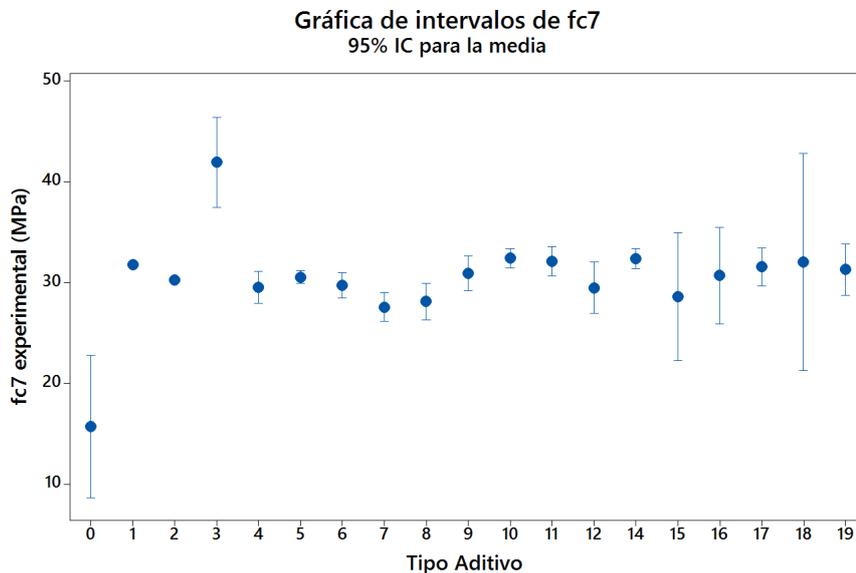
**Figura 5.55:** Influencia del tipo de aditivo en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ .



**Figura 5.56:** Influencia del tipo de cemento en la resistencia a compresión del hormigón a 7 días  $f_{c7}$ .



**Figura 5.57:** Influencia del tipo de fibras en la resistencia a compresión del hormigón a 7 días  $f_{c7}$ .



**Figura 5.58:** Influencia del tipo de aditivo en la resistencia a compresión del hormigón a 7 días  $f_{c7}$ .

Después procedemos a realizar la Prueba de Levene sobre la homogeneidad de las varianzas. Esta prueba permite contrastar la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales. En las tablas 5.23, 5.24 y 5.25 se muestran los resultados para cada factor.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
8,47	26	4797	0

**Tabla 5.23:** Estadístico de Levene para la variable tipo de cemento.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
5,562	18	4805	0

**Tabla 5.24:** Estadístico de Levene para la variable tipo de aditivo.

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
7,175	3	4820	0

**Tabla 5.25:** Estadístico de Levene para la variable fibras.

Junto con el valor estadístico de Levene aparecen los grados de libertad de su distribución (gl1 y gl2) y el nivel crítico o probabilidad de obtener valores como el obtenido o mayores (Sig.). Puesto que el nivel crítico o significación (Sig. = 0,000) es menor que 0,05 para los tres factores, debemos rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas.

El siguiente paso nos lleva a realizar la tabla de ANOVA que nos ofrece el estadístico F con su nivel de significación. Si el nivel de significación (Sig.) inter-grupos es menor o igual que 0,05 rechazamos la hipótesis de igualdad de medias y si es mayor, entonces aceptamos la igualdad de medias, es decir, no existen diferencias significativas entre los grupos.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	19184,547	26	737,867	59,521	0
Intra-grupos	59466,758	4797	12,397		
Total	78651,306	4823			

**Tabla 5.26:** Anova para la variable tipo de cemento.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2285,115	18	126,951	7,988	0
Intra-grupos	76366,191	4805	15,893		
Total	78651,306	4823			

**Tabla 5.27:** Anova para la variable tipo de aditivo.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1119,651	3	373,217	23,202	0
Intra-grupos	77531,655	4820	16,085		
Total	78651,306	4823			

**Tabla 5.28:** Anova para la variable fibras.

El estadístico F del ANOVA con su nivel de significación, únicamente nos permite contrastar la hipótesis de que los promedios comparados son iguales. Al rechazar esa hipótesis en nuestro caso, sabemos que las medias poblacionales comparadas no son iguales, pero no sabemos dónde en concreto se encuentran las diferencias: ¿son diferentes entre sí todas las medias o sólo hay una media que difiere de las demás?

Para saber qué media difiere de qué otra, debemos utilizar un tipo particular de contrastes denominados comparaciones múltiples “*post-hoc*” o comparaciones “a posteriori”. En el caso que nos ocupa, en el que no podemos suponer varianzas

poblacionales iguales, tomaremos el procedimiento T2 de Tamhane (1977) (método basado en la distribución del módulo máximo estudentizado).

En las tablas de comparaciones “*post-hoc*” que se muestran a continuación, vemos posibles combinaciones dos a dos entre los niveles de la variable factor, las diferencias entre las medias de la variable en cada grupo, el error típico de las diferencias y el nivel crítico o significación (Sig.) asociado a cada diferencia. Los grupos cuyas medias difieren de forma significativa (a nivel de 0,05) son los que presentan diferencias estadísticamente entre sí. Por un asunto de espacio se presentan las tablas T2 de Tamhane donde se han suprimido las significaciones (Sig.) superiores a 0,09. Estas tablas se presentan en este apartado y en el Anexo B, y se corresponden, como hemos señalado, a las comparaciones múltiples para cada factor, siendo la variable dependiente la resistencia a compresión a 28 días. En este apartado se presentan las correspondientes para los cementos codificados como CEM 5 (tabla 5.29), CEM 12 (tabla 5.30), CEM 13 (tabla 5.31), CEM 15 (tabla 5.32) y para las fibras (tabla 5.33). Las tablas para el resto de cementos y la tabla para los aditivos de pueden consultar en el Anexo B.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM5	CEM12	-7,450000*	1,319819	0,014	-14,0418	-0,85824
	CEM13	7,566250*	0,973061	0,000	3,07906	12,05344
	CEM17	4,454444*	0,848965	0,027	0,26209	8,6468
	CEM23	5,190357*	1,080637	0,009	0,60638	9,77433
	CEM24	5,217143*	0,913347	0,006	0,87215	9,56213
	CEM26	4,050079	0,740585	0,090	-0,32476	8,42491
	CEM27	7,310000*	0,781302	0,000	2,95388	11,66612

**Tabla 5.29:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 5.

Como se observa en la tabla 5.29, el cemento CEM 5 difiere significativamente al nivel establecido (Sig. 0,05) de los cementos CEM 12, CEM 13, CEM 17, CEM 23, CEM 24 CEM 27.

El cemento CEM 12 difiere de todos los cementos, salvo de los codificados como CEM 1, CEM 3, CEM 7, CEM 16, CEM 19, CEM 20 y CEM 22, tal y como se aprecia en la tabla 5.31. Igualmente el cemento CEM 13 difiere de todos los cementos salvo el CEM 6, CEM 15, CEM 17, CEM 23, CEM 24 y CEM 27 según podemos observar en la tabla 5.31. En la tabla 5.32 se observa que el cemento CEM 15 solo difiere del CEM 12.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
	CEM1	5,968621	1,252434	0,090	-0,39719	12,33443
	CEM2	7,153578*	1,124249	0,034	0,35453	13,95263
	CEM4	7,960000*	1,249474	0,006	1,55952	14,36048
	CEM5	7,450000*	1,319819	0,014	0,85824	14,04176
	CEM6	11,891250*	1,339577	0,000	5,39011	18,39239
	CEM8	8,395200*	1,127802	0,009	1,61963	15,17077
	CEM9	8,217675*	1,116694	0,012	1,36583	15,06952
	CEM10	7,615882*	1,117992	0,022	0,7734	14,45836
	CEM11	6,535532*	1,177264	0,050	0,00608	13,06499
	CEM13	15,016250*	1,285004	0,000	8,5743	21,4582
CEM12	CEM14	10,925743*	1,115272	0,001	4,06349	17,78799
	CEM15	8,621111*	1,755671	0,015	0,80561	16,43661
	CEM16	6,379535	1,119129	0,083	-0,45482	13,21389
	CEM17	11,904444*	1,193788	0,000	5,40008	18,40881
	CEM18	10,148393*	1,173904	0,001	3,60694	16,68985
	CEM21	7,962308*	1,171225	0,009	1,41078	14,51384
	CEM23	12,640357*	1,368271	0,000	6,2567	19,02402
	CEM24	12,667143*	1,2404	0,000	6,21137	19,12292
	CEM25	8,357471*	1,110832	0,011	1,46171	15,25323
	CEM26	11,500079*	1,11931	0,001	4,66698	18,33318
	CEM27	14,760000*	1,146657	0,000	8,0418	21,4782

Tabla 5.30: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 12.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
	CEM1	-9,047629*	0,879497	0,000	-12,7225	-5,37272
	CEM2	-7,862672*	0,684734	0,000	-11,1443	-4,58106
	CEM3	-10,945724*	0,721148	0,000	-14,2509	-7,64054
	CEM4	-7,056250*	0,875278	0,000	-10,7856	-3,32689
	CEM5	-7,566250*	0,973061	0,000	-12,0534	-3,07906
	CEM7	-8,824623*	0,69166	0,000	-12,1068	-5,54241
	CEM8	-6,621050*	0,690553	0,000	-9,90319	-3,33891
	CEM9	-6,798575*	0,672257	0,000	-10,0826	-3,51453
	CEM10	-7,400368*	0,674412	0,000	-10,6836	-4,11713
CEM13	CEM11	-8,480718*	0,768684	0,000	-11,8574	-5,104
	CEM12	-15,016250*	1,285004	0,000	-21,4582	-8,5743
	CEM14	-4,090507*	0,669893	0,005	-7,37568	-0,80533
	CEM16	-8,636715*	0,676296	0,000	-11,9193	-5,35414
	CEM18	-4,867857*	0,763528	0,000	-8,23307	-1,50264
	CEM19	-9,010662*	0,78264	0,000	-12,421	-5,6003
	CEM20	-10,844712*	0,717989	0,000	-14,1442	-7,54521
	CEM21	-7,053942*	0,759404	0,000	-10,4106	-3,69732
	CEM22	-9,616250*	0,778826	0,000	-13,1429	-6,08964
	CEM25	-6,658779*	0,662475	0,000	-9,94903	-3,36853
	CEM26	-3,516171*	0,676595	0,025	-6,79876	-0,23358

Tabla 5.31: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 13.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM15	CEM12	-8,621111 <sup>*</sup>	1,755671	0,015	-16,4366	-0,80561

**Tabla 5.32:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 15.

(I) Contenido en fibras	(J) Contenido en fibras	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
SINFIB	FIB1	6,381593 <sup>*</sup>	1,612645	0,006	1,5871	11,17609
	FIB2	1,304927 <sup>*</sup>	0,417441	0,032	0,08537	2,52448
	FIB3	4,758677 <sup>*</sup>	0,53622	0	3,14172	6,37563
FIB1	SINFIB	-6,381593 <sup>*</sup>	1,612645	0,006	-11,17609	-1,5871
	FIB2	-5,076667 <sup>*</sup>	1,663774	0,038	-9,95177	-0,20156
FIB2	SINFIB	-1,304927 <sup>*</sup>	0,417441	0,032	-2,52448	-0,08537
	FIB1	5,076667 <sup>*</sup>	1,663774	0,038	0,20156	9,95177
	FIB3	3,453750 <sup>*</sup>	0,674577	0	1,55378	5,35372
FIB3	SINFIB	-4,758677 <sup>*</sup>	0,53622	0	-6,37563	-3,14172
	FIB2	-3,453750 <sup>*</sup>	0,674577	0	-5,35372	-1,55378

**Tabla 5.33:** Comparación múltiple de Tamhane para la variable fibras.

En cuanto a las fibras, en la tabla 5.33 se puede apreciar que los hormigones con una mezcla de fibras de polipropileno y acero (FIB3) y a los que únicamente se les ha adicionado fibras de polipropileno (FIB1) no presentan diferencias significativas en cuanto a resistencia a compresión a 28 días. También se observa que los hormigones con inclusión de fibras de acero (FIB2) presentan diferencias significativas a todos los demás. También presentan diferencias significativas a todos los demás los hormigones sin fibras (SINFIB).

#### 5.4.8 Análisis multivariante

El análisis multivariante o de componentes principales calcula unas nuevas variables independientes entre sí en función de las originales. Estas nuevas variables se denominan “componentes principales” y se espera que unas pocas sintetizen la mayor parte de información que contienen los datos.

El primer componente principal se elige de forma que recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original, el segundo recoge la máxima variabilidad no recogida por el primero, y así sucesivamente. Realizamos el análisis mediante SPSS y elegimos Extracción mediante el Método de Componentes Principales y Matriz de Correlaciones. Esta técnica no presupone una dependencia a priori entre las variables (Shaw 2003). Al elegir Matriz de Correlaciones, los datos se normalizan y la suma de valores propios es igual al número de variables. Las comunales constituyen una desviación estandarizada tras la extracción y miden la proporción de la varianza con la que cada variable contribuye a la solución final o lo que es lo mismo, el grado de información que tenemos tras la extracción. Tomamos

		Media	Desviación típica	N del análisis	Extracción
Tipo Cemento	TipoCem	15,28	7,533	4824	0,83
Resistencia verdadera Cemento	ResisVerdCem	55,5883	3,29543	4824	0,607
Cono de Abrams	ConA	8,609	1,4978	4824	0,479
Temperatura ambiente	Tamb	21,63	7,078	4824	0,852
Temperatura del hormigón	Thorm	23,371	4,0784	4824	0,878
Tipo de aditivo	TipoAditivo	1,4	1,768	4824	0,563
% de aditivo real	%AdiReal	0,51846831	0,089046662	4824	0,745
Resistencia probeta 1	fc28	37,76992	4,038261	4824	0,869
Resistencia probeta 3	fc7	31,5916	3,606826	4824	0,865
Contenido en fibras	Fib	0,02	0,223	4824	0,597
Días hasta ensayo de rotura 2	DiaEnsProb2	28,07	0,546	4824	0,882
Días hasta ensayo de rotura 1	DiaEnsProb1	7,07	0,517	4824	0,605
Kg/m3 de árido G20/32	Kg7-GR-20/32	9,2366	45,71662	4824	0,973
Kg/m3 de árido G16/25	Kg6-GR-16/25	368,9145	83,19478	4824	0,98
Kg/m3 de árido G10/16	Kg5-GR-10/16	301,6598	28,01605	4824	0,901
Kg/m3 de árido G6/12	Kg4-GR-6/12	218,5445	31,07785	4824	0,924
Kg/m3 de árido G4/8	Kg3-GR-4/8	172,7813	25,13334	4824	0,923
Kg/m3 de arena lavada	Kg2-AF-0/4-R	403,9273	69,0706	4824	0,976
Kg/m3 de arena triturada	Kg1-AF-0/4-T	338,4124	100,23246	4824	0,968
Kg/m3 de cemento	Kg0-Cem	302,929	29,23985	4824	0,876
% árido G20/32 Bolomey	tb7-GR-20/32	0,004303	0,0213071	4824	0,973
% árido G16/25 Bolomey	tb6-GR-16/25	0,174213	0,0385185	4824	0,988
% árido G10/16 Bolomey	tb5-GR-10/16	0,142716	0,0145015	4824	0,922
% árido G6/12 Bolomey	tb4-GR-6/12	0,103374	0,015048	4824	0,935
% árido G4/8 Bolomey	tb3-GR-4/8	0,081707	0,0120808	4824	0,937
% AL0/4 Bolomey	tb2-AF-0/4-R	0,191066	0,0338196	4824	0,996
% AT0/4 Bolomey	tb1-AF-0/4-T	0,159367	0,0461678	4824	0,976
% Cemento Bolomey	tb0-Cem	0,143262	0,0146981	4824	0,887
Tamaño máximo del árido	Dmax	24,88	2,238	4824	0,968
MG árido G6/12	mg4-GR-6/12	6,8272	0,09397	4824	0,746
MG AL0/4	mg2-AF-0/4-R	3,0506	0,20035	4824	0,827
% árido G20/32 Fuller	t7-GR-20/32	0,00497	0,024631	4824	0,973
% árido G16/25 Fuller	t6-GR-16/25	0,20334	0,04565	4824	0,991
% árido G10/16 Fuller	t5-GR-10/16	0,16674	0,018388	4824	0,929
% árido G6/12 Fuller	t4-GR-6/12	0,12075	0,018275	4824	0,945
% árido G4/8 Fuller	t3-GR-4/8	0,09546	0,014805	4824	0,947
% AL0/4 Fuller	t2-AF-0/4-R	0,22334	0,041695	4824	0,995
% AT0/4 Fuller	t1-AF-0/4-T	0,18541	0,052565	4824	0,973
MG de la mezcla	MG	5,4794	0,13048	4824	0,907

Tabla 5.34: Estadísticos descriptivos y comunalidades.

como comunalidades carentes de explicación las que están por debajo de 0,47. En la tabla 5.34 se observan los estadísticos descriptivos para las diferentes variables con valores de comunalidades después de la extracción superiores a 0,47.

Los valores propios representan la aportación de cada componente principal a la explicación de la variabilidad de los datos. Para determinar el número de componentes principales, su autovalor debe ser superior a la unidad, ya que si una

componente principal no puede explicar más variación que una sola variable por sí misma, entonces probablemente no es importante.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	11,841	30,361	30,361	11,841	30,361	30,361	11,163	28,622	28,622
2	6,73	17,256	47,616	6,73	17,256	47,616	5,586	14,323	42,945
3	3,916	10,04	57,656	3,916	10,04	57,656	3,815	9,781	52,726
4	2,835	7,269	64,925	2,835	7,269	64,925	3,278	8,404	61,13
5	2,477	6,351	71,276	2,477	6,351	71,276	3,077	7,89	69,02
6	1,739	4,459	75,735	1,739	4,459	75,735	2,371	6,078	75,099
7	1,337	3,427	79,162	1,337	3,427	79,162	1,423	3,648	78,747
8	1,137	2,915	82,077	1,137	2,915	82,077	1,191	3,054	81,801
9	1,095	2,807	84,884	1,095	2,807	84,884	1,175	3,013	84,814
10	1,002	2,57	87,455	1,002	2,57	87,455	1,03	2,641	87,455

**Tabla 5.35:** Varianza total explicada. Método de extracción: Análisis de Componentes Principales.

La matriz de componentes nos indica qué variables contribuyen a explicar cada componente principal. Además, nos ofrecen las cargas factoriales, que representan la correlación entre su variable original y su componente principal. La carga factorial representa la jerarquía de importancia de cada variable para cada componente principal y el valor mínimo que tomamos, que depende del tamaño muestral, es de 0,5 en valor absoluto. En las matrices siguientes, no se han representado las cargas inferiores a 0,5 en valor absoluto.

Como la matriz de componentes puede expresar similares cargas de una variable para las diferentes componentes principales, debemos rotar las componentes principales para que las variables carguen en una u otra componente. Para la rotación se ha empleado el método Varimax, que supone una rotación ortogonal que minimiza el número de variables que tienen saturaciones altas en cada componente principal (Kaiser 1958) y la rotación ha convergido en 10 iteraciones.

Con 10 componentes principales se explica el 87,5% de la información de las variables de nuestro estudio para los hormigones de planta y tan solo bastan 8 componentes para explicar el 81,8% . Del análisis de la Matriz de Componentes Rotados se deducen 8 grupos de variables relacionadas entre sí. El primer grupo está formado por las cantidades de gravas hasta la fracción 16/25 y el tamaño máximo del árido. El segundo por las cantidades de arenas en la dosificación. El tercero por la cantidad de árido de las granulometrías superior (grava GR-20/32). El cuarto por las resistencias a compresión del hormigón tanto a 7 como a 28 días, la cantidad de cemento y el módulo granulométrico de la mezcla. El quinto por las temperaturas ambiente y del hormigón y el porcentaje de aditivo. El sexto tiene que ver con el tipo de cemento y la resistencia verdadera del mismo y el módulo granulométrico de la fracción 6/12. El séptimo está formado por el cono de Abrams y el tipo de aditivo. Por último, el octavo por el módulo granulométrico de la arena natural lavada.

	Componente									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
TipoCem						0,895				
ResisVerdCem						-0,697				
ConA							-0,570			
Tamb					0,880					
Thorm					0,921					
TipoAditivo							0,624			
%AdiReal					0,738					
fc28				0,797						
fc7				0,844						
Fib									0,755	
DiaEnsProb2										0,935
DiaEnsProb1									0,762	
Kg7-GR-20/32			0,920							
Kg6-GR-16/25	-0,846									
Kg5-GR-10/16	0,935									
Kg4-GR-6/12	0,899									
Kg3-GR-4/8	0,898									
Kg2-AF-0/4-R		0,971								
Kg1-AF-0/4-T		-0,834								
Kg0-Cem				0,600						
tb7-GR-20/32			0,920							
tb6-GR-16/25	-0,845									
tb5-GR-10/16	0,900									
tb4-GR-6/12	0,911									
tb3-GR-4/8	0,917									
tb2-AF-0/4-R		0,989								
tb1-AF-0/4-T		-0,849								
tb0-Cem				0,636						
Dmax	-0,935									
mg4-GR-6/12						0,792				
mg2-AF-0/4-R								0,891		
t7-GR-20/32			0,920							
t6-GR-16/25	-0,833									
t5-GR-10/16	0,879									
t4-GR-6/12	0,918									
t3-GR-4/8	0,913									
t2-AF-0/4-R		0,988								
t1-AF-0/4-T		-0,861								
MG				0,559						

Tabla 5.36: Matriz de componentes rotados. Método de rotación: Varimax con Kaiser.

Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,948	0,188	-0,219	0,111	0,066	0,03	-0,021	-0,014	0,004	0,006
2	-0,237	0,81	-0,021	0,444	0,277	-0,002	-0,076	0,088	-0,014	-0,011
3	0,16	0,242	0,796	-0,376	0,161	0,297	0,118	-0,1	-0,003	0,05
4	-0,079	-0,166	-0,33	-0,283	0,795	0,349	-0,148	0,034	0,01	-0,015
5	0,099	-0,296	0,365	0,282	0,486	-0,662	-0,004	0,088	-0,083	-0,022
6	0,026	-0,352	0,245	0,659	-0,019	0,546	-0,251	-0,089	0,082	-0,076
7	-0,02	-0,092	-0,087	0,219	0,095	0,199	0,845	0,066	-0,373	0,174
8	0,009	-0,032	0,014	0,045	0,043	0,01	0,304	0,378	0,862	0,125
9	0,047	-0,032	0,087	-0,063	-0,113	0,116	-0,23	0,886	-0,322	0,131
10	-0,017	-0,017	-0,016	0,041	0,008	-0,035	-0,19	-0,18	0,003	0,963

**Tabla 5.37:** Matriz de transformación de las componentes. Método de rotación: Varimax con Kaiser.

Analizando detalladamente los componentes principales, se observa que en el primero están relacionadas las cantidades de gravas, hasta la fracción 10/16, existentes en la dosificación, junto con la cantidad de grava de la fracción 16/25 y el tamaño máximo del árido, aunque de forma inversa. Este componente principal se le podría denominar "*gravas*".

El segundo componente principal relaciona de forma inversa la cantidad de arena natural lavada y de arena triturada, con lo que podría denominarse "*arenas*". Es lógico que a una cantidad dada de arena total en la dosificación, si crece la de un tipo disminuye la del otro. El tercer componente tiene que ver con la cantidad de grava 20/32 y se le podría denominar "*grava gorda*". Esta fracción granulométrica se encuentra muy puntualmente en las mezclas.

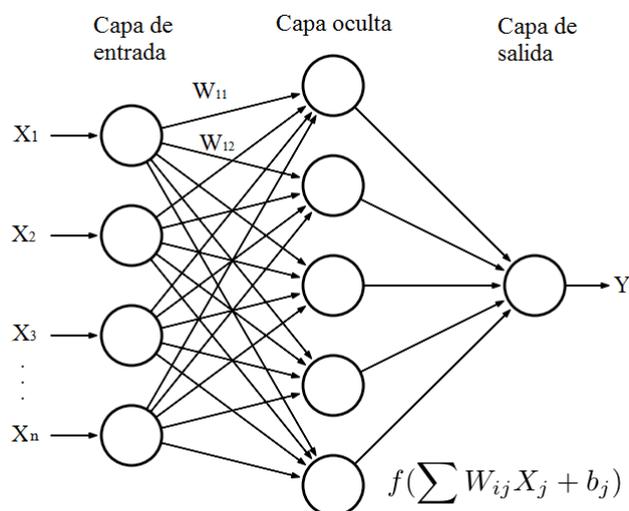
En el cuarto componente se observa que las resistencias a 7 días, a 28 días, la cantidad de cemento y el módulo granulométrico de la mezcla se encuentran relacionadas. Sobre todo se encuentra una fuerte dependencia entre la resistencia a 7 y a 28 días. Además, la existencia de dependencia entre las resistencias y la cantidad de cemento y el módulo granulométrico de la mezcla viene a corroborar el estado del conocimiento. A este componente se le podría denominar "*resistencia*". En el quinto componente se observan relacionadas la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón y el porcentaje de aditivo, con fuerte dependencia en el caso de las temperaturas. Podría denominarse a este grupo de variables "*temperatura*".

El sexto grupo de variables relaciona el tipo de cemento y el módulo granulométrico de la fracción 6/12, junto con la resistencia verdadera del cemento, aunque de forma inversa. A este grupo de variables se le podría denominar "*cemento*". En el séptimo componente, el tipo de aditivo se encuentra relacionado inversamente con el cono de Abrams y podría denominarse "*aditivo*". Por último, el octavo componente tiene que ver con el módulo granulométrico de la arena natural lavada y se le podría denominar "*módulo arena lavada*".

## 5.5 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA)

### 5.5.1 Introducción

Una RNA es un modelo computacional que emula al sistema neuronal biológico en el procesamiento de la información, que consiste en un número limitado de elementos interconectados entre sí (nodos o neuronas) y distribuidos en una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. La RNA más sencilla consta de una capa de entrada, una capa de neuronas o capa oculta y una capa de salida, en la que las capas y las neuronas están interconectadas como se muestra en la figura 5.59.



**Figura 5.59:** Topología modelo de una red neuronal artificial.

Las RNA son de aplicación en diversidad de problemas de reconocimiento de patrones y de aproximación de funciones, debido a su flexibilidad y facilidad de uso, y forman parte del conjunto de técnicas pertenecientes al campo de la inteligencia artificial. Dado que las RNA han sido aplicadas de forma satisfactoria en la predicción de diversos problemas en diferentes áreas de conocimiento (biología, medicina, ingeniería, psicología, etc) obteniendo excelentes resultados respecto a los modelos derivados de la estadística clásica (varias referencias bibliográficas en este sentido se pueden consultar en Palmer y Montaña (1999)), se justifica el uso de las mismas en el presente trabajo de investigación. En este sentido, el trabajo de Martí-Vargas *et al.* (2013) utilizó RNA para predicción de las longitudes de transferencia en esfuerzos de pretensado, reduciéndose un 30 % el error en comparación con la utilización de modelos de regresión lineal.

Aunque Sarle (1994) establece una similitud entre modelos estadísticos y modelos de RNA, las RNA presentan importantes ventajas con respecto a los modelos estadísticos como son no partir de restricciones respecto a los datos de partida, no imponer presupuestos y la habilidad para resolver problemas complejos o no lineales (Palmer y Montaña 1999). Respecto a las limitaciones de las RNA, la más importante consiste en la dificultad de comprender la naturaleza de las representaciones internas generadas por la red para responder ante un problema dado, es decir, no se sabe como el sistema interrelaciona las diferentes variables de entrada con los pesos de las conexiones para elaborar una solución (Rzempoluck 1998). Los diferentes modelos estadísticos, permiten sin embargo, observar los parámetros o pesos relativos que intervienen en el modelo. En definitiva, en las RNA no se puede explicar ni el proceso de razonamiento que utilizan ni la relación que existe entre las variables de entrada y las salidas que producen.

En este trabajo de investigación vamos a utilizar las RNA con el propósito de evaluar el comportamiento de los hormigones, en cuanto a la capacidad de predecir en función de unas variables de entrada, las resistencias a 7 días  $f_{c7}$  o bien a 28 días  $f_{c28}$ , o el cono de Abrams de la mezcla. También se van a utilizar, para obtener modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de variables.

### 5.5.2 Funcionamiento RNA

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

Las neuronas se disponen en diferentes capas en las que la capa de entrada tiene la función de recibir la información desde el exterior, mientras que las neuronas de la capa de salida son las encargadas de entregar los resultados de las predicciones realizadas por la red neuronal. Las capas ocultas generan las relaciones de encadenamiento entre las de entrada y salida, extraen y refinan las relaciones y características de las variables de entrada para predecir las de salida que son de interés para el problema.

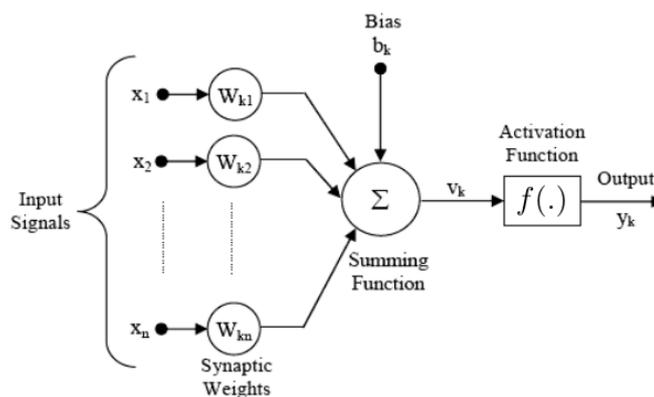
La fundamentación matemática para estructurar una RNA está basada en el teorema de Kolmogorov, presentado por Kurkova (1992) y Haykin (1999), de tal forma que a partir de 3 capas (de entrada, oculta y de salida), se puede aproximar hasta el nivel deseado cualquier función continua en un intervalo, haciendo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

dimensiones,  $n \geq 2$ , a una salida de  $m$  dimensiones puede ser implementada por una red con una capa oculta. También se ha demostrado que una red con más de una capa oculta puede aproximar relaciones que impliquen funciones discontinuas (Rzempoluck 1998).

La elaboración de una RNA involucra el número de capas ocultas, el número de neuronas en las capas ocultas, el tipo de conexiones entre neuronas, la función de transferencia o respuesta de las neuronas y el mecanismo de aprendizaje.

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

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



**Figura 5.60:** Funcionamiento de una neurona artificial  $k$  (Haykin 1999).

La función de activación, en caso de existir, activa la salida de esta neurona. La función de transferencia se aplica al resultado de la función de propagación y normalmente, consiste en una función de salida acotada. Algunas funciones de transferencia pueden ser las mencionadas en la figura 5.61 siguiente.

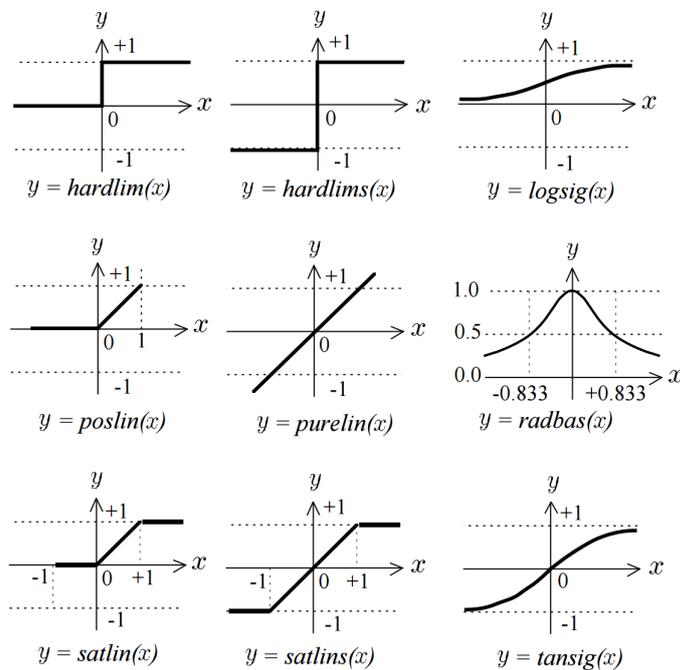


Figura 5.61: Tipología de funciones de transferencia.

### 5.5.3 Tipos de redes neuronales artificiales

Los criterios más importantes para clasificar las redes neuronales son:

- Según el tipo de conexiones:
  - Redes de propagación hacia delante (*feedforward*), donde las conexiones van en un solo sentido desde la capa de entrada hacia la capa de salida.
  - Redes recurrentes, donde las redes pueden realizar ciclos.
- Según el tipo de aprendizaje:
  - Aprendizaje supervisado: los datos o entradas tienen una respuesta conocida o salida, con la cual se ajusta o entrena la red neuronal.
  - Aprendizaje no supervisado o autoorganizado: los datos son solamente entradas. Son redes empleadas fundamentalmente para clasificación y reconocimiento de patrones.

Nos centraremos a partir de ahora en la aplicación de redes neuronales de propagación hacia adelante, con aprendizaje supervisado, empleadas en la aproximación de funciones, al ser estas las que se van a utilizar en el estudio. Las conexiones tipo *feedforward* fueron definidas por Rumelhart *y col.* (1986), la cual corresponde a un tipo de computación paralela donde muchas pequeñas unidades de cálculo llamadas neuronas están masivamente interconectadas con la capa anterior de donde reciben información, y con la capa posterior donde la transmiten. Sus capas ocultas poseen una función de activación que limita la salida a un rango cercano y desde esta, la capa de salida puede producir todos los valores de estimación. La salida de cada capa es representada como:

$$Y_{Nx1} = f(W_{NxM} X_{M,1} + b_{N,1}) \quad (5.9)$$

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

#### 5.5.4 Número de neuronas de la capa oculta

Lippman (1987) considera que redes con una única capa oculta resultan suficientes para resolver problemas arbitrariamente complejos, siempre que la capa oculta incluya un número mínimo de neuronas. La cantidad mínima de neuronas de las capas ocultas puede ser obtenida de entre los valores obtenidos a partir de la regla de la pirámide (Tabares *y col.* 2006):

$$k = \text{Redondeo}(\sqrt{nm}) \quad (5.10)$$

o la aplicación del teorema de Kolmogorov (Hecht-Nielsen 1987):

$$k = 2n + 1 \quad (5.11)$$

donde  $k$  es el número de neuronas de la capa oculta,  $n$  es el número de neuronas de la capa de entrada (variables de entrada), y  $m$  es el número de neuronas de la capa de salida (variables de salida). Un procedimiento muy usado es iniciar la red con el número mínimo de neuronas ocultas, y si los resultados no son satisfactorios se va aumentando progresivamente el número de estas hasta que el indicador de evaluación es aceptable (Brockett *y col.* 1997). En nuestro estudio el indicador de evaluación utilizado es el coeficiente de correlación  $R$ , tal y como se puede observar en la tabla 5.39.

En definitiva, el número de neuronas de la capa oculta se determina usualmente mediante prueba y error (Nehdi *y col.* 2001) y los criterios empíricos para determinar el número de neuronas de la capa oculta  $k$  son función del número de neuronas de la capa de entrada  $n$  y del número de neuronas de la capa de salida  $m$ , tal y como se puede observar en la tabla siguiente:

Número de neuronas de la capa oculta $k$	Referencias bibliográficas
<i>Redondeo</i> $\sqrt{n \cdot m}$	Tabares <i>y col.</i> (2006) y Shibata e Ikeda (2009)
$2n + 1$	Hecht-Nielsen (1987)
$2n$	Gallant (1993)
$n + m$	Nagendra (1998)
$0,75n$	Özturan <i>y col.</i> (2008)
$n$	Lai y Serra (1997) y Dias y Pooliyadda (2001)
$(n + m)/2$	Popovics (1990)

**Tabla 5.38:** Número de neuronas de la capa oculta según diversos autores.

### 5.5.5 Aprendizaje de la red neuronal

Una de las propiedades más importantes de las RNA es la habilidad de las mismas para aprender de su entorno y de mejorar su rendimiento en base a un proceso de aprendizaje.

El aprendizaje o entrenamiento de la red, cuyo objetivo es que la red sea capaz de reproducir el comportamiento subyacente en los datos aportados, consiste básicamente en la minimización de una función de coste o error, lo que significa que la salida de la red se aproxima a la salida de los datos. La función de coste más común es la de promedio de errores al cuadrado (*MSE*) (Hernández 2006) (Flórez y Fernández 2008) (Ivorra *y col.* 2015).

Para optimizar la red neuronal, se emplean diferentes métodos de ajuste de parámetros de la red (pesos de las conexiones y sesgo de las neuronas), a partir de unos valores aleatorios o predefinidos (inicialización de la red). Algunos ejemplos de los métodos de ajuste son los de tipo gradiente o los algoritmos genéticos:

- Los métodos de tipo gradiente calculan la variación del error al variar cada uno de los parámetros a modo de derivada multidimensional y luego, modifican todos los parámetros de la red neuronal obteniendo un error menor. Se puede decir que es una búsqueda en serie de la solución o mínimo global.

- Los métodos basados en algoritmos genéticos se basan en técnicas estocásticas de búsqueda basadas en las ideas de los mecanismos de selección natural. Se genera un determinado número de redes o hijos a través de mutaciones en los parámetros, evaluando el error de la red para cada uno de ellos. Los hijos con menor error, tienen mayor probabilidad de convertirse en padres de nuevas redes, mientras que los hijos con mayor error desaparecen. Se trata de una búsqueda en paralelo de la solución óptima.

Ambos métodos de ajuste de los pesos de las conexiones y sesgo de las neuronas se reducen a un proceso iterativo de optimización que se repite hasta cumplir alguno de los criterios de parada. Algunos ejemplos de los criterios de parada son el número de iteraciones, la obtención de un mínimo de la función de error, o un tiempo de ejecución. El principal problema de los algoritmos tipo gradiente es que el mínimo encontrado puede ser local, problema que se evita con los algoritmos genéticos al ejecutar estos una búsqueda multidireccional en base a un proceso aleatorio.

Uno de los algoritmos de aprendizaje más utilizado en aplicaciones de ingeniería es el *backpropagation*, que consiste en utilizar una optimización basada en derivadas, donde el error es derivable no solamente en función de los pesos de la capa de salida, sino también en función de los pesos de la capa oculta utilizando la regla de la cadena (Hinton 1989), que permite minimizar el error de entrenamiento de la red neuronal (la diferencia entre los valores calculados por la red utilizando un determinado conjunto de pesos, y los valores originales). El error y las correcciones efectuadas a los pesos se trasladan desde la capa de salida hacia atrás hasta la capa de entrada, de donde surge su nombre de propagación hacia atrás.

El método de gradiente descendiente o gradiente conjugado, correspondiente al gradiente conjugado con escalonamiento *SCG* (*Scale Conjugate Gradient*), ha sido definido por Moller (1993), y sustituye la búsqueda lineal por un escalonamiento de paso, que depende del éxito en la reducción del error y buen desempeño de la aproximación cuadrática de este.

El método de entrenamiento denominado *Algoritmo de Levenberg-Mardquardt* o *LMA*, ha sido definido por Lourakis (2005), y corresponde a una técnica iterativa que localiza el mínimo de una función que es expresada como la suma de los cuadrados de funciones no lineales. La base principal de este algoritmo es mantener la aproximación de segundo orden del error para acelerar el entrenamiento, pero a la vez evaluando de forma aproximada la matriz del Hessiano. Este es el método de entrenamiento utilizado en este trabajo de investigación al tener la velocidad de convergencia del *MSE* más rápida que los métodos de gradiente descendiente a pesar de su mayor complejidad de cálculos (Hernández 2006).

### 5.5.6 Sobreaprendizaje de la red

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

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

### 5.5.7 Datos de entrenamiento, validación y test

Con el fin de encontrar la red que sea capaz de generalizar mejor y para controlar si una red neuronal ha sobreaprendido, se dividen los datos en tres grupos (Ripley 1996) (Martín del Brío y Sanz 1997):

- Datos de entrenamiento. Son los datos empleados en el ajuste de los parámetros de la red neuronal. Han de ser representativos del total de datos, por lo que normalmente se seleccionan aleatoriamente.
- Datos de validación. Se emplean después de cada iteración en el proceso de entrenamiento, para comprobar si se produce sobreaprendizaje.
- Datos de test. Sólo se emplean una vez finalizado el entrenamiento.

A partir de la división de datos en los grupos mencionados es posible aplicar la técnica *early-stopping* para evitar el sobreaprendizaje. Durante el proceso iterativo de optimización de los parámetros de la red, se comparan los errores obtenidos con los datos de entrenamiento y con los datos de validación. En el caso de que durante sucesivas iteraciones, el error con los datos de entrenamiento disminuya, mientras que el error con los datos de validación aumente, se detiene el proceso de ajuste como un criterio de parada adicional.

Otra técnica para evitar el sobreaprendizaje consiste en aplicar el principio de parsimonia o navaja de Ockham, por el que a igualdad de condiciones, la explicación más simple es la correcta. La regularización consiste en agregar el sumatorio ponderado de los pesos de la red a la función de coste, de modo que para un error

similar de dos redes neuronales, aquella que tiene menores valores de los pesos es mejor (Figueres 2010).

$$MSE_{reg} = \gamma \cdot MSE + (1 - \gamma) \cdot MSW \quad (5.12)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad (5.13)$$

$$MSW = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (W_j)^2 \quad (5.14)$$

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

Las redes podadas (*pruned neural networks*) son otra técnica, según la cual, mediante la desconexión o eliminación de neuronas (reducción del número de parámetros) se consiguen redes neuronales más simples empleando una función de coste que tiene en cuenta el número total de parámetros de la red. Un posible tipo de función de coste a emplear en las redes neuronales podadas, que tiene en cuenta el número total de parámetros de la red, es el *PSE (Predicted Squared Error)* (Moody y Utans 1994):

$$PSE = MSE \cdot \left(1 + \frac{2N}{N - n}\right) \quad (5.15)$$

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

### 5.5.8 Estandarización de los datos

El entrenamiento o aprendizaje de la red se realiza de manera mucho más rápida si se estandarizan las entradas y salidas de la red, de modo que todas ellas se expresan en rangos similares, a modo de cambios de escala (Demuth y col. 2002). Teóricamente no sería necesaria esta transformación, pero dado que los pesos de una red neuronal se inicializan de manera aleatoria con unos valores pequeños, el aprendizaje funciona mejor con entradas y salidas estandarizadas.

Se puede estandarizar forzando los datos a que se encuentren en un rango determinado, como por ejemplo, escalando todos los datos.

### 5.5.9 Evaluación del desempeño de la RNA

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

Los indicadores mencionados se calculan utilizando las ecuaciones siguientes:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (5.16)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2 \quad (5.17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2} \quad (5.18)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5.19)$$

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

En la bibliografía podemos encontrar otros parámetros estadísticos para evaluar el desempeño de las RNA (Jain y Srinivasulu 2004).

## 5.6 APLICACIÓN DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES

### 5.6.1 Elaboración de las redes neuronales artificiales

Para la creación de las RNA se ha usado Neural Network Toolbox de Matlab R2013b. También se ha utilizado la aplicación informática Microsoft Office Excel 2007 (12.0.6425.1000) SP2 MSO. La tipología de la RNA usada corresponde a una red multicapa *feedforward*, siendo el algoritmo de aprendizaje elegido para entrenar la red el *Algoritmo de Levenberg-Marquardt* (la función de entrenamiento es *trainlm*) debido a sus prestaciones frente al clásico *backpropagation* (Haykin 2008).

Se ha utilizado la técnica de división de datos para entrenamiento-validación-test denominada validación cruzada (*K-Fold Cross Validation*) con  $K = 3$  para evitar el problema del sobreaprendizaje (Palmer y Montaña 1999) (Flórez y Fernández 2008).

La función de transferencia cumple con el objetivo de limitar el rango de salida de la neurona y se selecciona de acuerdo con el problema y a criterio del investigador, generalmente por ensayo y error (Collantes 2001), aunque también depende de la precisión y velocidad requerida y del algoritmo de aprendizaje escogido. En problemas de predicción en redes multicapa se suele utilizar como función de transferencia la tangente hiperbólica (*tansig*) (Piekiewicz y Rybicki 2004), que es la que hemos seleccionado en este trabajo.

En el presente trabajo, se ha configurado la RNA con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Las neuronas de la capa de entrada son variables para cada red neuronal y la capa de salida tiene una única neurona. En cuanto a las neuronas de la capa oculta, se ha decidido que sean 50 neuronas para todas las redes neuronales artificiales elaboradas, ya que en la red neuronal artificial RNA 6 vemos que el valor del coeficiente de correlación  $R$  máximo obtenido se encuentra cercano a las 50 neuronas en la capa oculta, tal y como se puede apreciar en la tabla 5.39 y como es el caso de algunos autores como Bilgehan y Turgut (2010).

Nº de neuronas en la capa oculta	Valor de R	Nº de neuronas en la capa oculta	Valor de R
5	0,82498	17	0,90375
6	0,81931	18	0,90483
7	0,85222	19	0,88628
8	0,85997	20	0,90126
9	0,84476	25	0,92051
10	0,87016	30	0,89545
11	0,83332	35	0,92044
12	0,87360	40	0,93630
13	0,88848	45	0,96135
14	0,84971	50	0,96448
15	0,89377	55	0,97115
16	0,90157	60	0,93869

**Tabla 5.39:** Valores de  $R$  obtenidos en función del nº de neuronas en la capa oculta en la RNA 6.

Como se ha señalado con anterioridad se utiliza el método de validación cruzada y en todas las redes neuronales artificiales elaboradas se ha dividido el número de datos en los siguientes porcentajes (Cover 1969):

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

En la figura 5.62 se pueden apreciar los coeficientes de correlación  $R$  para aprendizaje, test y validación, además del  $R$  total.

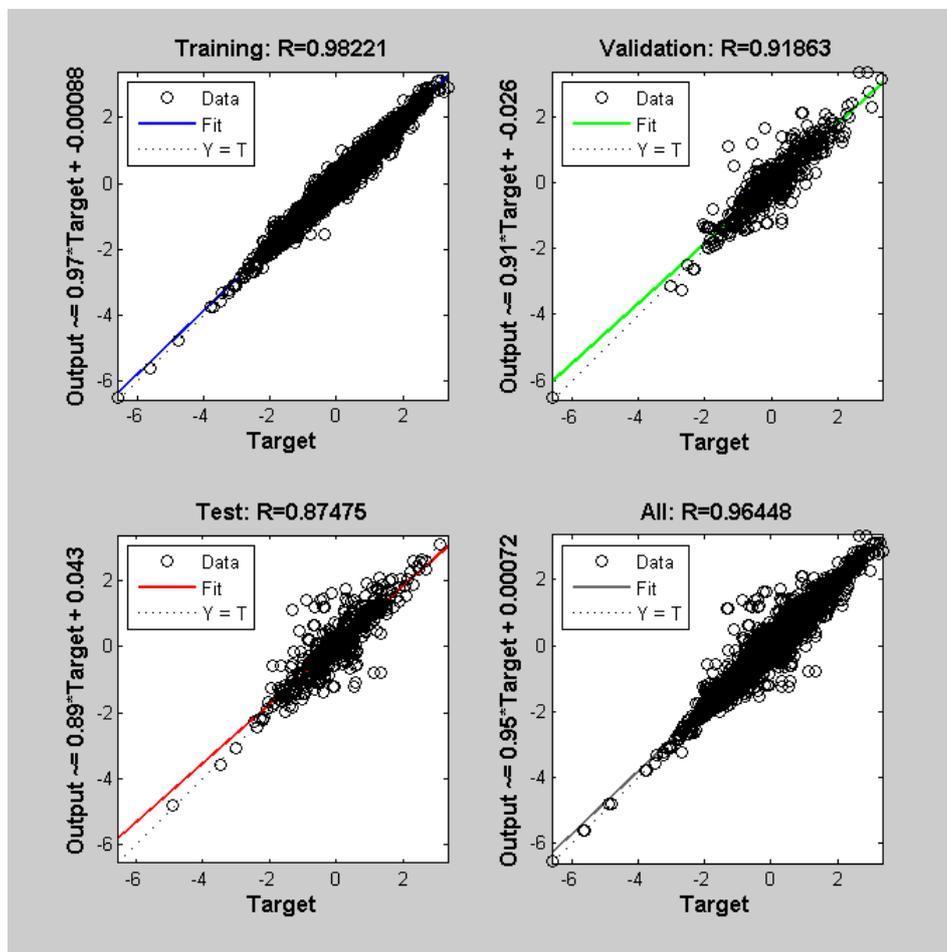


Figura 5.62: Coeficientes de correlación.

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

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

$$MSE = \text{mean}((astd - tstd)^2) \quad (5.20)$$

El error cuadrático medio relativo a la varianza es:

$$RMSE = MSE/\text{var}(tstd) \quad (5.21)$$

Y el valor de PSE es:

$$PSE = MSE \cdot (1 + 2 \cdot NPar)/(N - NPar) \quad (5.22)$$

Para cada ejecución de la red neuronal se calcula, además del factor de correlación  $R$  (para aprendizaje, test, validación y total), los valores de  $MSE$ ,  $RMSE$  y  $PSE$ . En el entorno de red neuronal en Matlab R2013b también tenemos información del número de iteraciones y del tiempo empleado (figura 5.63). Hemos registrado estos valores para algunas redes neuronales, tal y como se puede ver en las tablas 5.48, 5.49, 5.50, 5.51 y 5.52. El valor del coeficiente de correlación  $R$  que figura en todas las tablas se corresponde con el total. Se observa que las iteraciones, y por consiguiente los tiempos de ejecución, son bajos si se comparan con las de otros trabajos:

- 5000 o más iteraciones en Ni y Wang (2000), Muthupriya *y col.* (2011), Hakim *y col.* (2011) y Wankhade y Kambekar (2013).
- 1000 iteraciones en Supriya y Kishor (2014).
- De 50 a 800 iteraciones en Agrawal y Sharma (2010) variando el coeficiente de determinación  $R^2$  de 85,24% hasta 99,85% respectivamente.

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

Se van a plantear varias redes neuronales con el propósito de evaluar el comportamiento de los hormigones, en cuanto a la capacidad de predecir en función de unas variables de entrada, las resistencias a 7 días  $f_{c7}$  o bien a 28 días  $f_{c28}$ , o el cono de Abrams de la mezcla. Las variables de entrada que conforman las neuronas de la capa de entrada se pueden consultar en la tabla 5.40 para las 12 primeras

redes neuronales artificiales (desde RNA 1 a RNA 12). La variable de salida, que es única para cada red neuronal artificial, se puede consultar en la tabla 5.43 y esta variable de salida conforma la única neurona existente en la capa de salida. Esta salida puede ser bien la resistencia a 7 días  $f_{c7}$ , bien la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  o bien el cono de Abrams. En estas redes neuronales, cuando la salida es la resistencia a una edad determinada, figura como entrada el cono de Abrams pero no la resistencia a otra edad diferente. Si la salida es, sin embargo, el cono de Abrams, figura como entrada la resistencia a 28 días  $f_{c28}$ .

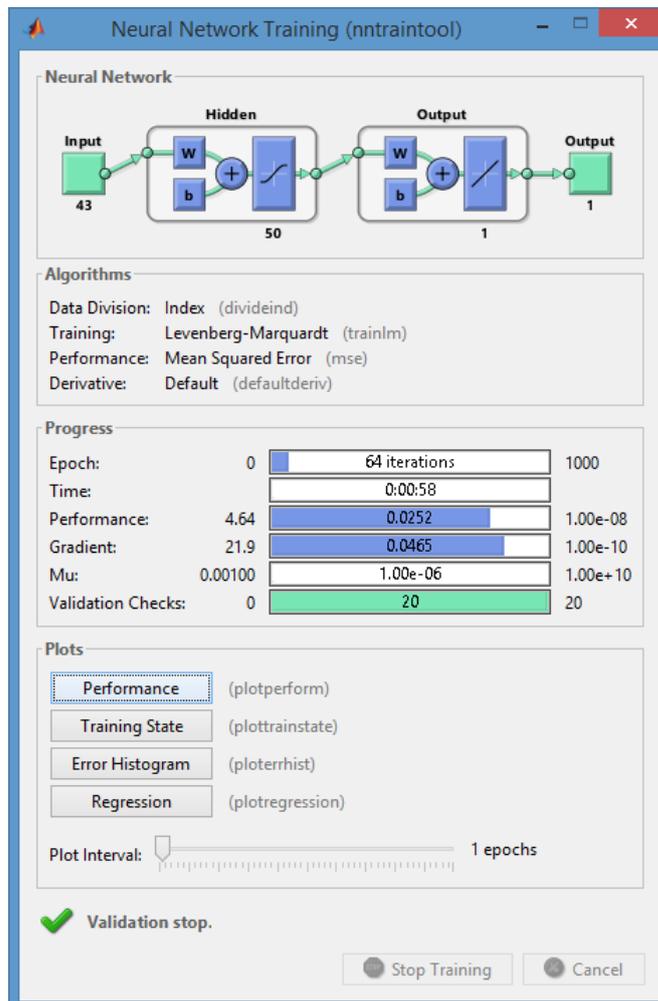


Figura 5.63: Entorno red neuronal en Matlab R2013b.

Variables de Entrada	RNA											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TipoCem	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ResisVerdCem	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
ConA	X	X	X	X	X	X		X	X	X		X
trCA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tamb	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thorm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
HoraFabPro	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
TipoAditivo	X	X	X	X	X	X	X	X				
%AdiReal	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
DiaEnsProb2		X										
DiaEnsProb1				X								
fc28							X-C				X-C	
fc7												X-C
Fib	X	X	X	X	X	X	X					
Kg7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kg0-Cem	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
KgTotal	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
tb7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
tb0-Cem	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dmax	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
mg7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
mg6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
mg5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
mg4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
mg3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
mg2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
mg1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
t1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
MG	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>n° Variables</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>43</b>	<b>43</b>	<b>43</b>	<b>18</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>42</b>
<b>n° Ensayos</b>	<b>4824</b>	<b>4636</b>	<b>4636</b>	<b>4636</b>	<b>4636</b>							

Tabla 5.40: Variables de entrada en las distintas RNA (1).

Variables de Entrada	RNA							
	13	14	15	16	17	18	19	20
MesFabPro					X			
TipoCem	X	X		X	X	X	X	X
ResisVerdCem	X	X	X	X	X	X	X	X
ConA	X	X	X	X	X	X	X	X
trCA	X	X	X	X	X	X	X	X
Tamb	X	X	X	X		X	X	X
Thorm		X	X	X			X	
HoraFabPro	X	X	X	X	X	X	X	X
TipoAditivo	X	X	X	X	X	X	X	X
%AdiReal	X	X	X	X	X	X	X	X
DiaEnsProb2								
DiaEnsProb1								
fc28								
fc7								
Fib	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X	X
Kg0-Cem	X	X	X	X	X	X	X	X
KgTotal	X	X	X	X	X	X	X	X
tb7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X	X
tb6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X	X
tb5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X	X
tb4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X	X
tb3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X	X
tb2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X	X
tb1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X	X
tb0-Cem	X	X	X	X	X	X	X	X
Dmax	X	X	X	X	X	X	X	X
mg7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X	X
mg6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X	X
mg5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X	X
mg4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X	X
mg3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X	X
mg2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X	X
mg1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X	X
t7-GR-20/32	X	X	X	X	X	X	X	X
t6-GR-16/25	X	X	X	X	X	X	X	X
t5-GR-10/16	X	X	X	X	X	X	X	X
t4-GR-6/12	X	X	X	X	X	X	X	X
t3-GR-4/8	X	X	X	X	X	X	X	X
t2-AF-0/4-R	X	X	X	X	X	X	X	X
t1-AF-0/4-T	X	X	X	X	X	X	X	X
MG	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>n° Variables</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>42</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>42</b>
<b>n° Ensayos</b>	<b>4824</b>							

Tabla 5.41: Variables de entrada en las distintas RNA (2).

Variables de Entrada	RNA					
	21	22	23	24	25	26
TipoCem	X	X	X	X	X	X
ResisVerdCem	X	X	X	X	X	X
ConA	X	X	X	X	X	X
trCA	X	X	X	X	X	X
Tamb	X	X	X	X	X	X
Thorm	X		X	X	X	
HoraFabPro						
TipoAditivo	X	X	X	X	X	X
%AdiReal	X	X	X	X	X	X
DiaEnsProb2						
DiaEnsProb1						
fc28						
fc7						
Fib	X	X	X	X	X	X
Kg7-GR-20/32						
Kg6-GR-16/25						
Kg5-GR-10/16						
Kg4-GR-6/12						
Kg3-GR-4/8						
Kg2-AF-0/4-R						
Kg1-AF-0/4-T						
Kg0-Cem						
KgTotal						
tb7-GR-20/32						
tb6-GR-16/25						
tb5-GR-10/16						
tb4-GR-6/12						
tb3-GR-4/8						
tb2-AF-0/4-R						
tb1-AF-0/4-T						
tb0-Cem	X	X	X	X	X	X
Dmax	X	X	X	X	X	X
mg7-GR-20/32						
mg6-GR-16/25						
mg5-GR-10/16						
mg4-GR-6/12						
mg3-GR-4/8						
mg2-AF-0/4-R						
mg1-AF-0/4-T						
t7-GR-20/32						
t6-GR-16/25						
t5-GR-10/16						
t4-GR-6/12						
t3-GR-4/8						
t2-AF-0/4-R						
t1-AF-0/4-T						
MG	X	X	X	X	X	X
<b>n° Variables</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>11</b>
<b>n° Ensayos</b>	<b>4824</b>	<b>4824</b>	<b>4824</b>	<b>4824</b>	<b>4824</b>	<b>4824</b>

Tabla 5.42: Variables de entrada en las distintas RNA (3).

Variables de Salida	RNA											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ConA							X					X
fc28	X	X				X-C		X-C		X-C		X-C
fc7			X	X	X-C				X-C			

Tabla 5.43: Variables de salida de las distintas RNA (1).

Variables de Salida	RNA							
	13	14	15	16	17	18	19	20
ConA								
fc28	X-C							
fc7								

Tabla 5.44: Variables de salida de las distintas RNA (2).

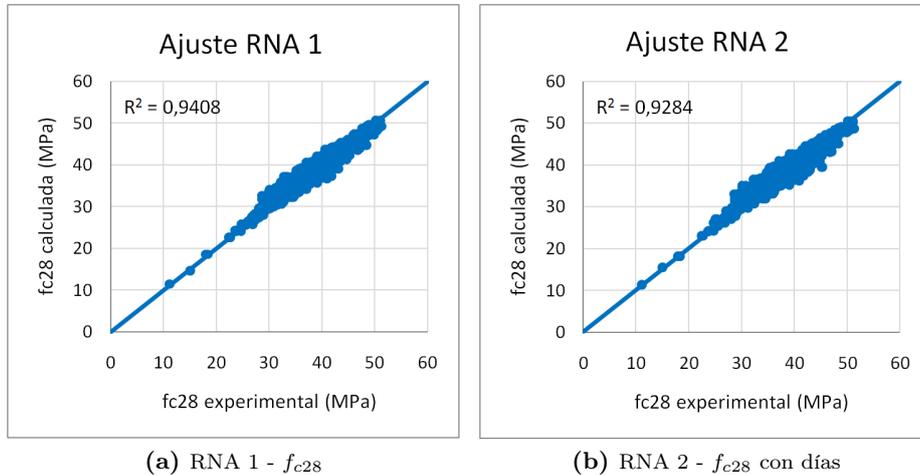
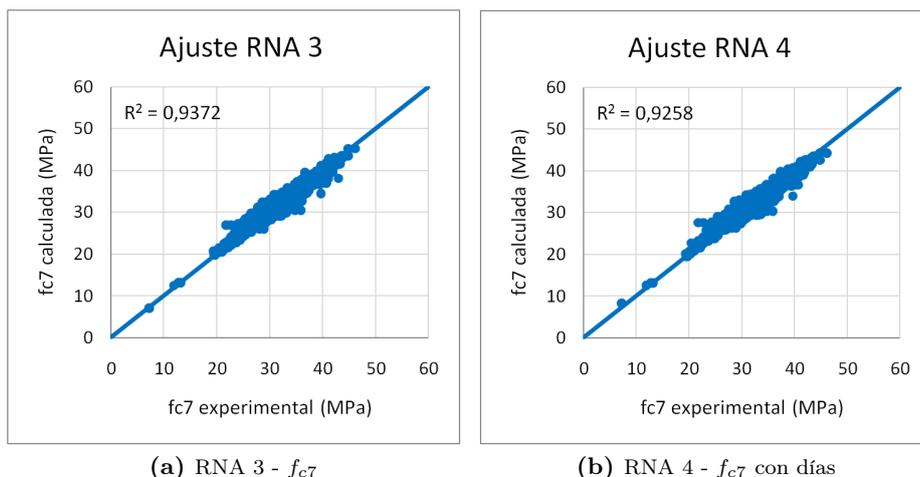
Variables de Salida	RNA					
	21	22	23	24	25	26
ConA						
fc28	X-C	X-C	X-C	X-C	X-C	X-C
fc7						

Tabla 5.45: Variables de salida de las distintas RNA (3).

La primera red neuronal artificial RNA 1, se plantea con el objetivo de predecir la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ , teniendo 43 variables de entrada. Como ya hemos señalado con anterioridad, la base de datos consta de 4824 ensayos en los que en este caso no se ha tenido en cuenta si la edad de rotura prevista a 28 días era diferente. El coeficiente de determinación obtenido para las  $f_{c28}$  calculadas en la simulación y los resultados experimentales, supuestos todos a 28 días, nos da un valor de  $R^2 = 0,9408$  (figura 5.64a).

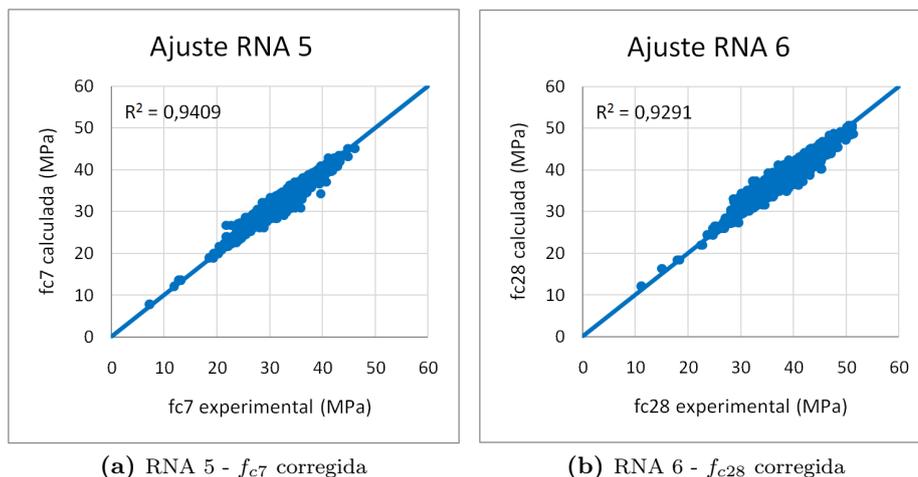
Dado que se pensaba que el ajuste podía mejorar teniendo en cuenta la edad real del ensayo, si esta era diferente a 28 días, se decidió crear una red neuronal artificial RNA 2 incorporando una nueva variable de entrada que fuese la edad real del ensayo (en este caso se pasa a 44 variables de entrada). El ajuste entre los valores de la resistencia  $f_{c28}$  calculada en la simulación y los resultados experimentales para las diferentes edades nos da un coeficiente de determinación de valor  $R^2 = 0,9284$ , algo inferior al de la red neuronal artificial RNA 1 (figura 5.64b).

Se procede de idéntica manera para las redes neuronales artificiales RNA 3 y RNA 4. De hecho, la red neuronal artificial RNA 3 predice la resistencia a compresión del hormigón a 7 días  $f_{c7}$  sin tener en cuenta la edad real de la rotura (43 variables de entrada) con un valor del coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,9372$  (figura 5.65a). La red neuronal artificial RNA 4 predice también la resistencia a 7 días  $f_{c7}$  teniendo en cuenta la edad real del ensayo (44 variables de entrada) con un coeficiente de determinación de valor  $R^2 = 0,9258$ , algo inferior al anterior (figura 5.65b).

(a) RNA 1 -  $f_{c28}$ (b) RNA 2 -  $f_{c28}$  con días**Figura 5.64:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 1 y RNA 2.(a) RNA 3 -  $f_{c7}$ (b) RNA 4 -  $f_{c7}$  con días**Figura 5.65:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 3 y RNA 4.

Otra estrategia para tener en cuenta la edad real a la que se han realizado las roturas, consiste en corregir las resistencias de las roturas realizadas a edades diferentes a 7 y 28 días mediante la expresión facilitada por el Código Modelo con  $s = 0,20$  (cementos de alta resistencia y endurecimiento rápido). En la creación de las redes neuronales artificiales RNA 5 y RNA 6 se predice la resistencia a compresión del hormigón a 7 días  $f_{c7}$  y a 28 días  $f_{c28}$  respectivamente, teniendo en cuenta ya las resistencias corregidas. Así pues, tenemos 43 variables de entrada

en las dos redes y los coeficientes de determinación son similares a los obtenidos en las anteriores redes,  $R^2 = 0,9409$  y  $R^2 = 0,9291$  (figuras 5.66a y 5.66b).



**Figura 5.66:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 5 y RNA 6.

Tal y como hemos visto en apartados anteriores, el asiento en cono de Abrams es el ensayo más conocido y más utilizado para caracterizar la consistencia del hormigón. La red neuronal artificial RNA 7 predice el asiento en cono de Abrams de la mezcla, teniendo la misma 43 variables de entrada, entre las que se encuentra la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  convenientemente corregida para las roturas a diferente edad (tabla 5.40). El coeficiente de determinación toma un valor de  $R^2 = 0,8628$  (figura 5.67a).

Elaboramos una nueva red neuronal artificial RNA 8 en la que se disminuye el número de variables de entrada a 18 (neuronas de la capa de entrada), tal y como se puede apreciar en la tabla 5.40. Básicamente se han anulado como variables de entrada la hora de fabricación de las probetas y variables relacionadas con cantidades de áridos y de cemento y módulos granulométricos de los áridos, que se entendía que no aportaban excesivamente a la bondad de la red neuronal. Como variable de salida tenemos la resistencia a compresión del hormigón corregida a 28 días  $f_{c28}$  y en este caso, el valor del coeficiente de determinación ha descendido a  $R^2 = 0,8834$  (figura 5.67b).

Hasta el momento las redes neuronales artificiales se han planteado para los 4824 ensayos de la base de datos completa. Elaboramos unas nuevas redes neuronales artificiales (RNA 9, RNA 10, RNA 11 y RNA 12) con el objetivo de evaluar el comportamiento de los hormigones sin fibras fabricados únicamente con idéntico plastificante lignosulfonato (LUBRICON 600 y POZZOLITH 375NE) tanto en lo que se refiere a resistencias a compresión corregidas a 7 y 28 días ( $f_{c7}$  y  $f_{c28}$

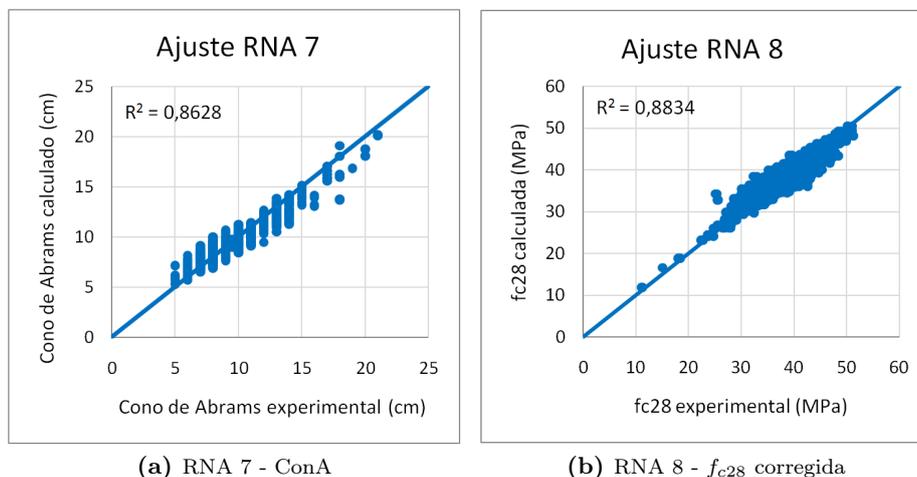


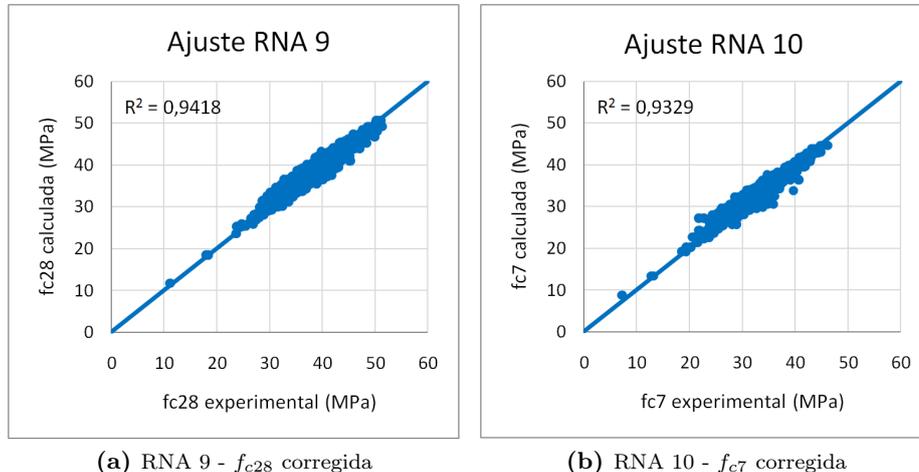
Figura 5.67: Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 7 y RNA 8.

respectivamente), como en lo que se refiere al asiento en cono de Abrams. En estas nuevas redes el número de ensayos desciende a 4636.

En las redes RNA 9 y RNA 10 se obtienen como variables de salida las resistencias a compresión a 7 y a 28 días respectivamente en función de ciertas variables de entrada. En la RNA 11 la variable de salida obtenida es el asiento en cono de Abrams. En la RNA 12 se obtiene como variable de salida la resistencia a compresión a 28 días, pero en este caso figura entre las variables de entrada la resistencia a 7 días.

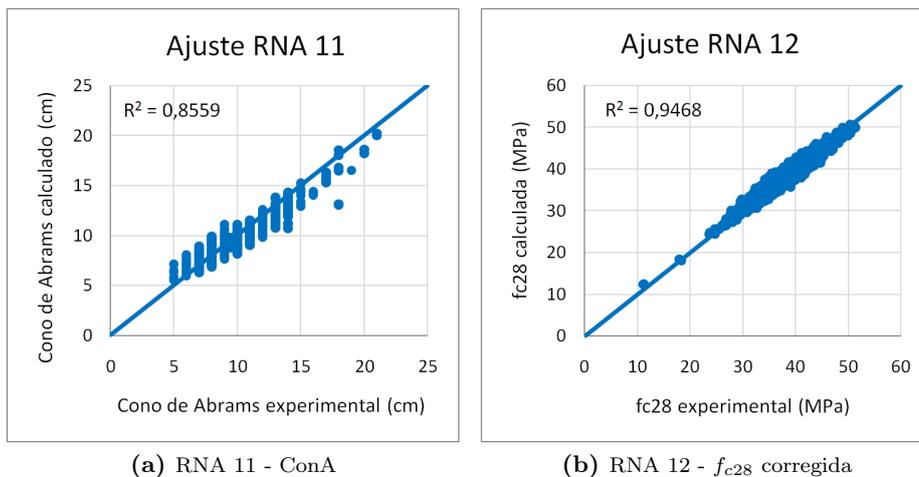
Red Neuronal	Ejecución								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RNA 1	0,95360	0,94519	0,94373	0,94257	0,95245	0,92356	0,95341	0,94302	0,95591
RNA 2	0,94808	0,93947	0,95046	0,94541	0,91346	0,94149	0,92283	0,94990	0,92916
RNA 3	0,93128	0,94093	0,94131	0,94057	0,95389	0,93956	0,93891	0,96042	0,94970
RNA 4	0,92629	0,91396	0,93108	0,95636	0,95238	0,91556	0,95127	0,95139	0,91805
RNA 5	0,92488	0,95174	0,95248	0,94224	0,94036	0,94190	0,93429	0,94768	0,96584
RNA 6	0,96448	0,94013	0,94364	0,92679	0,93431	0,91919	0,92710	0,95806	0,92389
RNA 7	0,91685	0,88335	0,84186	0,85331	0,83215	0,86527	0,84220	0,91393	0,78661
RNA 8	0,89875	0,92752	0,91215	0,93079	0,90911	0,91566	0,92987	0,88948	0,92324
RNA 9	0,95450	0,94217	0,95199	0,95056	0,94945	0,94014	0,91211	0,95595	0,94060
RNA 10	0,94879	0,93114	0,94075	0,94778	0,94705	0,92783	0,95487	0,93478	0,92031
RNA 11	0,83281	0,79393	0,81057	0,88957	0,94179	0,84553	0,88526	0,80655	0,87637
RNA 12	0,96299	0,96253	0,96183	0,96503	0,95851	0,96856	0,96899	0,96397	0,95441

Tabla 5.46: Valores de  $R$  obtenidos en cada ejecución para las distintas RNA (1).



(a) RNA 9 -  $f_{c28}$  corregida (b) RNA 10 -  $f_{c7}$  corregida

**Figura 5.68:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 9 y RNA 10.



(a) RNA 11 - ConA (b) RNA 12 -  $f_{c28}$  corregida

**Figura 5.69:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 11 y RNA 12.

Volviendo a la base de datos general con los 4824 ensayos, procedemos a elaborar cuatro nuevas redes neuronales artificiales (RNA 13, RNA 14, RNA 15 y RNA 16) para conseguir tener modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de ciertas variables. El procedimiento a seguir es el siguiente: se realiza el aprendizaje de cada red neuronal artificial con la base de datos general y con las variables de entrada que se indican en la tabla 5.41. La variable de salida será siempre la resistencia a compresión del hormigón corregida a 28 días  $f_{c28}$  (tabla 5.44). Posteriormente se toman los datos de un ensayo tipo (en nuestro caso

Red Neuronal	Ejecución								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RNA 18	0,91409	0,95451	0,94846	0,89954	0,94348	0,89919	0,94954	0,95267	0,92981
RNA 19	0,91019	0,95907	0,91559	0,92089	0,92134	0,92520	0,91549	0,94304	0,91460
RNA 20	0,94924	0,90656	0,94754	0,94258	0,95997	0,94174	0,94933	0,92615	0,93143
RNA 21	0,90022	0,90942	0,86683	0,90963	0,89839	0,90779	0,90273	0,91395	0,89026
RNA 22	0,90109	0,87962	0,90347	0,90446	0,90704	0,88575	0,90040	0,87483	0,90576
RNA 23	0,90330	0,89169	0,91585	0,90319	0,90679	0,87763	0,90241	0,85779	0,89361
RNA 24	0,89873	0,85318	0,90409	0,91931	0,90061	0,89073	0,89650	0,87442	0,87285
RNA 25	0,91655	0,90792	0,88195	0,90714	0,90488	0,91919	0,89657	0,91613	0,88931
RNA 26	0,82978	0,86587	0,89849	0,89334	0,91308	0,90623	0,90010	0,91289	0,90560

**Tabla 5.47:** Valores de  $R$  obtenidos en cada ejecución para las distintas RNA (2).

tomamos siempre el primer ensayo) y se hace variar la variable que nos interesa dentro del intervalo que figura en la base de datos general, dado que las redes neuronales artificiales interpolan, no extrapolan. Así pues, la red neuronal artificial nos da unos valores de la resistencia a compresión a 28 días  $f_{c28}$  en función de la variable estudiada.

La primera variable estudiada es la temperatura ambiente. En la red neuronal artificial RNA 13 se estudia la relación existente entre la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  y la temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) existente a la realización de las probetas y el ensayo de asentamiento en Cono de Abrams. El rango de temperaturas ambiente es el que va de 5 a 35  $^{\circ}C$  con incrementos de 1  $^{\circ}C$ . Para conseguir lo anterior se procede tal y como se indicó en el párrafo anterior, es decir, la red neuronal artificial aprende de la base de datos general con las 42 variables de entrada que figuran en la tabla 5.41 (entre las que no contemplamos la temperatura del hormigón), siendo la variable de salida la resistencia a compresión del hormigón corregida a 28 días  $f_{c28}$ . Se crea una base de datos nueva en la que todas las variables de entrada se mantienen constantes (siendo las correspondientes al primer ensayo) salvo la temperatura ambiente que varía de 5 a 35  $^{\circ}C$  con un intervalo de 1  $^{\circ}C$ . Se obtiene como resultado la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  para cada valor de la temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ). Se realizan 9 ejecuciones de la red neuronal artificial, tal y como viene siendo habitual, con los valores que figuran en la tabla 5.48 para cada ejecución.

El resultado final obtenido para la resistencia a compresión  $f_{c28}$  es el valor promedio de las 9 ejecuciones. Este valor de  $f_{c28}$  se representa en función de la temperatura ambiente, obteniendo una recta con un valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9972$  (figura 5.70a).

La elaboración de la red neuronal artificial RNA 14 nos permite estudiar la relación existente entre la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  y el asiento en Cono de Abrams ( $cm$ ). Se procede como en el caso anterior, es decir, la red

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,96022	0,92708	0,96097	0,92186	0,94554	0,94929	0,9405	0,92415	0,9467
MSE	0,0784	0,1406	0,0772	0,1502	0,1065	0,0993	0,116	0,1464	0,1039
RMSE	0,0784	0,1406	0,0772	0,1502	0,1065	0,0993	0,116	0,1464	0,1039
PSE	0,1945	0,3486	0,1914	0,3725	0,2639	0,2462	0,2877	0,363	0,2576
Tiempo	00:48	00:31	00:58	00:27	00:41	00:38	00:33	00:27	00:37
Nº iteraciones	54	35	66	31	47	42	38	31	42

**Tabla 5.48:** Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 13.

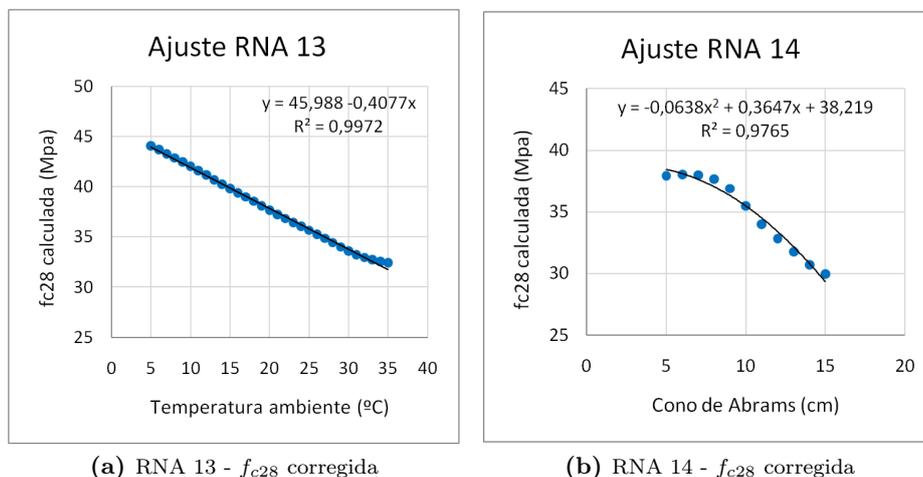
neuronal artificial aprende de la base de datos general con 43 variables de entrada (tabla 5.41). Posteriormente se crea una base de datos nueva en la que todas las variables de entrada se mantienen constantes (siendo las correspondientes al primer ensayo), salvo el asiento que varía de 5 a 15 *cm* con un intervalo de 1 *cm*. Se obtiene como resultado la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  para cada valor del asiento en Cono de Abrams (*cm*). Se realizan 9 ejecuciones de la red neuronal artificial obteniendo los valores de la tabla 5.49.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,95489	0,9485	0,93794	0,90203	0,91561	0,91841	0,93009	0,9204	0,95199
MSE	0,0894	0,101	0,1204	0,1877	0,1617	0,1565	0,1363	0,1528	0,094
RMSE	0,0894	0,101	0,1204	0,1877	0,1617	0,1565	0,1363	0,1528	0,094
PSE	0,2273	0,2568	0,3063	0,4773	0,4112	0,398	0,3467	0,3387	0,239
Tiempo	00:52	00:43	00:33	00:27	00:26	00:32	00:29	00:29	00:42
Nº iteraciones	56	46	36	29	28	35	32	31	45

**Tabla 5.49:** Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 14.

El resultado final obtenido para la resistencia a compresión  $f_{c28}$  es el valor promedio de las 9 ejecuciones y se representa en función del asiento en Cono de Abrams (figura 5.70b).

Con la elaboración de la red neuronal artificial RNA 15 pretendemos estudiar la relación existente entre la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  y la resistencia verdadera del cemento. La red neuronal artificial aprende de la base de datos general con las 42 variables de entrada de la tabla 5.41 (entre las que no está el tipo de cemento a propósito). En la base de datos que se crea nueva, se mantienen todas las variables de entrada idénticas (son las correspondientes al primer ensayo) salvo la resistencia verdadera del cemento que varía desde 47 a 63  $N/mm^2$  con un intervalo de 1  $N/mm^2$ . Se obtiene como resultado la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  para cada valor de la resistencia verdadera del cemento. Se realizan 9 ejecuciones para la red neuronal artificial con los valores obtenidos para cada ejecución que figuran en la tabla 5.50.



**Figura 5.70:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 13 y RNA 14.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,91655	0,92487	0,9325	0,91276	0,90506	0,94641	0,95769	0,91574	0,9067
MSE	0,1599	0,1446	0,1306	0,1668	0,1816	0,1048	0,0833	0,1614	0,1779
RMSE	0,1599	0,1446	0,1306	0,1668	0,1816	0,1048	0,0833	0,1614	0,1779
PSE	0,3965	0,3585	0,3239	0,4136	0,4501	0,2599	0,2066	0,4001	0,4411
Tiempo	00:28	00:35	00:33	00:29	00:26	00:55	00:54	00:27	00:28
Nº iteraciones	31	39	38	33	30	62	62	31	32

**Tabla 5.50:** Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 15.

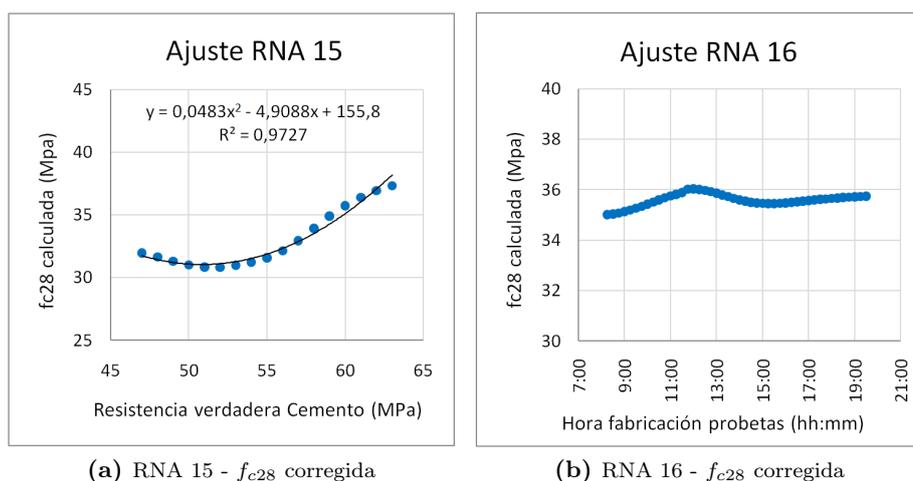
El resultado obtenido para la resistencia a compresión  $f_{c28}$  es el valor promedio de las 9 ejecuciones y se representa en función de la resistencia verdadera del cemento (figura 5.71a).

Por último, la elaboración de la red neuronal artificial RNA 16 nos permite estudiar la influencia de la hora de fabricación de la probeta en el valor de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ . La red neuronal artificial aprende de la base de datos general con las 43 variables de entrada de la tabla 5.41. En la base de datos que se crea nueva, se mantienen todas las variables de entrada idénticas (las correspondientes al primer ensayo) salvo la hora de fabricación de las probetas, que varía desde las 08:15 hasta las 19:30 (que se corresponde con el periodo normal de trabajo de la central) con un intervalo de 15 minutos. Se obtiene como resultado la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  para cada una de las horas. Se realizan 9 ejecuciones de la red neuronal artificial con los valores obtenidos para cada ejecución que figuran en la tabla 5.51.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,91085	0,95205	0,93618	0,94208	0,96413	0,97672	0,92042	0,93349	0,95428
MSE	0,1705	0,0945	0,1244	0,1126	0,0717	0,1418	0,1553	0,1286	0,0895
RMSE	0,1705	0,0945	0,1244	0,1126	0,0717	0,1418	0,1553	0,1286	0,0895
PSE	0,4336	0,2404	0,3163	0,2862	0,1824	0,3607	0,3948	0,327	0,2276
Tiempo	00:26	00:45	00:31	00:35	01:27	00:29	00:32	00:29	00:47
Nº iteraciones	29	48	33	38	93	31	31	31	50

**Tabla 5.51:** Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 16.

El resultado obtenido para la resistencia a compresión  $f_{c28}$  es el valor promedio de las 9 ejecuciones. Este valor  $f_{c28}$  se representa en la figura 5.71b en función de la hora de fabricación de las probetas en la que hemos discretizado la jornada laboral de la central.



**Figura 5.71:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 15 y RNA 16.

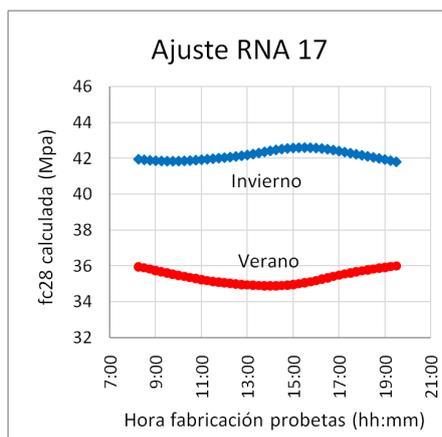
Como en la RNA 16 no se diferencia entre verano e invierno y en las variables de entrada se encuentran la temperatura ambiente y la temperatura del hormigón (constantes para todas las horas en la base de datos nueva), se decide elaborar una nueva red neuronal artificial, la RNA 17. Al elaborar esta nueva red neuronal artificial RNA 17 se persigue el objetivo de modelizar la influencia de la hora de fabricación de la probeta en la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  y esto, particularizado para invierno y verano. La base de datos de la que aprende la red neuronal consta de 42 variables en las que se ha añadido el mes de fabricación de la probeta (*MesFabPro*) y se han anulado las temperaturas ambiente y del hormigón. La base de datos nueva consta de dos grupos de datos

en base al ensayo 6145-1 en el que se han mantenido constantes todas las variables salvo el mes y la hora de fabricación de la probeta. Para el comportamiento en verano se mantiene en el mes de fabricación del ensayo el valor 7, correspondiente a julio, y se hace variar la hora de fabricación de la probeta desde las 8:15 hasta las 19:30 con intervalos de 15 minutos. Para el comportamiento en invierno se mantiene en el mes de fabricación del ensayo el valor 1, correspondiente a enero, y se varía la hora de fabricación de la probeta también desde las 8:15 hasta las 19:30. Así pues, obtendremos la predicción de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  en función de la hora de fabricación de la probeta para los periodos de invierno y verano por separado. Realizamos 9 ejecuciones, como es habitual, con los valores obtenidos para cada ejecución que figuran en la siguiente tabla 5.52.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,94018	0,93122	0,93595	0,92259	0,92584	0,95000	0,94216	0,93835	0,93676
MSE	0,1163	0,1329	0,1247	0,1490	0,1428	0,0977	0,1128	0,1200	0,1229
RMSE	0,1163	0,1329	0,1247	0,1490	0,1428	0,0977	0,1128	0,1200	0,1229
PSE	0,2883	0,3294	0,3092	0,3694	0,3541	0,2421	0,2797	0,2975	0,3047
Tiempo	00:33	00:34	00:42	00:29	00:31	00:53	00:37	00:37	00:37
Nº iteraciones	38	38	48	33	35	60	42	42	42

**Tabla 5.52:** Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 17.

El resultado obtenido para la resistencia a 28 días  $f_{c28}$  es el promedio de las 9 ejecuciones. Se representa este valor de  $f_{c28}$  en función de la hora de fabricación de las probetas para verano e invierno en la figura 5.72.

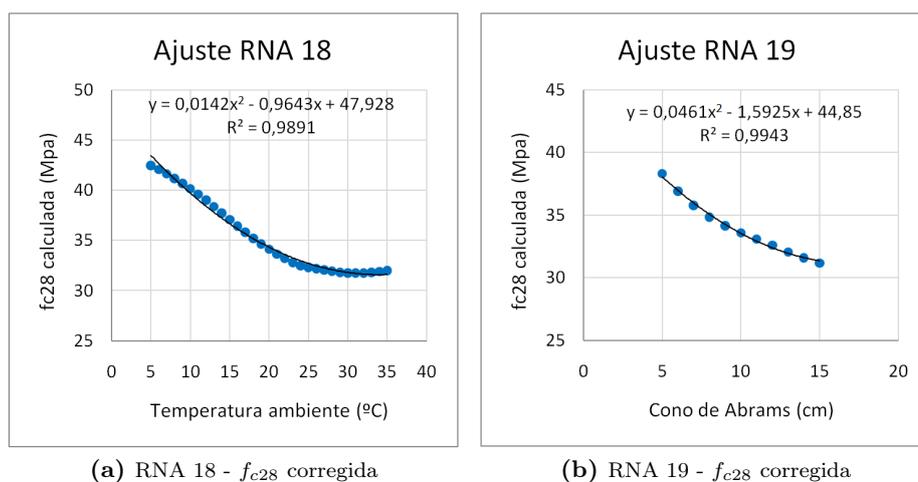


**Figura 5.72:** Ajuste de la red neuronal artificial RNA 17 -  $f_{c28}$  corregida.

Se nos plantea la necesidad de verificar si los modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de la temperatura ambiente y el

cono de Abrams (estudiados en las RNA 13 y RNA 14 respectivamente) se verifican para diferentes condiciones a la estudiada en las redes neuronales artificiales RNA 13 y RNA 14. Creamos la red neuronal RNA 18 en la que se procede como en la RNA 13, con la diferencia de que la base de datos nueva en la que todas las variables se mantienen constantes salvo la temperatura ambiente, se corresponde con el ensayo 7098-1. Se realizan 9 ejecuciones con los valores de  $R$  recogidos en la tabla 5.47, siendo el resultado final obtenido para la resistencia a compresión  $f_{c28}$  el valor promedio de las 9 ejecuciones. Este valor promedio  $f_{c28}$  se representa en función de la temperatura ambiente (figura 5.73a), obteniéndose un ajuste cuadrático con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,9891$ .

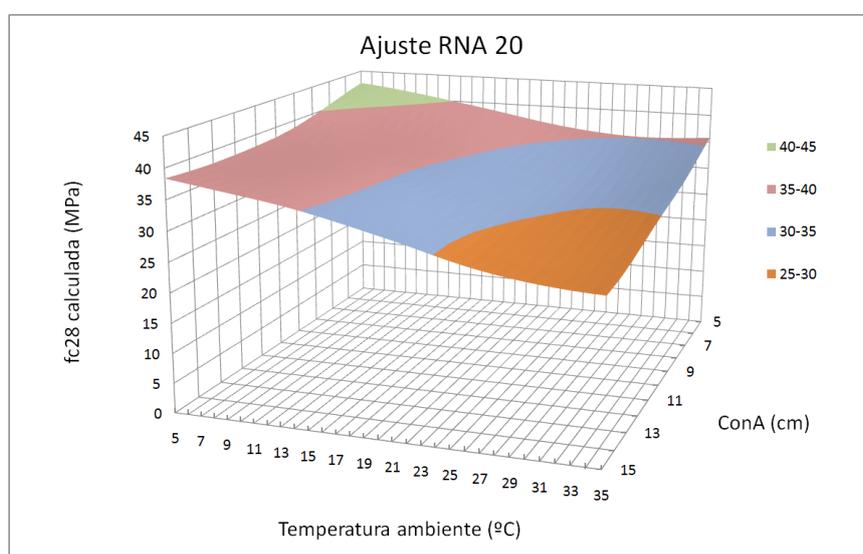
La siguiente red neuronal artificial RNA 19 elaborada nos permite estudiar la relación existente entre la resistencia a compresión a 28 días  $f_{c28}$  y el asiento en cono de Abrams ( $cm$ ). Se procede como en la RNA 14 a diferencia de que la base de datos nueva en la que todas las variables de entrada se mantienen constantes salvo el asiento, se corresponde con el ensayo 7098-1. Los valores de  $R$  de las 9 ejecuciones se encuentran en la tabla 5.47 y se representa en valor promedio  $f_{c28}$  en función del asiento en cono de Abrams ( $cm$ ) (figura 5.73b).



**Figura 5.73:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 18 y RNA 19.

Hasta el momento hemos elaborado redes neuronales artificiales para obtener modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de una sola variable (temperatura ambiente, cono de Abrams, resistencia verdadera del cemento o bien, hora de fabricación de la probeta). Se nos plantea la necesidad del conocimiento de modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de dos variables. Para lograr esto anterior elaboramos la red neuronal artificial RNA 20 con la que vamos a obtener el comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón corregida a 28 días  $f_{c28}$  en función de la temperatura ambiente (de 5 a 35 °C) y el asiento en cono de Abrams (de 5

a 15 cm). La red neuronal artificial aprende de la base de datos general con 42 variables de entrada, como en la RNA 18. La base de datos nueva mantiene todas las variables constantes (las correspondientes al ensayo 7098-1) salvo la temperatura ambiente y el cono de Abrams. Se hace variar la temperatura ambiente de 5 a 35 °C en intervalos de 1 °C y para cada temperatura ambiente, se varía el cono de Abrams de 5 a 15 cm con intervalos de 1 cm. Realizamos 9 ejecuciones con los valores de  $R$  recogidos en la tabla 5.47 y el resultado final obtenido para la resistencia a compresión a 28 días  $f_{c28}$  es el promedio de las 9 ejecuciones. Se representa  $f_{c28}$  en función de la temperatura ambiente (°C) y el asiento en cono de Abrams (cm), obteniéndose la superficie de respuesta de la figura 5.74.



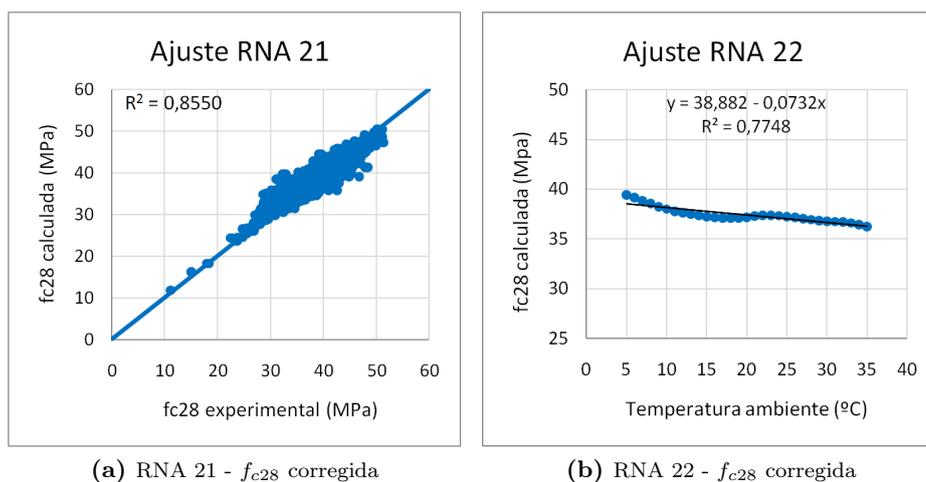
**Figura 5.74:** Superficie de respuesta de la red neuronal RNA 20.

Dado que en las redes neuronales artificiales anteriores se dispone de un número importante de variables de entrada que conforman las neuronas de entrada y sabemos que ciertas variables están relacionadas entre sí, se procede a elaborar una serie de redes neuronales con un número mínimo de variables de entrada elegidas convenientemente (tabla 5.42). En cuanto al tipo de cemento y la dosificación del mismo, tendremos las siguientes variables: Tipo, Resistencia Verdadera del cemento, y porcentaje de cemento  $tb0$ . Se mantienen también las variables asiento en cono de Abrams y tiempo al que se realiza el cono de Abrams y se confeccionan las probetas. En cuanto a las temperaturas, en todas las redes neuronales se mantienen tanto la temperatura ambiente como la temperatura del hormigón como variables de entrada, salvo en las redes neuronales RNA 22 y RNA 26 dado que en estas se pretende estudiar la influencia de la temperatura ambiente sobre la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$ . Las variables tipo de aditivo y porcentaje de aditivo real en la dosificación también se han mantenido. Las últimas tres variables tenidas en cuenta son las fibras, el tamaño máximo del árido  $D_{max}$  y el

módulo granulométrico de la mezcla. Con el valor del módulo granulométrico de la mezcla se tiene en cuenta la dosificación en cuanto a las diferentes fracciones granulométricas de los áridos.

Así pues, la red neuronal artificial RNA 21 se ha elaborado con 12 variables de entrada, la base de datos consta de 4824 ensayos y la variable de salida es la resistencia a compresión corregida a 28 días  $f_{c28}$  (tabla 5.45). El coeficiente de determinación obtenido en el ajuste entre los valores de la resistencia  $f_{c28}$  calculada en la simulación y los resultados experimentales toma un valor de  $R^2 = 0,8550$  (figura 5.75a).

En la red neuronal artificial RNA 22, al igual que en la RNA 13 y RNA 18, se estudia la relación existente entre la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  y la temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) existente a la realización de las probetas y el ensayo en cono de Abrams. El rango de temperatura ambiente es el que va de 5 a 35  $^{\circ}C$  con incrementos de 1  $^{\circ}C$  y se toma para confeccionar la base de datos nueva el ensayo 6710-1.

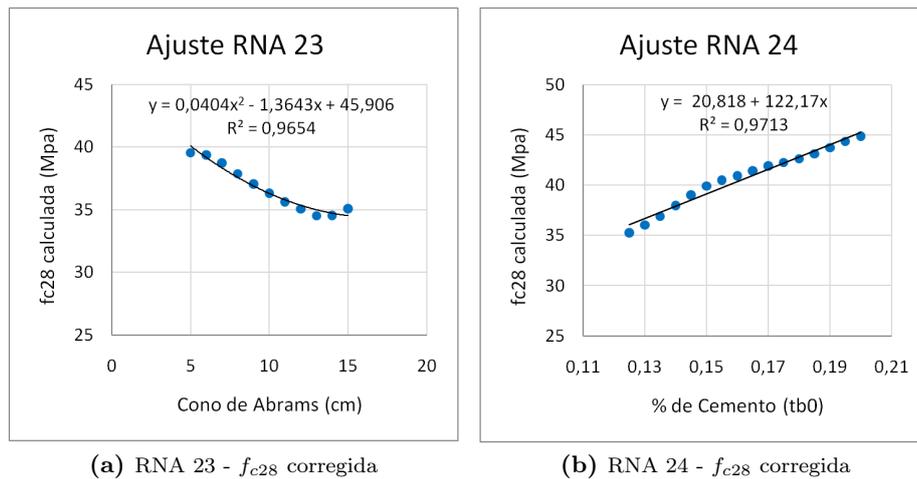


**Figura 5.75:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 21 y RNA 22.

Para estudiar la relación existente entre la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  y el asiento en cono de Abrams ( $cm$ ) se elabora la red neuronal RNA 23. Esta red es similar a la RNA 14 y la RNA 19 pero con 12 variables de entrada y se toma para confeccionar la base de datos nueva el ensayo 6710-1 en el que se varía el asiento en cono de Abrams de 5 a 15  $cm$  con un intervalo de 1  $cm$ .

En la siguiente red neuronal artificial elaborada RNA 24, se pretende estudiar el comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  al variar la cantidad de cemento en la mezcla y esto para todas las demás variables fijas. Se crea una base de datos nueva en base al ensayo 6710-1 en la que se mantienen

11 de las 12 variables de entrada fijas y se varía el porcentaje de cemento con respecto al peso de los componentes sólidos  $tb0$  de 0,125 (12,5 %) a 0,200 (20 %) con intervalos de 0,005 (0,5 %).



**Figura 5.76:** Ajuste de las redes neuronales artificiales RNA 23 y RNA 24.

En la elaboración de las dos redes neuronales artificiales siguientes, la RNA 25 y RNA 26 se tiene como objetivo obtener superficies de respuesta del comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón a 28 días  $f_{c28}$  en función de dos variables. En la RNA 25 estudiamos la variación de  $f_{c28}$  con la cantidad de cemento (porcentaje  $tb0$ ) en la dosificación y el cono de Abrams de la mezcla y en la RNA 26 obtenemos la variación de  $f_{c28}$  con la temperatura ambiente y la cantidad de cemento (porcentaje  $tb0$ ) en la dosificación.

La red neuronal artificial RNA 25 se ha elaborado con 12 variables de entrada (tabla 5.42), la base de datos consta de 4824 ensayos y la variable de salida es la resistencia a compresión del hormigón corregida a 28 días  $f_{c28}$  (tabla 5.45). La base de datos nueva mantiene 10 de las 12 variables constantes (las correspondientes al ensayo 6710-1). Se hace variar el cono de Abrams de 5 a 15  $cm$  con intervalos de 1  $cm$  y para cada cono se varía el porcentaje de cemento ( $tb0$ ) del 12,5 % al 20 % con intervalos de 0,5 %. La superficie de respuesta obtenida se presenta en la figura 5.77.

En la elaboración de la red neuronal artificial RNA 26 se han utilizado 11 variables de entrada (tabla 5.42), la base de datos consta de 4824 ensayos y la variable de salida es también la resistencia a compresión del hormigón corregida a 28 días  $f_{c28}$ . En esta se ha suprimido la temperatura del hormigón como variable de entrada, dado que se pretende estudiar el comportamiento de  $f_{c28}$  en función de la variación de la temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) y la cantidad de cemento en la dosificación ( $tb0$ ). Se hace variar la temperatura ambiente de 5 a 35  $^{\circ}C$  y para

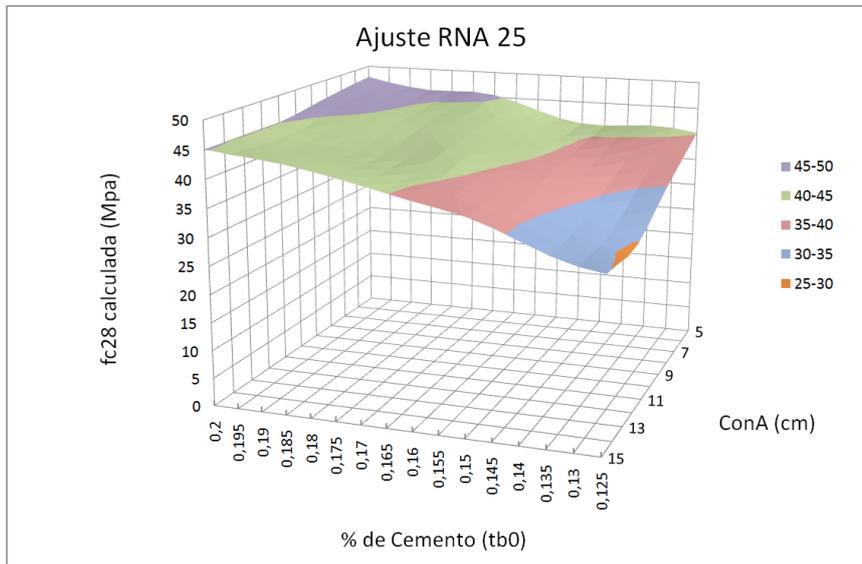


Figura 5.77: Superficie de respuesta de la red neuronal artificial RNA 25.

cada valor de temperatura ambiente se varía el porcentaje de cemento ( $tb_0$ ) del 12,5 % al 20 % con incrementos del 0,5 %. La superficie de respuesta obtenida se representa en la figura (5.78).

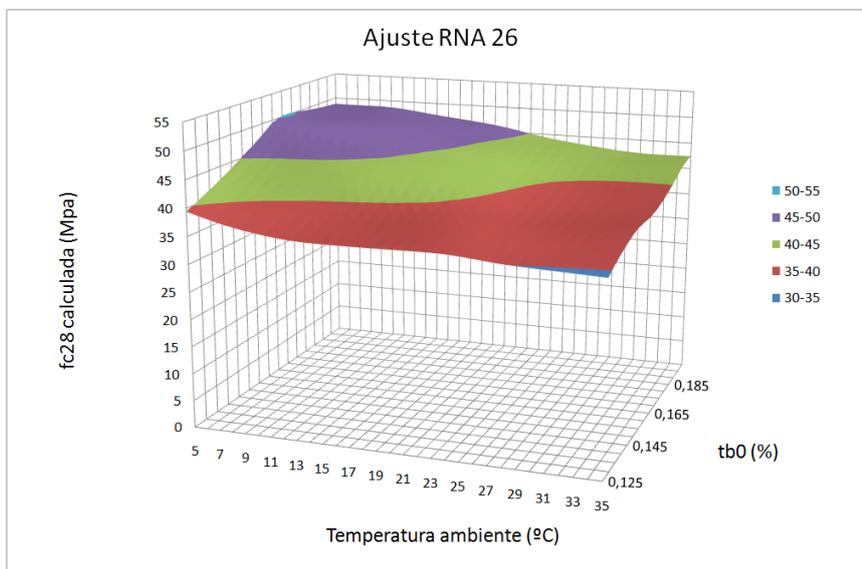


Figura 5.78: Superficie de respuesta de la red neuronal artificial RNA 26.

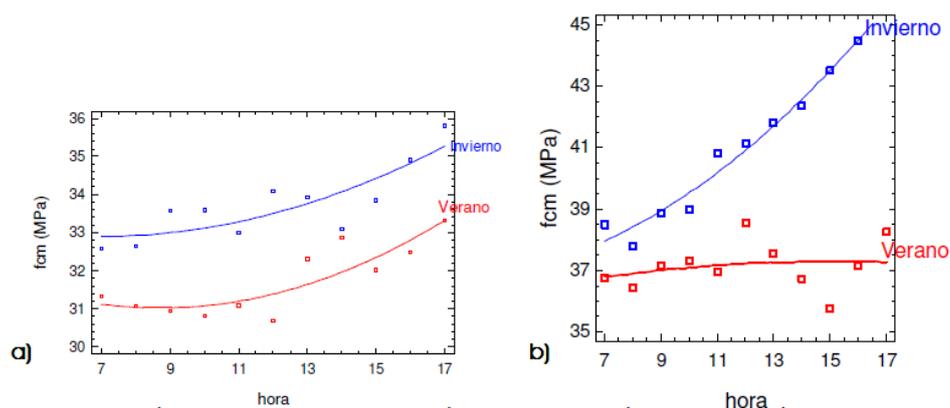
En los modelos de comportamiento obtenidos con la aplicación de las RNA, concretamente de las gráficas de las figuras 5.70a, 5.73a y 5.75b, se deduce una disminución de la resistencia a compresión del hormigón tal y como aumenta la temperatura ambiente a la que se realiza el ensayo, resultados que están de acuerdo con numerosos autores como Comella *y col.* (2002), Ortiz (2005), Gómez y Vidal (2006), García Toledano (2011) y Cánoves (2012) entre otros. Dado que las RNA interpolan, el rango estudiado de temperatura ambiente es de  $5^{\circ}C$  a  $35^{\circ}C$ .

En el modelo de comportamiento de la resistencia a compresión en función de la consistencia obtenido con la aplicación de RNA, se deduce que la resistencia a compresión del hormigón se mantiene constante entre 5 y 8 *cm* de asiento en cono de Abrams y luego decrece linealmente tal y como aumenta el cono hasta 15 *cm*, o bien decrece linealmente tal y como aumenta el cono entre 5 y 15 *cm*. Las gráficas de la resistencia a compresión en función de la consistencia determinada mediante el cono de Abrams, se encuentran en las figuras 5.70b y 5.73b y 5.76a. Cánoves (2012) en su tesis doctoral deduce que la consistencia es un parámetro significativo en la resistencia del hormigón, obteniendo que la consistencia de 6 a 7 *cm* es la que produce una mayor resistencia en los hormigones estudiados y que a medida que aumenta la consistencia se produce una disminución de la resistencia. Este resultado está en concordancia con los de esta tesis, pero contradice las conclusiones de la tesis de Ortiz (2005), en la cual afirma que una menor consistencia produce una menor resistencia a compresión (Cánoves 2012)

En lo que se refiere a la dependencia de la resistencia a la compresión con la resistencia verdadera del cemento, la bibliografía nos indica un aumento lineal de la resistencia del hormigón tal y como aumenta la resistencia del cemento (modelo desarrollado en el LCPC y representado en la ecuación 2.64). En nuestro modelo, y para las variables fijas del ensayo utilizado para la elaboración del mismo, la resistencia del hormigón se mantiene constante para resistencias del cemento entre 47 y 55 *MPa*, para después crecer linealmente desde 55 hasta 63 *MPa*. Es importante no olvidar que la resistencia verdadera del cemento es una variable estimada en nuestro estudio.

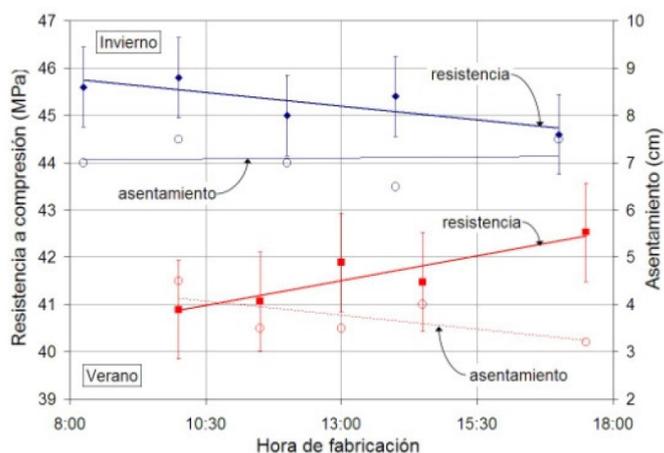
La dependencia de la resistencia a compresión del hormigón en función de la hora de fabricación de la probeta desde las 08:15 hasta las 19:30 para nuestro modelo, se observa en las gráficas de las figuras 5.71b y 5.72 particularizando en esta última para invierno y verano. Si no se discretiza en periodo estival e invernal, la resistencia a compresión se mantiene en un rango de variación de 1 *MPa*, tal y como se observa en la figura 5.71b. Sin embargo, y tal y como se observa en la figura 5.72, si se discretiza en periodo estival o invernal, entonces tenemos un rango de variación del 5% de la resistencia en verano y muy poca variación en invierno. En invierno las resistencias máximas a 28 días se consiguen en probetas fabricadas entre las 13:30 y las 17:00 horas, sin embargo en verano esto se consigue en probetas fabricadas a primera hora de la mañana y a última hora de la jornada laboral. Es entre las 13:00 y 15:00 horas donde se producen las resistencias menores, y evidentemente, este período coincide con las temperaturas ambiente máximas.

Cánoves (2012) en su tesis doctoral obtuvo valores superiores de las resistencias a 28 días en las probetas fabricadas en invierno entre las 16:00 y las 17:00, resultados en sintonía a los obtenidos por Gómez y Vidal (2006) para hormigones de resistencia 20 y 30 MPa, no así para los de 25 MPa, en los que la menor resistencia se produce en el intervalo de 13:30 a 16:30 horas. En verano, sin embargo, los resultados de Cánoves (2012) dependen de la resistencia del hormigón como se aprecia en la figura 5.79



**Figura 5.79:** Resistencias a compresión en función de la hora de realización de la probeta para invierno y verano: a)HA-25 y b)HA-30 (Cánoves 2012).

Los resultados obtenidos por Ortiz (2005) en su tesis doctoral, que se pueden observar en la figura 5.80, contradicen los anteriores de los diversos autores y también los obtenidos en la presente tesis.



**Figura 5.80:** Resistencia y asentamiento en función de la hora de realización de la probeta para invierno y verano (Ortiz 2005).

En cuanto a la dependencia de la resistencia a compresión del hormigón en función de la dosificación de cemento en la mezcla, esta se puede apreciar en la gráfica de la figura 5.76b, siendo una dependencia lineal en el intervalo de 12,5 % a 20 % y aumentando la resistencia tal y como aumenta la cantidad de cemento. Existen en la bibliografía gran cantidad de fórmulas que relacionan la resistencia a compresión del hormigón con la relación cemento/agua y con la cantidad de cemento, bien en peso o bien en volumen. El tema se encuentra ampliamente desarrollado en el apartado 2.7.

En grandes bases de datos con muestras de hormigones con diferencias en cuanto a dosificaciones, tipos de cemento empleados, consistencias, temperaturas ambiente, etc, las ecuaciones que relacionan linealmente la resistencia con la cantidad de cemento tienen ajustes bajos con coeficientes de determinación  $R^2$  de 3,97 o 3,39 para el estudio de Cánoves (2012), tal y como se puede observar en las tablas 5.6 y 5.7. En nuestro estudio mediante estadística clásica, estos valores aumentan en función de si la resistencia es a 28 o 7 días (valores de  $R^2$  de 14,13 y 24,44 respectivamente como se aprecia en las tablas 5.9 y 5.11). Si la base de datos está realizada con muestras con el mismo cemento, como es el caso de la base de datos reducida de nuestro estudio, entonces los valores de  $R^2$  aumentan hasta el 65,18 % y el 75,33 % respectivamente para las resistencias a 28 y 7 días. Por su parte Namyong *y col.* (2004) en el estudio realizado de su base de datos, obtienen un valor de  $R^2 = 39,5\%$  para la regresión lineal de la resistencia a compresión a 28 días si la variable explicativa es la cantidad de cemento.

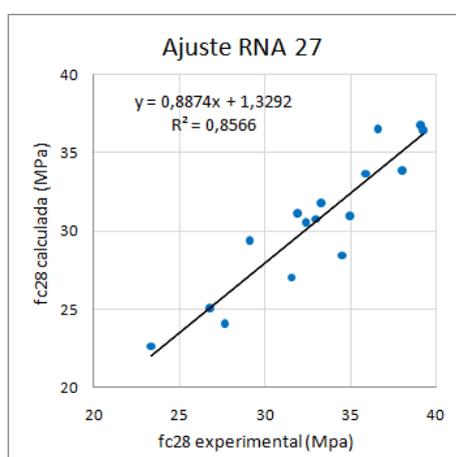
En el apartado 5.4.2 y 5.4.5 se ha estudiado la relación existente entre la resistencia a compresión del hormigón y la relación cemento/agua ( $c/a$ ). Dada la dificultad de conocer exactamente la relación  $c/a$  en los procesos industriales de producción de hormigón, tal y como se ha explicado a lo largo de este trabajo de investigación, vamos a aplicar redes neuronales artificiales para la predicción de la resistencia a compresión del hormigón sin tener en cuenta la relación  $c/a$  y vamos a comparar los resultados obtenidos con los modelos predictivos que se basan en dicha relación.

La red neuronal elaborada RNA 27 realiza el aprendizaje de la base de datos general, que consta de 4824 ensayos como ya hemos dicho en reiteradas ocasiones. Se han tomado 42 variables de entrada (similar a la RNA 6 con la diferencia de que la hora de fabricación de la probeta *HoraFabPro*, no se ha tenido en consideración) y la variable de salida es la resistencia a compresión corregida a 28 días  $f_{c28}$ . Una vez realizadas las 9 ejecuciones de la red neuronal con los parámetros que figuran en la tabla 5.53, se obtienen los valores calculados con la RNA 27 de la resistencia a compresión  $f_{c28}$  para los 16 casos de hormigones de la base de datos reducida. Estos valores calculados se comparan con los resultados experimentales obtenidos de las correspondientes roturas (tomamos como resultado el valor medio de las dos probetas ensayadas por cada hormigón). En la figura 5.81 se presenta el ajuste a la recta de regresión con un coeficiente de determinación de valor  $R^2 = 85,66\%$ . Así pues, el modelo obtenido es capaz de explicar el 85,66 % de la variabilidad de las muestras de la base de datos reducida, valor muy superior a

los obtenidos por otros autores en estudios de modelización de la resistencia a compresión en función de la relación  $c/a$ , y también superiores a nuestro modelo presentado en los apartados 5.4.2 y 5.4.5.

Nº Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valor de R	0,93251	0,94789	0,94761	0,91898	0,93290	0,93827	0,93247	0,93680	0,93050
Tiempo	00:31	00:54	00:57	00:27	00:35	00:41	00:29	00:32	00:31
Nº iteraciones	34	61	64	31	39	47	33	36	35

**Tabla 5.53:** Parámetros obtenidos para las distintas ejecuciones de la RNA 27.



**Figura 5.81:** Correlación entre valores calculados en la RNA 27 y experimentales para la  $f_{c28}$  de la base de datos reducida.

En el apartado 5.4.2 se presenta el trabajo de Cánoves (2012), en el que se analiza la resistencia a compresión a 28 días de un número elevado de lotes de hormigones, obteniendo coeficientes de determinación bajos cuando la variable explicativa es la relación  $a/c$ , tal y como se observa en las tablas 5.6 y 5.7. Los valores obtenidos son  $R^2 = 40,92\%$  y  $30,42\%$  para hormigones HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa respectivamente, estando estos hormigones fabricados con cemento tipo I. Vilanova (2009) obtiene un valor de  $R^2 = 54\%$  si la variable explicativa es la relación  $c/a$ , en este caso para una base de datos de resultados de hormigones autocompactables. Namyong *y col.* (2004) obtienen un valor de  $R^2 = 47\%$  para los hormigones de su base de datos, también con la relación  $c/a$  como variable explicativa.

En nuestra base de datos reducida, obtenemos para la ecuación de regresión de la resistencia a compresión a 28 días  $f_{c28}$  en función de la relación  $c/a$  un valor  $R^2 = 81,23\%$ . Si las variables explicativas son la relación  $c/a$  y la cantidad de cemento  $tb0$ , entonces  $R^2 = 81,34\%$  y si las variables explicativas son el asiento en Cono de Abrams  $ConA$  y la cantidad de cemento  $tb0$ , entonces  $R^2 = 81,26\%$ . Estos valores son inferiores al obtenido mediante redes neuronales artificiales.

En cuanto a los coeficientes de determinación  $R^2$ , los valores obtenidos por diferentes autores consultados en la predicción de la resistencia a compresión mediante RNA, son menores o en todo caso similares a los obtenidos en nuestro estudio:

- García *y col.* (2015) obtuvieron coeficientes de determinación  $R^2$  de 0,80 y 0,81 y Acuña *y col.* (2014) obtuvieron valores de  $R^2$  de 0,87 y 0,88. Estos valores son superiores a los obtenidos por Yeh (1998) y similares a los obtenidos por Prasa *y col.* (2009), que obtuvieron coeficientes  $R^2$  máximos de 0,92.
- Özturan *y col.* (2008) obtuvieron valores del coeficiente de determinación  $R^2$  entre 0,423 y 0,919, pero incluyendo el valor de la resistencia a 7 días como variable de entrada para predecir la resistencia a 28 días.

Resistencia experimental	Redes neuronales	Abrams	De la Peña	Bolomey
31,90	31,14	31,95	26,07	28,86
33,30	31,78	32,94	26,82	29,69
32,95	30,75	32,44	26,44	29,27
34,95	30,99	32,94	26,82	29,69
39,10	36,77	34,32	27,84	30,82
29,10	29,37	26,18	21,76	24,08
27,65	24,11	20,86	17,93	19,85
39,25	36,43	34,40	27,96	30,95
34,50	28,45	27,41	26,67	25,09
26,75	25,11	23,64	19,93	22,07
31,55	27,02	26,59	22,04	24,40
23,35	22,64	18,69	16,38	18,13
32,40	30,54	26,79	22,18	24,55
35,90	33,67	31,71	25,84	28,61
38,00	33,85	35,11	28,53	31,59
36,60	36,51	34,76	28,20	31,22

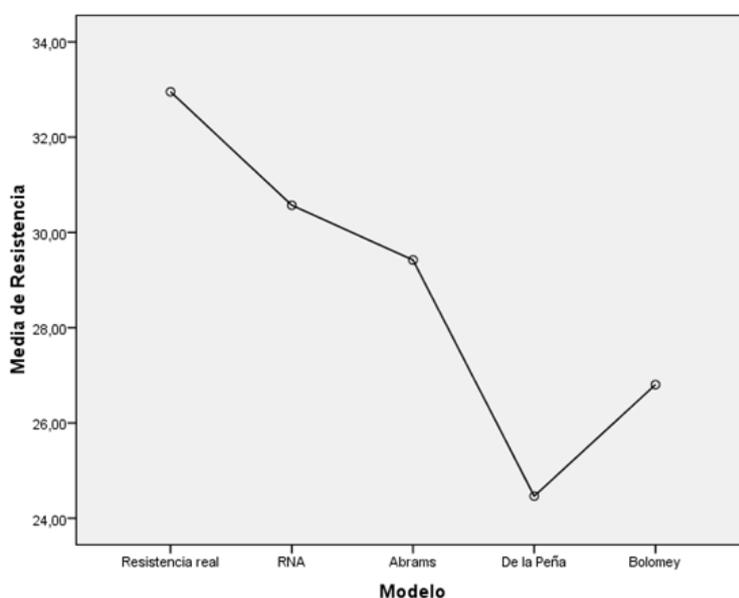
**Tabla 5.54:** Valores de resistencia experimental y según diferentes modelos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la capacidad de predicción de la resistencia a compresión del hormigón mediante la RNA sin tener en cuenta la relación cemento/agua ( $c/a$ ) comparada con otros modelos basados en dicha relación y con las resistencias experimentales de la base de datos reducida. Los modelos tenidos en cuenta son los de Abrams (Popovics y Popovics 1995), Bolomey (1935) y De la Peña (1955):

- El modelo de Abrams mediante la ecuación 2.55 con  $A \simeq 147$  y  $B \simeq 0,0779$   $MPa$  (Popovics y Popovics 1995).
- El modelo de Bolomey mediante la ecuación 2.53 con  $K = 24,6$  tal y como propone de Larrard (2000) con errores medios de 1,4  $MPa$ .

- El modelo de De la Peña mediante la ecuación 2.60 con  $K = 0,0045$  como se puede consultar en Delibes (1993).

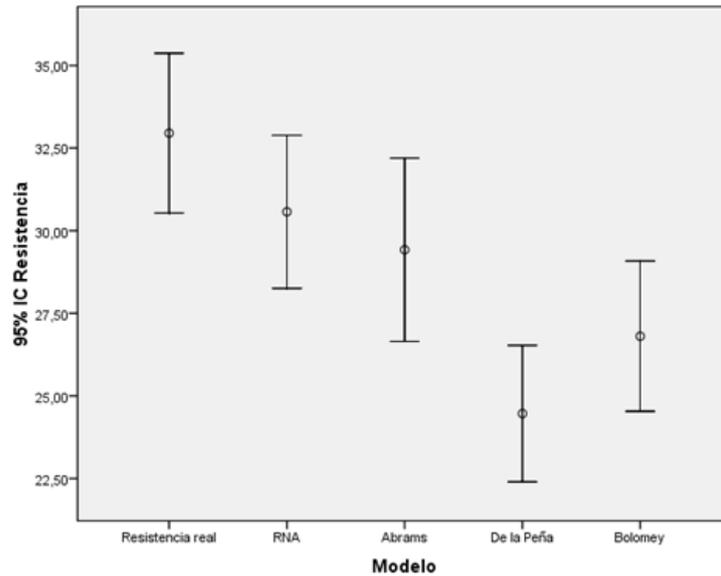
Los valores de la resistencia calculados mediante los diferentes modelos clásicos, los predichos con la red neuronal artificial y los experimentales se presentan en la tabla 5.54. En la gráfica de la figura 5.82, se puede observar que todas las predicciones se encuentran por debajo de la realidad, lo cual implica que se encuentran en el lado de la seguridad. La media proporcionada por las redes neuronales es la que más se acerca a la media real, y la más alejada es la predicción de De la Peña.



**Figura 5.82:** Valores medios de las resistencias experimentales y calculadas con diferentes modelos.

En el gráfico de la figura 5.83, donde se dibuja la media y su intervalo de confianza para el 95%, se comprueba que las predicciones de De la Peña y de Bolomey se encuentran muy por debajo de las resistencias reales. Sin embargo, tanto la predicción de redes neuronales como la de Abrams se acercan a la media real, si bien la media de la predicción de redes neuronales artificiales se acerca más a la real que la de Abrams.

Realizamos la tabla de ANOVA que nos ofrece el estadístico F con su nivel de significación (tabla 5.55). Como el nivel de significación (Sig.) inter-grupos es menor que 0,05 rechazamos la hipótesis de igualdad de medias, es decir, existen diferencias significativas entre las medias. Una vez determinado que existen diferencias entre las medias, las comparaciones múltiples permiten determinar qué medias difieren.



**Figura 5.83:** Intervalos de confianza de la resistencias experimentales y calculadas con diferentes modelos.

ANOVA					
Resistencia					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	696,714	4	174,179	8,726	,000
Intra-grupos	1497,013	75	19,960		
Total	2193,727	79			

**Tabla 5.55:** Anova para la variable resistencia.

Seguidamente procedemos a realizar la prueba de Levene sobre la homogeneidad de las varianzas. Puesto que el nivel crítico o significación es superior a 0,05 (Sig. = 0,621) como se ve en la tabla 5.56, entonces se asumen varianzas iguales y aplicamos la prueba DMS (diferencia menos significativa).

Aplicando la prueba de comparaciones múltiples DMS, obtenemos que no hay diferencias significativas entre la media de las resistencias experimentales y las predichas mediante redes neuronales artificiales y sí que hay diferencias significativas entre la media de las resistencias experimentales y las obtenidas mediante los modelos de Abrams, De la Peña y Bolomey, tal y como se aprecia en la tabla 5.57, ya que se considera que las medias difieren significativamente para valores de Sig. menores a 0,05.

**Prueba de homogeneidad de varianzas**

Resistencia

Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
,662	4	75	,621

**Tabla 5.56:** Estadístico de Levene para la variable resistencia.

**Comparaciones múltiples**

Resistencia

DMS

(I) Modelo	(J) Modelo	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Real	RNA	2,38229	1,57956	,136	-,7644	5,5289
	Abrams	3,53213*	1,57956	,028	,3855	6,6788
	De la Peña	8,48931*	1,57956	,000	5,3427	11,6360
	Bolomey	6,14844*	1,57956	,000	3,0018	9,2951
RNA	Real	-2,38229	1,57956	,136	-5,5289	,7644
	Abrams	1,14984	1,57956	,469	-1,9968	4,2965
	De la Peña	6,10703*	1,57956	,000	2,9604	9,2537
	Bolomey	3,76615*	1,57956	,020	,6195	6,9128
Abrams	Real	-3,53213*	1,57956	,028	-6,6788	-,3855
	RNA	-1,14984	1,57956	,469	-4,2965	1,9968
	De la Peña	4,95719*	1,57956	,002	1,8105	8,1038
	Bolomey	2,61631	1,57956	,102	-,5303	5,7630
De la Peña	Real	-8,48931*	1,57956	,000	-11,6360	-5,3427
	RNA	-6,10703*	1,57956	,000	-9,2537	-2,9604
	Abrams	-4,95719*	1,57956	,002	-8,1038	-1,8105
	Bolomey	-2,34088	1,57956	,143	-5,4875	,8058
Bolomey	Real	-6,14844*	1,57956	,000	-9,2951	-3,0018
	RNA	-3,76615*	1,57956	,020	-6,9128	-,6195
	Abrams	-2,61631	1,57956	,102	-5,7630	,5303
	De la Peña	2,34088	1,57956	,143	-,8058	5,4875

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

**Tabla 5.57:** Comparación múltiple DMS para la resistencia a compresión.

### 5.6.2 Resumen de la aplicación de las redes neuronales artificiales

En el presente trabajo de investigación se han elaborado redes neuronales artificiales con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. Las neuronas de la capa de entrada son variables para cada red neuronal (entre 11 y 44) y la capa de salida tiene una única neurona que se corresponde con el resultado de la predicción realizada por la red neuronal. De las 27 redes neuronales elaboradas, esta salida se corresponde con la predicción de la resistencia a compresión a 28 días  $f_{c28}$  en 22 redes, con la predicción de la resistencia a compresión a 7 días  $f_{c7}$  en 3 redes y con la predicción del asiento en cono de Abrams en las 2 redes restantes.

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

Para la elaboración de las diferentes redes neuronales se ha creado un código que se ha usado en el entorno “Neural Network Toolbox” de Matlab R2013b. Las características de cada red se pueden consultar en el apartado correspondiente, realizándose para cada una de las mismas 9 ejecuciones con un número de iteraciones bajo. Los valores de salida calculados por cada red se corresponden con los valores promedio de las 9 ejecuciones correspondientes.

Los valores del coeficiente de determinación  $R^2$  obtenidos para las resistencias a compresión calculadas mediante las redes neuronales artificiales y los resultados experimentales, nos muestran un buen comportamiento de estimación para las diferentes redes, similares o superiores a los de los diferentes autores consultados, como se aprecia en la tabla 5.58 sobre todo si se cuenta con un número de variables de entrada significativo ( $R^2$  de 92,58 % a 94,68 % para las redes desde 41 hasta 44 variables de entrada). Si las variables de entrada se reducen a 18, la estimación empeora bajando  $R^2$  hasta un 88,34 %. Con 12 variables de entrada el valor de  $R^2$  desciende hasta el 85,50 %.

Si la variable de salida es el asiento en cono de Abrams en lugar de la resistencia a compresión del hormigón, el coeficiente  $R^2$  desciende a valores del 86,28 % y 85,59 % tal y como se puede observar en la tabla 5.58, en las dos redes neuronales que predicen el cono en función de ciertas variables de entrada.

Si se predice la resistencia a compresión a 28 días de los ensayos de la base reducida mediante la red neuronal artificial RNA 27, que ha realizado el aprendizaje de los 4824 ensayos de la base de datos general, los resultados obtenidos mejoran los de los modelos predictivos que tienen en cuenta la relación  $c/a$ , tanto los de diversos autores consultados, como los propios.

En el presente trabajo de investigación se han utilizado redes neuronales artificiales para obtener modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de diferentes variables: temperatura ambiente, asiento en cono

RNA	Nº Variables de entrada	Variable de salida	$R^2$ (%)
RNA 1	43	$f_{c28}$	94,08
RNA 2	44	$f_{c28}$	92,84
RNA 3	43	$f_{c7}$	93,72
RNA 4	44	$f_{c7}$	92,58
RNA 5	43	$f_{c7}$	94,09
RNA 6	43	$f_{c28}$	92,91
RNA 7	43	<i>ConA</i>	86,28
RNA 8	18	$f_{c28}$	88,34
RNA 9	41	$f_{c7}$	94,18
RNA 10	41	$f_{c28}$	93,29
RNA 11	41	<i>ConA</i>	85,59
RNA 12	42	$f_{c28}$	94,68
RNA 21	12	$f_{c28}$	85,50

**Tabla 5.58:** Valores del coeficiente  $R^2$  para distintas redes neuronales artificiales.

de Abrams, resistencia verdadera del cemento, hora de fabricación de las probetas y cantidad de cemento en la mezcla. En líneas generales se obtienen las siguientes conclusiones:

- La resistencia a compresión del hormigón desciende linealmente tal y como aumenta la temperatura ambiente a la que se realiza la probeta desde 5 a 35°C.
- Dependiendo de la red neuronal elaborada, la resistencia a compresión del hormigón se mantiene constante para asientos del cono de Abrams entre 5 y 8 cm y decrece linealmente para conos superiores hasta 15 cm o bien, decrece linealmente para conos entre 5 y 15 cm.
- Para resistencias verdaderas del cemento entre 47 y 55 MPa, la resistencia a compresión se mantiene constante. A partir de resistencias verdaderas del cemento de 55 MPa y hasta 63 MPa, la resistencia a compresión del hormigón crece de manera lineal.
- Si no discretizamos en periodo estival o invernal, la resistencia a compresión se mantiene prácticamente independiente de la hora de fabricación de la probeta, con variaciones inferiores al 2,8%. Si se discretiza en periodo estival o invernal las variaciones son superiores a la anterior, pero inferiores al 5%. Las probetas realizadas entre las 13:30 y las 17:00 horas en invierno y a primera hora de la mañana y a última de la jornada laboral en verano son

las que nos dan mejores resultados, en cuanto a resistencia a compresión a 28 días se refiere.

- La resistencia a compresión del hormigón aumenta de manera lineal al aumentar la dosificación de cemento en la mezcla, desde porcentajes de cemento del 12,5 % al 20 % del peso de los componentes sólidos.

También se han elaborado en la presente tesis doctoral redes neuronales artificiales para obtener modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de dos variables: temperatura ambiente y asentamiento en cono de Abrams, o bien porcentaje de cemento en la mezcla y asentamiento en cono de Abrams. En ambos casos se han obtenido las correspondientes superficies de respuesta.



## Capítulo 6

# CONCLUSIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se resumen las conclusiones principales, tanto generales como específicas, de la presente tesis doctoral, así como futuras líneas de investigación que se estiman interesantes en esta área de conocimiento.

### 6.1 CONCLUSIONES GENERALES

Frente a la dificultad de conocer exactamente la relación cemento/agua en los procesos de producción industrial de hormigones preparados de planta, es posible predecir la resistencia a compresión del hormigón sin el conocimiento de dicha relación. El asiento en cono de Abrams y la cantidad de cemento pueden suplir el desconocimiento de la relación agua/cemento en cuanto a la predicción de la resistencia a compresión del hormigón.

Los modelos estadísticos aplicados a la predicción de la resistencia a compresión del hormigón no han sido capaces de explicar variabilidades aceptables. Las redes neuronales artificiales, sin embargo, han resultado una poderosa herramienta en el campo de la predicción de la resistencia y consistencia del hormigón. Mediante la elaboración de redes neuronales artificiales se pueden diseñar hormigones a la carta fabricados en condiciones industriales, sobre la base de un enfoque prestacional, y esto sin conocer la relación cemento/agua exacta.

La temperatura ambiente, el asentamiento en cono de Abrams y la cantidad de cemento en la mezcla son los factores más influyentes en la resistencia de los hormigones preparados.

## 6.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

El análisis del sector permite concluir:

- La mayor parte de los hormigones que se emplean en construcción se caracterizan por tener resistencias a compresión entre 25 y 30  $N/mm^2$  (80% de los fabricados en España en 2013) y consistencias blanda y fluida (92% del producido en España en 2013). En aproximadamente el 60% de los casos se producen en plantas de hormigón preparado.
- El contenido medio de cemento por metro cúbico de hormigón producido en Europa en 2013 es de 285  $kg$ , siendo mayoritariamente cemento tipo II de clase resistente 42,5. En cuanto al consumo de áridos en España, el 92% son arenas y gravas naturales y trituradas.

La revisión del estado del conocimiento, permite concluir que:

- Los materiales constituyentes del hormigón y su dosificación afectan a la trabajabilidad y a las propiedades mecánicas del hormigón, siendo la variable relación cemento/agua la más importante para una repartición granular dada. La inclusión de fibras en el hormigón a las dosis habituales, no afecta significativamente a la resistencia a compresión.
- Un gran número de métodos de dosificación proponen curvas granulométricas de referencia para determinar la proporción idónea de las fracciones granulométricas de los áridos y en algunos casos estas curvas incluyen el contenido de cemento en el hormigón. Según algunos autores, es suficiente con que el módulo granulométrico de la mezcla sea el mismo que el de la curva teórica adoptada.
- En la producción industrial de hormigón preparado de planta no se suele conocer la relación agua/cemento exacta y se suele controlar la consistencia mediante un amperímetro o watímetro instalado en la mezcladora. Además, es posible medir la trabajabilidad del hormigón en el camión hormigonera mediante la medida de la presión en el reductor de la cuba a una cierta velocidad de rotación de la misma.
- La temperatura influye de una manera importante en la resistencia a compresión del hormigón y también en la consistencia. Diferentes factores afectan a la evolución de la resistencia a compresión con el tiempo, encontrándose gran cantidad de modelos en la bibliografía.

- Los modelos estadísticos de predicción de resistencia y consistencia del hormigón en función de variables explicativas son mejorados aplicando redes neuronales artificiales.

Del estudio estadístico clásico se puede concluir que:

- Los modelos de regresión lineal simple y múltiple nos explican porcentajes de variabilidad bajos en bases de datos de una cierta entidad, donde muchas variables explicativas afectan a la variable de respuesta. En nuestro caso la variable explicativa que nos explica mayor variabilidad es la temperatura ambiente, sin tener en cuenta la relación cemento/agua. Aplicando modelos de regresión lineal múltiple aditiva podemos alcanzar un coeficiente de determinación  $R^2 = 51,8\%$  para la resistencia a compresión a 28 días con doce variables explicativas. Si consideramos solo tres variables explicativas como son la temperatura ambiente, la cantidad de cemento y el cono de Abrams, tenemos valores de  $R^2$  de 47,6% y 48,4% para las resistencias a 28 y 7 días respectivamente.
- Si tenemos bases de datos más reducidas con menor número de variables afectando a la variable de respuesta, entonces la relación cemento/agua es capaz de explicar un porcentaje elevado de la variabilidad (81,23% y 87,82% para resistencias a 28 y 7 días respectivamente). En nuestro caso, se puede sustituir la relación cemento/agua, por el porcentaje de cemento y el cono para obtener porcentajes de variabilidad explicados similares, para las resistencias a compresión.
- En periodos de temperatura elevada, las resistencias a compresión descienden aún con mayores dosificaciones de cemento y existe una correlación lineal entre la temperatura del hormigón y la temperatura ambiente. Se presentan como resultado del estudio estadístico modelos ajustados de evolución de la resistencia a compresión con el tiempo.
- Del análisis estadístico descriptivo de la resistencia a compresión, se deducen resistencias reales por encima de las demandadas como consecuencia de no controlar los parámetros que afectan al problema y evidentemente incrementando el coste de producción. Se deduce la necesidad de tener herramientas de alto desempeño para predecir las resistencias a compresión y la consistencia del hormigón.
- Del análisis multivariante se deduce que con 8 y 10 componentes principales se explica el 82,1% y el 87,5% respectivamente de la información de las variables de nuestro estudio para los hormigones de planta. Del análisis de varianza se deduce que el tipo de cemento provoca diferencias significativas en la resistencia a compresión y que la inclusión de fibras presenta resistencias menores en el hormigón. Los hormigones con fibras de polipropileno presentan resistencias a compresión bajas, debido fundamentalmente, a que

la inclusión de fibras se realiza con el objetivo de mejorar ciertas propiedades en hormigones de resistencias menores utilizados en soleras.

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

- Las redes neuronales artificiales elaboradas para predecir la resistencia a compresión y la consistencia son redes multicapa con una capa de entrada, una capa de salida y una capa oculta con 50 neuronas. El algoritmo de aprendizaje elegido es el *Algoritmo de Levenberg-Marquardt* con la utilización de la técnica de división de datos para entrenamiento-validación-test denominada validación cruzada, para evitar el sobreaprendizaje. La función de transferencia utilizada es la tangente hiperbólica (*tansig*). Cada ejecución de la red neuronal consta generalmente de menos de 60 iteraciones realizadas en un tiempo menor a 60 segundos.
- Los valores del coeficiente de determinación  $R^2$  obtenidos en la predicción de las resistencias a compresión y consistencia del hormigón mediante redes neuronales artificiales son altos (entre 85,5 % y 94,7 % en función del número de variables de entrada y cuál sea la variable de salida).
- Las redes neuronales artificiales mejoran la predicción de la resistencia a compresión frente a los modelos clásicos que tienen en cuenta la relación cemento/agua. Además, estadísticamente no hay diferencias significativas entre la media de las resistencias experimentales y las predichas mediante redes neuronales artificiales y sí que hay diferencias significativas entre la media de las resistencias experimentales y las obtenidas mediante los modelos de Abrams, De la Peña y Bolomey.
- Se han utilizado redes neuronales artificiales para obtener modelos de comportamiento de la resistencia a compresión del hormigón en función de algunas variables como son la temperatura ambiente, asiento en cono de Abrams, resistencia verdadera del cemento, porcentaje de cemento en la mezcla y hora de fabricación de las probetas.

### 6.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

No hay ninguna duda de que en el campo de los hormigones hay todavía muchos temas por investigar, al igual que la importancia de continuar investigando debido a la economía, utilización y prestaciones del hormigón. Dentro de las enormes posibilidades que plantea el tema y como parte final de este trabajo, se proponen los siguientes aspectos a continuar estudiando, algunos de los cuales pueden ser de utilidad:

- Plantear un estudio mediante redes neuronales artificiales en hormigones con dosificaciones no tan estudiadas como las de este trabajo y con valores extremos.
- Estudiar hormigones con áridos de diferentes procedencias, teniendo en cuenta no solo la granulometría sino también la compacidad de las mezclas.
- Avanzar en el estudio de la utilización de procedimientos de control de la consistencia y la relación agua/cemento en procesos industriales de producción de hormigón.
- Estudiar hormigones HAC o convencionales fabricados con aditivos superplastificantes.



## Bibliografía y normativa

1. *pat.* 3924447-Slump indicator (1975).
2. *pat.* 4900154-Concrete mixer having means for determining the consistency of concrete mixing therein (1990).
3. Abrams, D. *Design of Concrete Mixtures* (Universitatis Californiensis, 1919) (vid. pág. 103).
4. *ACI Committee 209: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures* ().
5. *ACI Recommended Practice for Hot Weather Concreting (ACI 305-72)*, (American Concrete Institute, 1971) (vid. pág. 96).
6. *ACI Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete ACI 613-54* (American Concrete Institute) (vid. pág. 70).
7. *ACI Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete (ACI 613-54)* (American Concrete Institute, 1954) (vid. págs. 69-71).
8. *ACI Recommended practice for selecting proportions for normal and heavy-weight concrete (ACI 211.1-77)* (American Concrete Institute, 1997) (vid. págs. 70, 71).
9. *ACI Standard Recommended Practice for the Design of Concrete Mixed (ACI 613-44)* (The Institute, 1944) (vid. pág. 70).
10. ACI318. *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentarios* (2005) (vid. pág. 136).
11. Acuña, L., Torre, A. V., Moromi, I. y García, F. Uso de las Redes Neuronales Artificiales en el Modelado del Ensayo de Resistencia a Compresión de

- Concreto de Construcción según la Norma ASTM C39/ C 39M. *Información Tecnológica* **25**(4), 3-12 (2014) (vid. pág. 279).
12. AFGC. *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages* inf. téc. (AFGC, 2004).
  13. Agrawal, V. y Sharma, A. Prediction of Slump in Concrete using Artificial Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology* **4**(9), 279-286 (2010) (vid. págs. 112, 116, 255).
  14. Agulló, L., Tollares-Carbonari, B., Gettu, R. y Aguado, A. Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer. A study based on the Marsh cone test. *Materials and Structures* **32**, 479-485 (1999) (vid. pág. 43).
  15. Alexander, K. M. y Taplín, J. H. Concrete Strength, Cement Hydration and the Maturity Rule. *Australian Journal of Applied Science* **13**, 277-284 (1962) (vid. págs. 100, 198).
  16. Alhozaimy, A. M. Effect of absorption of limestone aggregate on strength and slump loss of concrete. *Cement & Concrete Composites* **31**, 470-473 (2009) (vid. pág. 35).
  17. Alhozaimy, A. M., Soroushian, P. y Mirza, F. Mechanical Properties of Polypropylene Fibre Reinforced Concrete and the Effects of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Research* **18**, 85-92 (1996) (vid. pág. 48).
  18. Alsayed, S. H. y Amjad, M. A. Strength, water absorption and porosity of concrete incorporating natural and crushed aggregate. *Journal of King Saud University, Engineering Science* **8** (1996) (vid. pág. 28).
  19. Alshihri, M. M., Azmy, A. M. y El-Bisy, M. S. Neural networks of predicting compressive strength of structural light weight concrete. *Constructing and Building Materials* **23**, 2214-2219 (2009) (vid. pág. 112).
  20. Amziane, S., Ferraris, C. F. y Koehler, E. P. Concrete mixing trucks and workability. *Concrete Plant International Worldwide* **3**, 192-197 (2006) (vid. pág. 59).
  21. Amziane, S., Ferraris, C. F. y Koehler, E. P. *Feasibility of Using A Concrete Mixing Truck as a Rheometer*. (National Institute of Standards y Technology, 2006) (vid. pág. 94).

22. Andreasen, A. H. M. y Andersen, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern. *Kolloid-Zeitschrift* **50**, 217-228 (1930) (vid. págs. 65, 183, 185, 190).
23. ANEFA. El sector de los áridos en 2013. *Revista anual ANEFA* (2014).
24. ANEFA. El sector de los áridos en 2014. *Revista anual ANEFA* (2015).
25. Antia, K. P. Some modern methods of placing, compacting and curing concrete. *Indian Concrete Journal*, 104-108 (1949) (vid. pág. 69).
26. Arredondo, F. *Dosificación de hormigones* (ed. Torroja, I. E.) (1977) (vid. pág. 63).
27. Ashu, J., Sanjeev, K. J. y Sudhir, M. Modeling and Analysis of Concrete Slump Using Artificial Neural Networks. *Journal os Materials in Civil Engineering @ ASCE*. (2006) (vid. pág. 115).
28. ASTM-A820. *ASTM A820: Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete* (2011) (vid. pág. 45).
29. Aïtcin, P. C. *High Performance Concrete* (E&FN Spon, Londres, 1998) (vid. pág. 44).
30. Aïtcin, P. C., Jolicoeur, C. y MacGregor, J. G. Superplastizicers: how they work and why they occasionally don't. *Concrete International* **16(5)**, 45-52 (1994) (vid. pág. 109).
31. BAEL. *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et construct en béton armé suivant la méthode des états limites*. (1999) (vid. págs. 109, 110).
32. Bakhary, N., Hao, H. y Deeks, A. J. Structure damage detection using Neural Network with multi-stage substructuring. *Advances in Structural Engineering* **13(1)**, 95-110 (2010) (vid. pág. 112).
33. Banfill, P. F. G. A Viscosimetric Study of Cement Paste Containing Superplasticier with a Note on Experimental Techniques. *Magazine of concrete research* **33** (1981) (vid. pág. 77).
34. Banfill, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete. *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC) Cement's Contribution to Development in the 21st Century* (2003) (vid. págs. 76, 82).

35. Baron, J. y Lesage, R. La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier. *Rapport de recherche des LCPC* **64** (1976) (vid. pág. 68).
36. Baron, J. y Olivier, J. *Les bétons: Bases et données pour leur formulation* (ed. Eyrolles, E.) (Ecole française du béton ATIIH, 1996) (vid. pág. 68).
37. Baryval. *Manual de Servivio y Mantenimiento Hormigoneras* (SERVIPLEM, S.A., 2004) (vid. pág. 149).
38. Basma, A. A., Barakat, S. y Al-Oraimi, S. Prediction of Cement Degree of Hydration Using Artificial Neural Networks. *ACI Materials Journal* **96(2)**, 167-172 (1999) (vid. pág. 118).
39. Beaupré, D. *Rheology of High Performance Shotcrete* Tesis doct. (University of British Columbia, 1994) (vid. págs. 89, 94).
40. Beaupré, D. y Mindess, S. Rheology of fresh concrete: principles, measurement and applications. *Materials Science of Concrete V, The American Ceramic Society, USA* (ed. Society, T. A. C.) 149-190 (1998) (vid. pág. 77).
41. Bekaert. *DRAMIX: Stahlfasern - die neuzeitliche Betonbewehrung* (Bekaert Belgien, 1994) (vid. pág. 46).
42. Bektas, E. B. y Demirel, B. Determination of the effects of grounded pumice on compressive strength of concrete with Artificial Neural Networks. *E-Journal of New World Sciences Academy, Natural and Applied Sciences, Civil Engineering* **3(1)**, 20-29 (2008) (vid. pág. 117).
43. Belidor, B. F. d. Architecture hydraulique. *Chez Charles-Antoine Jombert Paris*, 168-190 (1770) (vid. pág. 3).
44. Bentz, D. P. y Aïtcin, P. C. The hidden meaning of water-cement ratio. *Concrete International* **30(5)**, 51-54 (2008) (vid. pág. 33).
45. Berzin, D. V. y Galaktionov, V. I. Influencia de la forma de los áridos para la resistencia de los hormigones y morteros. *Stoitelnye Materialy* **7** (1963) (vid. pág. 29).
46. Bilgehan, M. y Turgut, P. The use of neural networks in concrete compressive strength estimation. *Computers and Concrete* **7(3)**, 271-283 (2010) (vid. págs. 113, 117, 253).

47. Bolomey, J. Determination of the compressive strength of mortar and concrete (in German). *Schweizerische Bauzeitung* **2-3**, 41-44 and 55-59 (1926) (vid. págs. 183, 190).
48. Bolomey, J. Granulation et prévision de la résistance probable des béton. *Travaux* **19** (1935) (vid. págs. 103, 279).
49. Bonen, D. y Sarkar, S. L. The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition and parameters affecting flor loss. *Cement and Concrete Research* **25**, 1423-1434 (1995) (vid. pág. 23).
50. Borralleras Mas, P. Criterios de selección del aditivo superplastificante en HAC. *3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante, Madrid* (2012) (vid. pág. 30).
51. Boussion, R. y Charonnat, Y. Les bétonnières portées sont-elles des mélanges? *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **149** (1987) (vid. pág. 63).
52. BPEL. *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et construct en béton précontraint suivant la méthode des états limites*. (1999) (vid. págs. 109, 110).
53. Brandt, A. M. *Optimiza Methods for Material Design of Cement-Based Composites* (eds. Mindess, S. y A. Bentur editors E&FN SPON, L.) (Modern Concrete Technology Series n°7, 1998) (vid. pág. 63).
54. Brockett, P. L., Cooper, W. W., Golden, L. L. y Xia, X. A case study in applying networks to predicting insolvency for property and casualty insurers. *Journal of Operations Research Society* **48(12)**, 1153-1162 (1997) (vid. pág. 247).
55. Broda, J y Brachaczek, W. Influence of Polypropylene Fibre Geometry on the Mechanical Properties of Cement Mortars. *FIBRES AND TEXTILES in Eastern Europe* **23(2)**, 123-129 (2015) (vid. pág. 49).
56. Brouwers, H. J. H. The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1. *Cement and Concrete Research* **34**, 1697-1716 (2004) (vid. pág. 33).
57. Brouwers, H. J. H. The work of Powers and Brownyard revisited: Part 2. *Cement and Concrete Research* **35**, 1922-1936 (2005) (vid. pág. 33).
58. Brouwers, H. J. H. y Radix, H. J. *Self-Compacting Concrete: the role of the particle size distribution* (eds. Design, P. y Use of Self-Consolidating Concrete SCC, H. C. Changsha) (2005).

59. Brunquet, E. y Cazacliu, B. In-situ on-line control of SSC production regularity. *5th International Symposium on Self-Compacting Concrete, Belgium*. (2007) (vid. págs. 60, 61).
60. Burgos, A. *Los orígenes del hormigón armado en España* Tesis doct. (Universidad de Granada, 2009) (vid. pág. 5).
61. Bustillo, R. M. *HORMIGONES Y MORTEROS* (ed. FuegoEditores) (E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos, 2008) (vid. págs. 25, 26, 29).
62. Cadima, M. P., Rosas, R. J. y Aguirre, T. F. Comportamiento de hormigones reforzados con y sin fibras. *Investigación y desarrollo* **5**, 61-74 (2005) (vid. pág. 49).
63. Calibé, P. N. Résultats et recommandation du Projet National CALIBE: La maîtrise de la qualité des bétons. *Presse de ENPC*, 111-137 (2004) (vid. pág. 74).
64. Caquot, A. Le rôle des matériaux inertes das le béton. *Mémoires de la Cocieté des Ingénieurs Civils de france* (1937) (vid. pág. 65).
65. Carlsward, J., Emborg, M., Utsi, S. y Oberg, P. Effects of Constituents on the Workability and Rheology of Self-Compacting Concrete. *Proceedings of the Third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 143-153 (2003) (vid. pág. 77).
66. Castro, J., Keiser, L., Golioas, M. y Weis, J. Absorption and desorption properties of fine lightweight aggregate for application to internally cured concrete mixtures. *Cement & Concrete Composites* **33**, 1001-1008 (2011) (vid. pág. 35).
67. Cazacliu, B. y Dauvergne, M. Malazage de bétons autoplaçants. Influence de temps de malaxage et du type de malaxeur. *Rapport de contrat pour le projet national BAP, Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées* (2002) (vid. pág. 63).
68. Cazacliu, B. y Ventura, A. Technical and environment effects of concrete production: dry batch versus central mixed plant. *Journal of Cleaner Production* **18**, 1320-1327 (2010) (vid. págs. 59, 103).
69. Cazacliu, B., Loukili, A., Abdi, B. y Le Roy, R. Malaxage d'un béton fibré à ultra hautes performances. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **261-262**, 107-120 (2006) (vid. pág. 47).

70. Código Modelo DEB-FIP. *HORMIGÓN ESTRUCTURAL* (ed. GEHO-CEB, A.) 574 pag (1990) (vid. págs. 73, 107).
71. Chan, Y., Solís, R. y Moreno, E. I. Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Universidad Autónoma de Yucatán, Ingeniería* **7(2)**, 39-46 (2003) (vid. pág. 28).
72. Chandra, S. y Björnström, J. Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars. *Cement and Concrete Research* **32**, 1605-1611 (2002) (vid. pág. 41).
73. Chanut, S., Joubert, G., Eyrignoux, J. M. y Geoffray, G. M. Malaxage en centrale et en camion. *Résultats et Recommandations du projet national CALIBE, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris* (2004) (vid. pág. 63).
74. Charif, H., Jaccoud, J. P. y Alou, F. Reduction of deformations with the use of concrete admixtures. *Admixtures for concrete: Improvement of properties, Barcelona* (1990) (vid. pág. 25).
75. Charonnat, Y. Fabrication du béton hydraulique. *Technique de l'Ingénieur, traité Construction C2(225)* (1999) (vid. págs. 50, 51, 54, 57).
76. Charonnat, Y. Le dosage pondéral dans les centrales à béton. *Bull. Liaison Labo. P et Ch. Spécial XII, Matériels de travaux publics*, 59-70 (1982) (vid. pág. 53).
77. Charonnat, Y. *Quality control in concrete mixing. Production Methods and Workability of Concrete* (eds. Bartos, P. J. M., Marrs, D. L. y Cleland, D. J.) (E & FN SPON, 1996) (vid. pág. 63).
78. Chen, L. Grey and Neural Network prediction of concrete compressive strength using physical properties of electric arc furnace oxidizing slag. *J. Environment Eng. Manage* **20(3)**, 189-194 (2010) (vid. pág. 117).
79. Chopin, D. *Malaxage des bétons à hautes performance et des béton auto-plaçants: optimisation du temps de fabrication* Tesis doct. (Ecole Centrale, Nantes, 2003) (vid. págs. 58, 62, 63, 82).
80. Chopin, D., De Larrard, F. y Cazacliu, B. Why do SCC and HPC require a longer mixing time? *Cement and Concrete Research* (2004) (vid. pág. 62).
81. Christophe, P. *Le béton armé et ses applications*. (ed. Librairie Polytechnique Beranger, P. y L.) (1902) (vid. pág. 4).

82. CIMbéton. *Histoire du Béton: Naissance et Développement* en *CAHIER DES MODULES DE CONFÉRENCE POUR LES ÉCOLES D'ARCHITECTURE, 1818-1970* (2009) (vid. pág. 6).
83. Cladera, A., Marí, A. R., Martínez, F. y González, B. Aplicación de Redes Neuronales a Problemas de Hormigón Estructural. *II Congreso ACHE de Puentes y Estructuras de Hormigón* (2002) (vid. pág. 112).
84. Cánoves, J. V. *Evolución de la resistencia del hormigón de obra. Método de predicción a partir de los ensayos de control de la conformidad del hormigón* Tesis doct. (Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, 2012) (vid. págs. 99-101, 157, 198, 202, 203, 215, 218, 219, 228, 275-278).
85. Cánoves, J. V., Calvet, J., Benlloch, R. y Díez. Influencia de diferentes parámetros tecnológico-ambientales en la evolución de la resistencia del hormigón, producido en la provincia de Valencia. *Materiales de Construcción* **63(311)**, 327-340 (2012) (vid. págs. 11, 110).
86. Coignet, F. *Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire* (E. Lacroix Paris, 1861).
87. Collantes, J. V. Predicción con Redes Neuronales. Comparación con las Metodologías de Box y Jenkins. *Magister Scientiae en Estadística Aplicada. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela* (2001) (vid. pág. 253).
88. Comella, J., Picó, S. y Taure, E. Las pérdidas de resistencia del hormigón durante el verano. *Anales de Construcciones y Materiales Avanzados* **1**, 49-58 (2002) (vid. págs. 99, 275).
89. Commission42-CEA. Properties of set concrete at early ages. State of the art report. *Matériaux et Constructions*. (1981) (vid. págs. 96, 98).
90. Cordon, W. y Gillespie, H. Variables in concrete aggregate and portland cement paste which influence the strength of concrete. *Journal of the ACI* **35** (1963) (vid. pág. 32).
91. Correira, P. C., Gettu, R., Agulló, L. y Bernard, C. Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia. Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización. *Cemento y Hormigón, Madrid* **832**, 30-43 (2002) (vid. pág. 44).
92. Coutinho, A. S. *Fabrico e propiedades do Betao, V. 1.* (Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1973) (vid. pág. 64).

93. Cover, T. M. Learning in pattern recognition. *Methodologies of Pattern Recognition*. In Satoshi Watanabe. 111-132 (1969) (vid. pág. 254).
94. Daczko, J. A. A proposal for measuring rheology of production concrete. *Concrete International* **22** (2000) (vid. pág. 94).
95. Davis, H. E., Troxell, G. E. y Wiscocil, C. T. *The Testing and Inspection of Engineering Materials* (McGraw-Hill, New York, 1964) (vid. pág. 108).
96. Day, K. W. *Concrete mix design, quality control and specification* (E & FN Spon, London, 1995) (vid. pág. 69).
97. Day, K. W. Production of HPC. *4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete* **1** (1996) (vid. pág. 43).
98. De Larrard, F. *Formulation et propriétés des bétons a très hautes performances* Tesis doct. (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1988).
99. De Larrard, F. *High Performance Concrete: From the Laboratory to Practical Utilization* (Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications, 1994) (vid. pág. 25).
100. De Larrard, F. LE LOGICIEL BétonlabPro 3 (2007).
101. De Larrard, F. *Structures granulaires et formulation des béton* 414pag (Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2000) (vid. págs. 23, 25, 28, 68, 70, 83, 106, 109, 279).
102. De Larrard, F. y Ferraris. Rhéologie du béton frais remané I & II. *Bullettin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* (1998) (vid. págs. 77, 79, 82).
103. De Larrard, F. y Sedran, T. Le logiciel BétonlabPro 3. *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France. BLPC* **270-271** (2007) (vid. págs. 62, 78).
104. De Larrard, F. y Tondat, P. Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la resistance en compression du béton. *Materials and Structures RILEM* **26** (1993) (vid. pág. 106).
105. De Larrard, F., Szitkar, J. C., Hu, C. y Joly, M. Design of a Rheometer for Fluid Concrete. *Proceedings of the International RILEM workshop, Special Concretes: Workability and Mixing* (1994) (vid. pág. 90).

106. De la Fuente, L. J. y Palomo, A. Comportamiento mecánico resistente del Hormigón Preparado en Periodos Estivales. *Cemento-Hormigón* **867**, 4-13 (2004) (vid. pág. 101).
107. De la Peña, C. *Curso elemental de auxiliares de obra (especialidad hormigón): dosificación y puesta en obra del hormigón* (1955) (vid. págs. 72, 279).
108. Del Campo, M. La determinación del agua de amasado en morteros y hormigones fraguados. *Revista de Obras Públicas*, 81-89 (1963) (vid. pág. 104).
109. Delibes, A. *Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón*. (INTEMAC Ediciones, 1993) (vid. págs. 84, 85, 108, 280).
110. Delude, P. y Ambrosino, R. Le contrôle du béton. Méthode du Laboratoire Régional de Bordeaux. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées* **20** (1966) (vid. pág. 57).
111. Demuth, H., Beale, M. y Hagan, M. *Neural Networks Toolbox Users Guide, Version 4* (The MathWorks Inc, Natick, USA, 2002) (vid. pág. 251).
112. Denoël, J. F., Espion, B., Hellebois, A. y Provost, M. *Histoires de béton armé. Patrimoine, durabilité et innovations* (ed. FEBELCENetFABI) (2013) (vid. pág. 5).
113. Detwiler, R. J., Kjellsen, K. O. y Gjarv, O. E. Resistance to chloride intrusion of concrete cured at different temperatures. *ACI Materials Journal* (1991) (vid. pág. 98).
114. Devaux, M. F., Younes, C., Dominique, B. y Dominique, B. Application of a Hybrid Neural Network for the Discrimination of Seeds by Artificial Vision. *ICTAI Journal* (1996) (vid. pág. 112).
115. Dewar, J. The Structure of Fresh Concrete. *First Sir Frederick Lea Memorial Lecture Institute of Concrete Technology, Reprinted by British Ready Mixed Concrete Association*, 23p (1986) (vid. pág. 70).
116. Dias, W. P. S. y Pooliyadda, S. P. Neural Networks for Predicting Properties of Concrete with Admixtures. *Construction and Building Materials* **15**, 371-379 (2001) (vid. pág. 248).
117. DIN1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion* (2008) (vid. pág. 73).

118. Dixon, J. y Mayfield, B. Concrete reinforced with fibrous wire. *Journal of the Concrete Society* **5(3)**, 73-76 (1971) (vid. pág. 46).
119. Draper, N. y Smith, H. *Applied Regression Analysis*. 3th (ed. Wiley, N. Y.) (1999) (vid. pág. 196).
120. Dreux, G. y Gorisse, F. Vibration, ségrégation et ségrégabilité des bétons. *Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics* (1970).
121. Duda, W. M. *Manual tecnológico del cemento* (ed. S.A., E. T. A.) (1977) (vid. págs. 23, 24).
122. ECP. *203 Egyptian Code for Designin and Executing the Building Works, 2nd ed.* (HBRG, Egypt, 2009) (vid. pág. 108).
123. Edmeades, R. M. y Hewlett, P. C. Cement admixures. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete, IV Edition*, 837-901 (1998) (vid. pág. 39).
124. EHE. *Instrucción de Hormigón Estructural*. (Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, 1999) (vid. págs. 107, 215).
125. EHE. *Instrucción de Hormigón Estructural*. ISBN: 9788449808555 (Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, 2008) (vid. págs. 11, 20, 30, 44, 107, 129, 156, 194, 215).
126. EILA. *INFORME SOBRE EL EJERCICIO DE COMPACCIÓN INTERLABORATORIOS A NIVEL NACIONAL DE ENSAYOS DE HORMIGÓN*. inf. téc. (Comité de Infraestructuras de la Calidad de la Edificación (CICE). Subcomisión Administrativa para la Calidad de la Edificación (SACE)., 2014) (vid. pág. 156).
127. EILA-PLAN. *PLAN DE ENSAYOS INTERLABORATORIOS A NIVEL ESTATAL ENSAYOS DE HORMIGÓN FRESCO*. inf. téc. (Comité de Infraestructuras de la Calidad de la Edificación (CICE). Subcomisión Administrativa para la Calidad de la Edificación (SACE)., 2014) (vid. pág. 155).
128. *El Cemento Armado* (1903) (vid. pág. 5).
129. Emborg, M. Rheology Tests for Self-Compacting Concrete - How Useful are they for the Design of Concrete Mix for Full Scale production? *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 95-105 (1999) (vid. pág. 77).

130. ERMCO. *Ready-Mixed Concrete Industry Statistics, Year 2013* (European Ready Mixed Concrete Organisation, 2014) (vid. págs. 2, 8, 11, 12, 130).
131. Erntroy, H. C. y Shaclock, B. W. Design of high strength concrete mixes. *Proceedings of the Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, Cement and Concrete Asociation*, 55-73 (1954) (vid. págs. 30, 70, 72).
132. Falkner, H., Kubat, B. y Droese, S. Durchstanzversuche an Platten aus Stahlfaserbeton (Punching tests on steel fibre reinforced plates). *Bautechnik* **71(8)**, 460-467 (1994) (vid. pág. 47).
133. Faury, J. *Le béton. Influence de ses consituants inertes, 3<sup>o</sup> édition* (Dunod, Paris., 1958) (vid. pág. 106).
134. Faury, J. Le béton, Influence de ses constituants inertes. *Règles à adopter pour sa meilleure composition, sa confection et son transport sur les chantiers* (1944).
135. Feldman, R. y Beaudoin, J. J. Microestructure and Strength of Hydrated Cement. *Symposium Chemical Cement, Moscow* (1974) (vid. pág. 21).
136. Fernández Cánovas, M. *HORMIGÓN 10<sup>o</sup> Edición* (ed. Garceta, G. E.) (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2013) (vid. págs. 24, 25, 48, 49).
137. Ferrari, G. y col. Influence of carboxylic acid-carboxylic ester ratio of carboxylic ester superplasticiser on characteristics of cement mixtures. *International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete*, 505-519 (2000) (vid. pág. 23).
138. Ferraris, C. F. Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, **106(2)**, 391-399 (2001) (vid. págs. 53, 54).
139. Ferraris, C. F. Measurement of the rheological properties of cement paste: A new approach. *The Role of Admixtures in High Performance Concrete* (1999) (vid. pág. 76).
140. Ferraris, C. F. y de Larrard, F. *Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology* (National Institute of Standads y Technology, 1998) (vid. págs. 76, 82).

141. Ferraris, C. F. y Martys, N. S. Relating fresh concrete viscosity measurements from different rheometers. *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technology* **108(3)**, 229-234 (2003) (vid. pág. 90).
142. Ferraris, C. F. y col. Feasibility of Using a Concrete Mixing Truck as a Rheometer. *NISTIR 7447* (2007) (vid. pág. 95).
143. Ferron, R. P. D. *Formwork pressure of self-consolidating concrete: influence of flocculation mechanisms, structural rebuilding, thixotropy and rheology* Tesis doct. (Northwestern University, 2008) (vid. pág. 75).
144. Figueres, M. Introducción a las Redes Neuronales Artificiales. *Sistemas Inteligentes en Ingeniería Civil. optimización heurística. blogs.upv.es*, 10 (2010) (vid. pág. 251).
145. Flatt, R. J. Dispersion forces in cement suspensions. *Cement and Concrete Research* **34**, 399-408 (2004) (vid. pág. 192).
146. Flatt, R. J. y Bowen, P. Yield stress of multimodal powder suspensions: An extension of the Yodel ( Yield stress mODEL). *Journal of the American Ceramic Society* **90(4)**, 1038-1044 (2007) (vid. pág. 192).
147. Flood, I. y Kartman, N. Neural Networks in Civil Engineering. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering* **8(2)** (1994) (vid. pág. 112).
148. Flórez, R. y Fernández, J. M. *Las Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*. (NETBIBLO, 2008) (vid. págs. 248, 250, 253).
149. Féret, R. New investigation of the Form of Particle of Concrete. *ACI Materials Journal* (1938) (vid. pág. 29).
150. Féret, R. Sur la compacité des mortiers hydrauliques. *Annales des Ponts et Chaussées, Série 7* **4**, 5-164 (1892) (vid. pág. 103).
151. Freyssinet, E. *Un amour sans limite* (ed. Éditions du Linteau, P.) (1993) (vid. pág. 7).
152. Fuller, W. B. y Thompson, S. E. The laws of proportioning concrete. *American Society of Civil Engineers, Transactions of ASCE* **59**, 67-143 (1907) (vid. págs. 64, 183, 190).
153. Funk, J. y Dinger, D. *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspension, Applied to Ceramic Manufacturing* (1994) (vid. pág. 65).

154. Gallant, S. I. *Neural Network Learning and Expert Systems* (MIT Press, Cambridge, 1993) (vid. pág. 248).
155. Gallias, J. L., ara Ali, R. y Bigas, J. P. The effect of fine mineral admixtures on water requerimet of cement pastes. *Cement and Concrete Research* **30** (2000) (vid. pág. 28).
156. García, F., Torre, A., Moromi, I., Espinoza, P. y Acuña, L. Modelización del ensayo de resistencia a compresión del concreto de alta resistencia mediante una red neuronal artificial. Obtención de la incertidumbre del resultado. *Revista ECI Perú* **12(1)**, 77-83 (2015) (vid. pág. 279).
157. García, T. y Horstmann, P. Hormigones y morteros sin retracción. *Revista de obras públicas*, 973-996 (1985) (vid. pág. 151).
158. García Balado, J. F. *Método para la Dosificación de Hormigones Serie E 42* (Instituto del Cemento Portland Argentino, 1982) (vid. pág. 72).
159. García-Segura, T., Yepes, V., Alcalá, J. y Pérez-López, E. Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges. *Engineering Structures* **92**, 112-122 (2015) (vid. pág. 255).
160. García Toledano, M. *Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura durante el periodo estival en la resistencia a compresión del hormigón* 129pag (Universidad Politécnica de Madrid, Trabajo Fin de Master, 2011) (vid. págs. 100, 275).
161. Gardoni, P., Nemati, K. y Noguchi, T. Bayesian statistical framework to construct probabilistic models for the elastic modulus of concrete. *ASCE J. of Mater. in Civil Engrg.* (2007) (vid. pág. 28).
162. Garg, R. *Concrete mix design using Artificial Neural Networks* Tesis doct. (Thapar Institute of Engineering y Technology, Deemed University, Patiala, India, 2003) (vid. pág. 117).
163. Garín, L., Santilli, A. y Pejoja, E. Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental. *Trabajos de Difusión Científica y Técnica* **10**, 109-114 (2012) (vid. págs. 150, 151).
164. Gaweska, I. *Comportement à haute température des BHP - Evolution des principales propriétés méécaniques* (Structures et Matériaux, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, París, 2004) (vid. pág. 47).
165. Geiker, M. R., Brandl, M., Thrane, L. M. y Neilsen, L. F. On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of

- Self-Compacting Concrete. *Cement Concrete Aggregate* **24**, 3-6 (2002) (vid. pág. 77).
166. Geoffray, J. M. Mise en oeuvre. *Technique de l'ingénieur, Série de béton hydraulique* **2(230)** (2008) (vid. pág. 80).
167. Ghassemzadeh, F., Sajedi, S., Shekarchi, M., Mirghaderi, R. y Khanzadeh, M. Accuracy of shrinkage prediction models in high performance concretes containing slag and silica fume. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona* (2010) (vid. pág. 112).
168. Giganto, J. y Morano, A. J. *Árido calizo vs. árido silíceo*. (ed. Editores, F.) (I Congreso Nacional de Áridos, Zaragoza., 2006) (vid. pág. 25).
169. Glass, G. K., Hassanein, N. M. y Buenfeld, N. R. Neural Network Modeling of Chloride Binding. *Magazine of Concrete Research* **49(181)**, 323-335 (1997) (vid. pág. 117).
170. Gómez, M. S. y Vidal, S. Influencia en la Resistencia a Compresión de Hormigones por Efecto de la Temperatura Ambiente. *Revista de la construcción, Escuela de Construcción Civil* **5(1)**, 56-61 (2006) (vid. págs. 100, 101, 198, 275, 276).
171. Goldbeek, A. T. An Investigation of the Effect of Flat and Elongated Pieces in Crushed Stone used as and Aggregate in Concrete Pavements. *The Crushed Stone Journal* (1930) (vid. pág. 29).
172. Gonzalez-Salcedo, L. O. Aplicación de la Inteligencia Artificial en el diseño de mezclas de concreto. Estado del Arte. *Cuaderno ACTIVA* **4**, 55-65 (2012) (vid. pág. 112).
173. Gordon, S. Selección de la forma óptima de los áridos gruesos. *Stroitelnye Materialy* **2** (1958) (vid. pág. 29).
174. Goyal, S. y Goyal, G. K. Cascade and feedforward backpropagation artificial neural network models for prediction of sensory quality of instant coffee flavoured sterilized drink. *Canadian Journal on Artificial Intelligence, Machine Learning and Pattern Recognizing* **2(6)**, 78-82 (2011) (vid. pág. 252).
175. Gupta, R., Kewalramani, M. A. y Goel, A. Prediction of concrete strength using Neural-Expert-System. *Journal of Materials in Civil Engineering* **18(3)**, 426-466 (2006) (vid. pág. 112).

176. Gupta, S. Concrete Mix Design Using Artificial Neural Network. **1(1)**, 29-43 (2013) (vid. pág. 114).
177. Hagan, M. T., Demuth, H. B. y Beale, M. *Neural Network Design* (PWS Pub, Boston, USA., 1996) (vid. pág. 112).
178. Haj-Ali, R. M., Kurtis, K. E. y Sthapit, A. R. Neural Network Modeling of Concrete Expansion During Long-Term Sulfate Exposure. *ACI Materials Journal* **98(1)**, 36-43 (2001) (vid. pág. 117).
179. Hakim, S. J. S., Noorzaei, J., Jaafar, M. S., Jameel, M. y Mohammadasani, M. Application of Artificial Neural Network to Predict Compressive Strength of High Strength Concrete. *International Journal of the Physical Sciences* **6(5)**, 975-981 (2011) (vid. págs. 116, 255).
180. Hanehara, S. y Yamada, K. Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, adsorption behaviour of admixture and paste rheology. *Cement and Concrete Research* **29**, 1159-1165 (1999) (vid. pág. 41).
181. Harrison, T. A. *Concrete Properties: Setting and Hardening* (Elsevier Ltd, Oxford, 2003) (vid. pág. 104).
182. Haykin, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* ISBN: 9780139083853 (Prentice Hall, Upper Saddle River (USA), 1999) (vid. págs. 244, 245).
183. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines* (PrentPrentice, 3 edition, 2008) (vid. pág. 252).
184. Hecht-Nielsen, R. Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *1st International Conference on Neural Networks* **3**, 11-14 (1987) (vid. págs. 247, 248).
185. Hernández, L. *Predicción y optioptimiza de emisiones y consumo mediante redes neuronales en motores diesel* (ed. EDITORIAL-REVERTE) (2006) (vid. págs. 248, 249).
186. Hewayde, E., Nehdi, M., Allouche, E. y Nakhla, G. Neural Network prediction of concrete degradation by sulphuric acid attack. *Structure and Infrastructure Engineering* **3(1)**, 17-27 (2007) (vid. págs. 112, 117).
187. Hinton, G. E. Connectionist learning procedures. *Artificial Intelligence, Elsevier Science Ltd* **40(1-3)**, 185-234 (1989) (vid. pág. 249).

188. Hocking, R. The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression. *Biometrics* **32**, 1-49 (1976) (vid. pág. 203).
189. Hola, J. y Schabowicz, K. Application of Artificial Neural Networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive test. *Journal of Civil Engineering and Management* **11(1)**, 23-32 (2005) (vid. pág. 117).
190. Hornik, K. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks* **2**, 359-366 (1989) (vid. pág. 112).
191. Houst, Y. F., Bowen, P. y Siebold, A. Some basic aspect of the interaction between cement and superplasticizers. *International Conference Dundee*, 225-234 (2002) (vid. pág. 24).
192. Hu, C. *Rhéologie des béton fluides* Tesis doct. (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1995) (vid. págs. 82, 90).
193. Hu, C. y de Larrard, F. The Rheology of Fresh High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Research* **26**, 283-294 (1996) (vid. pág. 82).
194. Hudson, B. Modification to the Fine Aggregate Angularity Test. *Proceedings of the 7th ICAR Symposium* (1999) (vid. pág. 24).
195. Hughes, B. P. y Fattuhi, N. I. Improving the toughness of high-strength cement paste. *Concrete* **7**, 185-188 (1976) (vid. pág. 49).
196. Ivorra, S., Brótons, V., Foti, D. y Diaferio, M. A preliminary approach of dynamic identification of slender building by neuronal networks. *International Journal of Non-Linear Mechanics* (2015) (vid. pág. 248).
197. Iwata, H. y Homma, T. Distribution of coordination numbers in random packing of homogeneous spheres. *Powder Technology* **10(79)** (1974) (vid. pág. 192).
198. Jain, A. y Srinivasulu, S. Integrated approach to model decomposed flow hydrograph using artificial neural networks and conceptual techniques, *Journal of Hydrology* **317** (2004) (vid. pág. 252).
199. Jalali, S. y Abyaneh, M. *Prediction of final concrete strength in hot climates* (ed. of Concrete Research, M.) (1995) (vid. págs. 97, 98).
200. Jamil, M., Zain, M. F. M. y Basri, H. B. Neural Network simulator model for optimization in high performance concrete mix design. *European Journal of Scientific Research* **34(1)**, 61-68 (2009) (vid. pág. 117).

201. Jancovic, K., Nikolic, D., Bojovic, D., Loncar, L. J. y Romakov, Z. The estimation of compressive strength of normal and recycled aggregate concrete. *Architecture and Civil Engineering, Facta Univerzitates* **9(3)**, 419-431 (2011) (vid. pág. 104).
202. Jawed, J., Skalny, J. y Young, F. Hydration of Portland Cement. *Structure and performance of cements* (ed. Barnes.) 237-317 (1983) (vid. pág. 20).
203. Jee, N., Sangchun, Y. y Hongbum, C. Prediction of compressive strength of in situ concrete based on mixture proportions. *J. Asian Architect. Build. Eng.* (2004) (vid. págs. 106, 222).
204. Jiménez Montoya, P., Meseguer, Á., Cabré, F. y Portero, J. *Hormigón armado, 15ª Ed.* ISBN: 9788425223075 (Editorial Gustavo Gili, S.L., 2010) (vid. págs. 19, 20, 63, 73, 74).
205. Johnston, C. D. Steel fiber reinforced mortar and concrete, A review of mechanical properties. *American Concrete Institute, Detroit* **SP-44**, 195-207 (1974) (vid. pág. 46).
206. Joisel, A. Composition des bétons hydrauliques. *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics* **58** (1952) (vid. pág. 67).
207. Kaiser, H. The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* **23**, 187-200 (1958) (vid. pág. 240).
208. Kaplan, M. F. The Effect of the Properties of Coarse Aggregate on the Workability of Concrete. *Magazine of Concrete Research* **29** (1958) (vid. pág. 29).
209. Karahan, O., Tanyildizi, H. y Atis, C. D. An Artificial Neural Networks approach for prediction of long-term strength properties of steel fiber reinforced concrete containing fly ash. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* **9(11)**, 1514-1523 (2008) (vid. pág. 112).
210. Karrena. A new generation of mobile mixer drums. *CPI* **2**, 310-311 (2007) (vid. pág. 6).
211. Kausay, T. Acélhuzal-szálerősítésű betonok tulajdonságai és teherbírása. *BETON, II évfolyam 6, Szám*, 5-11 (1994) (vid. pág. 46).
212. Ke, Y., Beaucour, A. L., Ortola, S., Dumontet, H. y Cabrillac, R. Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregate on the mechanical properties of concrete. *Constructing and Building Materials* **23**, 2821-2828 (2009) (vid. pág. 35).

213. Kim, J. I. y Kim, D. K. Neural Networks for estimation of concrete strength. *KSCF Journal of Civil Engineering* **6** (2002) (vid. pág. 112).
214. Kjellsen, K. O. y Detwiler, R. J. Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperatures. *Cement ACI Materials Journal* **22** (1992) (vid. pág. 98).
215. Klein, N. *El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland* Tesis doct. (Universitat Politècnica de Catalunya, 2012) (vid. págs. 34-38, 190, 193).
216. Klein, N., Aguado, A., Torralles-Carbonari, B. y Real, L. Prediction of the water absorption by aggregates over time: Modelling through the use of value function and experimental validation. *Constructing and Building Materials* **69**, 213-220 (2014) (vid. pág. 35).
217. König, G. y Kützing, L. Modelling the increase of ductility of HPC under compressive forces, a fracture mechanical approach. *Proceedings of the III International RILEM Workshop. High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 251-260 (1999) (vid. pág. 46).
218. Koehler, E. P. y Fowler, D. W. *Aggregate in self-consolidating concrete* (International Center for aggregates Research (ICAR), The University of Texas at Austin., 2007) (vid. pág. 28).
219. Koehler, E. P. y Fowler, D. W. Development and Use of a Portable Rheometer for Concrete. *Proceedings of the 8th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Canada*, 53-72 (2006) (vid. pág. 89).
220. Koehler, E. P. y Fowler, D. W. Summary of Concrete Workability Test Methods. *RESEARCH REPORT ICAR* **105** (2003) (vid. pág. 83).
221. Kompen, R. High performance concrete: Field observations of cracking tendency at early age. *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munich* (1994) (vid. pág. 25).
222. Konderla, P. y Mokanet, T. Comparison of Two Methods for the Analysis of Composite Material. *Journal of Materials Processing Technology* **106(1)**, 87-93 (2000) (vid. pág. 113).
223. Kurkova, V. Kolmogorov theorem and multilayer neural networks. *Neural Networks* **5(3)** (ed. Ltd., O. U. E. S.) 501-506 (1992) (vid. pág. 244).

224. Lê, N. D. *Amélioration du béton en production* Tesis doct. (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, 2007) (vid. págs. 50, 51, 58, 59, 61).
225. Lai, S. y Serra, M. Concrete Strength Prediction by Means of Neural Network. *Construction and Building Materials* **11(2)**, 93-98 (1997) (vid. pág. 248).
226. Lee, B. Y. y Yoon, Y. S. Modified harmony search algorithm and Neural Networks for concrete mix proportion design. *Journal of Computing in Civil Engineering* **23(1)**, 57-61 (2009) (vid. pág. 117).
227. Lee, S. C. Prediction of concrete strength using artificial neural networks. *Engineering Structures* **25**, 849-857 (2003) (vid. pág. 115).
228. Leshno, M., Lin, V. Y., Pinkus, A. y Schocken, S. *Multilayer feedforward networks with nonpolynomial activation function can approximate any function* (New York University, Center for Research on Information Systems, 1992) (vid. pág. 244).
229. Lichtenberg, E. H. Method of and apparatus for determining the consistency of concrete. *US patent 1.730.893* (1929) (vid. pág. 93).
230. Lippmann, R. An introduction to computing with neural nets. *ASSP Magazine, IEEE* **4(2)**, 4-22 (1987).
231. Liu, X., Ye, G., de Shutter, G., Yuan, Y. y Taerwe, L. On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cement and Concrete Research* **38(4)**, 487-499 (2008) (vid. pág. 47).
232. Lizarazo, J. M. y Gómez Cortés, J. G. Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN* **27(1)**, 11-18 (2007) (vid. pág. 117).
233. Loring y Purrington. The Determination of the Workability of Concrete. *ASTM, New Hampshire* **II** (1928) (vid. pág. 57).
234. Lourakis, M. I. A. *A brief description of the Levenberg-Mardquardt Algorithm implemented by levmar* (Institute of Computer Science, Foundation for Research & Technology, Heraklion (Greece), 2005) (vid. pág. 249).
235. Loureda, J. y Vilar, J. Diseño de un nuevo reómetro para mezclas de hormigón, *3º Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante* (2012) (vid. págs. 89, 93).

236. Louvet, F. *Introduction aux plans d'expériences appliqués à la formulation des bétons* (ed. française du béton ATILH Edition Eyrolles, E.) (Bétons: Bases et données pour leur formulation, 1996) (vid. pág. 74).
237. López, J. A. y Caicedo, E. Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales. *Conferencias del Curso de Redes Neuronales Artificiales, Colombia: Universidad del Valle* (2006) (vid. pág. 112).
238. Lu, C. y Liu, R. Carbonation depth prediction of pre-stressed concrete based on artificial neural network. *Journal of Harbin Institute of Technology* (2008) (vid. pág. 117).
239. M16-ACHE. *Monografía 16: Manual de Tecnología de Aditivos para Hormigón* (2010) (vid. pág. 39).
240. M2-ACHE. *Monografía 2: Manual de tecnología del hormigón reforzado con fibras de acero* (2002) (vid. pág. 44).
241. M7-ACHE. *Monografía 7: Control Estadístico del Hormigón Estructural* (2003) (vid. pág. 136).
242. Machine, H., Chijen, T y Song, P. S. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering A* **494**, 153-157 (2008) (vid. pág. 50).
243. Maidl, B. R. *Steel fibre reinforced concrete* (Ernst & Sohn, 1995) (vid. pág. 46).
244. Mallol, R. Hormigones con dosificación de áridos discontinua. *Revista de Obras Públicas* (1946) (vid. pág. 105).
245. Mansur, M. A., Ong, K. C. G. y Paramasivam, P. Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups. *Journal Structures Engineering, ASCE* **112(9)**, 2066-2079 (1986) (vid. pág. 46).
246. Marchand, J. *Pâtes de ciment. Résultats des essais mécaniques à 2 jours* (Rapport interne LCPC, 1992) (vid. pág. 22).
247. Martí-Vargas, J., Ferri, J. y Yepes. Prediction of the transfer length of prestressing strands with neural networks. *Computers and Concrete* **12(2)**, 187-209 (2013) (vid. pág. 243).
248. Martín del Brío, B. y Sanz, A. *Redes neuronales y sistemas borrosos* (Madrid: Ra-Ma, 1997) (vid. pág. 250).

249. Maruyama, I., Kanematsu, M. y Noguchi, T. Optimization of the concrete mix proportions centered on fresh properties using genetic algorithm. *The Indian Concrete Journal*, 567-573 (2002) (vid. págs. 28, 112, 117).
250. Mathias, V. *Recyclage des fraisats d'enrobés dans les béton hhydraulique routiers* Tesis doct. (Ecole centrale et de l'université de Nantes, 2005) (vid. págs. 105, 106).
251. Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M. *Concrete. Microstructure, properties and materials* (Mc Graw-Hill Ed., 2006) (vid. pág. 21).
252. Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais* (ed. Pini) (1994) (vid. pág. 28).
253. Mendoza, C. J., Aire, C. y Dávila, P. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *CONCRETO Y CEMENTO. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO* (2011) (vid. pág. 50).
254. Mendoza, C. J., Vázquez, C., Aire, C. M. y Dircio, M. A. Predicción de la resistencia a partir del método de la madurez: determinación experimental de la energía de activación de concretos autocompatantes y convencionales de alta resistencia. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural* (2014) (vid. pág. 108).
255. Metwally, a. a. A. e. Compressive strength prediction of Portland cement concrete with age using a new model. *HBRC Journal* (2013) (vid. pág. 109).
256. Mindess, S. y Vondran, G. Properties of concrete reinforced with fibrillated fibres under impact loading. *Cement and Concrete Research* **18**, 109-115 (1988) (vid. pág. 49).
257. Mollah, M. Y. A., Adams, W. J., Schennach, R. y Cocke, D. L. A review of cement-superplasticizer iinteraction and theyr models. *Advances in Cement Research* **12(4)**, 153-161 (2000) (vid. pág. 41).
258. Moller, M. *Efficient training of feed-forward neural networks* Tesis doct. (Arthus University, Denmark, 1993) (vid. pág. 249).
259. Moody, J. y Utans, J. ArchitArchit selection strategies for neural networks: Application to corporate bond rating prediction. *Neural Networks in the Capital Markets Jhon Wiley & Sons in A.N. Referenes ed* (1994) (vid. pág. 251).

260. Morcou, G. y Lounis, Z. Prediction of Onset of Corrosion in Concrete Bridge Decks Using Neural Networks and Case-Based Reasoning. *Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (2005) (vid. pág. 117).
261. Mostafa, A. M. A. y Hossam, H. Analytic Formulae for Concrete Mix Design Based on Experimental Data Base and Predicting the Concrete Behavior Using ANN Technique. *International Journal of Engineering* **4(5)**, 368-386 (2007) (vid. pág. 114).
262. Mouret, M., Bascoul, A. y Escadeillas, G. Microstructural Features of Concrete in Relation to Initial Temperature. *Cement and Concrete Research* **29(3)**, 369-375 (1999) (vid. págs. 100, 101).
263. Mouret, M., Boscoul, A. y Escadeillas, G. Strength Impairment of Concrete Mixed in Hot Weather: relation to porosity of bulk fresh concrete paste and maturity. *Magazine of Concrete Research* **55(3)**, 215-223 (2003) (vid. pág. 99).
264. Murata, J. y Kikukawa, H. Viscosity Equation for Fresh Concrete. *ACI Materials Journal* **89(3)**, 230-237 (1992) (vid. pág. 82).
265. Muthupriya, P., Subramanian, K. y Vishnuram, B. G. Prediction of Compressive Strength and Durability of High Performance Concrete by Artificial Neural Networks. *INTERNATIONAL JOURNAL OF OPTIMIZATION IN CIVIL ENGINEERING* **1**, 189-209 (2011) (vid. págs. 116, 255).
266. Naaman, A. E. y Shah, S. P. Pull-Out Mechanisms in Steel Fibre Reinforced Concrete. *ASCE Journal of the Structural Division* **121(8)**, 1537-1548 (1976) (vid. pág. 46).
267. Naaman, A. E., Wongtanakitcharoen, T. y Hauser, G. Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete. *ACI Materials Journal* **102(1)**, 49-58 (2005) (vid. pág. 47).
268. Nagaraj, T. S. y Shashiprakash, S. G. Generalized Abram's law, Properties of fresh Concrete. *Proceedings of the RILEM colloquium, London* (1990) (vid. pág. 106).
269. Nagendra, S. *Practical Aspects of Using Neural Networks: Necessary Preliminary Specifications* (GE Research y Development Center, 1998) (vid. pág. 248).
270. Namyong, J., Sangchum, Y. y Hongbum, C. Prediction of Compressive Strength of In-Situ Concrete Based on Mixture Proportions. *Journal of*

- Asian Architecture and Building Engineering* **3(1)**, 9-16 (2004) (vid. págs. 208, 218, 277, 278).
271. Narayan Swamy, R., Jones, R. y Chiam, T. P. Influence of steel fibers on the shear resistance of lightweight concrete i-beams. *ACI Structural Journal* **90(1)**, 103-114 (1993) (vid. pág. 46).
272. Nehdi, M., El Chabil, H. y El Naggar, M. H. Predicting Performance of Self-Compacting Concrete Mixtures Using Artificial Neural Networks. *Materials Journal* **98(5)**, 394-401 (2001) (vid. págs. 118, 248).
273. Nel Quiroga, P. y Fowler, D. W. *The effects of aggregate of aggregate characteristics on the performance of Portland cement concrete F 104-1* (ICAR, 2004) (vid. pág. 29).
274. Neville, A. *Propriétés des bétons* 806pag (CRIB Paris, Eyrolles, 2000) (vid. pág. 64).
275. Neville, A. *Properties of concrete 4th Ed.* (Longman Group, London, 1995) (vid. págs. 24, 29-31, 96, 97, 105, 221).
276. Nezhad, H. B., Nariman-Zadeh, N. y Ranjbar, M. M. Multi Objective Optimization of Concrete Mix Design in Persian Gulf with Gmdh-type Neural Networks. *2nd International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, Portugal* (2010) (vid. págs. 112, 117).
277. Ni, H. G. y Wang, J. Z. Prediction of compressive strength of concrete by neural networks. *Cement and Concrete Research* **30**, 1245-1250 (2000) (vid. págs. 115, 255).
278. Nkem, E. A. e Ige, A. Optimal Polypropylene Fiber Content for Improved Compressive and Flexural Strength of Concrete. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* **11(3)**, 129-135 (2014) (vid. pág. 49).
279. Noguchi, T., Maruyama, I. y Kanematsu, M. Performance based design system for concrete mixture with multi-optimizing genetic algorithm. *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement, Durban* (2003) (vid. págs. 28, 112, 117).
280. Nold, P. y Löbe, R. Guter Mischer, guter Beton: der erste Schritt auf dem Weg zum Erfolg. *BWI* **3**, 54-77 (2004) (vid. pág. 6).
281. Nordenswan, E. y Kappi, A. A new online method of measuring the workability of scc. *Proceedings of the 5th International Symposium on Self-Compacting Concrete* (2007) (vid. pág. 58).

282. Odler, I. Hydration, setting and hardening of Portland Cement. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete, IV Edition*, 241-298 (1998) (vid. págs. 20, 21).
283. Oficemen. Anuario del sector cementero español 2013 (2014) (vid. págs. 8, 9).
284. Oficemen. Anuario del sector cementero español 2014 (2015) (vid. págs. 8, 9).
285. *Oficemen. Agrupación de fabricantes de cemento de España*. (2015).
286. Oh, J. W., Lee, G. W. y Lee, I. W. The proportion of Concrete Mixture using Artificial Neural Networks. *Seventh International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, Seoul* (1997) (vid. pág. 117).
287. O'Reilly, V. A. *Métodos para dosificar mezclas de hormigón* (INTEMAC, 1995) (vid. pág. 29).
288. Ortega, F. *Influencia de la compactación y conservación de probetas durante su permanencia en obra, así como su posterior refrentado en la resistencia a compresión del hormigón* Tesis doct. (Universidad Politécnica Madrid, España, 2010) (vid. págs. 8, 11).
289. Ortiz, J. A. *Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado* Tesis doct. (Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, 2005) (vid. págs. 35, 99-101, 198, 275, 276).
290. Pacheco, R. F. R., Calmon, J. L. y Zandonade, E. Statistical Analysis of Mechanical Properties of Concrete Produced at Batching Plants in Grande Vitoria (ES-BRAZIL). *49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO CBC* (2007) (vid. págs. 109, 215-217).
291. Pacios, A. y Colonna, I. *Comportamiento de la Compatibilidad Aditivo-Cemento para su Empleo en los Hormigones de Alta Resistencia* (Madrid, 1997) (vid. pág. 44).
292. Palmer, A. y Montaña, J. J. ¿Qué son las redes neuronales artificiales?. Aplicaciones realizadas en el ámbito de las adicciones. *ADICCIONES* **11(3)**, 243-255 (1999) (vid. págs. 243, 244, 253).
293. Parey, C. y Durrieu, J. Les centrales de béton routier-contrôle en cours de fabrication et contrôle a posteriori. *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* **30**, 137-158 (1968) (vid. pág. 57).

294. Parveen y Sharma, A. Structural Behaviour of Fibrous Concrete Using Polypropylene Fibres. *International Journal of Modern Engineering Research* **3**, 1279-1282 (2013) (vid. pág. 48).
295. Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F. y Hospitaler, A. On the Weibull cost estimation of building frames dedesign by simulated annealing. *Meccanica* **45**, 693-704 (2010) (vid. pág. 255).
296. Peng, J., Li, Z. y Ma, B. Neural Network Analysis of Chloride Diffusion in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* **14(4)**, 327-333 (2002) (vid. págs. 112, 117).
297. Perepérez, B. y Barberá, E. *Temperatura, madurez y resistencia del hormigón*. inf. téc. 55 (Cuadernos Intemac, 2004) (vid. pág. 108).
298. Piekniejszy, F. y Rybicki, L. Visual Comparison of Performance for Different Activation Functions in MLP. *IEEE* (2004) (vid. pág. 253).
299. Ponce, P. *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería* (ed. Marcombo) (Alfaomega, 2010) (vid. pág. 111).
300. Popovics, S. Analysis of Concrete Strength Versus Water-Cement Ratio Relationship. *ACI Materials Journal* **87(5)**, 517-529 (1990) (vid. págs. 104, 248).
301. Popovics, S. *Strength and related properties of concrete. A quantitative approach* (eds. Wiley, J. y Sons) (1998) (vid. págs. 30, 109).
302. Popovics, S. y Popovics, J. S. Computerization of the strength versus w/c relationship. *Concrete International* **17(4)**, 37-40 (1995) (vid. págs. 104, 279).
303. Pouliot, N., Sedran, T., de Larrard, F. y Marchand, J. Prédiction de la compacité des bétons compactés au rouleau à l'aide d'un modèle d'empilement granulaire. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* **233**, 23-36 (2001).
304. Powers, T. C. Physical Properties of Cement Paste. *Research Laboratories of the Portland Cement Association, Bulletin of Chemistry of Cement, Proceedings of the Fourth International Symposium, Washington D.C.* **2(154)** (ed. Chemistry of Cement, W. D. Proceedings of the Fourth International Symposium) 577-609 (1962) (vid. págs. 21, 22, 102).

305. Powers, T. C. y Brownyard, T. L. *Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste* (Lab. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S., 1946-1947) (vid. págs. 21, 22, 33).
306. Prasa, B. K. R., Eskandari, H. y Reddy, B. V. V. Prediction of compressive strength of SCC and HPC with hay volumen fly ash using ANN. *Constructing and Building Materials* **23**, 117-128 (2009) (vid. pág. 279).
307. Puertas, F. y Vázquez, T. Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes. *Materiales de construcción* **51(262)**, 53-61 (2001) (vid. pág. 41).
308. Puertas, F., Blanco-Varela, M. T. y Palomo, A. *Microestructura del hormigón. Influencia sobre sus propiedades* **398** (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja CSIC, Madrid, 1989) (vid. págs. 20, 21).
309. Pujadas, P. *Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas*. Tesis doct. (Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria de la Construcció., 2013) (vid. págs. 47, 48).
310. Raheman, A. y Modani, P. O. Prediction of Properties of Self Compacting Concrete Using Artificial Neural Network. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERIA)* **3(4)**, 333-339 (2013) (vid. pág. 118).
311. Ramachandran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C y Spiratos, N. *Superplasticizers: Properties and applications in concrete* (ed. Canada, C. E.) (1998) (vid. págs. 20, 41).
312. RC-08. *Instrucción para la recepción de cementos*. (ed. de Publicaciones. Ministerio de Fomento., C.) 142 pag (2008) (vid. pág. 20).
313. Rebut, P. *Centrales hormigoneras* (Editores Técnicos Asociados, S.A., 1975) (vid. pág. 59).
314. Reino, H. Experiencia de Holcim (España) con cementos con escorias de alto horno altamente adicionadas. *Patología de Cimentaciones, Estructuras y Hormigones*. 7 pag (2013) (vid. pág. 19).
315. Ribera, J. E. Puente de Valencia de Don Juan de hormigón armado sistema Ribera. *Arquitectura y Construcción* **XIV** (1910) (vid. pág. 5).
316. Richardson, A. E. Compressive strength of concrete with polypropylene fibre additions. *Structural Survey* **24**, 138-153 (2006) (vid. pág. 48).

317. Ripley, B. D. *Pattern recognition and neural networks* (Cambridge University Press, 1996) (vid. pág. 250).
318. Rixom, M. R. *ADITIVOS PARA LOS HORMIGONES. Composición, Propiedades y Empleo* (Editores Técnicos Asociados, Barcelona, 1984) (vid. pág. 41).
319. Roncero, J. *Effect of Superplasticizers on the Behavior of Concretes in the Fresh and Hardened States: Implications for High Performance Concrete* Tesis doct. (Esc. Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2000) (vid. pág. 44).
320. Rosi, P. *Les béton de fibres métalliques* (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, París, 1998) (vid. pág. 68).
321. Rougeron, P. y Aitcin, P. C. Optimization of the composition of high performance concrete. *Cement Concrete Aggregates* **16(2)**, 115-124 (1994) (vid. pág. 74).
322. Roussel, N. y Coussot, P. Ecoulements d'affaissement et d'étalement: modélisation, analyse et limites pratiques. *Revue Européenne de Génie Civil* **10(1)**, 25-44 (2006) (vid. pág. 83).
323. Roy, D. M. y Asaga, K. Rheological properties of cement mixes: III. The effects of mixing procedures on viscometric properties of mixes containing superplasticizers. *Cement and Concrete Research* **9** (1979) (vid. pág. 77).
324. Roy, D. M. y Gouda, G. R. Porosity-Strength Relation in Cementitious Materials with Very High Strength. *Journal of the American Ceramic Society* **56(10)**, 549-550 (1973) (vid. pág. 21).
325. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. y Williams, R. J. *Learning internal representations by error propagation* (Cambridge (USA): MIT Press, 1986) (vid. pág. 247).
326. Rzepoluck, E. J. *Neural network data analysis using Simulnet* (Springer-Verlag: New York, 1998) (vid. págs. 244, 245).
327. Salim, T. Y., Majid, A. T. y Abdulkareem, O. M. Design of concrete mixes using Artificial Neural Networks. *The 2nd Regional Conference fo Engineering Science*, 449-459 (2010) (vid. pág. 117).
328. Sarle, W. S. Neural networks and statistical models. *Proceedings of the 19th Annual SAS Users Group International Conference*, 1538-1550 (1994) (vid. pág. 244).

329. Scandiuzzi, L. y Andriolo, F. R. *Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios* (Sao Paulo: Pini, 1986) (vid. pág. 64).
330. Schartzentruber, A y Catherine, C. La méthode du Mortier de Béton Equivalent (MBE): Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Materials and Structures* **33(8)**, 475-482 (2008) (vid. pág. 74).
331. Schiller, K. K. Porosity and Strength of Brittle Solids (with Particular Reference to Gypsum). *Mechanical Properties of Non-metallic Brittle Materials*, W. H. Walton (Ed.), Interscience Publishers, New York, 35-49 (1958) (vid. pág. 104).
332. Sedran, T. Effet de l'air entrainé sur le comportement rhéologique du béton frais. *LCPC* (2005) (vid. pág. 79).
333. Sedran, T. *Rhéologie et rhéométrie des bétons fluides. Application à la formulation des bétons autonivelants* Tesis doct. (Ecole nationale des ponts et chaussées, 1999) (vid. págs. 70, 79, 82).
334. Sedran, T. y de Larrard, F. *RENE-LCPC: Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil*. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. (1994) (vid. pág. 70).
335. Serna, P. *Étude de la contribution des fibres métalliques à l'amélioration du comportement du béton au cisaillement* Tesis doct. (École National des Ponts et Chaussées, 1984) (vid. pág. 46).
336. Setién, J., Carrascal, I. A., Figueroa, J. F. y Polanco, J. A. Aplicación de una red neuronal artificial a la dosificación de hormigones premezclados. *Materiales de construcción* **53(270)**, 5-19 (2003) (vid. pág. 113).
337. Shamsad, A. y Saeid, A. A. A Statistical Approach to Optimizing Concrete Mixture Design. *The Scientific World Journal*. 7 pag (2014) (vid. pág. 113).
338. Shaw, P. *Multivariate statistics for the environmental sciences* (ed. Hoddeer-Arnold, L.) (2003) (vid. pág. 238).
339. Shetty, M. S. *Concrete Technology Theory and Practice*. (New Delhi, 2006) (vid. pág. 109).
340. Shibata, K. e Ikeda, Y. Effect of number of hidden neurons on learning in large-scale layered neural networks. *ICROS-SICE International Joint Conference*, 5008-5013 (2009) (vid. pág. 248).

341. Skalny, J. y Mindess, S. *Materials Science of Concrete V* (The American Ceramic Society, Ohio, 1998) (vid. pág. 29).
342. Soler, M. La retracción por secado del hormigón. Cálculo. Figuración. *Construction Chemicals*, 19-26 (2009) (vid. pág. 151).
343. Soroka, I. *Concrete in Hot Environments* (ed. E. & F. N. Spon, L.) (1993) (vid. págs. 97, 98, 101).
344. Soroka, I. y Ravina, D. Hot weather concreting with admixtures. *Cement and Concrete composites* **20**, 129-136 (1998) (vid. pág. 101).
345. Soroushian, P., Mirza, F. y Alhozaimy, A. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal* **92(5)**, 553-560 (1995) (vid. pág. 47).
346. Stewart, D. A. *The Design and Placing of High Quality Concrete* (London: E. & F. N. Spon Limited, 1951) (vid. pág. 68).
347. Stock, A. F., Hannant, D. J. y Williams, R. I. T. The Effect of Aggregate Concentration upon the Strength and Modulus of Elasticity of Concrete. *Magazine of Concrete Research* **31** (1979) (vid. págs. 30, 32).
348. Supriya, K. y Kishor, S. K. Concrete Compressive Strength Prediction by ANN. *Journal of Civil Engineering Technology and Research* **2(1)**, 95-102 (2014) (vid. págs. 115, 255).
349. Suryadi, A., Triwulan y Aji, P. Predicting the initial setting time of self-compacting concrete using Artificial Neural Networks with the various of learning rate coefficient. *Journal of Applied Science Research* **7(3)**, 314-320 (2011) (vid. pág. 112).
350. Swamy, R. *SFRC for bridge deck and building floor applications* (Swedent Join Seminar (NSF-STU), 1985) (vid. pág. 46).
351. Tabares, H., Branch, J. y Valencia, J. Generación dinámica de la topología de una red neuronal artificial del tipo Perceptrón multicapa. *Revista Facultad de Ingeniería* **38**, 146-162 (2006) (vid. págs. 247, 248).
352. Tam, V. W. Y., Gao, X. F., Tam, C. M. y Chan, C. H. New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials* **22**, 364-369 (2008) (vid. pág. 35).

353. Tamhane, A. Multiple Comparisons in Model I One-Way ANOVA With Unequal Variances. *Communications in Statistics* **A6(1)**, 15-32 (1977) (vid. pág. 236).
354. Tattersall, G. *Workability and Quality Control of Concrete* (E & FN Spon, London, 1991) (vid. págs. 76, 88).
355. Tattersall, G. y Banfill, P. *The rheology of fresh concrete* ISBN: 9780273085584 (Pitman Advanced Publishing Program, 1983) (vid. pág. 77).
356. Taylor, H. F. W. *Cement Chemistry* (London Academic Press, 1990) (vid. pág. 33).
357. Taylor, H. F. W. *La química de los cementos* (ed. Urmo, E. Bilbao) (1978) (vid. pág. 18).
358. Tegguer, A. D. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Coonstruction and Building Materials* **27**, 112-116 (2012) (vid. pág. 35).
359. Teillet, R., Bruneau, S. y Charonnat, Y. Suivi et contrôle de la fabrication des mélanges - une nouvelle jeunesse pour le wattmètre différentiel. *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées* **174**, 5-16 (1991) (vid. pág. 57).
360. Tesfamariam, S. y Najjaran, H. Adaptive network-fuzzy inference to estimate concrete strength using mix design. *Journal of Materials in Civil Engineering* **19(7)**, 550-560 (2007) (vid. pág. 112).
361. Torralles-Carbonari, B., Gettu, R., Agulló, L., Aguado, A. y Aceña, V. A. Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete. *4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete* **5(2)** (1996) (vid. págs. 25, 43).
362. Toutou, Z. y Roussel, N. Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale. *Materials and Structures* **39(2)**, 189-199 (2006) (vid. pág. 32).
363. Uchikawa, H., Hanehara, S., Shirasaka, T. y Sawaki, D. Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behaviour of admixture and fluid and setting of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research* **22**, 1115-1129 (1992) (vid. pág. 41).
364. Uchikawa, H., Sawaki, D. y Hanehara, S. Influence of kind and added timing organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research* **25(2)**, 353-364 (1995) (vid. pág. 41).

365. UEPG. Union Européenne des Producteurs de Granulats.
366. Ukrainczyk, N, Banjad, P. I. y Bolf, N. Evaluating rebar corrosion damage in RCstructures exposed to marine environment using Neural Networks. *Civil Engineering and Environment Systems* **24(1)**, 15-32 (2007) (vid. págs. 112, 117).
367. UNE-EN-ISO/TEC17043: *Evaluación de la conformidad. Requisitos generales para los ensayos de aptitud (ISO/TEC17043:2010)* 17/11/2010. 50pag (AENOR, 2010) (vid. pág. 155).
368. UNE-EN1008: *Agua de amasado para hormigón. Especificaciones para la toma de muestras, los ensayos de evaluación y aptitud al uso incluyendo las aagua de lavado de las instalaciones de reciclado de la industria de hormigón así como el agua de amasado para hormigón.* 17/10/2007. 20pag (AENOR, 2007) (vid. pág. 133).
369. UNE-EN1097-2: *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación.* 22/09/2010. 38pag (AENOR, 2010) (vid. pág. 140).
370. UNE-EN1097-5: *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 5: Determinación del contenido en agua por secado en estufa.* 06/09/2012. 14pag (AENOR, 2009) (vid. pág. 139).
371. UNE-EN1097-6: *Ensayos para determinación las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6, Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.* 07/05/2014. 54pag (AENOR, 2014) (vid. pág. 138).
372. UNE-EN12350-1: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras* 11/11/2009. 10pag (AENOR, 2009) (vid. pág. 155).
373. UNE-EN12350-2: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.* 11/11/2009. 12pag (AENOR, 2009) (vid. págs. 80, 130, 152, 155).
374. UNE-EN12350-3: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 3: Ensayo Vebe.* 18/11/2009. 12pag (AENOR, 2009) (vid. pág. 83).
375. UNE-EN12350-4: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 4: Grado de compactibilidad.* 11/11/2009. 10pag (AENOR, 2006) (vid. pág. 86).
376. UNE-EN12350-5: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas.* 18/11/2009. 14pag (AENOR, 2009) (vid. pág. 87).

377. UNE-EN12350-6: *Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Determinación de la densidad*. 18/11/2009. 14pag (AENOR, 2009) (vid. pág. 153).
378. UNE-EN12390-1. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes*. 06/05/2015. 16pag (AENOR, 2013) (vid. pág. 150).
379. UNE-EN12390-2: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia*. 18/11/2009. 12pag (AENOR, 2009) (vid. págs. 101, 130, 150, 155).
380. UNE-EN12390-3: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*. 16/09/2009. 22pag (AENOR, 2009) (vid. págs. 153, 155, 156).
381. UNE-EN12390-7: *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*. 14/10/2009. 14pag (AENOR, 2009) (vid. págs. 153, 155).
382. UNE-EN12620:2003+A1: *Áridos para hormigón*. 27/05/2009. 60pag (AENOR, 2009) (vid. págs. 24, 30, 133).
383. UNE-EN14889-1: *Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definiciones, especificaciones y conformidad*. 09/01/2008. 26pag (AENOR, 2008) (vid. pág. 45).
384. UNE-EN14889-2: *Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad*. 13/02/2008. 24pag (AENOR, 2008) (vid. págs. 45, 48).
385. UNE-EN1744-1:2010+A1: *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico* 20/01/2015. 64pag (AENOR, 2013) (vid. págs. 139, 140).
386. UNE-EN196-1: *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas*. 16/11/2005. 36pag (AENOR, 2005) (vid. págs. 125, 137).
387. UNE-EN196-2: *Métodos de ensayo de cementos Parte 2: Análisis químico de cementos*. 04/06/2014. 78pag (AENOR, 2014) (vid. pág. 138).
388. UNE-EN196-3: *Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen*. 04/11/2009. 16pag (AENOR, 2005) (vid. pág. 138).

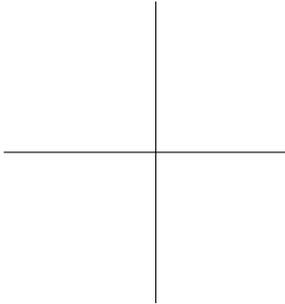
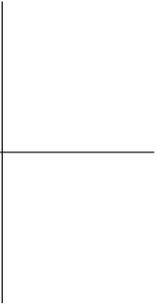
389. UNE-EN197-1: *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*. 28/12/2011. 40pag (AENOR, 2011) (vid. págs. 18, 133, 164, 165).
390. UNE-EN206-1: *Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad*. 27/02/2008. 92pag (AENOR, 2008) (vid. págs. 51-53, 84, 86, 88, 129, 132, 133, 136, 145).
391. UNE-EN445: *Lechadas para tendones de pretensado. Métodos de ensayo*. 26/02/2009. 18pag (AENOR, 2009) (vid. pág. 43).
392. UNE-EN480-10: *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 10: Determinación del contenido de cloruros solubles en agua*. 10/12/2014. 10pag (AENOR, 2010) (vid. pág. 141).
393. UNE-EN480-12: *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 12: Determinación del contenido de alcalinos en los aditivos*. 07/05/2015. 12pag (AENOR, 2006) (vid. pág. 141).
394. UNE-EN480-8: *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo. Parte 8: Determinación del extracto seco convencional*. 05/06/2013. 10pag (AENOR, 2013) (vid. pág. 141).
395. UNE-EN933-1: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas: Método del tamizado*. 11/07/2012. 20pag (AENOR, 2012) (vid. págs. 30, 138).
396. UNE-EN933-2: *Modificación: Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas: Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas*. 30/04/1996. 8pag (AENOR, 1996) (vid. pág. 30).
397. UNE-EN933-3: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas*. 21/03/2012. 14pag (AENOR, 2012) (vid. págs. 29, 140).
398. UNE-EN933-4: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma*. 06/09/2012. 14pag (AENOR, 2008) (vid. pág. 29).
399. UNE-EN933-8:2012+A1: *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena*. 04/11/2015. 24pag (AENOR, 2015) (vid. pág. 139).

400. UNE-EN934-2:2010+A1: *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado*. 01/01/2014. 28pag (AENOR, 2012) (vid. págs. 39, 41, 133, 141).
401. UNE:66543-1IN. *UNE 66543-1 IN: ensayos de aptitud por intercomparación de laboratorios. Parte 1: Desarrollo y aplicación de programas de ensayos de aptitud* (AENOR, 1999) (vid. pág. 155).
402. UNE:66543-2IN. *UNE 66543-2 IN : Ensayos de aptitud por intercomparación de laboratorios parte 2* (AENOR, 1999) (vid. pág. 155).
403. UNE7050-3: *Tamices y tamizado de ensayo. Parte 3: Exigencias técnicas y verificación de los tamices de ensayo de tela metálica*. 06/0572010. 12pag (AENOR, 1997) (vid. págs. 139, 140).
404. UNE7133:1958. *Determinación de terrones de arcilla en áridos para la fabricación de morteros y hormigones* 15/02/1958. 2pag (Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1958) (vid. págs. 139, 140).
405. UNE7134: *Determinación de partículas blandas en áridos gruesos para hormigones*. 15/02/1958. 2pag (Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, 1958) (vid. pág. 140).
406. UNE80122: *Métodos de ensayo de cementos. Determinación de la finura*. (AENOR, 1991) (vid. pág. 138).
407. UNE83226: *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación de la densidad aparente de los aditivos sólidos*. 27/07/2005. 8pag (AENOR, 2005) (vid. pág. 141).
408. UNE83227: *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Determinación del pH*. 30/03/2005. 10pag (AENOR, 2005) (vid. pág. 141).
409. Vahid, K. A. y Mohammad, T. Prediction of 28 day compressive strength of concrete on the third day using Artificial Neural Networks. *International Journal of Engineering (IJE)* **3(6)**, 565-576 (2009) (vid. pág. 113).
410. Vaquero, J. J. Hormigonado en tiempo caluroso. *Cemento-Hormigón* **853**, 36-51 (2003) (vid. págs. 98, 99, 101).
411. Verbeck, G. y Helmuth, R. Structures and Physical Properties of Cement Pastes. *Proceedings, Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, The Cement Association of Japan III*, 9 (1968) (vid. pág. 96).

412. Vikan, H., Jutnes, H., Winnefeld, F. y Figi, R. Correlating cement characteristics with rheology of paste. *Cement and Concrete Research* **37**, 1502-1511 (2007) (vid. pág. 24).
413. Vilanova, A. *Influencia de la dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante*. Tesis doct. (ETSICCyP, UPM, 2009) (vid. págs. 208, 278).
414. Vu, X. H., Laurent, D. y Yann, M. Effect of coarse aggregate size and cement paste volume on concrete behavior under high triaxial compression loading. *Construction and Building Materials* **25** (2011) (vid. pág. 28).
415. Vázquez-Herrero, C., Martínez-Lage, I. y Sánchez-Tembleque. A new procedure to ensure structural safety based on the maturity method and limit state theory. *Construction and Building Materials* **35**, 393-398 (2012) (vid. pág. 108).
416. Wackerly, D. D., Mendenhall, W. y Scheaffer, R. L. *Mathematical Statistics with Applications* (7th edition Thomson Higher Education, Belmont, CA, USA, 2008) (vid. pág. 228).
417. Waddell, J. J. y Dobrowolsky, J. A. *Manual de la Construcción con Hormigón* (Mc Graw-Hill, 1997) (vid. pág. 108).
418. Walker, S. y Bloem, D. L. Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete. *Journal of the American Concrete Institute* **32(3)**, 283-298 (1960) (vid. págs. 31, 72).
419. Walkers, S. y Proudley, C. E. *Effects of Flat Particle on Concrete Making Properties of Gravel* (ASTM Proceedings, 1929) (vid. pág. 29).
420. Wallevik, O. H. *Rheology of Fresh Concrete* (Advances in Cement Manufacture & Use, Eng. Found. Conf. Potosi, MI, 1988) (vid. pág. 89).
421. Wang, J. Z., Wang, X. J. y Ni, H. G. An algorithm of Neural Network and application to data processing in concrete engineering. *Informática* **14(1)**, 95-110 (2003) (vid. pág. 117).
422. Wankhade, M. W. y Kambekar, A. R. Prediction of Compressive Strength of Concrete using Artificial Neural Network. *International Journal of Scientific Research and Reviews* **2**, 11-26 (2013) (vid. págs. 114, 255).
423. West, L. y Fulton, F. *Design of Trial Mixes* (1961) (vid. pág. 70).

424. Wong, H. S. y Buenfeld, N. R. Determinating the water-cement ratio, cement content, water content and degree of hydration of hardened cement paste: method development and validation on paste samples. *Cement and Concrete Research* **39**, 957-965 (2009) (vid. pág. 23).
425. Yasarer, H. I. *Characterizing the permeability of concrete mixes used in transportation application: a neuronet approach* Tesis doct. (Kansa State University, Manhattan, KA, USA, 2010) (vid. pág. 117).
426. Yazici, S. *Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of sfrc* (2007) (vid. pág. 46).
427. Yeh, I. C. Analysis of strength of concrete using design of experiments and Neural Networks. *Journal of Materials and Civil Engineering* **18(4)**, 597-604 (2006) (vid. pág. 117).
428. Yeh, I. C. Design of high-performance concrete mixture using neural networks and nonlinear programming (on line). *Journal of Computing in Civil Engineering* **13(1)**, 36-42 (1999) (vid. págs. 112, 117).
429. Yeh, I. C. Exploring Concrete Slump Model Using Artificial Neural Networks. *Journal of Computing in Civil Engineering @ ASCE* **20**, 217-221 (2006) (vid. pág. 115).
430. Yeh, I. C. Modeling of strength of high-performance concrete using Artificial Neural Networks. *Cement and Concrete Research* **28(12)**, 1797-1808 (1998) (vid. págs. 116, 279).
431. Yeh, I. C. Optimization of concrete mix proportioning using a flattened simplex-centroid mixture design and neural networks. *Engineering with Computers* **25(2)**, 179-190 (2009) (vid. pág. 117).
432. Yepes, V., Diaz, J., Gonzalez-Vidosa, F. y Alcala, J. Caracterización Estadística de Tableros Pretensados para Carreteras. *Revista de la Construcción* **8**, 95-109 (2009) (vid. págs. 196, 203).
433. Yohe, P. P. Consistency controlling mechanism for concrete mixers. *Technical report, United State Patent Office*. (1933) (vid. pág. 57).
434. Zain, M. F. M., Suhad, M., Sopian, K., Jamil, M. y Che-Ani, A. I. Mathematical Regression Model for the Prediction of Concrete Strength. *MATHEMATICAL METHODS, COMPUTATIONAL TECHNIQUES, NON-LINEAR SYSTEMS, INTELLIGENT SYSTEMS*, 396-402 (2011) (vid. pág. 113).

435. Zain, M. F. M., Suhad, M. A., Roszilah, H. y Jamil, M. Potential for Utilising Mix Properties to Predict Strength at Different Ages. *Journal of Applied Sciences*, 2831-2838 (2010) (vid. pág. 113).
436. Zerbino, R., Barragçan, B., García, T., Agulló, L. y Gettu, R. Efectos de la temperatura sobre los parámetros reológicos y propiedades ingenieriles del hormigón autocompactante, Ed. por: B. Barragan, A. Pacios y P. Serna. *1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante (Valencia, España)*, 317-326 (2008) (vid. pág. 77).
437. Özgan, E. y Öztürk, A. Optimization of the hardened concrete properties with GA and LP. *Journal of Applied Sciences* **7(24)**, 3918-3926 (2007) (vid. págs. 112, 117).
438. Zivkovic, S. D. The effect of increased temperature on fresh and hardned concrete. *Proceedings of the third international RILEM conference*, 3-12 (1992) (vid. pág. 97).
439. Özturan, M., Kutlu, B. y Özturan, T. Comparison of concrete strength prediction techniques with artificial neural network approach. *Building Research Journal* **56(1)**, 23-36 (2008) (vid. págs. 114, 248, 279).



ANEXO A

BASES DE DATOS

ANEXO A. BASES DE DATOS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	IF	FechaFabPro	TipoHor	CemTeo	TipoCem	ResistVerdCem	ConA	t r CA	Tamb	Thorm	HoraFabPro
2	8525-1	29.11.2012	HA-25/B/20/IIA	280	21	58,0	9	60	16	18	11:44
3	8526-1	29.11.2012	HA-25/B/20/IIA	280	21	58,0	10	70	16	18	12:42
4	8527-1	29.11.2012	HA-25/B/20/IIA	280	21	58,0	8	70	16	18	16:14
5	8528-1	30.11.2012	HA-25/B/24/IIA	270	21	58,0	8	80	16	17	15:47
6	8529-1	13.12.2012	HA-25/B/20/IIA	270	21	58,0	7	50	12	16	10:55
7	8530-1	21.12.2012	HA-30/B/20/IIA	310	21	58,0	7	120	14	16	9:32
8	8531-1	05.01.2013	HA-30/B/20/IIA	305	21	58,0	8	80	11	15	9:50
9	8532-1	05.01.2013	HA-30/B/20/IIA	305	21	58,0	7	80	11	15	10:08
10	8533-1	16.01.2013	HA-30/B/20/IIA	305	21	58,0	8	80	10	15	9:36
11	8534-1	16.01.2013	HA-30/B/20/IIA	305	21	58,0	7	80	10	15	10:02
12	8535-1	22.01.2013	HA-30/B/20/IIA	305	21	58,0	8	85	12	16	16:38
13	8536-1	05.02.2013	HA-25/B/20/IIA	265	15	56,6	8	60	8	12	8:47
14	8537-1	12.02.2013	HA-25/B/20/IIA	265	21	56,1	8	80	8	14	9:43
15	8540-1	09.04.2013	HA-25/B/20/IIA	270	21	56,6	8	60	21	18	13:18
16	8542-1	14.06.2013	HA-25/B/20/IIA	280	21	53,8	7	45	26	24	11:54
17	8543-1	14.06.2013	HA-25/B/20/IIA	280	15	56,6	8	45	26	24	13:30
18	8545-1	23.07.2013	HA-25/B/16/IIA	295	15	56,6	8	60	30	28	15:55
19	8546-1	02.08.2013	HA-25/B/20/IIA	290	21	52,8	8	60	31	27	17:14
20	8547-1	20.08.2013	HA-25/B/20/IIA	290	15	56,6	7	90	32	28	11:30
21	8548-1	20.08.2013	HA-25/B/20/IIA	290	24	57,0	8	70	32	28	13:42
22	8549-1	03.10.2013	HA-25/B/20/IIA	285	15	56,6	7	50	24	25	8:15
23	8550-1	03.10.2013	HA-25/B/20/IIA	285	15	56,6	7	50	24	25	8:57
24	8551-1	15.10.2013	HA-25/B/20/IIA	285	21	55,8	7	60	19	21	8:54
25	8553-1	31.12.2013	HA-25/B/20/IIA	265	21	55,5	8	85	10	14	11:18
26	8554-1	24.06.2014	HA-25/B/16/IIA	295	21	52,6	8	70	19	22	9:30
27	8555-1	15.09.2014	HA-25/B/20/IIA	285	21	52,8	8	80	23	23	8:49
28	8556-1	16.09.2014	HA-25/B/16/IIA	295	21	52,8	9	85	30	28	15:49
29	8557-1	22.09.2014	HM-20/B/20/I	240	21	52,8	8	90	22	24	11:31
30	8558-1	23.09.2014	HA-25/B/20/IIA	275	21	52,8	8	30	26	26	12:17
31	8559-1	24.09.2014	HA-25/B/16/IIA	295	21	52,8	8	70	26	26	16:53
32	8560-1	21.10.2014	HA-25/B/20/IIA	285	15	57,2	7	60	13	21	8:53
33	8561-1	10.11.2014	HA-25/B/20/IIA	280	21	51,5	8	90	22	21	12:54
34	8562-1	20.11.2014	HA-40/B/20/IIA	390	15	57,2	7	30	20	22	13:27
35	8563-1	03.12.2014	HA-40/B/20/IIA	390	15	57,2	8	30	19	22	11:43
36	8564-1	03.12.2014	HA-25/B/20/IIA	275	21	55,5	8	60	19	22	17:29

L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
TipAd	%AdiTeo	%AdiReal	DiasEP1	DiasEP2	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	fc28	fc28	fc7	fc7
4	0,48	0,480	29	7	12768	12781	12764	12785	40,4	41,1	28,9	30,2
2	0,48	0,484	29	7	12746	12733	12719	12728	41,3	41,5	30,9	30,1
7	0,48	0,480	29	7	12820	12836	12831	12846	36,1	36,2	28,4	28,3
2	0,48	0,482	28	7	12818	12824	12820	12837	37,9	37,5	27,2	27,4
2	0,46	0,464	28	7	12830	12856	12850	12841	44,8	43,6	30,5	31,2
2	0,48	0,484	31	7	12848	12860	12848	12860	41,5	42,9	30,1	30,3
2	0,49	0,491	28	6	12830	12824	12824	12836	41,1	41,2	29,8	29,9
2	0,49	0,492	28	6	12861	12849	12848	12860	39,1	39,6	30,1	29,7
2	0,49	0,491	28	7	12838	12847	12838	12846	47,3	46,7	33,6	32,1
2	0,49	0,493	28	7	12860	12851	12862	12870	47,5	47,8	36,9	36
2	0,49	0,497	28	7	12860	12854	12839	12850	45,6	45,7	32,6	33
2	0,47	0,471	31	7	12846	12829	12841	12826	34,4	33,5	26,2	26,6
2	0,47	0,472	28	7	12846	12830	12820	12840	33,6	33,7	29	30
2	0,48	0,483	28	7	12846	12834	12831	12842	33,8	33,6	27,8	28,2
2	0,50	0,501	28	7	12864	12853	12847	12862	35,6	35,4	31,8	31,9
2	0,50	0,500	28	7	12818	12830	12828	12814	36,5	36,4	31,4	31,1
2	0,50	0,508	28	7	12828	12846	12846	12830	31,5	32,9	25	24,6
2	0,50	0,500	33	7	12836	12820	12840	12831	34,1	34,7	28,7	28,9
2	0,50	0,499	34	8	12849	12860	12850	12863	32,1	32,2	24,1	24,5
2	0,50	0,499	34	8	12819	12831	12829	12841	35,1	35,3	28,1	27,1
2	0,51	0,509	33	7	12846	12851	12849	12863	34,2	34,4	26,8	26,9
16	0,51	0,510	33	7	12863	12850	12835	12844	35,5	35,1	27,9	28,3
16	0,50	0,500	28	7	12849	12856	12840	12861	35,5	36,5	33,5	33,1
2	0,47	0,471	28	9	12848	12832	12849	12836	40,4	40,2	33,8	33,4
2	0,49	0,490	31	7	12848	12830	12820	12812	34,1	34,2	25,9	26,4
2	0,51	0,508	28	7	12846	12853	12820	12834	31,5	31,1	26,2	26,4
2	0,51	0,508	28	7	12786	12770	12789	12770	30,1	30,4	25,3	24,9
2	0,50	0,501	28	9	12788	12770	12784	12768	25,5	25,5	21,6	21,8
2	0,51	0,507	28	7	12826	12834	12840	12831	32,4	32,2	25,7	25,3
2	0,51	0,510	28	7	12846	12830	12822	12836	31,1	32,1	25,7	25,9
2	0,51	0,505	34	7	12850	12864	12860	12851	38,1	37,5	29,8	28,9
2	0,48	0,487	28	7	12828	12836	12826	12838	32,6	32,8	30	27,6
2	0,50	0,500	39	7	12874	12860	12868	12854	46,5	46,3	36,3	36,1
2	0,50	0,500	28	7	12878	12864	12866	12850	48,2	48,6	43,3	43,1
2	0,47	0,470	28	7	12840	12824	12821	12834	33,7	33,3	27,7	27,5

ANEXO A. BASES DE DATOS

Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
Fib	Kg7 G20/32	Kg6 G16/25	Kg5 G10/16	Kg4 G6/12	Kg3 G4/8	Kg2 AL0/4	Kg1 AT0/4	Kg0 Cem	Kg Total
0	0,00	349,71	304,00	189,43	150,71	423,43	443,29	280,14	2140,71
0	0,00	349,33	292,67	190,44	149,78	420,78	438,00	280,11	2121,11
0	0,00	351,22	303,22	188,67	149,56	415,11	440,67	280,22	2128,67
0	219,10	310,50	235,50	108,00	82,80	428,80	438,50	263,20	2086,40
0	0,00	350,13	304,88	189,13	150,38	421,88	448,63	269,88	2134,88
0	0,00	350,71	282,86	190,00	150,57	411,86	419,14	309,57	2114,71
0	0,00	353,44	309,33	190,15	150,15	408,92	424,72	305,03	2141,74
0	0,00	352,21	293,64	189,03	149,85	413,23	424,51	305,23	2127,69
0	0,00	348,82	304,00	190,15	150,67	412,51	425,54	305,44	2137,13
0	0,00	350,97	298,87	188,72	150,15	412,92	422,26	304,72	2128,62
0	0,00	350,22	337,78	194,67	149,78	397,33	428,00	302,22	2160,00
0	0,00	344,00	310,24	190,40	149,92	408,32	453,28	265,76	2121,92
0	0,00	351,36	299,84	192,16	149,44	427,36	454,08	265,60	2139,84
0	0,00	356,00	307,06	179,06	150,12	420,94	451,06	270,12	2134,35
0	0,00	353,90	299,50	196,20	149,90	437,50	408,90	279,90	2125,80
0	0,00	344,40	300,60	185,40	149,90	435,70	409,40	279,90	2105,30
0	0,00	0,00	421,92	312,96	229,44	412,64	459,52	294,72	2131,20
0	0,00	344,60	299,70	190,00	149,70	449,80	410,50	290,00	2134,30
0	0,00	354,87	297,23	190,26	150,05	424,82	407,49	290,26	2114,97
0	0,00	347,08	297,95	198,36	150,56	426,46	410,46	290,26	2121,13
0	0,00	349,25	300,13	190,25	150,00	470,50	377,50	285,13	2122,75
0	0,00	348,00	301,38	189,50	149,88	469,88	378,25	284,63	2121,50
0	0,00	349,22	300,56	189,89	149,89	491,44	379,67	285,33	2146,00
0	0,00	351,25	300,13	190,75	149,63	466,13	389,88	264,63	2112,38
0	0,00	0,00	439,50	326,00	239,00	429,83	478,67	295,00	2208,00
0	0,00	350,40	304,40	194,70	150,40	502,20	324,50	285,00	2111,60
0	0,00	0,00	424,32	309,28	230,24	487,04	383,52	294,88	2129,28
0	0,00	289,63	297,38	229,38	135,25	537,75	376,38	239,13	2104,88
0	0,00	361,75	319,88	215,00	160,25	545,13	343,25	275,25	2220,50
0	0,00	0,00	427,83	313,74	229,74	481,57	368,00	294,26	2115,13
0	0,00	348,95	306,86	192,76	149,90	502,10	324,00	284,95	2109,52
0	0,00	352,36	313,09	195,64	153,09	513,45	328,36	280,73	2136,73
0	0,00	338,90	299,40	170,00	130,00	446,70	250,00	389,70	2024,70
0	0,00	331,18	296,12	164,24	124,71	450,12	240,12	390,35	1996,82
0	0,00	361,75	319,88	215,00	160,25	545,13	343,25	275,25	2220,50

AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU
tb7	tb6	tb5	tb4	tb3	tb2	tb1	tb0	Dmax	mg7	mg6	mg5	mg4
0	0,163	0,142	0,088	0,070	0,198	0,207	0,131	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,138	0,090	0,071	0,198	0,206	0,132	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,142	0,089	0,070	0,195	0,207	0,132	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0,105	0,149	0,113	0,052	0,040	0,206	0,210	0,126	31,5	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,164	0,143	0,089	0,070	0,198	0,210	0,126	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,166	0,134	0,090	0,071	0,195	0,198	0,146	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,144	0,089	0,070	0,191	0,198	0,142	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,166	0,138	0,089	0,070	0,194	0,200	0,143	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,163	0,142	0,089	0,070	0,193	0,199	0,143	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,140	0,089	0,071	0,194	0,198	0,143	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,162	0,156	0,090	0,069	0,184	0,198	0,140	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,162	0,146	0,090	0,071	0,192	0,214	0,125	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,164	0,140	0,090	0,070	0,200	0,212	0,124	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,167	0,144	0,084	0,070	0,197	0,211	0,127	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,166	0,141	0,092	0,071	0,206	0,192	0,132	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,164	0,143	0,088	0,071	0,207	0,194	0,133	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,000	0,198	0,147	0,108	0,194	0,216	0,138	16	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,161	0,140	0,089	0,070	0,211	0,192	0,136	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,168	0,141	0,090	0,071	0,201	0,193	0,137	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,164	0,140	0,094	0,071	0,201	0,194	0,137	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,141	0,090	0,071	0,222	0,178	0,134	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,164	0,142	0,089	0,071	0,221	0,178	0,134	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,163	0,140	0,088	0,070	0,229	0,177	0,133	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,166	0,142	0,090	0,071	0,221	0,185	0,125	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,000	0,199	0,148	0,108	0,195	0,217	0,134	16	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,166	0,144	0,092	0,071	0,238	0,154	0,135	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,000	0,199	0,145	0,108	0,229	0,180	0,138	16	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,138	0,141	0,109	0,064	0,255	0,179	0,114	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,163	0,144	0,097	0,072	0,245	0,155	0,124	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,000	0,202	0,148	0,109	0,228	0,174	0,139	16	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,145	0,091	0,071	0,238	0,154	0,135	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,165	0,147	0,092	0,072	0,240	0,154	0,131	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,167	0,148	0,084	0,064	0,221	0,123	0,192	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,166	0,148	0,082	0,062	0,225	0,120	0,195	25	8,00	7,89	7,07	6,88
0	0,163	0,144	0,097	0,072	0,245	0,155	0,124	25	8,00	7,89	7,07	6,88

ANEXO A. BASES DE DATOS

AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF
mg3	mg2	mg1	t7	t6	t5	t4	t3	t2	t1	MG
5,99	3,19	3,50	0	0,188	0,163	0,102	0,081	0,228	0,238	5,384
5,99	3,19	3,50	0	0,190	0,159	0,103	0,081	0,229	0,238	5,382
5,99	3,19	3,50	0	0,190	0,164	0,102	0,081	0,225	0,238	5,397
5,99	3,19	3,50	0,120	0,170	0,129	0,059	0,045	0,235	0,241	5,490
5,99	3,33	2,94	0	0,188	0,163	0,101	0,081	0,226	0,241	5,278
5,99	3,33	2,94	0	0,194	0,157	0,105	0,083	0,228	0,232	5,307
5,99	3,33	2,94	0	0,192	0,168	0,104	0,082	0,223	0,231	5,332
5,99	3,33	2,94	0	0,193	0,161	0,104	0,082	0,227	0,233	5,310
5,99	3,25	2,94	0	0,190	0,166	0,104	0,082	0,225	0,232	5,298
5,99	3,25	2,94	0	0,192	0,164	0,103	0,082	0,226	0,232	5,298
5,99	3,25	2,94	0	0,189	0,182	0,105	0,081	0,214	0,230	5,349
5,99	3,41	2,18	0	0,185	0,167	0,103	0,081	0,220	0,244	5,116
5,99	3,41	2,18	0	0,187	0,160	0,103	0,080	0,228	0,242	5,099
5,99	3,09	3,15	0	0,191	0,165	0,096	0,081	0,226	0,242	5,274
5,99	3,04	2,99	0	0,192	0,162	0,106	0,081	0,237	0,222	5,260
5,99	3,04	2,99	0	0,189	0,165	0,102	0,082	0,239	0,224	5,240
5,99	3,16	3,37	0	0,000	0,230	0,170	0,125	0,225	0,250	5,098
5,99	3,16	3,37	0	0,187	0,163	0,103	0,081	0,244	0,223	5,339
5,99	3,08	3,13	0	0,194	0,163	0,104	0,082	0,233	0,223	5,312
5,99	3,08	3,13	0	0,190	0,163	0,108	0,082	0,233	0,224	5,303
5,99	3,59	3,13	0	0,190	0,163	0,104	0,082	0,256	0,205	5,418
5,99	3,59	3,13	0	0,189	0,164	0,103	0,082	0,256	0,206	5,416
5,99	3,59	3,13	0	0,188	0,162	0,102	0,081	0,264	0,204	5,394
5,99	3,59	3,13	0	0,190	0,162	0,103	0,081	0,252	0,211	5,410
5,99	2,70	3,43	0	0,000	0,230	0,170	0,125	0,225	0,250	5,010
5,99	3,50	3,00	0	0,192	0,167	0,107	0,082	0,275	0,178	5,414
5,99	3,50	3,00	0	0,000	0,231	0,169	0,126	0,266	0,209	5,104
5,99	2,98	3,36	0	0,155	0,159	0,123	0,072	0,288	0,202	5,168
5,99	2,98	3,36	0	0,186	0,164	0,111	0,082	0,280	0,176	5,312
5,99	2,98	3,36	0	0,000	0,235	0,172	0,126	0,264	0,202	5,070
5,99	2,98	3,36	0	0,191	0,168	0,106	0,082	0,275	0,178	5,334
5,99	2,98	3,36	0	0,190	0,169	0,105	0,082	0,277	0,177	5,329
5,99	2,98	3,36	0	0,207	0,183	0,104	0,080	0,273	0,153	5,450
5,99	2,98	3,36	0	0,206	0,184	0,102	0,078	0,280	0,149	5,435
5,99	2,98	3,36	0	0,186	0,164	0,111	0,082	0,280	0,176	5,312

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	IF	FechaFabPro	TipoHor	CemTeo	TipoCem	ResistVerdCem	ConA	t r CA	Tamb	Thorm	TipAd	%AdiTeo	%AdiReal
2	8571-1	18.05.2015	HA-25/B/20/IIa	280	21	52,0	10	70	27	24	2	0,54	0,53493
3	8572-1	18.05.2015	HA-25/B/20/IIa	280	21	52,0	8	75	29	25	2	0,54	0,5352
4	8573-1	18.05.2015	HA-25/B/20/IIa	280	21	52,0	8	75	31	26	2	0,54	0,5364
5	8574-1	18.05.2015	HA-25/B/20/IIa	280	21	52,0	8	80	32	26	2	0,54	0,5362
6	8576-1	19.05.2015	HA-25/B/20/IIa	280	21	52,0	7	60	20	22	2	0,54	0,5369
7	8577-1	20.05.2015	HM-20/B/20/I	240	21	52,0	9	70	14	19	2	0,46	0,4593
8	8578-1	20.05.2015	HM-20/B/20/I	240	21	52,0	15	70	18	20	2	0,46	0,4569
9	8579-1	20.05.2015	HA-25/B/16/IIa	290	21	52,0	8	70	20	21	2	0,52	0,5158
10	8580-1	20.05.2015	HM-20/B/20/I	240	21	52,0	7	80	21	22	2	0,46	0,4583
11	8581-1	21.05.2015	HM-20/B/20/I	240	21	52,0	16	60	15	18	2	0,48	0,4791
12	8582-1	21.05.2015	HM-20/B/20/I	240	21	52,0	9	70	21	21	2	0,48	0,4787
13	8583-1	21.05.2015	HL-175/B/20	175	21	52,0	6	80	26	22	2	0,53	0,5271
14	8584-1	22.05.2015	HA-25/B/20/IIa	275	21	52,0	15	50	15	19	2	0,44	0,4344
15	8585-1	22.05.2015	HA-25/B/20/IIa	275	21	52,0	8	60	16	20	2	0,44	0,4351
16	8586-1	22.05.2015	HA-25/B/20/IIa	275	21	52,0	7	60	19	21	2	0,44	0,4368
17	8587-1	22.05.2015	HA-25/B/16/IIa	290	21	52,0	8	50	21	23	2	0,52	0,5153

N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
28	7	12827	12820	12731	12796	31,5	32,3	27,4	26,3	0	0,00	350,71	307,14
28	7	12780	12796	12802	12779	33,2	33,4	27,8	27,4	0	0,00	352,14	305,71
28	7	12814	12792	12835	12824	33,2	32,7	28,4	28,9	0	0,00	342,85	307,14
28	7	12855	12895	12867	12883	34,4	35,5	28,5	28,6	0	0,00	351,42	302,14
28	7	12841	12875	12879	12882	38,3	39,9	31,5	31,2	0	0,00	352,22	305,55
28	7	12806	12799	12786	12798	28,8	29,4	24,3	24,4	0	0,00	290,00	302,50
28	7	12745	12824	12701	12716	27	28,3	23,4	22,1	0	0,00	292,22	298,88
28	7	12700	12708	12830	12844	38,4	40,1	31,2	31,1	0	0,00	0,00	423,00
28	7	12813	12850	12862	12877	34,4	34,6	27,2	27,7	0	0,00	291,00	296,00
28	7	12645	12694	12704	12665	26,8	26,7	20,1	20,9	0	0,00	290,00	302,14
28	7	12768	12736	12721	12736	30,6	32,5	23,7	24,1	0	0,00	288,88	298,88
28	7	12720	12748	12769	12780	23,6	23,1	17,3	17,2	0	0,00	287,50	318,75
28	7	12741	12747	12683	12698	32,5	32,3	26,5	26,1	0	0,00	350,00	305,00
28	7	12861	12845	12784	12799	36,1	35,7	29,6	29,8	0	0,00	355,00	303,50
28	7	12834	12864	12840	12866	37,9	38,1	32,8	31,6	0	0,00	352,00	304,00
28	7	12764	12747	12835	12819	36,4	36,8	31,4	31	0	0,00	0,00	440,00

AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ
Kg4 G6/12	Kg3 G4/8	Kg2 ALO/4	Kg1 ATO/4	Kg0 Cem	Kg Total	tb7	tb6	tb5	tb4	tb3	tb2	tb1	tb0	Dmax	m7
194,28	150,00	505,00	320,00	280,14	2107,27	0	0,166	0,146	0,092	0,071	0,240	0,152	0,133	25	8,00
193,57	150,71	500,00	319,28	279,71	2101,13	0	0,168	0,146	0,092	0,072	0,238	0,152	0,133	25	8,00
194,28	150,00	504,28	320,00	280,14	2098,69	0	0,163	0,146	0,093	0,071	0,240	0,152	0,133	25	8,00
195,00	150,71	497,85	321,42	279,71	2098,25	0	0,167	0,144	0,093	0,072	0,237	0,153	0,133	25	8,00
192,20	148,88	496,66	318,88	279,77	2094,16	0	0,168	0,146	0,092	0,071	0,237	0,152	0,134	25	8,00
219,50	134,50	527,00	375,50	239,90	2088,90	0	0,139	0,145	0,105	0,064	0,252	0,180	0,115	25	8,00
216,66	134,44	497,77	372,22	239,77	2051,96	0	0,142	0,146	0,106	0,066	0,243	0,181	0,117	25	8,00
315,00	229,00	477,00	371,00	289,60	2104,60	0	0,000	0,201	0,150	0,109	0,227	0,176	0,138	25	8,00
219,00	134,00	525,00	375,00	240,00	2080,00	0	0,140	0,142	0,105	0,064	0,252	0,180	0,115	25	8,00
220,00	135,00	526,42	374,28	239,71	2087,55	0	0,139	0,145	0,105	0,065	0,252	0,179	0,115	25	8,00
218,88	135,00	531,66	375,55	240,22	2089,07	0	0,138	0,143	0,105	0,065	0,254	0,180	0,115	25	8,00
211,25	145,00	523,75	455,00	179,75	2121,00	0	0,136	0,150	0,100	0,068	0,247	0,215	0,085	25	8,00
195,50	150,50	515,50	326,00	275,30	2117,80	0	0,165	0,144	0,092	0,071	0,243	0,154	0,130	25	8,00
201,00	149,50	516,00	325,00	275,30	2125,30	0	0,167	0,143	0,095	0,070	0,243	0,153	0,130	25	8,00
195,00	150,00	510,50	325,00	274,90	2111,40	0	0,167	0,144	0,092	0,071	0,242	0,154	0,130	25	8,00
313,84	227,69	493,84	370,77	291,38	2137,52	0	0,000	0,206	0,147	0,107	0,231	0,173	0,136	25	8,00

AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ
m6	m5	m4	m3	m2	m1	t7	t6	t5	t4	t3	t2	t1	MG	a	H. AL	H. AT	a/c	c/a
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,192	0,168	0,106	0,082	0,276	0,175	5,334	113,71	9,5	1,8	0,598	1,673
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,193	0,168	0,106	0,083	0,275	0,175	5,342	110,57	9,5	1,8	0,586	1,707
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,189	0,169	0,107	0,082	0,277	0,176	5,324	112,14	9,5	1,8	0,592	1,690
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,193	0,166	0,107	0,083	0,274	0,177	5,339	119,28	7,8	1,8	0,586	1,707
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,194	0,168	0,106	0,082	0,274	0,176	5,345	126,00	5,6	1,8	0,570	1,753
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,157	0,164	0,119	0,073	0,285	0,203	5,173	110,70	8,5	1,8	0,676	1,479
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,161	0,165	0,120	0,074	0,275	0,205	5,208	95,10	16,4	1,8	0,765	1,307
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,000	0,233	0,174	0,126	0,263	0,204	5,062	79,80	16,4	1,8	0,569	1,758
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,158	0,161	0,119	0,073	0,285	0,204	5,170	65,00	16,4	1,8	0,658	1,520
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,157	0,164	0,119	0,073	0,285	0,203	5,175	110,57	10,3	1,8	0,716	1,397
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,156	0,162	0,118	0,073	0,288	0,203	5,162	99,44	10,3	1,8	0,670	1,492
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,148	0,164	0,109	0,075	0,270	0,234	5,109	85,00	10,3	1,4	0,808	1,237
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,190	0,166	0,106	0,082	0,280	0,177	5,313	106,20	14,6	0,7	0,667	1,498
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,192	0,164	0,109	0,081	0,279	0,176	5,323	87,90	14,6	0,7	0,601	1,663
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,19	0,17	0,11	0,08	0,28	0,18	5,321	77,30	14,6	0,7	0,561	1,784
7,89	7,07	6,89	5,99	3,00	3,30	0	0,000	0,238	0,170	0,123	0,267	0,201	5,060	90,00	14,6	0,7	0,565	1,769

## ANEXO B

# COMPARACIONES MÚLTIPLES

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM1	CEM6	5,922629 <sup>*</sup>	0,957468	0,000	1,84684	9,99842
	CEM8	2,426579	0,627867	0,080	-0,08818	4,94134
	CEM12	-5,968621	1,252434	0,090	-12,3344	0,39719
	CEM13	9,047629 <sup>*</sup>	0,879497	0,000	5,37272	12,72254
	CEM14	4,957123 <sup>*</sup>	0,605071	0,000	2,51318	7,40107
	CEM17	5,935824 <sup>*</sup>	0,739871	0,000	2,95498	8,91667
	CEM18	4,179772 <sup>*</sup>	0,70734	0,000	1,39495	6,9646
	CEM23	6,671736 <sup>*</sup>	0,997218	0,000	2,73575	10,60772
	CEM24	6,698522 <sup>*</sup>	0,812939	0,000	3,32407	10,07297
	CEM25	2,38885	0,596847	0,059	-0,03043	4,80813
	CEM26	5,531459 <sup>*</sup>	0,612482	0,000	3,06477	7,99814
	CEM27	8,791379 <sup>*</sup>	0,661136	0,000	6,00932	11,57344

**Tabla B.1:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 1.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM2	CEM3	-3,083052 <sup>*</sup>	0,364354	0,000	-4,50404	-1,66206
	CEM6	4,737672 <sup>*</sup>	0,782362	0,004	0,94563	8,52972
	CEM8	1,241622 <sup>*</sup>	0,29927	0,014	0,09565	2,3876
	CEM9	1,064097 <sup>*</sup>	0,254222	0,012	0,09067	2,03752
	CEM12	-7,153578 <sup>*</sup>	1,124249	0,034	-13,9526	-0,35453
	CEM13	7,862672 <sup>*</sup>	0,684734	0,000	4,58106	11,14428
	CEM14	3,772165 <sup>*</sup>	0,247904	0,000	2,82271	4,72162
	CEM17	4,750866 <sup>*</sup>	0,492702	0,000	2,53895	6,96278
	CEM18	2,994815 <sup>*</sup>	0,442352	0,000	1,27633	4,7133
	CEM20	-2,982040 <sup>*</sup>	0,35806	0,000	-4,36344	-1,60064
	CEM23	5,486779 <sup>*</sup>	0,830535	0,000	2,12552	8,84804
	CEM24	5,513565 <sup>*</sup>	0,596838	0,000	2,59052	8,43661
	CEM25	1,203893 <sup>*</sup>	0,227095	0,000	0,33166	2,07612
	CEM26	4,346501 <sup>*</sup>	0,26548	0,000	3,32951	5,3635
	CEM27	7,606422 <sup>*</sup>	0,363932	0,000	4,6303	10,58254

Tabla B.2: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 2.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM3	CEM2	3,083052 <sup>*</sup>	0,364354	0,000	1,66206	4,50404
	CEM4	3,889474 <sup>*</sup>	0,655747	0,000	1,1334	6,64555
	CEM6	7,820724 <sup>*</sup>	0,814422	0,000	4,01929	11,62216
	CEM7	2,121100 <sup>*</sup>	0,377209	0,000	0,65509	3,58711
	CEM8	4,324674 <sup>*</sup>	0,375176	0,000	2,86527	5,78408
	CEM9	4,147149 <sup>*</sup>	0,340328	0,000	2,81111	5,48319
	CEM10	3,545356 <sup>*</sup>	0,344565	0,000	2,19446	4,89625
	CEM11	2,465006 <sup>*</sup>	0,504746	0,001	0,50194	4,42807
	CEM13	10,945724 <sup>*</sup>	0,721148	0,000	7,64054	14,25091
	CEM14	6,855217 <sup>*</sup>	0,335634	0,000	5,53532	8,17511
	CEM16	2,309009 <sup>*</sup>	0,348237	0,000	0,94567	3,67235
	CEM17	7,833918 <sup>*</sup>	0,542171	0,000	5,51924	10,14859
	CEM18	6,077867 <sup>*</sup>	0,496859	0,000	4,15101	8,00472
	CEM21	3,891781 <sup>*</sup>	0,490497	0,000	1,99325	5,79031
	CEM23	8,569831 <sup>*</sup>	0,860804	0,000	5,11348	12,02619
	CEM24	8,596617 <sup>*</sup>	0,638286	0,000	5,65566	11,53757
	CEM25	4,286945 <sup>*</sup>	0,320572	0,000	3,01748	5,55641
	CEM26	7,429553 <sup>*</sup>	0,348818	0,000	6,06367	8,79544
CEM27	10,689474 <sup>*</sup>	0,428533	0,000	8,31607	13,06287	

Tabla B.3: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 3.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM4	CEM3	-3,889474 <sup>*</sup>	0,655747	0,000	-6,64555	-1,1334
	CEM6	3,93125	0,953594	0,086	-0,18763	8,05013
	CEM12	-7,960000 <sup>*</sup>	1,249474	0,006	-14,3605	-1,55952
	CEM13	7,056250 <sup>*</sup>	0,875278	0,000	3,32689	10,78561
	CEM14	2,965743 <sup>*</sup>	0,598922	0,011	0,33794	5,59355
	CEM17	3,944444 <sup>*</sup>	0,734851	0,001	0,87411	7,01478
	CEM20	-3,788462 <sup>*</sup>	0,652271	0,000	-6,53276	-1,04416
	CEM23	4,680357 <sup>*</sup>	0,993499	0,004	0,71675	8,64397
	CEM24	4,707143 <sup>*</sup>	0,808373	0,000	1,26249	8,1518
	CEM26	3,540079 <sup>*</sup>	0,606408	0,001	0,89866	6,1815
	CEM27	6,800000 <sup>*</sup>	0,655513	0,000	3,86897	9,73103

**Tabla B.4:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 4.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM6	CEM1	-5,922629 <sup>o</sup>	0,957468	0,000	-9,99842	-1,84684
	CEM2	-4,737672 <sup>*</sup>	0,782362	0,004	-8,52972	-0,94563
	CEM3	-7,820724 <sup>*</sup>	0,814422	0,000	-11,6222	-4,01929
	CEM4	-3,93125	0,953594	0,086	-8,05013	0,18763
	CEM7	-5,699623 <sup>*</sup>	0,788431	0,000	-9,49056	-1,90869
	CEM9	-3,673575	0,771465	0,069	-7,47017	0,12302
	CEM10	-4,275368 <sup>*</sup>	0,773344	0,014	-8,0709	-0,47983
	CEM11	-5,355718 <sup>*</sup>	0,856799	0,001	-9,20312	-1,50832
	CEM12	-11,891250 <sup>*</sup>	1,339577	0,000	-18,3924	-5,39011
	CEM16	-5,511715 <sup>*</sup>	0,774987	0,001	-9,30636	-1,71707
	CEM19	-5,885662 <sup>*</sup>	0,869341	0,000	-9,75707	-2,01425
	CEM20	-7,719712 <sup>*</sup>	0,811626	0,000	-11,5176	-3,92179
	CEM21	-3,928942 <sup>*</sup>	0,848483	0,038	-7,7624	-0,09548
	CEM22	-6,491250 <sup>*</sup>	0,865909	0,000	-10,4497	-2,53281

**Tabla B.5:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 6.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM7	CEM3	-2,121100 <sup>*</sup>	0,377209	0,000	-3,58711	-0,65509
	CEM6	5,699623 <sup>*</sup>	0,788431	0,000	1,90869	9,49056
	CEM8	2,203573 <sup>*</sup>	0,314795	0,000	1	3,40715
	CEM9	2,026049 <sup>*</sup>	0,272327	0,000	0,98538	3,06671
	CEM10	1,424256 <sup>*</sup>	0,277603	0,000	0,36316	2,48535
	CEM13	8,824623 <sup>*</sup>	0,69166	0,000	5,54241	12,10683
	CEM14	4,734117 <sup>*</sup>	0,266438	0,000	3,71586	5,75237
	CEM17	5,712818 <sup>*</sup>	0,502283	0,000	3,48722	7,93842
	CEM18	3,956766 <sup>*</sup>	0,452999	0,000	2,20057	5,71296
	CEM20	-2,020088 <sup>*</sup>	0,371133	0,000	-3,44889	-0,59129
	CEM21	1,770681 <sup>*</sup>	0,446012	0,034	0,04694	3,49442
	CEM23	6,448731 <sup>*</sup>	0,836255	0,000	3,07029	9,82717
	CEM24	6,475516 <sup>*</sup>	0,604771	0,000	3,55523	9,39581
	CEM25	2,165844 <sup>*</sup>	0,247194	0,000	1,21953	3,11216
	CEM26	5,308453 <sup>*</sup>	0,282865	0,000	4,22699	6,38992
CEM27	8,568373 <sup>*</sup>	0,376802	0,000	5,82377	11,31298	

**Tabla B.6:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 7.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM8	CEM1	-2,426579	0,627867	0,080	-4,94134	0,08818
	CEM2	-1,241622*	0,29927	0,014	-2,3876	-0,09565
	CEM3	-4,324674*	0,375176	0,000	-5,78408	-2,86527
	CEM7	-2,203573*	0,314795	0,000	-3,40715	-1
	CEM11	-1,859668*	0,459976	0,029	-3,65179	-0,06755
	CEM12	-8,395200*	1,127802	0,009	-15,1708	-1,61963
	CEM13	6,621050*	0,690553	0,000	3,33891	9,90319
	CEM14	2,530543*	0,263551	0,000	1,52149	3,5396
	CEM16	-2,015665*	0,279425	0,000	-3,08461	-0,94672
	CEM17	3,509244*	0,500758	0,000	1,28569	5,7328
	CEM18	1,753193*	0,451307	0,049	0,00269	3,50369
	CEM19	-2,389612*	0,482936	0,001	-4,29309	-0,48613
	CEM20	-4,223662*	0,369066	0,000	-5,64551	-2,80181
	CEM22	-2,995200*	0,47673	0,006	-5,42174	-0,56866
	CEM23	4,245157*	0,835339	0,001	0,86942	7,62089
	CEM24	4,271943*	0,603505	0,001	1,35119	7,19269
	CEM26	3,104879*	0,280148	0,000	2,03223	4,17753
CEM27	6,364800*	0,374766	0,000	3,58751	9,14209	

Tabla B.7: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 8.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM9	CEM2	-1,064097*	0,254222	0,012	-2,03752	-0,09067
	CEM3	-4,147149*	0,340328	0,000	-5,48319	-2,81111
	CEM6	3,673575	0,771465	0,069	-0,12302	7,47017
	CEM7	-2,026049*	0,272327	0,000	-3,06671	-0,98538
	CEM11	-1,682144	0,432023	0,055	-3,37625	0,01196
	CEM12	-8,217675*	1,116694	0,012	-15,0695	-1,36583
	CEM13	6,798575*	0,672257	0,000	3,51453	10,08262
	CEM14	2,708068*	0,21101	0,000	1,90381	3,51232
	CEM16	-1,838141*	0,23053	0,000	-2,71749	-0,95879
	CEM17	3,686769*	0,47521	0,000	1,49442	5,87912
	CEM18	1,930717*	0,422781	0,004	0,28205	3,57938
	CEM19	-2,212087*	0,456392	0,002	-4,02692	-0,39725
	CEM20	-4,046137*	0,333581	0,000	-5,3372	-2,75507
	CEM22	-2,817675*	0,44982	0,017	-5,31011	-0,32524
	CEM23	4,422682*	0,820279	0,000	1,09207	7,7533
	CEM24	4,449467*	0,582481	0,001	1,51511	7,38382
	CEM26	3,282404*	0,231406	0,000	2,39796	4,16685
CEM27	6,542325*	0,339876	0,004	2,81046	10,27419	

Tabla B.8: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 9.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM10	CEM3	-3,545356 <sup>c</sup>	0,344565	0,000	-4,89625	-2,19446
	CEM6	4,275368 <sup>a</sup>	0,773344	0,014	0,47983	8,0709
	CEM7	-1,424256 <sup>b</sup>	0,277603	0,000	-2,48535	-0,36316
	CEM12	-7,615882 <sup>d</sup>	1,117992	0,022	-14,4584	-0,7734
	CEM13	7,400368 <sup>b</sup>	0,674412	0,000	4,11713	10,6836
	CEM14	3,309861 <sup>b</sup>	0,217778	0,000	2,47861	4,14112
	CEM16	-1,236347 <sup>c</sup>	0,236741	0,000	-2,1402	-0,33249
	CEM17	4,288562 <sup>a</sup>	0,478253	0,000	2,09348	6,48364
	CEM18	2,532511 <sup>b</sup>	0,426199	0,000	0,87171	4,19331
	CEM20	-3,444344 <sup>a</sup>	0,337902	0,000	-4,75131	-2,13738
	CEM23	5,024475 <sup>c</sup>	0,822046	0,000	1,68861	8,36034
	CEM24	5,051261 <sup>a</sup>	0,584967	0,000	2,11957	7,98295
	CEM25	,741588 <sup>a</sup>	0,19376	0,049	0,00079	1,48239
	CEM26	3,884197 <sup>a</sup>	0,237594	0,000	2,97548	4,79291
CEM27	7,144118 <sup>b</sup>	0,344118	0,002	3,59058	10,69766	

**Tabla B.9:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 10.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM11	CEM3	-2,465006 <sup>b</sup>	0,504746	0,001	-4,42807	-0,50194
	CEM6	5,355718 <sup>a</sup>	0,856799	0,001	1,50832	9,20312
	CEM8	1,859668 <sup>a</sup>	0,459976	0,029	0,06755	3,65179
	CEM9	1,682144	0,432023	0,055	-0,01196	3,37625
	CEM12	-6,535532 <sup>d</sup>	1,177264	0,050	-13,065	-0,00608
	CEM13	8,480718 <sup>a</sup>	0,768684	0,000	5,104	11,85743
	CEM14	4,390212 <sup>c</sup>	0,428335	0,000	2,70878	6,07164
	CEM17	5,368913 <sup>a</sup>	0,603962	0,000	2,88385	7,85397
	CEM18	3,612861 <sup>b</sup>	0,56364	0,000	1,43072	5,795
	CEM20	-2,363993 <sup>a</sup>	0,500222	0,002	-4,30466	-0,42333
	CEM23	6,104825 <sup>c</sup>	0,901002	0,000	2,51741	9,69225
	CEM24	6,131611 <sup>a</sup>	0,691542	0,000	3,10796	9,15526
	CEM25	1,821939 <sup>b</sup>	0,416638	0,010	0,18009	3,46379
	CEM26	4,964547 <sup>a</sup>	0,438743	0,000	3,24702	6,68208
CEM27	8,224468 <sup>b</sup>	0,504442	0,000	5,8913	10,55764	

**Tabla B.10:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 11.

ANEXO B. COMPARACIONES MÚLTIPLES

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM14	CEM1	-4,957123 <sup>*</sup>	0,605071	0,000	-7,40107	-2,51318
	CEM2	-3,772165 <sup>*</sup>	0,247904	0,000	-4,72162	-2,82271
	CEM3	-6,855217 <sup>*</sup>	0,335634	0,000	-8,17511	-5,53532
	CEM4	-2,965743 <sup>*</sup>	0,598922	0,011	-5,59355	-0,33794
	CEM7	-4,734117 <sup>*</sup>	0,266438	0,000	-5,75237	-3,71586
	CEM8	-2,530543 <sup>*</sup>	0,263551	0,000	-3,5396	-1,52149
	CEM9	-2,708068 <sup>*</sup>	0,21101	0,000	-3,51232	-1,90381
	CEM10	-3,309861 <sup>*</sup>	0,217778	0,000	-4,14112	-2,47861
	CEM11	-4,390212 <sup>*</sup>	0,428335	0,000	-6,07164	-2,70878
	CEM12	-10,925743 <sup>*</sup>	1,115272	0,001	-17,788	-4,06349
	CEM13	4,090507 <sup>*</sup>	0,669893	0,005	0,80533	7,37568
	CEM16	-4,546209 <sup>*</sup>	0,223543	0,000	-5,39858	-3,69384
	CEM19	-4,920155 <sup>*</sup>	0,452903	0,000	-6,72364	-3,11667
	CEM20	-6,754205 <sup>*</sup>	0,328791	0,000	-8,02791	-5,4805
	CEM21	-2,963436 <sup>*</sup>	0,411448	0,000	-4,56281	-1,36406
	CEM22	-5,525743 <sup>*</sup>	0,446279	0,000	-8,03222	-3,01927
CEM25	-2,568273 <sup>*</sup>	0,177394	0,000	-3,24388	-1,89267	
CEM27	3,834257	0,335176	0,058	-0,12853	7,79704	

Tabla B.11: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 14.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM16	CEM3	-2,309009 <sup>*</sup>	0,348237	0,000	-3,67235	-0,94567
	CEM6	5,511715 <sup>*</sup>	0,774987	0,001	1,71707	9,30636
	CEM8	2,015665 <sup>*</sup>	0,279425	0,000	0,94672	3,08461
	CEM9	1,838141 <sup>*</sup>	0,23053	0,000	0,95879	2,71749
	CEM10	1,236347 <sup>*</sup>	0,236741	0,000	0,33249	2,1402
	CEM12	-6,379535	1,119129	0,083	-13,2139	0,45482
	CEM13	8,636715 <sup>*</sup>	0,676296	0,000	5,35414	11,91929
	CEM14	4,546209 <sup>*</sup>	0,223543	0,000	3,69384	5,39858
	CEM17	5,524910 <sup>*</sup>	0,480906	0,000	3,32744	7,72238
	CEM18	3,768858 <sup>*</sup>	0,429174	0,000	2,09773	5,43999
	CEM20	-2,207996 <sup>*</sup>	0,341647	0,000	-3,52826	-0,88773
	CEM21	1,582773	0,421792	0,079	-0,05345	3,219
	CEM23	6,260822 <sup>*</sup>	0,823592	0,000	2,9204	9,60125
	CEM24	6,287608 <sup>*</sup>	0,587138	0,000	3,35814	9,21708
	CEM25	1,977936 <sup>*</sup>	0,200219	0,000	1,21372	2,74215
	CEM26	5,120544 <sup>*</sup>	0,242889	0,000	4,19249	6,0486
CEM27	8,380465 <sup>*</sup>	0,347796	0,001	4,96448	11,79645	

Tabla B.12: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 16.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM17	CEM1	-5,935824 <sup>a</sup>	0,739871	0,000	-8,91667	-2,95498
	CEM2	-4,750866 <sup>a</sup>	0,492702	0,000	-6,96278	-2,53895
	CEM3	-7,833918 <sup>a</sup>	0,542171	0,000	-10,1486	-5,51924
	CEM4	-3,944444 <sup>a</sup>	0,734851	0,001	-7,01478	-0,87411
	CEM5	-4,454444 <sup>a</sup>	0,848965	0,027	-8,6468	-0,26209
	CEM7	-5,712818 <sup>a</sup>	0,502283	0,000	-7,93842	-3,48722
	CEM8	-3,509244 <sup>a</sup>	0,500758	0,000	-5,7328	-1,28569
	CEM9	-3,686769 <sup>a</sup>	0,47521	0,000	-5,87912	-1,49442
	CEM10	-4,288562 <sup>a</sup>	0,478253	0,000	-6,48364	-2,09348
	CEM11	-5,368913 <sup>a</sup>	0,603962	0,000	-7,85397	-2,88385
	CEM12	-11,904444 <sup>a</sup>	1,193788	0,000	-18,4088	-5,40008
	CEM16	-5,524910 <sup>a</sup>	0,480906	0,000	-7,72238	-3,32744
	CEM19	-5,898856 <sup>a</sup>	0,621627	0,000	-8,44923	-3,34848
	CEM20	-7,732906 <sup>a</sup>	0,537961	0,000	-10,0323	-5,43348
	CEM21	-3,942137 <sup>a</sup>	0,592105	0,000	-6,38581	-1,49847
	CEM22	-6,504444 <sup>a</sup>	0,616818	0,000	-9,27574	-3,73315
	CEM25	-3,546974 <sup>a</sup>	0,461267	0,000	-5,7319	-1,36204
CEM27	2,855556 <sup>a</sup>	0,541887	0,024	0,20243	5,50868	

**Tabla B.13:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 17.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM18	CEM1	-4,179772 <sup>a</sup>	0,70734	0,000	-6,9646	-1,39495
	CEM2	-2,994815 <sup>a</sup>	0,442352	0,000	-4,7133	-1,27633
	CEM3	-6,077867 <sup>a</sup>	0,496859	0,000	-8,00472	-4,15101
	CEM7	-3,956766 <sup>a</sup>	0,452999	0,000	-5,71296	-2,20057
	CEM8	-1,753193 <sup>a</sup>	0,451307	0,049	-3,50369	-0,00269
	CEM9	-1,930717 <sup>a</sup>	0,422781	0,004	-3,57938	-0,28205
	CEM10	-2,532511 <sup>a</sup>	0,426199	0,000	-4,19331	-0,87171
	CEM11	-3,612861 <sup>a</sup>	0,56364	0,000	-5,795	-1,43072
	CEM12	-10,148393 <sup>a</sup>	1,173904	0,001	-16,6899	-3,60694
	CEM13	4,867857 <sup>a</sup>	0,763528	0,000	1,50264	8,23307
	CEM16	-3,768858 <sup>a</sup>	0,429174	0,000	-5,43999	-2,09773
	CEM19	-4,142805 <sup>a</sup>	0,582528	0,000	-6,40979	-1,87582
	CEM20	-5,976854 <sup>a</sup>	0,492262	0,000	-7,88061	-4,0731
	CEM21	-2,186085 <sup>a</sup>	0,550916	0,033	-4,31264	-0,05953
	CEM22	-4,748393 <sup>a</sup>	0,577394	0,000	-7,26308	-2,2337
	CEM25	-1,790922 <sup>a</sup>	0,407047	0,008	-3,38496	-0,19689
	CEM27	4,611607 <sup>a</sup>	0,49655	0,000	2,29479	6,92842

**Tabla B.14:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 18.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM19	CEM6	5,885662 <sup>*</sup>	0,869341	0,000	2,01425	9,75707
	CEM8	2,389612 <sup>*</sup>	0,482936	0,001	0,48613	4,29309
	CEM9	2,212087 <sup>*</sup>	0,456392	0,002	0,39725	4,02692
	CEM13	9,010662 <sup>*</sup>	0,78264	0,000	5,6003	12,42102
	CEM14	4,920155 <sup>*</sup>	0,452903	0,000	3,11667	6,72364
	CEM17	5,898856 <sup>*</sup>	0,621627	0,000	3,34848	8,44923
	CEM18	4,142805 <sup>*</sup>	0,582528	0,000	1,87582	6,40979
	CEM23	6,634769 <sup>*</sup>	0,912937	0,000	3,00414	10,26539
	CEM24	6,661555 <sup>*</sup>	0,707022	0,000	3,59707	9,72604
	CEM25	2,351883 <sup>*</sup>	0,441856	0,000	0,58362	4,12015
	CEM26	5,494491 <sup>*</sup>	0,462757	0,000	3,65862	7,33036
	CEM27	8,754412 <sup>*</sup>	0,525463	0,000	6,36909	11,13974

Tabla B.15: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 19.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM20	CEM2	2,982040 <sup>*</sup>	0,35806	0,000	1,60064	4,36344
	CEM4	3,788462 <sup>*</sup>	0,652271	0,000	1,04416	6,53276
	CEM6	7,719712 <sup>*</sup>	0,811626	0,000	3,92179	11,51763
	CEM7	2,020088 <sup>*</sup>	0,371133	0,000	0,59129	3,44889
	CEM8	4,223662 <sup>*</sup>	0,369066	0,000	2,80181	5,64551
	CEM9	4,046137 <sup>*</sup>	0,333581	0,000	2,75507	5,3372
	CEM10	3,444344 <sup>*</sup>	0,337902	0,000	2,13738	4,75131
	CEM11	2,363993 <sup>*</sup>	0,500222	0,002	0,42333	4,30466
	CEM13	10,844712 <sup>*</sup>	0,717989	0,000	7,54521	14,14421
	CEM14	6,754205 <sup>*</sup>	0,328791	0,000	5,4805	8,02791
	CEM16	2,207996 <sup>*</sup>	0,341647	0,000	0,88773	3,52826
	CEM17	7,732906 <sup>*</sup>	0,537961	0,000	5,43348	10,03233
	CEM18	5,976854 <sup>*</sup>	0,492262	0,000	4,0731	7,88061
	CEM21	3,790769 <sup>*</sup>	0,48584	0,000	1,91591	5,66563
	CEM23	8,468819 <sup>*</sup>	0,858159	0,000	5,02202	11,91561
	CEM24	8,495604 <sup>*</sup>	0,634715	0,000	5,56163	11,42958
	CEM25	4,185932 <sup>*</sup>	0,3134	0,000	2,96693	5,40493
	CEM26	7,328541 <sup>*</sup>	0,342238	0,000	6,00558	8,6515
CEM27	10,588462 <sup>*</sup>	0,423195	0,000	8,21259	12,96433	

Tabla B.16: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 20.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM21	CEM3	-3,891781 <sup>†</sup>	0,490497	0,000	-5,79031	-1,99325
	CEM6	3,928942 <sup>†</sup>	0,848483	0,038	0,09548	7,7624
	CEM7	-1,770681 <sup>†</sup>	0,446012	0,034	-3,49442	-0,04694
	CEM12	-7,962308 <sup>†</sup>	1,171225	0,009	-14,5138	-1,41078
	CEM13	7,053942 <sup>†</sup>	0,759404	0,000	3,69732	10,41056
	CEM14	2,963436 <sup>†</sup>	0,411448	0,000	1,36406	4,56281
	CEM16	-1,582773	0,421792	0,079	-3,219	0,05345
	CEM17	3,942137 <sup>†</sup>	0,592105	0,000	1,49847	6,38581
	CEM18	2,186085 <sup>†</sup>	0,550916	0,033	0,05953	4,31264
	CEM20	-3,790769 <sup>†</sup>	0,48584	0,000	-5,66563	-1,91591
	CEM22	-2,562308 <sup>†</sup>	0,571929	0,037	-5,06266	-0,06195
	CEM23	4,678049 <sup>†</sup>	0,893097	0,000	1,11849	8,2376
	CEM24	4,704835 <sup>†</sup>	0,681212	0,000	1,70558	7,70409
	CEM26	3,537772 <sup>†</sup>	0,422272	0,000	1,89954	5,176
CEM27	6,797692 <sup>†</sup>	0,490184	0,000	4,49164	9,10374	

**Tabla B.17:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 21.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM22	CEM6	6,491250 <sup>†</sup>	0,865909	0,000	2,53281	10,44969
	CEM8	2,995200 <sup>†</sup>	0,47673	0,006	0,56866	5,42174
	CEM9	2,817675 <sup>†</sup>	0,44982	0,017	0,32524	5,31011
	CEM13	9,616250 <sup>†</sup>	0,778826	0,000	6,08964	13,14286
	CEM14	5,525743 <sup>†</sup>	0,446279	0,000	3,01927	8,03222
	CEM17	6,504444 <sup>†</sup>	0,616818	0,000	3,73315	9,27574
	CEM18	4,748393 <sup>†</sup>	0,577394	0,000	2,2337	7,26308
	CEM21	2,562308 <sup>†</sup>	0,571929	0,037	0,06195	5,06266
	CEM23	7,240357 <sup>†</sup>	0,909669	0,000	3,55523	10,92548
	CEM24	7,267143 <sup>†</sup>	0,702798	0,000	4,04188	10,4924
	CEM25	2,957471 <sup>†</sup>	0,435065	0,016	0,39529	5,51965
	CEM26	6,100079 <sup>†</sup>	0,456277	0,000	3,62936	8,5708
	CEM27	9,360000 <sup>†</sup>	0,519765	0,000	6,47458	12,24542

**Tabla B.18:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 22.

ANEXO B. COMPARACIONES MÚLTIPLES

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM23	CEM1	-6,671736 <sup>*</sup>	0,997218	0,000	-10,6077	-2,73575
	CEM2	-5,486779 <sup>*</sup>	0,830535	0,000	-8,84804	-2,12552
	CEM3	-8,569831 <sup>*</sup>	0,860804	0,000	-12,0262	-5,11348
	CEM4	-4,680357 <sup>*</sup>	0,993499	0,004	-8,64397	-0,71675
	CEM5	-5,190357 <sup>*</sup>	1,080637	0,009	-9,77433	-0,60638
	CEM7	-6,448731 <sup>*</sup>	0,836255	0,000	-9,82717	-3,07029
	CEM8	-4,245157 <sup>*</sup>	0,835339	0,001	-7,62089	-0,86942
	CEM9	-4,422682 <sup>*</sup>	0,820279	0,000	-7,7533	-1,09207
	CEM10	-5,024475 <sup>*</sup>	0,822046	0,000	-8,36034	-1,68861
	CEM11	-6,104825 <sup>*</sup>	0,901002	0,000	-9,69225	-2,51741
	CEM12	-12,640357 <sup>*</sup>	1,368271	0,000	-19,024	-6,2567
	CEM16	-6,260822 <sup>*</sup>	0,823592	0,000	-9,60125	-2,9204
	CEM19	-6,634769 <sup>*</sup>	0,912937	0,000	-10,2654	-3,00414
	CEM20	-8,468819 <sup>*</sup>	0,858159	0,000	-11,9156	-5,02202
	CEM21	-4,678049 <sup>*</sup>	0,893097	0,000	-8,2376	-1,11849
	CEM22	-7,240357 <sup>*</sup>	0,909669	0,000	-10,9255	-3,55523
	CEM25	-4,282886 <sup>*</sup>	0,812282	0,001	-7,59006	-0,97571

Tabla B.19: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 23.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
CEM24	CEM1	-6,698522 <sup>*</sup>	0,812939	0,000	-10,073	-3,32407
	CEM2	-5,513565 <sup>*</sup>	0,596838	0,000	-8,43661	-2,59052
	CEM3	-8,596617 <sup>*</sup>	0,638286	0,000	-11,5376	-5,65566
	CEM4	-4,707143 <sup>*</sup>	0,808373	0,000	-8,1518	-1,26249
	CEM5	-5,217143 <sup>*</sup>	0,913347	0,006	-9,56213	-0,87215
	CEM7	-6,475516 <sup>*</sup>	0,604771	0,000	-9,39581	-3,55523
	CEM8	-4,271943 <sup>*</sup>	0,603505	0,001	-7,19269	-1,35119
	CEM9	-4,449467 <sup>*</sup>	0,582481	0,001	-7,38382	-1,51511
	CEM10	-5,051261 <sup>*</sup>	0,584967	0,000	-7,98295	-2,11957
	CEM11	-6,131611 <sup>*</sup>	0,691542	0,000	-9,15526	-3,10796
	CEM12	-12,667143 <sup>*</sup>	1,2404	0,000	-19,1229	-6,21137
	CEM16	-6,287608 <sup>*</sup>	0,587138	0,000	-9,21708	-3,35814
	CEM19	-6,661555 <sup>*</sup>	0,707022	0,000	-9,72604	-3,59707
	CEM20	-8,495604 <sup>*</sup>	0,634715	0,000	-11,4296	-5,56163
	CEM21	-4,704835 <sup>*</sup>	0,681212	0,000	-7,70409	-1,70558
	CEM22	-7,267143 <sup>*</sup>	0,702798	0,000	-10,4924	-4,04188
	CEM25	-4,309672 <sup>*</sup>	0,571164	0,001	-7,26087	-1,35847

Tabla B.20: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 24.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
	CEM1	-2,38885	0,596847	0,059	-4,80813	0,03043
	CEM2	-1,203893 <sup>*</sup>	0,227095	0,000	-2,07612	-0,33166
	CEM3	-4,286945 <sup>*</sup>	0,320572	0,000	-5,55641	-3,01748
	CEM7	-2,165844 <sup>*</sup>	0,247194	0,000	-3,11216	-1,21953
	CEM10	-,741588 <sup>*</sup>	0,19376	0,049	-1,48239	-0,00079
	CEM11	-1,821939 <sup>*</sup>	0,416638	0,010	-3,46379	-0,18009
	CEM12	-8,357471 <sup>*</sup>	1,110832	0,011	-15,2532	-1,46171
	CEM13	6,658779 <sup>*</sup>	0,662475	0,000	3,36853	9,94903
	CEM14	2,568273 <sup>*</sup>	0,177394	0,000	1,89267	3,24388
CEM25	CEM16	-1,977936 <sup>*</sup>	0,200219	0,000	-2,74215	-1,21372
	CEM17	3,546974 <sup>*</sup>	0,461267	0,000	1,36204	5,7319
	CEM18	1,790922 <sup>*</sup>	0,407047	0,008	0,19689	3,38496
	CEM19	-2,351883 <sup>*</sup>	0,441856	0,000	-4,12015	-0,58362
	CEM20	-4,185932 <sup>*</sup>	0,3134	0,000	-5,40493	-2,96693
	CEM22	-2,957471 <sup>*</sup>	0,435065	0,016	-5,51965	-0,39529
	CEM23	4,282886 <sup>*</sup>	0,812282	0,001	0,97571	7,59006
	CEM24	4,309672 <sup>*</sup>	0,571164	0,001	1,35847	7,26087
	CEM26	3,142609 <sup>*</sup>	0,201227	0,000	2,37187	3,91335
	CEM27	6,402529 <sup>*</sup>	0,320092	0,021	1,36233	11,44273

**Tabla B.21:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 25.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
	CEM1	-5,531459 <sup>*</sup>	0,612482	0,000	-7,99814	-3,06477
	CEM2	-4,346501 <sup>*</sup>	0,26548	0,000	-5,3635	-3,32951
	CEM3	-7,429553 <sup>*</sup>	0,348818	0,000	-8,79544	-6,06367
	CEM4	-3,540079 <sup>*</sup>	0,606408	0,001	-6,1815	-0,89866
	CEM5	-4,050079	0,740585	0,090	-8,42491	0,32476
	CEM7	-5,308453 <sup>*</sup>	0,282865	0,000	-6,38992	-4,22699
	CEM8	-3,104879 <sup>*</sup>	0,280148	0,000	-4,17753	-2,03223
	CEM9	-3,282404 <sup>*</sup>	0,231406	0,000	-4,16685	-2,39796
	CEM10	-3,884197 <sup>*</sup>	0,237594	0,000	-4,79291	-2,97548
CEM26	CEM11	-4,964547 <sup>*</sup>	0,438743	0,000	-6,68208	-3,24702
	CEM12	-11,500079 <sup>*</sup>	1,11931	0,001	-18,3332	-4,66698
	CEM13	3,516171 <sup>*</sup>	0,676595	0,025	0,23358	6,79876
	CEM16	-5,120544 <sup>*</sup>	0,242889	0,000	-6,0486	-4,19249
	CEM19	-5,494491 <sup>*</sup>	0,462757	0,000	-7,33036	-3,65862
	CEM20	-7,328541 <sup>*</sup>	0,342238	0,000	-8,6515	-6,00558
	CEM21	-3,537772 <sup>*</sup>	0,422272	0,000	-5,176	-1,89954
	CEM22	-6,100079 <sup>*</sup>	0,456277	0,000	-8,5708	-3,62936
	CEM25	-3,142609 <sup>*</sup>	0,201227	0,000	-3,91335	-2,37187
	CEM27	3,259921	0,348377	0,061	-0,13793	6,65777

**Tabla B.22:** Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 26.

(I) Tipo Cemento	(J) Tipo Cemento	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Limite inferior	Limite superior
CEM27	CEM1	-8,791379 <sup>*</sup>	0,661136	0,000	-11,5734	-6,00932
	CEM2	-7,606422 <sup>*</sup>	0,363932	0,000	-10,5825	-4,6303
	CEM3	-10,689474 <sup>*</sup>	0,428533	0,000	-13,0629	-8,31607
	CEM4	-6,800000 <sup>*</sup>	0,655513	0,000	-9,73103	-3,86897
	CEM5	-7,310000 <sup>*</sup>	0,781302	0,000	-11,6661	-2,95388
	CEM7	-8,568373 <sup>*</sup>	0,376802	0,000	-11,313	-5,82377
	CEM8	-6,364800 <sup>*</sup>	0,374766	0,000	-9,14209	-3,58751
	CEM9	-6,542325 <sup>*</sup>	0,339876	0,004	-10,2742	-2,81046
	CEM10	-7,144118 <sup>*</sup>	0,344118	0,002	-10,6977	-3,59058
	CEM11	-8,224468 <sup>*</sup>	0,504442	0,000	-10,5576	-5,8913
	CEM12	-14,760000 <sup>*</sup>	1,146657	0,000	-21,4782	-8,0418
	CEM14	-3,834257	0,335176	0,058	-7,79704	0,12853
	CEM16	-8,380465 <sup>*</sup>	0,347796	0,001	-11,7965	-4,96448
	CEM17	-2,855556 <sup>*</sup>	0,541887	0,024	-5,50868	-0,20243
	CEM18	-4,611607 <sup>*</sup>	0,49655	0,000	-6,92842	-2,29479
	CEM19	-8,754412 <sup>*</sup>	0,525463	0,000	-11,1397	-6,36909
	CEM20	-10,588462 <sup>*</sup>	0,423195	0,000	-12,9643	-8,21259
	CEM21	-6,797692 <sup>*</sup>	0,490184	0,000	-9,10374	-4,49164
CEM22	-9,360000 <sup>*</sup>	0,519765	0,000	-12,2454	-6,47458	
CEM25	-6,402529 <sup>*</sup>	0,320092	0,021	-11,4427	-1,36233	
CEM26	-3,259921	0,348377	0,061	-6,65777	0,13793	

Tabla B.23: Comparación múltiple de Tamhane para el tipo de cemento CEM 27.

(I) Tipo de aditivo	(J) Tipo de aditivo	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
AD0	AD4	-20,133333	2,504551	0,078	-42,29651	2,02985
AD1	AD2	,880809 <sup>†</sup>	0,200425	0,002	0,15282	1,6088
	AD3	-7,784047	0,117049	0,058	-16,24128	0,67319
AD2	AD1	-,880809 <sup>†</sup>	0,200425	0,002	-1,6088	-0,15282
	AD3	-8,664856 <sup>†</sup>	0,215568	0	-9,59561	-7,7341
	AD18	-2,014856 <sup>†</sup>	0,242837	0,014	-3,64806	-0,38165
AD3	AD1	7,784047	0,117049	0,058	-0,67319	16,24128
	AD2	8,664856 <sup>†</sup>	0,215568	0	7,7341	9,59561
	AD6	10,660000 <sup>†</sup>	0,583324	0	7,42762	13,89238
	AD7	10,350000 <sup>†</sup>	0,494132	0,024	2,14317	18,55683
	AD8	12,200000 <sup>†</sup>	0,655744	0,043	0,60062	23,79938
	AD9	9,080000 <sup>†</sup>	0,887593	0	5,18297	12,97703
	AD10	6,913333 <sup>†</sup>	0,510189	0	4,82763	8,99904
	AD11	8,516667 <sup>†</sup>	0,885218	0,03	0,85362	16,17972
	AD14	7,940000 <sup>†</sup>	0,510542	0	5,71035	10,16965
AD16	10,050000 <sup>†</sup>	0,314907	0,003	5,6475	14,4525	
AD17	8,562500 <sup>†</sup>	1,07869	0	3,54352	13,58148	
AD4	AD0	20,133333	2,504551	0,078	-2,02985	42,29651
AD6	AD3	-10,660000 <sup>†</sup>	0,583324	0	-13,89238	-7,42762
	AD10	-3,746667 <sup>†</sup>	0,761944	0,009	-6,97283	-0,5205
	AD18	-4,010000 <sup>†</sup>	0,593942	0,009	-7,24062	-0,77938
AD7	AD3	-10,350000 <sup>†</sup>	0,494132	0,024	-18,55683	-2,14317
	AD10	-3,436667 <sup>†</sup>	0,696031	0,065	-6,98738	0,11404
AD8	AD3	-12,200000 <sup>†</sup>	0,655744	0,043	-23,79938	-0,60062
	AD10	-5,286667 <sup>†</sup>	0,818714	0,047	-10,51625	-0,05709
AD9	AD3	-9,080000 <sup>†</sup>	0,887593	0	-12,97703	-5,18297
AD10	AD3	-6,913333 <sup>†</sup>	0,510189	0	-8,99904	-4,82763
	AD6	3,746667 <sup>†</sup>	0,761944	0,009	0,5205	6,97283
	AD7	3,436667 <sup>†</sup>	0,696031	0,065	-0,11404	6,98738
	AD8	5,286667 <sup>†</sup>	0,818714	0,047	0,05709	10,51625
	AD16	3,136667 <sup>†</sup>	0,582631	0,003	0,67577	5,59757
AD11	AD3	-8,516667 <sup>†</sup>	0,885218	0,03	-16,17972	-0,85362
AD14	AD3	-7,940000 <sup>†</sup>	0,510542	0	-10,16965	-5,71035
AD16	AD3	-10,050000 <sup>†</sup>	0,314907	0,003	-14,4525	-5,6475
	AD10	-3,136667 <sup>†</sup>	0,582631	0,003	-5,59757	-0,67577
AD17	AD3	-8,562500 <sup>†</sup>	1,07869	0	-13,58148	-3,54352
AD18	AD2	2,014856 <sup>†</sup>	0,242837	0,014	0,38165	3,64806
	AD6	4,010000 <sup>†</sup>	0,593942	0,009	0,77938	7,24062

Tabla B.24: Comparativa múltiple de Tamhane para el tipo de aditivo.