

TESIS DOCTORAL

2020

ANÁLISIS DE ECOCEMENTOS PARA LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

Santiago Yagüe García

PROGRAMA DE DOCTORADO EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Directora
CRISTINA GONZALEZ GAYA

Agradecimientos

A mi directora de tesis, Profesora Doña Cristina González Gaya, por ayudarme a cumplir este sueño que se ha hecho realidad, compartiendo conmigo su interés y sus valiosos conocimientos, así como todos los profesores que forman parte de la UNED. También quiero agradecer a mi madre todo lo que ha hecho por mí, a mi padre y a Tomás. Gracias a ellos no sería lo que soy.

A todos los profesores y compañeros de la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de la UEM. Gracias a ellos me formé como Ingeniero Técnico e Ingeniero Industrial.

También querría dedicársela a mi familia, a mis amigos y a mis compañeros de trabajo.

Resumen

Cuando se envejece el balasto de la vía corresponde su renovación por uno nuevo que cumpla las funciones que debe desempeñar, con la generación del residuo inerte que, hasta el momento, no recibe una utilidad adecuada en función de su composición.

En la presente Tesis Doctoral se analizan residuos de balasto, junto a un material procedente de un aserradero de granito de naturaleza similar, para adicionarlos al cemento Portland ordinario.

La economía en el gasto de materiales destinados a la fabricación de cemento, así como eliminar del ciclo de materiales los residuos vinculados con el balasto y la piedra ornamental y redirigirlos al ámbito de la Infraestructura Ferroviaria, han sido las prioridades a las que se ha dirigido la presente investigación.

En primer lugar, se han caracterizado los residuos por difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y espectrometría de acoplamiento inductivo, al objeto de comprobar su adecuación como puzolana en la normativa vigente.

En una segunda etapa y visto el buen resultado obtenido en el proceso anterior, se ha procedido a fabricar cementos mezcla con 10% y 20% de sustitución de residuos, así como morteros con las mismas sustituciones, que se han estudiado en fresco (trabajabilidad, fraguado y retracción) y una vez fraguados (resistencia mecánica a la flexión y a la compresión, módulo elástico a compresión, fluencia, retracción y durabilidad), cumpliendo las prescripciones normativas actuales de tipo físico, químico y mecánico. La durabilidad de los mencionados morteros se ha seguido durante un año con exposiciones en dos ambientes medioambientales extremos para observar su comportamiento con resultado satisfactorio de comportamiento.

La adición del 10% de residuo, en todos los casos, se dirige hacia la elaboración de un cemento tipo II / A (6/20%), mientras que la del 20% de residuo, llevaría a un cemento tipo IV / A (11–35%), de acuerdo con la norma (UNE-EN 197-1, 2011), ambos aplicables en la Infraestructura Ferroviaria para fabricar vía en placa u otro tipo de mortero u hormigón que precise las características recogidas en la mencionada norma.

Abstract

When the track ballast wears out, it must be replaced by a new one that fulfills the functions it must perform, with the generation of the inert waste that, up to now, has not received adequate utility according its composition.

In this Doctoral Thesis, the use of ballast waste is analyzed, together with a material from a granite sawmill of a similar nature, to add them to ordinary Portland cement, in order to save materials in the manufacture of cement, extracted the relative waste from the waste circuit ballast and ornamental stone, which until now were useless and incorporate it into the Rail Infrastructure.

For this, in a first stage, the wastes that can be considered as addition to cement have been characterized by mineralogical, by X-ray diffraction and scanning electron microscopy, and chemically, by inductive coupling spectrometry. That considers the material suitable to be a pozzolan in the current regulations.

In a second stage and given the good result obtained in the previous process, we have proceeded to manufacture mixed cements with 10% and 20% waste substitution, as well as mortars with the same substitutions, which have been studied fresh (workability, setting and retraction) and once set (mechanical resistance to bending and compression, elastic modulus to compression, creep, retraction and durability), according the current regulatory requirements of a physical, chemical and mechanical type. The durability of the aforementioned mortars has been followed for a year with exposures in two extreme environments to observe their behavior with satisfactory performance results.

The 10% waste addition, in all samples, is directed towards the production of a type II / A cement (6%/20%), while the addition of 20% waste would lead to a type IV / A cement (11%/35%), in accordance with the (UNE-EN 197-1, 2011) standard, both applicable in the Railway Infrastructure to manufacture slab track or other type of mortar or concrete, that requires the characteristics included in the aforementioned standard.

Índice General

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos y estructura de la Tesis Doctoral.....	10
1.2.1. Objetivos	10
1.2.2. Estructura	12
Capítulo 2. Antecedentes	15
2.1. Historia del ferrocarril	15
2.2. Historia del cemento	31
2.3. El cemento Portland	37
2.4. Cementos con adiciones minerales	41
2.5. La reacción puzolánica	44
Capítulo 3. Infraestructura ferroviaria.....	45
3.1. Definición	45
3.2. Clasificación	48
3.2.1. La vía férrea	62
Capítulo 4. Materiales.....	109
4.1. Rocas.....	110
4.2. Cemento	119
4.3. Arena	121
4.4. Hidróxido de calcio.....	121

Capítulo 5. Métodos y técnicas de medida	123
5.1. Métodos.....	123
5.1.1. Propiedades en estado fresco	123
5.2. Técnicas de medida.....	135
5.2.1. Difracción de rayos X.....	135
5.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis por energías dispersivas (EDX).	137
5.2.3. Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/MS).....	137
5.2.4. Tomografía computerizada	138
5.2.5. Actividad puzolánica	141
Capítulo 6. Resultados y discusión.....	143
6.1. Caracterización de materiales	144
6.2. Sistema residuo/cal	158
6.3. Sistema residuo/cemento	164
6.3.1. Cemento Portland ordinario	164
6.3.2. CPO con adición de 10 y 20% de residuo.....	172
6.4. Preparación de morteros con residuos	184
6.4.1. Propiedades en estado fresco	184
6.4.2. Propiedades en estado endurecido	195
Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros	225
7.1. Conclusiones.....	226
7.2. Desarrollos futuros.....	232
Capítulo 8. Bibliografía.....	233

Lista de tablas

Tabla 2.1. Clasificación de cemento.	38
Tabla 3.1. Velocidades máximas y medias en distintos tipos de trenes de Alta Velocidad. (Torres V. , 2005).	48
Tabla 3.2. Anchos existentes en Europa en el siglo XIX (Ojeda García - Escudero, J.M., 2000).	50
Tabla 3.3. Países de la Unión Europea con ancho de vía diferente de la U.I.C. (Ojeda García - Escudero, J.M., 2000).	51
Tabla 3.4. Adaptación de RENFE a las características de la red transeuropea de transporte combinado. Transporte combinado RENFE, 2001.	57
Tabla 3.5. Especificación técnica de Interoperabilidad (Unión Europea) (San Feliu, 2010).	57
Tabla 3.6. Especificaciones técnicas de algunas líneas de Alta Velocidad (Carrasco, 2006).	58
Tabla 3.7. Vida útil aproximada de los componentes de la superestructura de la vía. RENFE en Martínez Jorba (1999).	60
Tabla 3.8. Espesor de balasto considerado para cada rango de velocidades. Elaboración propia.	74
Tabla 3.9. Descripción general de las traviesas utilizadas en algunas líneas de Alta Velocidad en Europa Subirós (2002).	76
Tabla 3.10. Dimensiones del carril UIC 60E1 según la normativa EN 13674 – 1. Elaboración propia.	80
Tabla 3.11. Traviesa monobloque para el sistema del tercer carril. RENFE, 2000.	83
Tabla 3.12. Características del perfil de carril 60E1. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).	83
Tabla 3.13. Características del perfil de carril 60E2. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).	84
Tabla 3.14. Rigidez vertical de las placas de asiento en vías de ferrocarril (López Pita A. , 2002).	89
Tabla 4.1. Composición química del cemento CEM I 42,5 R.	120
Tabla 4.2. Parámetros del hidróxido de calcio utilizado.	121
Tabla 6.1. Cuantificación Rietveld de la muestra C.	145
Tabla 6.2. Análisis químico de elementos mayores en las muestras estudiadas.	147

Tabla 6.3a. Análisis químico de elementos menores y trazas en las muestras estudiadas.....	147
Tabla 6.3b. Análisis químico de elementos menores y trazas en las muestras estudiadas.....	147
Tabla 6.3c. Análisis químico de elementos menores y trazas en las muestras estudiadas.....	147
Tabla 6.4. Cuantificación Rietveld de la muestra CU.....	151
Tabla 6.5. Cuantificación Rietveld de las muestras procedentes de Cardeñosa.....	153
Tabla 6.6. Cuantificación rietveld de las muestras sólidas procedentes del sistema residuo/cal a diferentes edades de curado en muestras PR-1.....	162
Tabla 6.7. Análisis químico superficial mediante EDX.....	163
Tabla 6.8. Cuantificación Rietveld del CPO anhidro y curado a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.....	168
Tabla 6.9. Análisis químico superficial mediante EDX.....	171
Tabla 6.10. Cuantificación Rietveld de las muestras C en el sistema residuo/cemento con adición del 10% de residuo.....	174
Tabla 6.11. Cuantificación Rietveld de las muestras P en el sistema residuo/cemento con adición del 10% de residuo.....	177
Tabla 6.12. Cuantificación Rietveld de las muestras CU en el sistema residuo/cemento con adición de 20% de residuo.....	180
Tabla 6.13. Cuantificación Rietveld de las muestras P en el sistema residuo/cemento con adición del 20% de residuo.....	183
Tabla 6.14. Consistencia de morteros fabricados con diferentes sustituciones de residuos.....	185
Tabla 6.15. Parámetros de fraguado para las muestras estudiadas.....	189
Tabla 6.16. Medidas obtenidas en laboratorio para determinar la expansividad de volumen.....	194
Tabla 6.17. Número de ciclos antes de que se produzca el fallo.....	214
Tabla 6.18. Porosidad total de morteros expuestos a ciclos de gelifracción.....	215

Lista de figuras

Figura 1.1 Europa Sostenible 2030. EC.EUROPA.EU	2
Figura 2.1. Primer viaje del ferrocarril, en Cuba. (Wais y San Martín, 1974).	18
Figura 2.2. Primer tren en España que unía las ciudades de Barcelona - Mataró. En 1848. TRENEANDO.COM	19
Figura 2.3. Placa del Instituto Geográfico y Estadístico de la estación de la Cañada. Elaboración propia.	20
Figura 2.4. Mapa de la red ferroviaria Española durante el siglo XIX.	22
Figura 2.5. Logotipo de RENFE.	24
Figura 2.6. Inauguración de la Alta Velocidad Española. EUROPA PRESS.	25
Figura 2.7. LOGOTIPO DE ADIF.	26
Figura 2.8. Tren Eurostar, cruzando el Canal de la Mancha. ESPANOL.UPI.COM.	28
Figura 2.9. Enclavamiento electrónico. Elaboración propia.	30
Figura 2.10. Clasificación de las puzolanas.	43
Figura 3.1. Sistema Talgo Pendular. (Asociación Española de científicos, 2019).	49
Figura 3.2. Dimensiones del galibo para construcción del material ferroviario internacional. Ficha UIC 505.	52
Figura 3.3. Gálibo internacional de carga. Ficha UIC, 505.	53
Figura 3.4. Gálibos estáticos GA, GB E GC. Ficha UIC, 505.	54
Figura 3.5. Gálibos cinemáticos GA, GB Y GC. FICHA UIC, 505.	55
Figura 3.6. Comparación de los gálibos de carga A, B, B + Y C (Gálibos de carga). S.N.C.F., 1990.	56
Figura 3.7. Diferentes capas que forman la estructura de la vía. Elaboración propia. .	59
Figura 3.8. Esquema de las distintas capas de balasto que puede llevar las líneas de Alta Velocidad frente a las líneas convencionales (López Pita A. , 2002).	60
Figura 3.9. Cuadro de Velocidades Máximas. ADIF.	62
Figura 3.10. Vista del tendido de Vía con traviesa de hormigón. Elaboración propia. .	63
Figura 3.11. Estructura de la Vía. Elaboración propia.	64
Figura 3.12. Sección tipo de viaducto de hormigón hiperestático. Dirección General de Infraestructuras de Transporte Ferroviario (1991).	65
Figura 3.13. Sección tipo de viaducto de hormigón isostático. Dirección General de Infraestructuras de Transporte Ferroviario (1991).	66
Figura 3.14. Ejemplo de cuña de transición. Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario (1991).	67

Figura 3.15. Vía sobre balasto. Elaboración propia.....	68
Figura 3.16. Posible evolución de los cambios que sufre el balasto en vía. Modificado de Kim y colaboradores (Kim, J.; Park, B.S.; Inn Woo, S.; Choi, Y.T., 2020).	69
Figura 3.17. Instalación de la capa de forma para su posterior vertido de la capa de balasto. ELaboración propia.	71
Figura 3.18. Sección de una vía de una línea ferroviaria. Elaboración propia.	73
Figura 3.19. Sección transversal de vía y disposición del balasto. CENIT, 2008.....	73
Figura 3.20. Detalle de la sección de una traviesa de madera (Hernández Yagüe, 2017).	75
Figura 3.21. Dibujo de los distintos anchos de traviesas en España. RENFE, 1996....	76
Figura 3.22. Traviesa con sus sujeciones. Elaboración propia.....	77
Figura 3.23. Perfil del carril con sus componentes. Elaboración propia.	79
Figura 3.24. Características del carril con las dimensiones referidas en la tabla 3.10.	80
Figura 3.25. Traviesa en betón monobloque para tres carriles. RENFE, 2000.....	82
Figura 3.26. Características del perfil de carril 60E1. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).	84
Figura 3.27. Características del perfil de carril 60E2. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).	85
Figura 3.28. Detalle de una sujeción de tirafondos a una traviesa de madera. Elaboración propia.....	86
Figura 3.29. Sujeción tipo Nabla. Elaboración propia.....	87
Figura 3.30. Sujeción tipo Vossloh. Elaboración propia.	87
Figura 3.31. Sujeción tipo Pandrol. Tomado de www.pandrol.com/es/product/e-clip/ .	88
Figura 3.32 Detalle de una placa de asiento de una traviesa. Elaboración propia.....	90
Figura 3.33. Escape con corazón móvil del desvío de la línea del AVE Madrid – Sevilla. RENFE – AVE (1992).	91
Figura 3.34. Aparatos de vía. Elaboración propia.	93
Figura 3.35. Brida de unión entre dos traviesas. Elaboración propia.....	94
Figura 3.36. Tornillo que se instala en la traviesa. Elaboración propia.....	95
Figura 3.37. Aparato de dilatación. Elaboración propia.....	96
Figura 3.38. Desvío en ancho ibérico, para tres carriles. RENFE, 2000.....	97
Figura 3.39. Túnel de Montgat. FOROTRENES.COM.	98
Figura 3.40. Proceso de construcción del puente de los Franceses (Fontanella, 1999).	99
Figura 3.41. Circuito de vía. Elaboración propia.....	100
Figura 3.42. Contador electrónico de ejes de THALES. Elaboración propia.....	101
Figura 3.43. Detectores de cajas calientes.	102

Figura 3.44. Ubicación de los detectores de caídas de objetos. Elaboración propia.	103
Figura 3.45. Localización de los elementos del sistema 2 x 25 en la infraestructura ferroviaria. Elaboración propia.	105
Figura 3.46. Enclavamiento accionado con levas y poleas. Elaboración propia.	107
Figura 3.47. Enclavamiento electromecánico con relés modulares. enclavamiento de Granollers – Canovelles. Hernández Yagüe, 2020	107
Figura 4.1. Localización en España de la provincia de Ávila.	110
Figura 4.2. Canteras y Construcciones S.A. (CYCASA). Elaboración propia.	111
Figura 4.3. Localización de las canteras Cardeñosa, Cuadrado y CYCASA. Elaboración propia.	112
Figura 4.4. Vista aérea de la cantera de Aldeavieja y su localización en el mapa geológico. Fuente: Google Earth Pro. Escala: 1: 1.000.	113
Figura 4.5. Canteras Cuadrado. Elaboración propia.	114
Figura 4.6. Vista aérea de la cantera de Cuadrado y su localización en el mapa geológico. Fuente: Google Earth Pro. Escala: 1: 700.	115
Figura 4.7. Granitos Cardeñosa, en Cardeñosa (Ávila). Elaboración propia.	116
Figura 4.8. Vista aérea de la cantera Cardeñosa y su localización en el mapa geológico. Fuente: Google Earth Pro. Escala: 1: 1.000.	117
Figura 6.1. Desarrollo de los materiales que se van a tratar en la presente tesis doctoral.	143
Figura 6.2. Canteras y Construcciones CYCASA. Elaboración propia.	144
Figura 6.3. Difracción de rayos X de la muestra C (B= Biotita, C = Caolinita, Q = Cuarzo, O = Ortoclasa, A = Albita, H = Hematita).	145
Figura 6.4. Cuantificación Rietveld de la muestra C.	146
Figura 6.5. Vista general de la explotación de Canteras Cuadrado. Elaboración propia.	150
Figura 6.6. Difracción de rayos X de la muestra CU (B= Biotita, C = Caolinita, Q = Cuarzo, O = Ortoclasa, L = Labradorita, H = Hematita).	150
Figura 6.7. Cuantificación Rietveld de la muestra CU.	151
Figura 6.8. Frente de cantera de granitos Cardeñosa. Elaboración propia.	152
Figura 6.9. Difracción de rayos X de las muestras procedentes de Cardeñosa (B= Biotita, C = Caolinita, Q = Cuarzo, O = Ortoclasa, A = Albita, H = Hematita).	153
Figura 6.10. Cuantificación Rietveld de las muestras CA, P, PR-1 Y PR2.	154
Figura 6.11. Curvas de densidad de distribución de tamaño de partícula de todas las muestras estudiadas.	155
Figura 6.12. Valores de puzolanicidad de las muestras C (Residuo de balasto) y CC (Residuo de balasto calcinado a 600°C/2 horas).	158

Figura 6.13. Resultados de los análisis de cal fijada por las diferentes muestras a todas las edades de curado.	159
Figura 6.14. Difractogramas de las fases sólidas del sistema residuo/cal.	160
Figura 6.15. Disposición de materiales a 7 días de reacción.	162
Figura 6.16. Disposición de materiales a 90 días de reacción.	163
Figura 6.17. Disposición de materiales a 360 días de reacción.	163
Figura 6.18. Difractogramas del cemento portland ordinario anhidro y curado a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.	164
Figura 6.19. Detalle de algunos componentes del cemento Portland ordinario anhidro.	170
Figura 6.20. Cristales alargados de Ettringita que se reconocen a la semana de reacción.	170
Figura 6.21. Detalles de los cristales que se aprecian al año de reacción: geles CSH tipo II y compuestos LDH, creciendo sobre portlandita.	171
Figura 6.22. Difractogramas de las muestras de cemento portland ordinario con una adición del 10% de residuo C, curadas a 1,7, 28, 90, 180 y 360 días.	172
Figura 6.23. Cristales vistos al microscopio electrónico de diferentes especies en muestras C.	175
Figura 6.24. Difractogramas de las muestras de cemento portland ordinario con un adición del 10% de residuo P, curadas a 1,7, 28, 90, 180 y 360 días.	176
Figura 6.25. Materiales observados por sem en los que se localizan geles CSH tipo II y abundantes LDH que crecen sobre cristales hexagonales de portlandita.	178
Figura 6.26. Difractogramas de las muestras de cemento portland ordinario con un adición del 20% de residuo CU curadas a 1,7, 28, 90, 180 y 360 días.	179
Figura 6.27. Difractogramas de las muestras de cemento portland ordinario con un adición del 20% de residuo P, curadas a 1,7, 28, 90, 180 y 360 días.	181
Figura 6.28. Representación de los valores de la pérdida de fluidez y consistencia media en todas las muestras estudiadas.	186
Figura 6.29. Diagrama de frattini con los valores obtenidos en las muestras objeto de estudio.	188
Figura 6.30. Parámetros relacionados con el fraguado en los residuos iniciales y las mezclas.	190
Figura 6.31. Variación de la retracción por secado en la muestra PR-1.	193
Figura 6.32. Variación de los valores de resistencia a la flexión de las mezclas con el residuo C.	196
Figura 6.33. Variación de los valores de resistencia a la flexión de las mezclas con el residuo CU.	196

Figura 6.34. Variación de los valores de resistencia a la flexión de las mezclas con los residuos P, PR-1 y PR-2.....	197
Figura 6.35. Variación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas con el residuo C.....	198
Figura 6.36. Variación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas con el residuo CU.	200
Figura 6.37. Variación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas con los residuos P. PR-1 y PR-2.....	200
Figura 6.38. Deformación total bajo carga mantenida en morteros con y sin adición de muestra C.	202
Figura 6.39. Deformación total bajo carga mantenida en morteros con y sin adición de muestra PR-1.....	203
Figura 6.40. Retracción en seco de morteros con y sin adición de muestra C.	204
Figura 6.41. Retracción en seco de morteros con y sin adición de muestra PR-1.....	205
Figura 6.42. Cuantificación de la macroporosidad (en % de número de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $0.09 \text{ mm}^3 - 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$), para los residuos C.....	207
Figura 6.43. Cuantificación de la macroporosidad (en % del volumen de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $< 0.09 \text{ mm}^3 > 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$) para los residuos C.	207
Figura 6.44. Muestra de mortero cpo sin adición. izquierda) imagen ampliada del contacto entre granos. derecha) cristales de ettringita con geles porosos CSH.	209
Figura 6.45 Izquierda) Imagen ampliada del contacto entre granos de la muestra de mortero con 20% de adición. Derecha) borde de grano en muestras de mortero del 10% de adición.	209
Figura 6.46. Bordos de grano en: arriba izquierda y derecha) adición del 10%. abajo izquierda y derecha: Adición del 20%.	210
Figura 6.47. Cuantificación de la macroporosidad (en % de número de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $0.09 \text{ mm}^3 - 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$), para los residuos PR-1.	211
Figura 6.48. Cuantificación de la macroporosidad (en % del volumen de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $< 0.09 \text{ mm}^3 > 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$) para los residuos PR-1.....	211
Figura 6.49. Variación del módulo dinámico relativo por fallo al alcanzar el 60% de fallo.....	216
Figura 6.50. Variación del módulo dinámico relativo por fallo de fisuración.....	216
Figura 6.51. Climograma de Barcelona (A) y Madrid (B).....	218

Figura 6.52. Rosa de los vientos para las estaciones de Barcelona (A) y Madrid (B).	218
Figura 6.53. Etringite y geles CSH (izquierda). Portlandita (derecha).	219
Figura 6.54. Cemento con el 10% de sustitución y un año de curado (izquierda). Contacto entre granos (derecha).	219
Figura 6.55. Movilidad iónica en el cemento sin adición expuesto a los dos ambientes: Madrid (superior), Barcelona (inferior).	221
Figura 6.56. Movilidad iónica en el cemento con adición puzolánica del 10% expuesto a los dos ambientes: Madrid (superior), Barcelona (inferior).	222
Figura 6.57. Movilidad iónica en el cemento con adición puzolánica del 20% expuesta a los dos ambientes. Madrid (superior), Barcelona (inferior).	222

Lista de ecuaciones

ECUACIÓN 5.1:.....	132
ECUACIÓN 5.2:.....	135
ECUACIÓN 6.1:.....	165
ECUACIÓN 6.2:.....	185
ECUACIÓN 6.3:.....	192

Siglas y Acrónimos

ADIF	Administrador de Infraestructuras Ferroviarias
AEDT	Ácido etilendiaminotetraacético
AFm	Monosulfatoaluminato de calcio
AFt	Aluminato de calcio
ASFA	Anuncio de Señales y Frenado Automático
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
AVE	Alta Velocidad Española
CAT	Conducción Asistida de Trenes
CEM	Cemento Portland
COD	Crystallography Open Database
CPO (OPC)	Cemento Portland Ordinario
CSH	Silicato Cálcico Hidratado
CTC	Control de Tráfico Centralizado
CVM	Cuadro de Velocidades Máximas
CYCASA	Canteras y Construcciones S.A.
DCO	Detectores de Cajas Calientes
DRL	Difracción de Rayos Láser
DRX	Espectrometría de Difracción de Rayos X
EDX	Análisis por Energías Dispersivas
EFE	Explotación de Ferrocarriles por el Estado
ENCE	Enclavamiento Electrónico
ERTMS	European Rail Traffic Management System (Sistema

	Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario)
ETCS	European Train Control System
ETI	Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad
FRX	Fluorescencia de rayos X
GIF	Gestor de Infraestructuras Ferroviarias
GSM-R	Global System for Mobile Communications-Railways (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles Ferroviarias)
HT	Hidrotalcita
ICE	InterCity Express
ICP/MS	Espectrometría de Masas con Plasma de acoplamiento inductivo
ICP/OES	Espectrometría de Masas con Plasma de acoplamiento inductivo Ópticamente Estimulada
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
LDH	Hidróxidos Dobles Laminares
LSF	Ley del Sector Ferroviario
LZB	Linienzugbeeinflussung (Sistema de seguridad de control de tráfico Ferroviario)
MZA	Madrid a Zaragoza y Alicante
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PB	Puesto Banalizado
PET	Tomografía por Emisión de Positrones
PNIR	Plan Nacional Integrado de Residuos
PNRCD	Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición
PNRU	Plan Nacional de Residuos Urbanos
PPC	Pérdida a la Calcinación
PTF	Plan de Transportes Ferroviarios

RCD's	Residuos de Construcción y Demolición
RENFE	Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles
RD	Real Decreto
SEM	Microscopía Electrónica de Barrido
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français (Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses)
SPECT	Tomógrafo de Emisión de Fotón Único
TAF	Tren Automotor FIAT
TALGO	Tren Articulado Ligero Goicoechea Oriol
TC	Tomografía Computarizada de Rayos X
TER	Tren Español Rápido
TGV	Train de Grand Vitese
UE	Unión Europea
UIC	Union International des Chemins de Fer (Unión Internacional de Ferrocarriles)

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se va a esbozar el problema al que se dirige la propuesta de esta Tesis Doctoral, es decir, la utilización de un residuo de construcción y demolición que se trata de reintroducir en el ciclo de los materiales a través de su incorporación en la elaboración de cemento, con el consiguiente ahorro energético y la reutilización del residuo.

Además, se presentan los objetivos deseables y la estructura en la que se ha dispuesto el texto.

1.1. Introducción

En 1987, el informe Brundtland¹ definió “desarrollo sostenible” como aquel desarrollo que alcanza el bienestar de la generación presente, respetando las necesidades de generaciones futuras y desde esta manifestación surgió el concepto de sostenibilidad. Esta definición inicial ha ido evolucionando bajo los diversos puntos de vista correspondientes a los agentes institucionales, sociales y económicos. El sector empresarial no se ha quedado al margen de esta discusión y define la sostenibilidad como un sistema de producción y consumo capaz de garantizar una

¹ Este informe fue elaborado por una comisión liderada por la doctora Gro Harlem Brundtland, primera ministra noruega, por encargo de la ONU, y que contrapone la postura de desarrollo económico actual junto con la sostenibilidad ambiental. En un principio se llamó informe “*Our Common Future*”.

mayor equidad, calidad de vida y equilibrio ecológico a generaciones futuras (Philips, 2001).

Existe un amplio consenso en la Unión Europea (UE) sobre el hecho de que, el crecimiento económico, debe venir impulsado por políticas estratégicas que relacionen eficiencia energética y recursos materiales. De un lado, la dependencia de las importaciones de energía en Europa sigue siendo elevada; de ahí que la industria europea necesite nuevas tecnologías dirigidas a reducir y/o minimizar dicha dependencia energética. La eficiencia energética constituye en sí un vector de actuación para incrementar la competitividad económica y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Durante los últimos años, la Comisión Europea ha impulsado medidas innovadoras para mejorar la eficiencia energética y contribuir a los objetivos 40-27-27 establecidos para 2030 (COM, 2014). Instrumentos tales como directivas específicas, etiquetas energéticas y estándares para productos, permitirán un ahorro económico, además de la creación de nuevos empleos. Por otro lado, la iniciativa emblemática para una Europa eficiente en el uso de los recursos dentro de la estrategia Europa 2030 (Figura 1.1), apoya la transición a una economía eficiente, sostenible y baja en carbono, que se oriente hacia paradigmas de economía circular donde se maximiza el aprovechamiento de los recursos materiales contenidos en residuos y subproductos.



Figura 1.1. Europa Sostenible 2030. Tomado de ec.europa.eu

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la UE deben ser reusados, reciclados o recuperados en más de un 70% en el año en curso y éste es un objetivo vinculante. De esta manera, la utilización de residuos de lana mineral, por ejemplo, considerados a menudo no reciclables, es uno de los retos que se proponen vencer para su nuevo uso, consultando a los productores, mediante encuestas, sobre su volumen de utilización y propiedades como la resistencia al fuego que presenta este material y que se podría derivar en la misma línea como materia prima (Vantsi & Karki, 2014).

No obstante, no todos los RCD tienen las mismas aplicaciones; las propiedades del agregado reciclado producido a partir de residuos de construcción y demolición mixtos (albañilería y mortero) son muy variables, y esto restringe el uso de dicho agregado. El desarrollo de técnicas de clasificación capaces de reducir su variabilidad es fundamental para fines de control de calidad y para la producción de materiales de alto valor, en los que influye, entre otras propiedades, la porosidad en el rendimiento mecánico del hormigón y de esta manera, para los hormigones producidos con fracciones de volumen constante de agua, cemento, arena natural y agregado grueso, conseguido a partir de residuos de RCD mixtos reciclados, la resistencia a la compresión y el módulo de Young se relacionan exponencialmente con la porosidad del agregado, como ponen de manifiesto Angulo y colaboradores (Angulo, y otros, 2010).

De forma análoga a otros sectores, el cementero lleva varios años trabajando en la dirección del desarrollo sostenible (Mora Peris, 2007), armonizando la respuesta a la demanda de producto, respetando las necesidades humanas y de los ecosistemas, tanto locales como globales. Para ello compagina la actividad de fabricación de cemento con la protección del entorno, optimizando el comportamiento de las instalaciones de fabricación e invirtiendo en la reducción de diversos impactos ambientales.

La Agencia Internacional de la Energía propuso un Plan de Reducción de CO₂ (Kheshgi, de Coninck, & Kessels, 2012) que, para la industria del cemento, requiere una reducción de emisiones de CO₂ desde 2 Gt en el año 2007 a 1,55 Gt en 2050, estimándose, para el mismo periodo de tiempo, un aumento de la producción de cemento del 50% (Barceló, Kline, Walenta, & Gartner, 2014).

La situación actual en España (como en el resto de los estados miembros de la UE) está muy alejada de este objetivo, ya que la fabricación de 1 t de clinker libera 700-800 kg de CO₂ (Bermúdez Alvite, 2005), por lo que, si no se quiere parar su producción, España se ve obligada a comprar entre 70 y 120 Mt de CO₂ (con una estimación de gastos entre 20-30 €/t), que equivalen a un coste entre el 0,2 y 0,6 del PIB (Horton, 2001). En la actualidad, según Oficemen (Oficemen Homepage, 2019), el consumo de cemento en España ha disminuido un 80% desde el año 2007, produciéndose cerca de 11x10⁶ t en el pasado año 2018. Sin embargo, se espera un repunte del 5% en el consumo del cemento para el futuro.

Sin embargo, existe una creciente preocupación en la industria del cemento español por el descenso progresivo en la disponibilidad de las puzolanas tradicionalmente recogidas en la norma europea. Bajo este contexto, se pone de manifiesto la necesidad de diversificar las fuentes de suministro de adiciones minerales con actividad puzolánica para su uso en la fabricación de cementos y materiales derivados (Zhang, Gao, Wei, & Yu, 2013); (Akcil, Agcasulu, & Swain, 2019).

Las investigaciones se dirigen hacia el empleo de nuevas adiciones que permitan, además, valorizar residuos o subproductos industriales. No obstante, su utilización requiere un gran esfuerzo de investigación ya que, para poder ser puestas en obra, deben ser recogidas en las correspondientes normas de producto. Para ello, resulta oportuno acometer estudios orientados a establecer las bases científico-técnicas de uso para estos nuevos materiales con propiedades cementantes (Stark, 2011), (Frías, y otros, 2014), (Frías Rojas, Sánchez de Rojas, & Rodríguez, 2015), (Juenger & Siddique, 2015), como paso previo a la normalización.

La valorización material o energética de los recursos embebidos en residuos generados en los diferentes sectores productivos es una opción prioritaria de actuación. Así, la búsqueda de estrategias que promuevan la rotación de grandes volúmenes de residuos y subproductos industriales en los ciclos productivos, constituye uno de los principales nichos de oportunidad económica. La indagación de estas estrategias exige un exhaustivo conocimiento de las diferentes corrientes, al objeto de dotarles de valor en potenciales aplicaciones.

La publicación, en febrero de 2008, del Real Decreto (RD) 105/2008, con la regulación de la producción y gestión de RCD (BOE de 13 de febrero), avanzó un paso más en las crecientes preocupaciones e intereses ambientales en este asunto,

puestas de manifiesto a nivel nacional y de las comunidades autónomas. El desarrollo de diferentes directivas culminó en el Plan Nacional de Residuos Urbanos (PNRU) 2002-2006, y más particularmente, para el tipo de residuos que son de interés aquí, Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006 (PNRCD) (BOE 12 julio de 2001), que recomienda el tratamiento, la recuperación y el reciclaje de este tipo de residuos.

Estos planes nacionales fueron sustituidos por el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el período 2008 - 2015 (BOE 26 de febrero de 2009), dentro del cual se recogen como objetivos:

1. La recolección controlada y la gestión adecuada del 95% de RCD para 2011.
2. La reducción o la reutilización del 15% en 2011.
3. El reciclado del 40% en el mismo periodo de tiempo.

Entre otros aspectos, el RD 105/2008 introdujo la obligación de incluir un estudio de gestión de RCD en cada proyecto de diseño de obra o construcción, que debía contener, como mínimo, una estimación de la cantidad de residuos que podrían producirse, así como medidas para la prevención de riesgos, procesos de gestión y explotación de los flujos de estos residuos, etc.

Según los datos del Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2008-2015, se producen 40×10^6 t/año de estos residuos, lo que equivale a más de 2 kg/persona/día, una tasa más alta que la correspondiente a los residuos domésticos. Según las cifras del Ministerio del Medio Ambiente, se reciclaron $2,5 \times 10^6$ t en 2018, lo que implica una tasa de reciclaje de RCD del 5,1%, cifra que está muy por debajo del promedio europeo, lo que indica que el principal medio de eliminación de estos residuos continúa siendo (regulados o no regulados) un vertedero en España.

El reciclado de RCD procedentes de diversas fuentes es uno de los objetivos fundamentales en las economías mundiales. El uso de estos residuos en zonas próximas al lugar de su generación favorece el empleo, al disminuir los costes económicos de transporte. Uno de los RCD que más interés presenta en su aplicación son los procedentes de la industria de la piedra ornamental, en general, y en particular,

aquella que tiene como materia prima, las rocas carbonatadas, tipo mármol, y las rocas silicatadas.

Así, en la mayoría de los países, aun teniendo un importante volumen de residuos en esas industrias relativas al corte de rocas, como por ejemplo Irán, sólo una mínima parte se reutiliza, ya que casi en su totalidad es llevada a vertedero (Mosaferi, y otros, 2014). No obstante, en países de la UE la generación de residuos procedentes de la industria de la piedra ornamental es aprovechada, dada la cualidad de estos residuos de ser materiales estériles (Galetakis & Soultana, 2016).

El sector de la obra civil es uno de los segmentos industriales con mayor nivel de degradación ambiental, debido a la explotación excesiva de los recursos naturales y a la gran cantidad de gases contaminantes generados en la fabricación de materiales de construcción. Debido a esto, Teixeira y colaboradores (Teixeira Marvila, M.; Alexandre, J.; R. G. de Azevedo, A.; Bernabé Zanelato, E., 2019) han estudiado la posibilidad del total, o al menos, reemplazo parcial, de cal hidratada por residuos de mármol originados en una industria de rocas ornamentales brasileñas. En dicho reemplazo se estudiaron los materiales originarios, como la cal hidratada y el polvo de mármol, y se comprobó la calidad de los morteros por sustitución de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% de cal hidratada por el residuo citado. Los resultados confirmaron la posibilidad de una sustitución parcial de la cal hidratada por los residuos de mármol, hasta una cantidad del 50%, no siendo posible el trueque total.

En la misma línea, Baeza y colaboradores (Baeza, Payá, Galao, Saval, & Garcés, 2014) han elaborado combinaciones binarias y ternarias de cenizas de lodos de depuradora con polvo de mármol, cenizas volantes y ceniza de restos vegetales como reemplazo en las pastas de cemento Portland, estudiando, a diferentes edades de curado, propiedades como densidad, absorción de agua, velocidad de pulso ultrasónico y resistencias mecánicas, entre otras, que permitieron identificar mejoras en el cemento resultante cuando se combinaban con los residuos. Así, la resistencia a la compresión con una sustitución del 30%, correspondiendo un 10% a cada residuo antes citado, mejoró en un 9% dicha propiedad al compararla con la muestra patrón (cemento Portland ordinario).

Los residuos de piedra caliza procedentes de explotaciones del mismo material se han empleado, por Chen y colaboradores (Chen, Kwan, & Jiang, 2014), para rellenar huecos entre partículas de los agregados del cemento, reducir el volumen y

mejorar la estabilidad dimensional. Los estudios de estos investigadores se basaron en la respuesta de las pastas de cemento a la permeabilidad en agua y a la porosidad, llegando a que la adición de partículas finas de piedra caliza intercambiadas en la pasta de cemento, aumentaba significativamente la resistencia y mejoraba la resistencia al agua del mortero fabricado.

También Singh y colaboradores (Singh, Srivastava, & Bhunia, 2017), (Singh, Srivastava, & Bhunia, 2019) en el estado de Rajasthan (India), zona con amplitudes térmicas próximas a los 50°C, han utilizado polvo de mármol seco, procedente de la cantería de rocas calizas, para sustituir parte del cemento, concluyendo que, para una cantidad de hasta un 15%, se observó una mayor resistencia física y durabilidad de los bloques de hormigón para tiempos entre 28 y 360 días de fraguado; además, cuando las proporciones en la sustitución eran mayores, se generaba una mezcla densa muy adecuada para fines constructivos. Todo ello mejoraba las propiedades del mortero a largo plazo. Estos morteros con distintas adiciones se pueden usar de manera segura en ambientes agresivos y no agresivos, reemplazando la arena de río, empleada en la fabricación, en un porcentaje entre 25% y 50% (Kumar Khyaliya, Syed Ahmed Kabeer, & Kumar Vyas, 2017), (Li, Huang, Tan, Kwan, & Liu, 2018). El mismo material, polvo de mármol, se ha potenciado en la fabricación de ladrillos en Turquía (Bilgin, Yeprem, Arslan, Bilgin, & Marsoglu, 2012).

En países donde los residuos son diversos se han estudiado cementos consistentes en mezclas con sustitución compuestas por polvo de mármol, ceniza volante y humo de sílice (Choudhary, Gupta, & Nagar, 2020), con resultados favorables para la mejora de propiedades en fresco, cuando las proporciones de sustitución son 10% polvo de mármol/15% ceniza volante/5% humo de sílice.

El otro tipo de residuos de rocas ornamentales abundantes son las silíceas; así, ensayos para la utilización de residuos procedentes de rocas ígneas, tales como granodiorita o basalto, se han llevado a cabo por Piasta y colaboradores (Piasta, Góra, & Turkiewicz, 2016), en relación con la resistencia de propiedades como la congelación/descongelación y la susceptibilidad a la reacción con los álcalis. La relación entre las propiedades y la durabilidad de los agregados y hormigones se evaluó por estos investigadores, considerando los resultados de los análisis microestructurales. La granodiorita y el basalto fueron sensibles a la reacción álcali-sílice debido a la presencia, en su composición mineralógica, de calcedonia y ópalo; además, la resistencia a los cambios térmicos concuerda con los valores de

resistencia al aplastamiento y se relaciona con el menor número de poros de pequeño diámetro existentes en el mortero.

En residuos de minería de granito han trabajado Ramos y colaboradores (Ramos, Matos, Schmidt, Rio, & Sousa-Coutinho, 2013) en Portugal, considerando que, si los residuos se muelen con suficiente finura, producen una matriz más densa que promueve una reducción de hasta el 38% en la expansión del nuevo mortero obtenido por intercambio de ese residuo con cemento Portland y una resistencia a los cloruros de casi el 70%, sin comprometer propiedades como la trabajabilidad y la resistencia. Esta mejora, en términos de resistencia al cloruro, parece derivar de la captura de estos iones por los aluminatos presentes en los residuos para formar cloroaluminatos.

Con el mismo tipo de residuos y valorando la microestructura de los agregados generados al adicionarlos a un cemento, han investigado Pacheco Torgal y Castro-Gomes (Pacheco Torgal & Castro-Gomes, 2006) y Ostrowski y colaboradores (Ostrowski, Stefaniuk, Sadowski, Krzywinski, & Rozanska, 2020), entre otros. Los primeros, además de agregados basados en rocas graníticas, utilizaron agregados de piedra caliza, realizando ensayos de trabajabilidad y durabilidad para analizar las propiedades geométricas de los agregados resultantes, con resultados satisfactorios.

Kumar Sharma y colaboradores (Kumar Sharma, Kumar, Kumar, Skariah Thomas, & Chandra Gupta, 2017), en India, han demostrado que la incorporación de residuos de granito pulido en el cemento, disminuye la resistencia a la compresión y a la flexión, pero con mejores resultados en la absorción de agua, la abrasión y la permeabilidad a la misma. El hormigón que contiene residuos de granito pulido, hasta un 20%, podría recomendarse para todo tipo de aplicaciones constructivas y una sustitución entre el 20% y el 40% sería útil, por ejemplo, en pavimentos.

Para Kumar Gupta y Kumar Vyas (Kumar Gupta & Kumar Vyas, 2018) es viable la utilización de los desechos generados por el corte y acabado de bloques de granito como reemplazo en mezclas de mortero, dando mejores resultados que los morteros convencionales. Estos autores han trabajado con sustituciones de 30% a 40% en volumen.

También en Egipto, Mashaly y colaboradores (Mashaly, Shalaby, & Rashwan, 2018), han sugerido las sustituciones de cemento por residuos de granito hasta un 40%. Los resultados demostraron que, las mezclas modificadas a las que se ha intercambiado en el cemento hasta un 20% de material, produjeron una disminución insignificante en las propiedades físicas y mecánicas respecto al cemento sin sustitución, pero sí una mayor resistencia a la abrasión, a los procesos de congelación/descongelación y al ataque por sulfato.

Jain y colaboradores (Jain, Gupta, & Chaudary, 2019) han estudiado propiedades en hormigón fresco y fraguado a través de diversas pruebas con una sustitución del 20% de residuo de roca granítica. Los resultados de los ensayos para propiedades en fresco se encontraron dentro de límites satisfactorios. La adición de estos residuos indicó que se podían usar eficientemente para generar mezclas de morteros sostenibles. En la misma línea se manifiestan Abukersh y Fairfield (Abukersh & Fairfield, 2011) que utilizan polvo de granito rojo para reemplazar hasta un 30% en masa, de morteros. Los agregados resultantes eran adecuados en términos de trabajabilidad, rigidez y resistencia, en comparación con un cemento Portland ordinario.

Noor E-Khuda y colaboradores (Noor E-Khuda, Albermani, & Veidt, 2017) trabajando en muestras con sustitución de granito australiano han investigado los resultados que generan los ciclos de congelación / descongelación sobre la resistencia a la flexión. Para estos autores se produjo una degradación física acompañada de notable reducción en densidad y resistencia a la flexión.

El posible uso puzolánico de los residuos procedentes del trabajo en rocas ornamentales después de un tratamiento térmico de los mismos a 1200°C ha sido propuesto por dos Santos Vazzoler y colaboradores (dos Santos Vazzoler, Lima Vieira, Rodrigues Teles, Klein Degen, & Arlêu Teixeira, 2018), para potenciar, con ese tratamiento, las posibles características puzolánicas de los residuos, a través de sustituciones del 5% y 10% en masa, de cemento Portland en la preparación de la pasta de cemento. Los resultados indican que el material conseguido tiene una baja actividad puzolánica cuando se usa en la producción de pastas a base de cemento, pudiendo proporcionar un producto final con una microestructura más densa debido al efecto de relleno y posiblemente, a esa pequeña reacción puzolánica.

La andesita es una roca que se usa ampliamente en ingeniería civil y en aplicaciones arquitectónicas de países como Turquía, donde es un material frecuente en el entorno. La extracción, corte y pulido de andesita conduce a la generación de cantidades significativas de material de desecho. La andesita contiene SiO_2 como componente principal y, por lo tanto, puede tener puzolanicidad y usarse como aditivo mineral en el cemento. Davraz y colaboradores (Davraz, Ceylan, Bekir Topcu, & Uygunoglu, 2018) investigaron el factor de eficiencia del polvo residual de andesita como aditivo mineral en el cemento, comparándolo con las cenizas volantes tipo F. El resultado fue satisfactorio en la sustitución del polvo de andesita, incluso se ha utilizado esta roca como balasto, con experiencias en climas lluviosos y fríos, preferiblemente a la roca caliza, en países como Irán, donde es abundante (Ferestade, Hosseini Tehrani, & Heidary, 2017).

Uno de los residuos no utilizados en su reciclado hasta el momento, es el generado por el desgaste del balasto de la vía férrea y que le condiciona para su sustitución debido al proceso de redondez que produce el uso y por tanto, el incumplimiento de un test de control típico en estos materiales, como es el ensayo de desgaste de Los Ángeles (ASTM C131/C131M-14).

1.2. Objetivos y estructura de la Tesis Doctoral

Se van a exponer, seguidamente, los objetivos perseguidos en la presente Tesis Doctoral, así como la estructura en la que se ha plasmado la investigación.

1.2.1. Objetivos

La UE en la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible propone tres prioridades que se refuerzan mutuamente:

1. Crecimiento inteligente, desarrollando una economía basada en el conocimiento y la innovación.
2. Crecimiento sostenible, promoviendo una economía que haga un uso más eficaz de los recursos, más verde y competitiva.

3. Crecimiento integrador, fomentando una economía con alto nivel de empleo con cohesión social y territorial.

Para alcanzar dichos objetivos de crecimiento, la Comisión Europea ha desplegado diferentes iniciativas emblemáticas con el fin de catalizar los avances en cada una de las prioridades establecidas. En la iniciativa “*Una Europa eficiente en recursos*”, el horizonte es apoyar la transición a una economía que utilice eficientemente sus recursos, con pocas emisiones de carbono, desacoplando el crecimiento económico del uso de recursos y de energía, así como de la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente CO₂.

La investigación y eco-innovación en materia de nuevas fuentes alternativas de materias primas a partir de residuos, se erigen como potenciales actuaciones dirigidas a la consecución de una mayor eficiencia en el uso de los recursos. Los residuos sólidos, de no gestionarse de manera adecuada, según los principios de prevención, reutilización y reciclaje, tienden a acumularse deviniendo en impactos ambientales, económicos y sociales.

La industria cementera, en los años de máxima producción (55 Mt de cemento) empleó hasta $5,7 \times 10^6$ t, de diferentes subproductos y residuos industriales como adiciones al clinker (escorias de alto horno, cenizas volantes, humo de sílice, puzolanas industriales activadas, etc.), reduciéndose a menos de la mitad en el año 2019. Estas puzolanas industriales, están dirigidas, principalmente, a fabricar cementos binarios (clinker + puzolana), para preparar cementos tipo II A/B, como una consecuencia del ahorro energético y económico, respecto al cemento tipo I sin adiciones.

En el panorama actual del reciclaje de residuos, los RCD adquieren una importancia fundamental, ya que constituyen uno de los principales flujos de residuos dentro de la UE. Las tasas de su reciclaje / reutilización varían significativamente en ese ámbito territorial, oscilando entre el 5% en Portugal y el 90% en los Países Bajos y Estonia. Como promedio, la tasa de es del 55%.

Con el doble objetivo de reciclar / reutilizar residuos y minimizar la generación de emisiones de CO₂, se han propuesto diversas actuaciones dirigidas a la elaboración de cementos ecoeficientes (Miller, John, Pacca, & Horvath, 2018), entre las que se

priorizan la de nuevos cementos y clinkers. Es, en esta dualidad, en la que se va a desarrollar la presente Tesis Doctoral, aunando hacia un mismo resultado el empleo de un residuo de construcción y demolición inerte, que de esta manera se valoriza y se incorpora, de nuevo, al ciclo de los materiales, y la propuesta de elaboración de un cemento puzolánico en el que se adiciona el mencionado residuo.

El residuo que se ha utilizado es el balasto desechado, RDC, que no cumple su función como soporte en la infraestructura de la vía y que se propone como adición puzolánica al cemento. El residuo, de composición silicatada, puede actuar como materia prima secundaria, entrando de ese modo en la Economía Circular, modelo que potencia el aprovechamiento de los recursos y trata de reducir las materias primas, presentándose con una alternativa al modelo de Economía Lineal, en el que son fundamentales los procesos de extracción, producción, consumo y eliminación, tradicionales hasta el momento.

El residuo se pretende incorporar como sustitución en dos porcentajes al cemento Portland ordinario, 10% y 20%, tratando de estudiar sus propiedades y comportamiento en cuanto a ensayos químicos, mineralógicos y mecánicos, recogidos en la norma que rige estas adiciones (UNE-EN 197-1, 2011) y que se propone como cemento idóneo para la elaboración de vía en placa, ecoeficiente y sostenible, de mantenimiento menor que el soporte de balasto.

1.2.2. Estructura

En el logro de los objetivos propuestos se ha seguido el esquema siguiente:

En el capítulo de “**Introducción**” se describe el problema detectado en relación con los residuos y con la industria cementera, analizando los estudios a nivel global que se han encontrado en la bibliografía y las posibles soluciones dadas por los investigadores.

No obstante, y conocido el problema, se necesita una mayor profundización en el conocimiento de la materia que se ha presentado en el capítulo de “**Antecedentes**” con su doble vertiente, por un lado, el ferrocarril, y por otro, el cemento. En cuanto al ferrocarril ha sido preciso conocer el papel que desarrolla el balasto en la

infraestructura ferroviaria, describiendo los componentes de la vía y las variantes que existen sobre ellos. A la vez, ha sido imprescindible analizar la normativa y las posibilidades que ofrece la fabricación de cemento, y en la actualidad, los modernos cementos ecológicos.

La selección de **“Materiales”** y su descripción han sido fundamentales en el estudio, presentando un residuo similar logrado en laboratorio mediante un ensayo de desgaste habitual en este tipo de materiales, y otro residuo, de la misma clase, generado en gran volumen y al que se otorga escasa o nula utilización. Es el procedente del proceso de corte de rocas similares al residuo de balasto y que, además, tiene la ventaja de su uniformidad de tamaño.

Con los materiales elegidos se procedió a su estudio en **“Métodos y técnicas de análisis”** para caracterizar las diferentes muestras mediante ensayos como la difracción de Rayos X, espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo, microscopía electrónica de barrido con analizador EDAX y, determinación de la puzolanicidad. En este momento fue fundamental la elaboración de cementos con sustitución de residuos en diversas proporciones, que fueron estudiados según la normativa vigente en estado fresco y una vez fraguados. Los ensayos que se han practicado son trabajabilidad, fraguado y retracción, controlando el momento de endurecimiento a través de las resistencias mecánicas a flexión y compresión, módulo elástico, fluencia, retracción y durabilidad. Por último, se procedió durante un año, a un ensayo *“in situ”* de los cementos fabricados, expuestos a dos ambientes extremos, al objeto de conocer el comportamiento de los mismos ante situaciones reales.

Con todos los datos conseguidos se ha elaborado el capítulo de **“Resultados y discusión”**, detallando, por separado, los logrados en los materiales originales, en los sistemas residuo/cal, residuo/cemento y en la preparación de morteros con sustituciones de 10% y 20%, respectivamente.

Todo lo anterior se concreta en **“Conclusiones y desarrollos futuros”**, donde se sintetizan los resultados obtenidos en el capítulo de resultados, así como posibles desarrollos futuros que podrían obtenerse desde los mismos.

Se concluye con **“Bibliografía”**, recogiendo las diferentes fuentes, publicaciones y referencias utilizadas a lo largo de la investigación para facilitar al lector su consulta.

Capítulo 2. Antecedentes

En este capítulo se van a desarrollar consecutivamente las dos fuentes de información en las que se sustenta esta Tesis Doctoral. En la primera, se tratará el material objeto de estudio y su entorno; siendo, la segunda, el ámbito donde se va a tratar de aplicar el resultado logrado en la primera parte.

2.1. Historia del ferrocarril

Las primeras consideraciones relativas al desarrollo del ferrocarril se podrían atribuir a cualquiera de los antepasados *Homo* que, en su modo de vida, tratarían de desplazar grandes pesos, no sólo mediante tracción, sino valiéndose de algún que otro artefacto de los que luego se han llamado inventos.

Los arqueólogos coinciden en situar en Mesopotamia, quizás en el cuarto milenio a.C., la invención de la rueda, evidentemente, instrumento de ayuda en el transporte. El desplazamiento de la rueda generaba en el suelo una marca que, por la persistencia de uso circulando por el mismo camino, se hacía más honda y producía un surco, por el que era fácil el movimiento, dado que la rueda se canalizaba y evitaba un errático camino. Esta consideración no pasó desapercibida por los mesopotámicos que, en ciudades como Ur, han permanecido y conservado esas marcas en sus materiales arcillosos, rellenándose a veces con madera (medio tronco incrustado en el surco) y facilitando el transporte de materiales pesados.

En el mundo egipcio se puede intuir algo similar destinado al movimiento de los grandes bloques utilizados en su arte suntuario y que precisaban de transporte desde las vías fluviales o desde las canteras, a su definitivo emplazamiento. Quizás, en esta cultura sea el transporte por rodillos el utilizado como precursor de los actuales raíles de la vía.

Culturas posteriores como la griega y la romana, mantuvieron y perfeccionaron este incipiente ferrocarril, sobre todo vinculado al transporte de grandes masas y volúmenes y en relación con industrias como la minería, la cantería o similares. De este hecho quedo constancia en las ruinas de Pompeya, donde se han detectado carriles sobre las numerosas calzadas romanas, de las que se tuvo, en el Imperio romano, un gran control por relacionar ciudades, estados, etc.

A pesar de estos comentarios de la prehistoria del ferrocarril es la relación con explotaciones industriales tales como la minería, con las que éste se desarrolla. Así, por ejemplo, las rodadas descritas anteriormente eran fáciles de sobresaltarse y es, en la minería transilvana del siglo XVI, donde se pone en marcha un ferrocarril en el que las ruedas tienen rebordes imprescindibles para que las mismas no se salgan del carril y el vehículo se mueva guiado por sí mismo y con tracción, en principio, animal. Será necesario llegar al siglo XIX, con la utilización exhaustiva de la máquina de vapor, cuando se produjo el mayor desarrollo de este medio de transporte y de sus infraestructuras.

Como precursor de la máquina de vapor se puede considerar al inglés Thomas Newcomen que, en 1712, creó un invento que generaba vapor a presión atmosférica y se empleaba en el achique de agua en las galerías mineras. Sobre la base de este artefacto, el escocés James Watt perfeccionó la aplicación y desarrolló las máquinas de vapor como tales, que, en este caso, fueron usadas rápidamente, en la industria textil. No obstante, se trataba de ingenios estáticos, por lo que fue necesario esperar a que el ingeniero militar francés Nicolás José Cugnot, en 1769, colocara unas ruedas al sistema para permitir el desplazamiento de una ubicación a otra, como ocurría en el transporte de cañones artilleros de gran peso.

Relacionado con los carriles se opina que, la primera máquina de vapor en vía, se usó para el transporte de viajeros en la ciudad de Londres, en 1808, inventada por el británico Richard Trevithick y que, en realidad, era una diversión de feria que

efectuaba un recorrido circular. Pero no fue Trevithick quien se llevó los honores sino el también británico George Stephenson al que se conoce como padre del ferrocarril y su locomotora “Locomotion” con 28 vagones, realizó el primer servicio público entre Darlington y Stockton, el día 27 de noviembre de 1825. A pesar de este logro sólo circuló la locomotora de vapor en el viaje inaugural, siendo utilizada para el transporte de mercancías, sobre todo carbón, y relegando los trenes de pasajeros a ser tirados por caballos.

La compañía de ferrocarril que unía las ciudades de Liverpool y Manchester convocó el concurso Rainhill para desarrollar prototipos de locomotoras que facilitaran el transporte: lo ganaron los Stephenson, George y Robert, con su locomotora “Rocket”, el 6 de octubre de 1829. En ese mismo año, 1829, se presentó al gobierno español, por parte de José Díaz Imbrechts, comerciante de Cádiz, una solicitud para construir una línea ferroviaria pionera que cubriría 6 km de línea entre Jerez y el Muelle del Portal, para el transporte de vino con destino a Inglaterra. La iniciativa fue un fracaso por dejación del Ayuntamiento.

En la misma zona se proyectó una segunda línea que unía las localidades de El Puerto de Santa María con Sanlúcar de Barrameda y que devino un fiasco por falta de fondos. Lo mismo ocurrió con el proyecto propuesto para enlazar Bilbao y Burgos, en 1832, en este caso por motivos políticos. Una región más, Cataluña, y en 1834, también fracasó en la iniciativa, por falta de financiación, para enlazar Reus y Tarragona con el objeto de transportar almendras.

Todos estos proyectos frustrados en la península ibérica, hicieron que los primeros españoles en disfrutar del ferrocarril fueran los territorios de Ultramar, es decir, nuestro primer ferrocarril se construyó en Cuba (Figura 2.1), con la línea La Habana-Güines, inaugurado el 19 de noviembre de 1837. La línea fue pionera en la América Hispana y empleaba material procedente de Estados Unidos de América. Durante la construcción murieron 2000 trabajadores y su propietaria fue la compañía de Caminos de Hierro de la Habana. La función principal era transportar mercancías, como la caña de azúcar, de la región agrícola de Güines al puerto de La Habana.



Figura 2.1. Primer viaje del ferrocarril, en Cuba (Wais y San Martín, 1974).

Como proyecto industrial, de nuevo vinculado a la minería, se puede considerar como esbozo de ferrocarril en España, en el año 1836, el de la mina asturiana de Arnao, de la que se extraía mineral mediante un sistema de vías y vagones con tracción a sangre.

El interés por los ferrocarriles desde la perspectiva industrial cada vez era mayor, no sólo en España, sino también en los países europeos que hacían inversiones en el nuestro, sobre todo, las compañías mineras. Todo ello empujó al gobierno a solicitar un informe, el denominado informe Subercase (Lozano Carbayo, 2004), para buscar la idoneidad en la construcción de los ferrocarriles e intentar justificar la procedencia del capital, con iniciativa privada y concesión pública. El informe se denomina de esa manera ya que los ingenieros Juan y José Subercase, junto a Calixto Santa Cruz, fueron los encargados del estudio, indicando que el capital debería ser público y el estado, el constructor de los ferrocarriles.

Los tres ingenieros no se limitaron a emitir un informe sobre la financiación, sino que, además, recomendaron como ancho de vía 1,67 metros² lo que permitiría circular a locomotoras potentes, en contraposición con el ancho europeo más estrecho,

² Se pueden establecer cuatro anchos de vía: 1) de 1,668 metros o ancho ibérico o ancho Renfe, es el convencional en toda la red, excepto en la línea de alta velocidad, la de Cercedilla a Los Cotos y la línea 1 del metro de Barcelona. 2) 1,435 metros o ancho internacional, empleado en alta velocidad, en los ferrocarriles catalanes y en los metropolitanos de Madrid y Barcelona. 3) 1 metro o vía estrecha y 4) 0,914 metros en el ferrocarril de Palma a Sóller, en Mallorca.

indicando también datos sobre el gálibo de los túneles, peraltes, curvatura y demás características de vía. En definitiva, el informe se plasmó en el primer decreto de ferrocarriles o carta fundacional de los mismos, en 1844.

El 28 de octubre de 1848 fue la fecha clave para el inicio de un hito trascendental en la historia del ferrocarril español: se inauguró la línea de Barcelona a Mataró (Figura 2.2), con una longitud de 29,1 km y un tiempo de trayecto de 35 minutos a 40 km/h. Unía las poblaciones de Barcelona, Mataró, San Adrián del Besos, Badalona y Premiá de Mar. Los constructores fueron ingenieros ingleses que proporcionaron ideas y material.

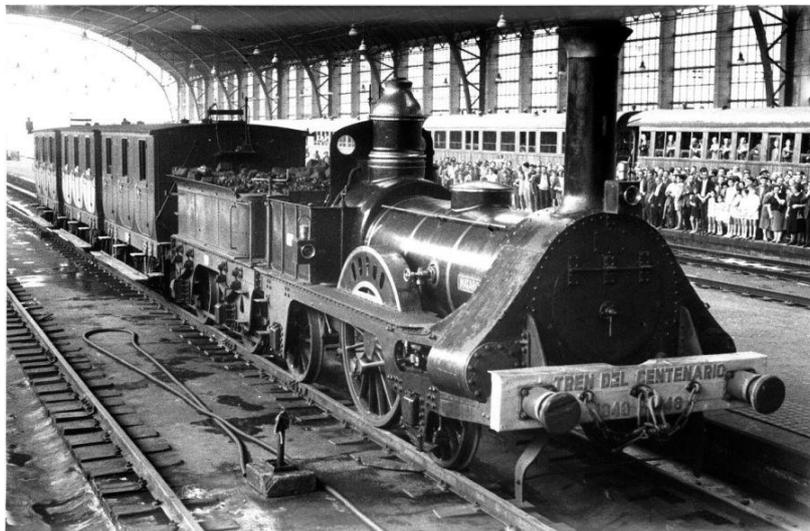


Figura 2.2. Primer tren en España que unía las ciudades de Barcelona – Mataró (1848).
Tomado de Treneando.com

Su éxito fue rotundo de manera que, inmediatamente, se aumentó el número de los coches, facilitando el desplazamiento de mercancías y viajeros, lo que contribuyó al crecimiento y a la prosperidad de la zona.

Fue la Ley General de Ferrocarriles, de 1855, la que permitió las inversiones extranjeras en España, otorgando grandes facilidades para instalaciones y financiadores. A partir de esa fecha se empezaron a construir numerosas líneas de ferrocarril de ancho ibérico:

- Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante (MZA 1856) con capital francés y dependiente de la banca Rothschild, que absorbió, en 1889, la línea de los ferrocarriles de Tarragona a Barcelona y Francia.

- Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España (1858) para la línea Madrid - Irún, financiada por los franceses Pereire, que, más tarde, en 1874, anexionó el ferrocarril de Alar del Rey a Santander.

- Compañía de los Ferrocarriles Andaluces (1877).

Todas ellas funcionaban por separado hasta que empezó la Guerra Civil de 1936, para pasar luego a fusionarse, casi todas, en una compañía única, RENFE, que, además, englobaba la línea de Barcelona a Zaragoza, la de Almansa a Valencia y Tarragona. En definitiva, se construyó una red radial, similar a la de carreteras, cuyo centro neurálgico era Madrid. La principal particularidad de la red viaria española, con respecto a las redes europeas, son las peculiaridades orográficas que tiene el territorio español. La altitud varía desde los 0 m a nivel del mar en Alicante, a 1360,1 m en la estación de La Cañada (Ávila) (Figura 2.3). Al ser un país muy montañoso, necesita rampas para salvar estos desniveles; así, el 77% del trazado se desarrolla en pendiente, de las cuales, el 30% se sitúa entre 10 y 25 milésimas.

El ancho de vía español es de 1468 mm, mientras que el internacional es de 1435 mm, fijado en la conferencia de Berna de 1915. La diferencia de ancho se debe a que, antiguamente, para subir las mencionadas pendientes tan pronunciadas se tenían que utilizar maquinas más potentes y grandes en función de la relación tamaño – potencia.



Figura 2.3. Placa del Instituto Geográfico y Estadístico en la Estación de La Cañada. Elaboración propia.

No se debe olvidar que, en 1851, se inauguró la línea Madrid-Aranjuez, bajo la regencia de la reina Isabel II y patrocinio del Marqués de Salamanca, y que, vinculado a su destino, se denominó “Tren de la Fresa”. Más tarde, se construyó el ferrocarril de Valencia a Játiva, entre 1852 y 1854, además del ferrocarril para la minería de carbón entre Langreo y el puerto de Gijón.

El año 1877 proporcionó una nueva Ley General de Ferrocarriles, permitiendo la construcción de líneas transversales que igualaran los desequilibrios de ser Madrid el núcleo de la red y de esta manera se permitió la construcción de líneas de vía estrecha, ancho de vía inferior a 1,67 m, más económicas y con carácter marcadamente industrial. El ferrocarril más importante fue el de La Robla (1904), que une León con Bilbao.

Las conexiones con Francia estaban aseguradas a través de Barcelona y en 1881, se inauguró la línea de Madrid a Lisboa, cuya constructora fue la Compañía de Madrid a Cáceres y Lisboa.

En relación con el ferrocarril se construyeron y divulgaron los tranvías, así como los ferrocarriles suburbanos. Zaragoza tuvo un tranvía de tracción animal desde 1885 hasta 1902, año en que se creó la línea electrificada.

La primera ciudad en introducir el tranvía eléctrico fue Bilbao, en 1896, y después le siguió Cartagena, en 1898. Los tranvías en Madrid empezaron a circular en 1871, y en Barcelona, en el año siguiente. También Cataluña fue la impulsora del tren de cremallera de Montserrat, para salvar grandes desniveles, en 1892. Toda la red ferroviaria del siglo XIX se puede resumir en la Figura 2.4.

En 1919, se inauguró el Metro de Madrid, con la primera línea entre la Puerta del Sol y Cuatro Caminos, de 3,48 km y 8 estaciones. Más tarde, se amplió hasta 3 líneas.

En relación con el ferrocarril, la Primera Guerra Mundial, generó una serie de dificultades en las empresas del territorio hispano debido a la carestía del precio del carbón. De esta manera el gobierno de la época, propuso la nacionalización del ferrocarril, pero cediendo la explotación del mismo a las compañías ferroviarias.



Figura 2.4. Mapa de la red Ferroviaria Española durante el siglo XIX.

En 1911, se inauguró la primera línea electrificada en España, entre Gergal y Santa Fe, del ferrocarril de Linares a Almería. La razón de la electrificación no fue sólo la escasez del carbón sino el trazado de la línea en pendiente y la necesidad de una potencia adicional.

La solución a la diversidad fue la redacción del Estatuto Ferroviario, 1924, en el que el gobierno de Primo de Rivera, adjudicaba ayudas económicas a las compañías para la renovación de infraestructuras y material, además de regular las tarifas de transporte. Como consecuencia, en 1926, se aprobó el Plan Preferente de Urgente Construcción de los ferrocarriles que indicaba nuevas líneas complementarias a la red viaria existente, evitando la centralidad. Una nueva compañía, la del Oeste, apareció en 1928 con esas miras, para las compañías del noroeste de la península y, además, el Estado se convirtió en garante de las compañías quebradas a las que englobó.

La Compañía de los Caminos de Hierro del Norte de España continuó con la expansión de la electrificación, en este caso en la línea del Puerto de Pajares, obligado también por la necesidad de salvar grandes desniveles. Tras los buenos resultados logrados en la construcción de la mencionada línea, la misma compañía realizó lo propio en los tramos de Irún a Alsasua y Barcelona a Manresa. En 1935,

empezaron los trabajos de la electrificación de Madrid a Ávila y Segovia, pero se suspendió la obra debido a la guerra civil.

En 1926, se creó la Explotación de Ferrocarriles por el Estado (EFE), organismo encargado de la explotación de líneas férreas estatales o abandonadas, recuperando algunos trazados y mejorando el servicio que se estaba prestando. En 1928, se inauguró la Estación Internacional de Canfranc (Huesca) en la que el ejército nazi, durante la Segunda Guerra Mundial, estableció un puesto en la zona francesa. Por esta estación pasaron muchos trenes con materias primas, como el volframio para la industria alemana, a cambio de permitir el tránsito de trenes hacia Suiza, cargados de oro, y procedentes de la Estación de Francia, en Barcelona.

En el primer año de la guerra civil española se expropiaron por Decreto Ley, todas las líneas ferroviarias, pasando a ser la empresa "Red Nacional de Ferrocarriles" la encargada de toda la red viaria. Los republicanos durante la defensa de Madrid vieron cortadas las comunicaciones por vía férrea con el sur y el levante español.

Para evitar la escasez de alimentos, se decidió construir un enlace que bordease el frente franquista para alcanzar la capital y que se llamó "Vía Negrín"; la obra se realizó en un tiempo record de 100 días y se inauguró en 1937. El bando republicano construyó y financió el ferrocarril de Gibraleón a Ayamonte para recibir material bélico procedente de Portugal, además de la construcción del ferrocarril del Val de Zafrán, para el suministro de munición que se utilizó en la batalla del Ebro.

En 1936, se inauguró la línea 3 del Metro de Madrid, entre las estaciones de Sol y Embajadores. Todas las líneas metropolitanas de Madrid y Barcelona fueron usadas como refugios antiaéreos por la población civil o como depósito de material bélico, durante la guerra civil española.

En 1941, se nacionalizaron todos los ferrocarriles españoles de ancho ibérico; mientras que las compañías de vía estrecha mantuvieron su independencia, a través de la Ley de Bases de ordenación Ferroviaria y de los Transportes por carretera. Se unificaron señales y reglamentos de todas las compañías. El único invento relevante en estos años fue el tren diseñado por Alejandro Goicoechea, TALGO (Tren Articulado Ligero Goicoechea Oriol), que pasó a ser el primer tren articulado, llamado Talgo I.

Las primeras compañías, las de 1,67 m de ancho, se integraron en la Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles (RENFE), cuyo logotipo se presenta en la Figura 2.5, que unificó material y reconstruyó las infraestructuras, aprobándose, en 1949, el Plan Guadalhorce (denominado así por el entonces presidente de Renfe) o Plan General de Reconstrucción y Reformas Urgentes, cuyo objetivo primordial fue la electrificación de las líneas, además de permitir la circulación del Talgo de Madrid a Hendaya y la renovación de la vía mediante la sustitución del carril tradicional por el carril soldado.



Figura 2.5. Logotipo de RENFE.

El tráfico se automatizó mediante el Control de Tráfico Centralizado (CTC) cuyo hito fue la regulación del tráfico entre Ponferrada y Brañuelas. El Plan Marsall, de ayuda americana, hizo que se pusiera en marcha el Plan General de Electrificación, la compra de material diésel, la renovación de material obsoleto y el empleo del ferrobús.

El Banco Mundial recomendó a España una serie de medidas para la estabilización de la economía que se plasmaron en el Plan Decenal de Modernización (1964/1973) y que se fijaron en la renovación de vía, la construcción de estaciones de mercancías, la compra de nuevos vagones, la sustitución de la tracción vapor por eléctrica y diésel, la circulación de los trenes TAF³, TER⁴ y Talgo III, la amortización de líneas deficitarias, la modernización de sistemas con el empleo de programas informáticos y un largo etcétera.

En 1967, se inauguró la nueva Estación de Chamartín en Madrid y el denominado “Túnel de la Risa”, que conectaba Chamartín con la estación de Atocha,

³ Tren Automotor FIAT. Automotores diésel empleados por RENFE entre 1950 – 1980.

⁴ Tren Español Rápido. Trenes de la serie 597. Automotores diésel utilizados por RENFE entre 1965 – 1990.

lo que provocó la reducción del tráfico en la estación del Norte y el cierre definitivo de la estación de Delicias, más tarde sede del Museo del Ferrocarril. Además, en Barcelona, se construyó la estación de Sants, más grande que la estación del Norte de la misma ciudad y que, luego, fue clausurada.

Se llegó a lograr el reto de plasmar el proyecto de la línea de Madrid a Burgos, inaugurada en 1968, y cuya andadura se había iniciado en 1930. Cabe destacar y será objeto de un comentario espacial, que, en 1992, se puso en funcionamiento la primera línea de Alta Velocidad en España, entre Madrid y Sevilla (Figura 2.6), siendo éste el germen de las líneas de la Alta Velocidad Española (AVE). Esta gran obra se debe vincular al estudio de ensayos con circulación de vía en placa, 1975, en el tramo experimental entre Ricla y Calatayud, donde se alcanzaban velocidades de 190 km/h.



Figura 2.6. Inauguración de la Alta Velocidad Española. Europa Press.

El Contrato Programa aparece en 1977, relacionado con la creación del Ministerio de Transportes, y en el que el estado aportaba los recursos para explotación e inversiones y Renfe mantenía la calidad. El ministerio se dedicó a construir doble vía en las líneas principales, también ramales de pequeñas dimensiones en los entornos urbanos; además, se desarrollaron grandes complejos para el transporte de mercancías (estaciones de Abroñigal, Vicálvaro, La Sagrera), y la puesta en funcionamiento el sistema ASFA, de frenado automático, con el fin de evitar accidentes y que auxilia al maquinista en los rebases de las señales en rojo.

Todas estas mejoras potenciaron el uso del ferrocarril, pero fue preciso esperar a 1984, año en el que un Contrato Programa intervino en la financiación, excepto en las

líneas altamente deficitarias, lo que obligó al cierre de doce líneas y 132 estaciones para economizar gastos. Posteriormente, en 1986, se aprobó el Plan de Transportes Ferroviarios (PTF), en el que se apostó, sobre todo, por la competitividad del ferrocarril con otros medios de transporte, un incremento en la velocidad por encima de 200 km/h, nuevos accesos ferroviarios a Andalucía (construcción de la nueva estación de Sevilla Santa Justa), una posible variante en Guadarrama para alta velocidad y desatascar la variante de Orduña. Con el tiempo se comprobó que eran sólo intenciones ya que no todas se pudieron realizar.

La preferencia se centró en el triángulo Madrid/Barcelona/Valencia/Alicante para Alta Velocidad, aunque finalmente se focalizó en el corredor mediterráneo y en las líneas de cercanías, como alternativa a los desplazamientos próximos y en los grandes trenes para mercancías.

Los ferrocarriles de vía estrecha se transfirieron a las comunidades autónomas que les dotaron de importantes mejoras, vinculadas a la construcción del Metro en Bilbao y Valencia, para complementar el sistema de transportes.

La entrada de España en la UE obligó a la liberalización de los transportes, llevando a que las infraestructuras pudieran ser utilizadas por operadores privados. Se inició así una etapa de sustentación por sí misma de las compañías ferroviarias, es decir, se precisaba que fuera autosuficiente, lo que indujo a un cambio de mentalidad en la empresa ya que, en 2005, la Ley del Sector Ferroviario, creó el ente público Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), cuyo logotipo se proporciona en la Figura 2.7, con GIF (Gestor de Infraestructuras Ferroviarias, creado en 1997, para construir la línea de Alta Velocidad de Madrid a Barcelona) y parte de Renfe, encargado de las mismas, por un lado, y Renfe Operadora, por otro, cuyas atribuciones se centran en la explotación de los ferrocarriles de ancho ibérico, ancho internacional y vía estrecha.



Figura 2.7. Logotipo de ADIF.

Con el paso del tiempo las necesidades actuales hicieron que los requisitos de desplazamiento de unos lugares a otros precisaran de tiempos cada vez más cortos. De esta forma los eternos viajes en tren han visto acortada su duración gracias a las velocidades superiores a los 250 km/h que adquieren los trenes. Se produjo así una revolución, no sólo en el material rodante, sino en las instalaciones, en el trazado férreo y en los sistemas de conducción, que deben conservar, sobre todo, su seguridad.

Algunos de los requisitos en este tipo de transporte son, por ejemplo, en cuanto al trazado de la vía, curvas de radio de gran amplitud (3000 a 3500 m, cuando en una línea convencional son de 500 m); distancia intervías superior a la actual; lo mismo que los túneles; confinamiento de las estructuras mediante vallas y electrificación a alta tensión; las composiciones de los trenes tienen que ser únicas e indeformables, con cabecera y cola de cabezas motrices; señalización especial ya que al circular a tan alta velocidad requiere una señalización también en la cabina de conducción (sistema ERTMS que vigila el cumplimiento de todas las ordenes de circulación al maquinista).

Además, el maquinista tendrá comunicación constante a través de radio o GSM-R con el puesto de mando; sistema de frenado, es decir, que sea generador de energía y pueda devolver ésta a la red. Además de usar frenos de disco y sistema doble de suspensión, intermedio entre suspensión neumática y de muelles de acero, entre otras mejoras necesarias y que se han introducido en el sistema.

La primera línea de Alta Velocidad en Europa funcionó en 1927, entre las ciudades de Roma y Nápoles. Luego le siguieron las de Bolonia y Prato, cruzando por el túnel de los Apeninos. Hoy, Italia cuenta con uno de los trazados más largos, con cerca de 1320 km de vías. El tren italiano fue el primero en superar los 200 km/h, en 1939.

No obstante, quienes implantaron por primera vez la línea de Alta Velocidad fueron los japoneses, en 1940, con la línea Tokio a Shimonoseki, servida por locomotoras eléctricas. Más tarde, se amplió la línea a Pekín y Singapur, y en 1964, se inauguró la línea Tokaido a Shinkansen, con una velocidad punta de 210 km/h, con motivo de los juegos Olímpicos de Tokio de ese mismo año y que se denominó "tren

bala” por su rapidez y puntualidad. En 1975, se extendió la línea hasta Hiroshima llegando a cubrir una longitud de 550 km, cuyos hitos más destacados son que la mitad del recorrido circula por túneles y más de la tercera parte, por viaductos. Actualmente, Japón es el segundo país, a nivel mundial, en kilómetros construidos, de líneas de alta velocidad, por detrás de China.

En Francia se debió esperar al año 1981, para inaugurar la línea entre París y Lyon, denominándose TGV (*train de grand vitesse*), proyectada en 1976. La velocidad máxima era de 270 km/h. Ahora, el país vecino cuenta con una amplia red de alta velocidad, de estructura concéntrica, irradiando desde París. Se debe mencionar el conocido como Eurostar (para pasajeros y Shuttle para mercancías), que circula por el Eurotúnel (Figura 2.8), cruzando el Canal de la Mancha, entre Francia e Inglaterra desde 1994, y cuyo tiempo de recorrido es de 35 minutos para 50 km, de los cuales, 39 km son submarinos. La explotación corresponde a varias empresas privadas hasta 2052. También tienen nombre propio el tren Thalys que llega hasta Ámsterdam (Holanda).



Figura 2.8. Tren Eurostar, cruzando el Canal de la Mancha. Tomado de Espanol.upi.com.

En 1965, las ciudades alemanas de Múnich y Augsburg fueron unidas por la Alta Velocidad a 200 km/h, bajo el auspicio de la compañía de los ferrocarriles alemanes (DB). Esta compañía optó por modificar la infraestructura y acondicionarla, cambiando las características de la vía en cuanto a curvas y peraltes. Además, adquirió trenes de última generación susceptibles de alcanzar 300 km/h. Así, en 1991,

circuló el denominado tren ICE. La red de Alta Velocidad alemana cuenta con cerca de 2500 km de vía, de los cuales 600 km, son de nueva construcción, pudiendo circular a una velocidad de 300 km/h.

Otro país que ha entrado en el club de la Alta Velocidad ha sido Corea del Sur que, en 2004, dispuso de trenes tipo AVE de tecnología francesa, circulando a velocidades de 300 km/h. Con motivo de los Juegos Olímpicos de Pekín, en 2008, se inauguró la línea de Alta Velocidad interurbana Pekín-Tianjin, con el record de velocidad en trenes de pasajeros: 350 km/h. China es el único país que cuenta con una línea de tren con levitación magnética. Estos trenes funcionan con unos potentes motores magnéticos, creando grandes campos magnéticos que levantan los trenes unos milímetros y avanzan. Los motores se sitúan en el carril a diferencia de los trenes convencionales, lo que hace que el vagón pese menos y así, al arrancar y parar, lo hace en menos tiempo del habitual. La línea de levitación magnética une la ciudad de Shanghái con su aeropuerto, a 30 km de distancia, tarda 7 minutos y se desplaza a una velocidad punta de 431 km/h y una velocidad media de 250 km/h.

En África, la única línea de Alta Velocidad está en Sudáfrica, conectando Johannesburgo y Tshwane, inaugurada en 2010, con motivo del Mundial de Fútbol.

En España, a finales de los años 60 del siglo pasado, se inició el estudio de una línea de Alta Velocidad y la construcción, más tarde, de un tren de esa categoría basado en los que disponía la SNCF francesa (TGV), que sirviese de vínculo entre la meseta castellana y Andalucía, pasando por el desfiladero de Despeñaperros y que dispusiera, además, de ancho Internacional (UIC). La línea previa antigua era vía única, tenía radios de curvatura muy reducidos y estaba saturada de trenes.

El 21 de abril de 1992 entró en funcionamiento la línea de Alta Velocidad de Madrid a Sevilla, con motivo de la Exposición Universal de esta ciudad. Se diseñó para transitar a una velocidad máxima de 300 km/h. El servicio se inició con 6 trenes por sentido, que circulaban a una velocidad de 250 km/h, con una duración del trayecto de la línea, de 2 horas y 55 minutos, frente a las 7 horas que se tardaba anteriormente.

Estaba construida en ancho internacional, sobre una plataforma de 13,3 m, vías banalizadas para que los trenes pudieran circular, indistintamente, en cualquier sentido, electrificada con corriente monofásica de alta tensión y frecuencia industrial. Las, comunicaciones y señalización eran de última generación, con enclavamientos

electrónicos (Figura 2.9) y un sistema de protección automática de trenes, LZB, controlados desde el centro de mando situado en la estación de Atocha, en Madrid, con telecomunicaciones a través de fibra óptica.

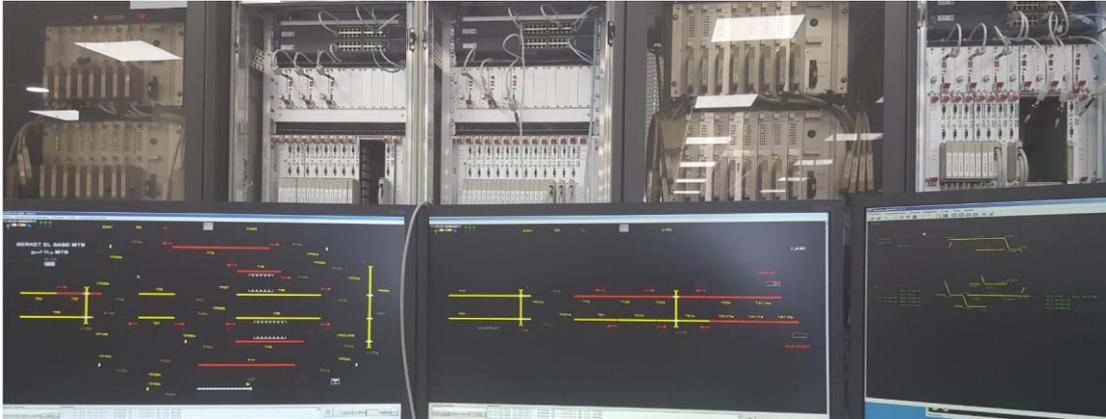


Figura 2.9. Enclavamiento electrónico. Elaboración propia.

Además, se pensó en el transporte de pasajeros y mercancías. Más tarde, se inició el desplazamiento por lanzaderas, entre las ciudades de Madrid, Ciudad Real y Puertollano, que utilizaban parte de la infraestructura, pero no completaban el recorrido hasta Sevilla.

Con posterioridad se construyeron las líneas Madrid – Barcelona, Madrid – Segovia – Valladolid, esta última, atravesando la Sierra de Guadarrama a través de su túnel. Ahora se está construyendo la variante de Pajares para conectar la Meseta castellana con Asturias.

Se creó también un servicio especial de Alta Velocidad para circular por ancho ibérico, “Euromed”, pasando por el corredor del Mediterráneo (Barcelona, Valencia y Alicante) y le siguieron los trenes Alaris entre Albacete y Madrid, a una velocidad de 200 km/h.

En 2006, entró en funcionamiento el AVE a Antequera y un año más tarde, a Málaga, con 11 trenes diarios por sentido. En ese mismo año se incrementó la velocidad de los trenes AVE de 200 a 250 km/h, con motivo de la puesta en servicio del ERTMS nivel 1, pasando un año más tarde, a desplazarse a 300 km/h.

El 18 de diciembre de 2010 se inauguró la línea Madrid – Valencia, y en 2013, la de Barcelona – Figueras y Albacete - Alicante.

El futuro de la Alta Velocidad se extiende a otros países como Arabia Saudí, Argentina, Brasil o Estados Unidos de América. En California se está diseñando un nuevo tren de Alta Velocidad que unirá las ciudades de San Francisco y Los Ángeles en menos de 2 horas y media.

La UE tiene un proyecto a nivel europeo para construir una red de Alta Velocidad, cuyas características no son comparables con los países en los que circulan trenes rápidos, por ejemplo, Italia (línea *directissima* entre Florencia y Roma), Suecia, Rusia, o incluso, Gran Bretaña.

2.2. Historia del cemento

Los cementos primitivos tienen su origen en el Mediterráneo oriental hacia 7000 a.C. (Bonen, Tasdemir, & Sakar, 2011). Cuando el hombre empieza a vivir en asentamientos permanentes se percata de que ciertos suelos y rocas, en contacto con el fuego, adquieren propiedades hidráulicas.

Hace unos 5000 años que aparecieron, en el norte de Chile, las primeras obras en las que las piedras estaban unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas y que se empleaban como mortero en las paredes de las chozas de la zona.

Los egipcios (circa 2600 a.C.) usaban morteros de yeso y cal en sus construcciones; así, el yeso hemihidrato obtenido de la cocción de yeso a 120°C fue utilizado en la construcción de la pirámide de Keops (Mingarro, 1996), lo mismo que en el templo de Amón, en Karnak, donde se observa la existencia de anhidrita en las uniones entre los bloques de piedra.

En la cultura griega, en la Grecia continental, Troya y Micenas, disponían piedras unidas por medio de arcilla en sus muros, para más tarde, emplear conglomerantes a base de cal, yeso y áridos, sobre todo polvo de mármol, en la construcción de

viviendas en Delos y Thera (Mingarro, 1996), utilizando, después, morteros a base de cal con arena y polvo volcánico o tierra de Santorini, que se reconoce en los estucos ornamentales del Hephasteion. Estos morteros tenían la ventaja de ser resistentes y estables al agua (Alejandre, F.J., 2002) y pueden considerarse los precursores de las puzolanas.

En el siglo IV a.C., los griegos descubrieron las ventajas de mezclar puzolanas naturales con cal, arte que perfeccionaron los romanos. Son éstos los primeros en utilizar sistemáticamente puzolanas sintéticas, añadiendo cerámica cocida, finamente triturada a los morteros de cal. Los romanos llamaron a este material, capaz de producir mezclas fluidas y endurecer a lo largo del tiempo, *caementum*, sustantivo del verbo *caedere* = cortar. Es, en el tratado “*De Architectura*” de Vitruvio donde se puede encontrar, por primera vez, la composición de un mortero que se ha perpetuado a lo largo de los siglos hasta la actualidad. Marco Vitruvio Polion fue arquitecto, ingeniero y erudito romano en el siglo I a.C., al servicio de Julio Cesar. Su tratado se divide en 10 libros, de los cuales el segundo, trata de los materiales (adobes, arena, cal, polvo de Puzo, canteras, madera).

Los romanos dieron un paso importante al descubrir las propiedades que tenía un cemento fabricado cuando se mezclaba ceniza volcánica con cal viva, era el *Opus caementicium*. En Puteoli, Pozzuoli, se encontraba un depósito de estas cenizas, de aquí el actual nombre de cemento de puzolana, que se equipara a la tierra de Santorini, utilizada por los griegos con fines similares. La técnica es la aplicada, por ejemplo, en el Panteón de Roma y se inicia en esta época, con la adición, además, de la albúmina, la caseína, la urea o los aceites.

Con la caída del Imperio Romano los progresos realizados en la construcción se estancan y la calidad de los elementos constructivos se deteriora. Sólo a partir del siglo XII se recuperan las buenas técnicas de elaboración de cal y preparación, por ejemplo, de arena, que se vuelve a lavar para evitar la adición de arcilla en los morteros.

No se conoce mayor progreso en la tecnología del cemento hasta mediados del siglo XVIII; así, en 1756, John Smeaton (ingeniero inglés de Yorkshire) sintetiza un cemento de alta calidad (terras alemanas equivalentes a dos medidas de cal apagada por una de puzolana) para reconstruir, en 1758, el faro de Eddystone en Cornish. Estos preparados de cemento eran los que mejor resultado daban cuando se ponían

en contacto con el agua marina, ya que su mezcla con arcilla hacía que fraguasen bajo el agua y al endurecer la mezcla de arcilla y caliza, eran insolubles (Hewlett, 2017). En 1798, James Parker popularizó el término “cemento romano” para designar el que se obtenía por calcinación de calizas arcillosas y que se endurecía, rápidamente, bajo el agua.

Vicat, en 1817, desarrolló el sistema de fabricación del cemento actual, el sistema de la vía húmeda, desde mezclas de calizas y arcillas en proporciones adecuadas y molidas a la vez (Fernández Cánovas, 2013) y que expuso en su libro “Recherches experimentales”, completado en 1828, con “Mortiers et ciments calcaires”.

A partir de ese momento, Joseph Aspdin (constructor de Leeds, Inglaterra) desarrolló, en 1824, los primigenios prototipos de cemento Portland (ya que al amasar el material con agua y arena se lograba un conglomerado similar a la piedra natural de Portland, en la costa sur de Inglaterra), a partir de una mezcla idónea de materiales calizos y arcillosos, que una vez calcinados, daban lugar al clinker (Puig Montraveta, 2007); (Bustillo, 2008) y que, además, fueron objeto de patente, en 1838, desarrollada junto con James Parker. Posiblemente, el material patentado era una caliza hidráulica debido a las bajas temperaturas empleadas en la cocción. En 1838, Brunel utilizó por primera vez, un cemento de la fábrica de Aspdin, en el que se había mejorado la temperatura de cocción, para la construcción de un túnel bajo el río Támesis.

En 1845, el control de temperatura modificado por Isaac Johnson, para clinkerizar la mezcla de arcilla y caliza, hizo que el cemento Portland sustituyera a los cementos naturales en el desarrollo de construcciones de ferrocarriles, puentes, puertos, etc. Michaelis, en 1870, y Le Chatelier, en 1880, son considerados como los verdaderos desarrolladores del cemento.

El 4 de junio de 1864 se inició la actividad de "Portland-Cement-Fabrik Dyckerhoff and Söhne", una nueva compañía que se especializó en este nuevo material, el cemento. El fundador fue Wilhelm Gustav Dyckerhoff. En 1886, se firmó uno de los contratos más grandes de sus canteras, el suministro de 8000 barriles de cemento Portland en los Estados Unidos, procedente de Alemania, cemento para la construcción de la base de la estatua de la Libertad. Esta fue la orden de cemento más grande realizada en los Estados Unidos de América.

El inicio de la fabricación del cemento Portland en España data de 1898, en Tudela Veguín (Asturias), una vez que quedó libre la patente original.

Las escorias granuladas de horno alto, así como las cenizas procedentes de la combustión del carbón ya se usaban como adiciones puzolánicas a finales del siglo XIX (Jones, 2002).

Durante el siglo XX el uso de mezclas con adiciones minerales como clinker de cemento Portland, resulta una práctica común como elemento clave para reducir costes de producción, así como para mejorar las prestaciones de los materiales base cemento. En España, hay que esperar hasta finales de 1959, con la aprobación del “Pliego de condiciones para la recepción de los conglomerantes hidráulicos en obras oficiales”, para posibilitar la incorporación de adiciones minerales, en proporciones inferiores al 10%, en la elaboración de los cementos Portland.

El cemento se fue posicionando como el principal conglomerante hidráulico utilizado en la fabricación de hormigones puesto que, a diferencia de los arcaicos sistemas cal/puzolana, manifiesta un fraguado y endurecimiento más rápido y eficaz de acuerdo a las necesidades de la construcción moderna y cuando se patentan los métodos de transporte de hormigón fresco (1903 y 1907), ideados por Juergen Hinrich Magens, el cemento se consolida como un material prometedor. En un periodo de 100 años la producción anual de cemento Portland pasó de unos pocos millones de toneladas anuales, a más de 1600 millones de toneladas (Malhotra, V.M., 1999). En la actualidad su fabricación supera 2600 millones de toneladas anuales (Oficemen Homepage, 2019).

A la vista de las ingentes cantidades de cemento demandadas en este comienzo de siglo, y en el marco del nuevo contexto de desarrollo sostenible que ha ido emergiendo desde finales de la década de los años 80 del siglo pasado, la industria de fabricación de cemento está llamada a conciliarse con el medio ambiente.

Entre los principales impactos medioambientales asociados al proceso de fabricación del cemento cabe destacar:

- 1) La explotación de canteras a partir de las cuales se extraen las materias primas que nutren el proceso de fabricación de clinker de cemento. Constituye un

importante consumo de recursos y espacios naturales y da lugar a otro tipo de impactos (visuales, ruido, polvo en suspensión, pérdida de biodiversidad, etc.).

2) Las actividades de manipulación, almacenamiento y procesado de materiales de forma pulverulenta suponen emisión de partículas e importantes volúmenes de gases de efecto invernadero. Por cada tonelada de clinker de cemento Portland producido, se libera alrededor de una tonelada de CO₂, principal contribuyente a dichas emisiones, responsables del calentamiento global de la atmósfera.

3) Tras las industrias de fabricación de acero y aluminio, el proceso de fabricación de cemento consume alrededor de 4 GJ de energía por tonelada de clinker producido (Malhotra, V.M.; Metha, P.K., 2002).

Consciente de los impactos anteriores el sector cementero lleva varios años desarrollando una serie de actuaciones dirigidas a reemplazar parcialmente los combustibles y materias primas tradicionales en los procesos de fabricación. Dicha sustitución parcial se está llevando a cabo con la incorporación de residuos o subproductos industriales, toda vez, que se ofrece una solución ecológica y segura a la gestión de determinados flujos residuales.

La generación de residuos es cada vez mayor en los países desarrollados y con economías emergentes, merced a la creciente avidez por alcanzar mayores niveles de bienestar que incentivan el consumo, muchas veces desmesurado. Constituye un hecho afortunado el que cada vez se abran más posibilidades para el aprovechamiento de materiales procedentes de los residuos, gracias al avance tecnológico, verdaderamente incesante, en los últimos años, en este campo. Esta circunstancia obliga a establecer directrices para la selección de la mejor opción de gestión posible de los diferentes residuos, ya que es evidente la imposibilidad de hacer análisis de impacto específicos para cada residuo y en cada circunstancia concreta.

Este es el origen del principio de jerarquía de gestión de residuos que consiste en una secuencia ordenada de modalidades de gestión, de mayor a menor calidad ecológica, y que se acepta como directriz general a la hora de decidir o escoger la mejor gestión para los residuos.

Naturalmente, este principio solo es aplicable cuando hay más de una opción de gestión posible, entendiendo este término como su viabilidad técnica y económica. Hoy en día, pocos son los que discuten su necesidad, si bien existen algunas divergencias acerca de los niveles de que debe constar.

En la ley española de residuos (Ley de Residuos 10/98, 1998) artículo 1.1, se adoptó el principio de jerarquía de 5 niveles: prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y eliminación (vertedero, incineración sin recuperación, energética, o con baja recuperación energética). El principio de jerarquía es necesario, por múltiples razones, algunas muy evidentes. La experiencia acumulada a lo largo de los últimos decenios, los datos empíricos disponibles, junto con estudios de impacto ambiental comparativos entre modalidades de gestión, ponen de manifiesto que el orden establecido en el principio de jerarquía de los cinco niveles está justificado

De acuerdo con los criterios descritos, la industria cementera aprovecha recursos materiales o energéticos latentes de los residuos, actuando de las siguientes maneras:

- Valorización energética de determinados tipos de residuos orgánicos, utilizándolos como combustible alternativo, entre los que cabe destacar los neumáticos fuera de uso, harinas animales, residuos de madera y plásticos, residuos peligrosos líquidos, etc.
- Valorización material de residuos como materias primas para la preparación de crudo (cenizas, lodos de papelera, arenas de fundición) o como adiciones minerales en la molienda del cemento (escorias de horno alto, cenizas volantes, humo de sílice, etc.).

De entre las diferentes opciones de valorización de residuos de cementera, la incorporación como adición mineral en la fase final de molienda, resulta la más atractiva por:

1. Razones económicas, asociadas a una reducción de los costes de producción, de explotación de canteras y de comercio de emisiones de gases de efecto invernadero.

2. Técnicas, relativas a una mejora en las prestaciones (resistencia y durabilidad) del cemento final.
3. Ambientales, concernientes a una reducción de emisiones por chimeneas y menor generación de CO₂, asociado a la descarbonatación del carbonato cálcico, presente en el crudo que se introduce en el horno cementero.

2.3. El cemento Portland

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico que, finamente molido y amasado con agua, forma una pasta que fragua por medio de reacciones y procesos de hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua (UNE-EN 197-1, 2011).

Es un material básico para la edificación e ingeniería civil. Su principal propiedad es la de conformar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua. El endurecimiento acontece transcurrido un cierto tiempo desde el momento en que se realiza la mezcla, antes de lo cual constituye una masa fluida que permite ejecutar estructuras con diversas formas geométricas de manera muy versátil.

Dichas cualidades de moldeo, resistencia y durabilidad, unidas a un coste económico moderado, contribuyen a que los materiales derivados del cemento, sean de gran aplicación en el sector de la construcción.

El proceso de fabricación de cemento contempla tres etapas diferenciadas:

1. Obtención y preparación de materias primas (caliza, marga, correctores encargados de aportar óxido de calcio, cal, y arcillas que proporcionan sílice) que garanticen la incorporación de los óxidos fundamentales necesarios para sintetizar el clinker de cemento. Las materias primas son molidas (para facilitar las reacciones químicas que ocurren durante la cocción del crudo en el horno) y homogeneizadas, para conseguir el crudo (harina de crudo). Se precisa, además, la dosificación, es decir, la determinación de las proporciones de las materias primas (CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) que se unifican para formar el crudo (Sorrentino, 2008).

El CaO se obtiene desde materiales ricos en cal, como calizas, margas, conchas marinas, arcilla calcárea, greda. SiO₂ y Al₂O₃, proceden de las arcillas, pizarra, ceniza muy fina o arena y Fe₂O₃, tiene su origen en el mineral de hierro, costras de laminado o algún material semejante, para suministrar el hierro o componente ferrífero.

Con los dos primeros componentes, CaO y SiO₂/Al₂O₃, se produce cemento Portland blanco, el tercero, Fe₂O₃, es un material fundente que reduce la temperatura de calcinación necesaria para la producción del cemento gris (Tabla 2.). Esta disminución en la temperatura, hace que sea más económica su fabricación, en relación al cemento blanco, aunque ambos poseen las mismas propiedades aglomerantes.

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

Tabla 2.1. Clasificación de cemento.

	Óxido	Porcentaje medio (%)	Tipo de cemento
Cal combinada	CaO	62,5	C
Sílice	SiO ₂	21	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	6,5	A
Hierro	Fe ₂ O ₃	2,5	F
Cal libre	CaO	0	
Azufre	SO ₃	2,0	
Magnesia	MgO	0,5	
Álcalis	Na ₂ O/K ₂ O	2,0	
Pérdida al fuego	P.F.	2,0	
Residuo insoluble	R.I.	1,0	

2. La cocción del crudo en hornos rotatorios especiales hasta alcanzar 1450°C para la obtención de un producto semielaborado denominado clinker de cemento, que está compuesto por cuatro óxidos mayoritarios (CaO, 60 a 70%, SiO₂, 18 a 22%, Al₂O₃, 4 a 6% y Fe₂O₃, 2 a 4 %). Otros óxidos se encuentran en proporciones menores, como Na₂O, K₂O, MgO y SO₂ (Barnes & Bensted, 2002). Mineralógicamente, los principales componentes del clinker son C₃S (silicato tricálcico o alita, 55 a 65%), C₂S (silicato bicálcico o belita, 15 a 25%), C₃A (aluminato tricálcico) y C₄AF (ferritoaluminatos cálcicos, 20 a 25%). Las fases mayoritarias del clinker son silicatos cálcicos (>65%), siendo el tricálcico el fundamental, seguido del bicálcico (Taylor, 1997). El crudo puede insertarse en el horno por:

- Vía húmeda (mezclado con agua, resultando una pasta de 30/40% de agua).
- Vía semihúmeda, cuyo contenido de humedad es de 16/21% de agua.
- Vía semiseca (humedad entre 10/12% de agua).
- Vía seca, que es la que predomina en la industria cementera, donde la mezcla tiene entre 0,5 y 1,0% de agua. Al final del proceso se consigue el clinker que consiste en nódulos esféricos de diámetro entre 5 y 25 mm.

3. Por último, una molienda conjunta de clinker con otros componentes, fundamentalmente el regulador de fraguado (el más frecuente es yeso). Cabe la posibilidad de mezclar el clinker con adiciones reguladas en la norma (UNE-EN 197-1, 2011).

Se puede establecer una serie de categorías de cemento según el tipo de aplicaciones que se deseen, así se puede hablar de:

1) Cemento Portland Tipo I o cemento normal, que se produce por la adición de yeso al clinker. Es el más corriente de todos los cementos en obras donde no se precise una construcción específica. A los 28 días se le considera que ha desarrollado el 100% de su resistencia relativa.

2) Cemento Portland Tipo II o cemento modificado para usos generales. Resiste moderadamente la acción de los sulfatos y se emplea también cuando se requiere un calor bajo de hidratación. El cemento Tipo II adquiere resistencia más lentamente que el Tipo I, pero al cabo del tiempo ambos se igualan. Las características de este tipo de cemento se consiguen al imponer modificaciones en el contenido de aluminato tricálcico (C_3A) y silicato tricálcico (C_3S) del cemento.

3) Cemento Portland Tipo III o cemento de alta resistencia inicial, recomendable cuando se necesita una resistencia temprana en una situación particular de construcción. El mortero elaborado con el cemento Tipo III desarrolla una resistencia en tres días, equivalente a la existente a los 28 días para los tipos Tipo I y Tipo II.

4) Cemento Portland Tipo IV o cemento de bajo calor de hidratación, que gana resistencia con lentitud.

5) Cemento Portland Tipo V de alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Cabe aún considerar los denominados tipos especiales como el cemento Portland blanco, caracterizado por su color al evitar, en el proceso de fabricación, las materias primas que llevan hierro y óxido de magnesio, componentes que dan la coloración gris al cemento.

También se elabora el cemento Portland de escoria de alto horno, mediante la pulverización conjunta del clinker Portland y escoria granulada finamente molida con adición de sulfato de calcio; el cemento siderúrgico supersulfatado (mediante pulverización de escoria de alto horno con pequeñas cantidades de sulfato de calcio); cemento Portland puzolánico (mediante la molienda del clinker con una puzolana en una proporción de entre 15 y 50% de la masa total y cuya propiedad fundamental es su resistencia a los ataques de agua de mar); cemento Portland adicionado (pulverizando el clinker con materiales arcillosos o calcáreo silíceo arcillosos) y el cemento aluminoso (con un clinker aluminoso pulverizado, que le confiere una gran resistencia inicial y a la acción de los sulfatos).

2.4. Cementos con adiciones minerales

Las adiciones minerales están constituidas por materiales inorgánicos de origen natural o subproductos industriales que, finamente molidos, se añaden al clinker en proporciones definidas (Puertas, 2001), para mejorar ciertas propiedades del cemento en su estado fresco (trabajabilidad y tiempo de fraguado) o en su estado endurecido (resistencias o durabilidad). Las adiciones se pueden clasificar como activas o inertes.

A principios de la década de 2000, se aprobó la normativa europea relativa a especificaciones y criterios de conformidad de los centros comunes, que se traspone a la normativa española como norma (UNE-EN 197-1, 2011), contemplando el uso de ciertas adiciones utilizables en la fabricación de cemento, como son las escorias de horno alto, ceniza volante silíceo y calcárea, humo de sílice, puzolanas naturales, puzolanas naturales calcinadas, esquisto calcinado o calizas.

Las adiciones inertes no se comportan como tales, sino que tienen una actividad física que depende del grado de finura y división del material utilizado. Una de las más empleadas es el filler calizo.

Se denominan adiciones activas a aquellos materiales capaces de reaccionar, bien con el hidróxido cálcico, en presencia de agua, generado en la hidratación de los silicatos del cemento para formar compuestos insolubles y de elevada estabilidad, bien directamente con el agua para generar productos de reacción cohesivos. Los primeros son los denominados materiales puzolánicos de origen natural o artificial. Los segundos son los denominados materiales hidráulicos.

Horton (Horton, 2001) anunciaba a principios de siglo, nuevas oportunidades para el mercado de las puzolanas que, atendiendo a su amplia disponibilidad a escala global, podrían llegar a sustituir hasta un 50% del cemento que se consume en el mundo, si bien en muchos países la normativa vigente limita el alcance de tales niveles de sustitución.

Las adiciones puzolánicas o puzolanas se definen como materiales que, carentes de propiedades cementicias y de actividades hidráulicas por si solas, contienen importantes ácidos que se combinan con la cal a temperaturas ordinaria y en medio acuoso, dando lugar a compuestos insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos (Calleja, 1987) y sus materiales no son cementantes

por si mismos pero que, en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido cálcico formando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (Taylor, 1997); (Xu, A.; Sarkar, S.L.; Nilsson, L.O., 1993); (UNE-EN 197-1, 2011).

Las puzolanas se clasifican en naturales y artificiales (Soria Santamaría, 1983). Las primeras no precisan ningún tratamiento para su uso, son activas por sí mismas, y pueden ser materiales de origen volcánico, es decir, piroclastos expulsados por los volcanes que sufren un enfriamiento rápido después de la salida por el cráter. Su estructura es vítrea y a su vez, pueden ser: materiales incoherentes o sueltos (las tradicionales de Puzzuoli y Santorini y rocas vítreas tipo riolita), o materiales compactos (tuffa), procedentes de la compactación de los anteriores por meteorización o argilización. También son naturales algunos materiales de origen sedimentario como las arcillas o las tierras de diatomeas, utilizadas en Rusia o Dinamarca y, por último, materiales de origen mixto, constituido por rocas variadas de naturaleza volcánica, sedimentaria u orgánica y entre las que se puede citar la tierra blanca italiana.

Según Massazza (Massazza, 2002), la composición química de estas puzolanas naturales sería SiO_2 (40-80%), Al_2O_3 (2-20%), Fe_2O_3 (0,5-14,0%) y CaO (0,2-15,0%), como componentes mayoritarios.

El otro gran grupo de puzolanas son las artificiales que resultan de la transformación química y/o estructural de materiales que, originariamente, no presentan actividad puzolánica. Entre ellas se puede encontrar:

1. Ceniza volante o producto sólido y dividido que procede de la combustión del carbón pulverizado en las centrales termoeléctricas. Las partículas finas son arrastradas por los gases del proceso y recuperadas en filtros, generalmente en forma de pequeñas gotas fundidas debido a las altas temperaturas alcanzadas que, por su rápido enfriamiento, presentan estructura vítrea. Dependiendo del tipo de carbón utilizado, la composición química de las cenizas cambia; así, las de hulla son ricas en sílice y alúmina con bajos contenidos en cal (pueden tener bajo o alto contenido en cal, lo que las clasifica), siendo mineralógicamente vidrios de aluminio con calcio y magnesio, apareciendo algún mineral cristalino como hematites, magnetita, cuarzo, gehlenita o mullita.

2. Humo de sílice o microsíllice es un subproducto que aparece en la fabricación del silicio metálico y del ferrosilicio en los hornos de arco eléctrico. En estos hornos se alcanzan temperaturas superiores a 2000°C con la consiguiente descomposición del cuarzo que, en su fase vapor y al enfriarse, se condensa como macropartículas esféricas de sílice amorfa. Las partículas tienen un diámetro medio de 0,1 micras y su superficie específica oscila entre 20/24 m²/g, es precisamente este tamaño el que hace que cuando se adiciona humo de sílice al cemento, se necesita mayor cantidad de agua. Desde 1980 su uso como adición está permitido.

3. Arcillas y esquistos calcinados: este tipo de materiales naturales requieren de una activación térmica entre 600°C/900°C para que presenten puzolanidad, aunque en esa manipulación puede suceder pérdida de agua y cambios en las fases cristalinas, junto a una disminución del área superficial del material y posible amorfización de los componentes.

4. En la actualidad se han llevado a cabo numerosas líneas de investigación que consideran como puzolanas, diversos materiales procedentes de la valorización de residuos industriales, de construcción, agrícolas, etc.

Como resumen de los tipos de puzolanas se presenta la Figura 2.10.

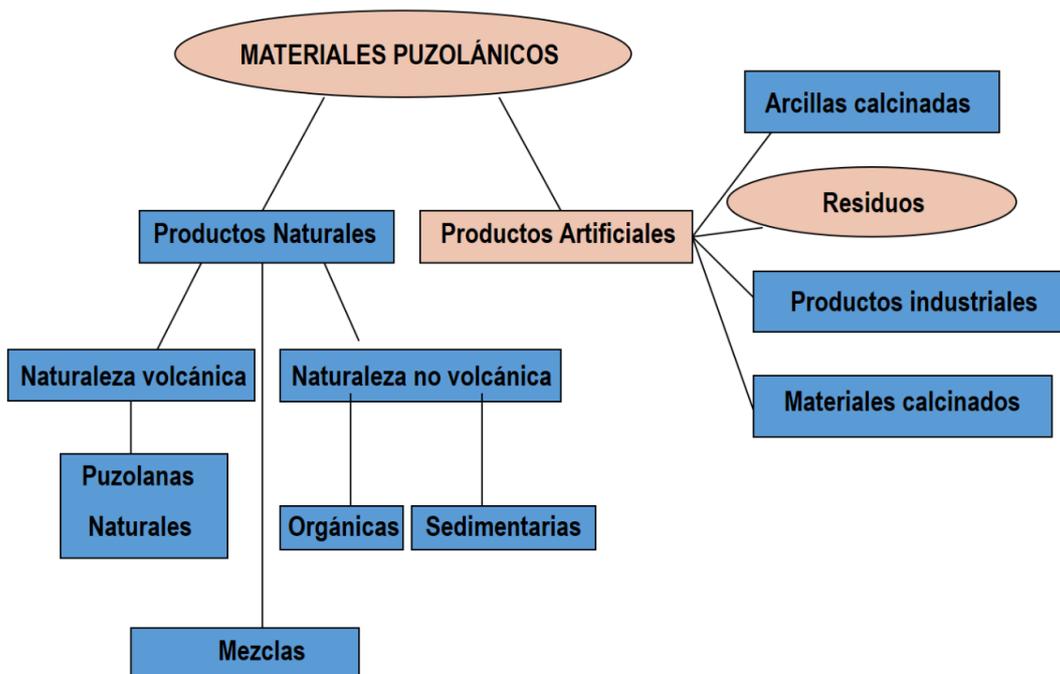


Figura 2.10. Clasificación de las puzolanas.

2.5. La reacción puzolánica

La consideración de un material como puzolánico implica la consideración de todas las reacciones y procesos que ocurren entre los componentes activos de la puzolana (sobre todo sílice y alúmina), el hidróxido cálcico y el agua. Los productos obtenidos que se forman son similares a los logrados durante la hidratación del cemento Portland. Así, según Jawed y colaboradores (Jawed, Skalny, & Young, 1983), la hidratación del cemento Portland acaece en una secuencia de reacciones químicas entre los componentes del clinker, el yeso y el agua para llegar al fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Los productos de reacción en la hidratación del cemento son silicato cálcico hidratado (CSH), portlandita (CH) y aluminatos cálcicos hidratados C_4AH_{19} , C_2AH_8 y C_3AH_6 . El cemento Portland, al hidratarse, presenta desventajas fisicoquímicas como son la exotermia de las reacciones, llegando a ocasionar contracciones y fisuras en las construcciones y una formación excesiva de portlandita, material de carácter no cementante.

El uso de puzolanas en la fabricación de cementos hace que la cantidad de portlandita disminuya y aparecen productos hidráulicos como los silicatos cálcicos hidratados, además de carboaluminatos entre otros, que aportan al cemento, mayor durabilidad en los procesos de carbonatación, mayor resistencia al ataque por sulfatos, menor penetración de cloruros, menor ataque por ácidos y reacción árido-álcali.

Capítulo 3. Infraestructura ferroviaria

3.1. Definición

La Ley del Sector Ferroviario (LSF) en su artículo 3, define la infraestructura ferroviaria como la totalidad de los elementos que forman parte de las vías principales y de las de servicio y los ramales de desviación para particulares, excepto las vías situadas dentro de los talleres de reparación de material rodante y de los depósitos o garajes de máquinas de tracción.

En ella se incluyen todos los elementos que se relacionan con las vías, exceptuando los talleres de reparación de material rodante y las cocheras. Es decir, se incluyen todas las instalaciones de obra civil vinculadas al ferrocarril y las necesarias para el perfecto y seguro desplazamiento de circulaciones.

Quizás el componente más importante es la línea en su conjunto, con todos los aditamentos que conlleva (plataforma de vía, carriles, traviesas, material de sujeción, puentes, viaductos, túneles, instalaciones de electrificación, señalización y seguridad y telecomunicación de vía, entre otros).

Desde este momento es lo que se va a describir, atendiendo, sobre todo a la Alta Velocidad y considerando especialmente el balasto y la vía en placa, uno como fuente de residuos y la otra, constituida por morteros, autoabastecidos por el residuo de

balasto, es decir, el soporte de vía. En definitiva, la infraestructura ferroviaria de vía se define como el conjunto de obras de tierra y de fábrica necesarias para construir la plataforma sobre la que se apoya la superestructura de vía.

La red de Alta Velocidad es aquella que está delineada para viajes a alta velocidad o que ha sido mejorada para dichos viajes. En estas líneas los trenes tienen que circular a velocidades de 250 km/h o cuando se trata de infraestructuras mejoradas (concernientes a la topografía, zonas urbanas, etc.), a velocidades próximas a los 200 km/h.

El material rodante debe estar diseñado para circular a velocidades comerciales de 250 km/h, aunque en algunas zonas no se pueda alcanzar ese máximo, como los trenes pendulares de TALGO. La tecnología que se ha empleado garantiza la seguridad a altas velocidades mediante sistemas muy complejos que aseguran, por ejemplo, que la vía no se va a deformar a tan alta velocidad.

Según la directiva 2004/50/CE, 29 de abril de 2004, en lo relativo al material rodante, un servicio de Alta Velocidad engloba todos los tráficos, con independencia de la línea en la que opera.

La ley 38-2015 del Sector Ferroviario especifica el servicio de transporte de viajeros de Alta Velocidad (definiéndolos como “servicios ferroviarios de transporte de pasajeros sin paradas intermedias entre dos puntos separados, al menos, por una distancia superior a 200 km, que circulan sobre vías construidas especialmente para la alta velocidad, equipadas para velocidades, generalmente, iguales o superiores a 250 km/h y que circulan de media a estas velocidades”).

El apéndice 1 de la Directiva 2008/57/CE relativa a la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la UE proporciona una explicación amplia sobre la Alta Velocidad, integrando distintos sistemas ferroviarios bajo la denominación “Alta Velocidad” y es ese documento por el que las administraciones ferroviarias tratan de mejorar sus infraestructuras con el fin de proporcionar servicios de calidad superior y formar parte del selectivo club de la Alta Velocidad.

Para que se considere Alta Velocidad, la Directiva 2004/50/CE precisa que debe darse una combinación entre varios factores en los que se conjugan las infraestructuras, el material rodante y las condiciones de operación y compatibilidad

entre ellos. No obstante, hay trenes que pueden pertenecer, indistintamente, a la Alta Velocidad o a la red convencional.

Según la Ley 38-2015 del Sector Ferroviario (LSF), para que un tren circule por la Red de Infraestructuras de Interés General debe estar bajo la responsabilidad de una empresa ferroviaria (“son empresas ferroviarias las entidades, titulares de una licencia de empresa ferroviaria, cuya actividad principal consiste en prestar servicios de transporte de viajeros o de mercancías por ferrocarril”). Estas empresas deberán haber obtenido la licencia correspondiente para prestar ciertos servicios.

Desde el punto de vista de la infraestructura se pueden englobar en Alta Velocidad:

- Líneas de nueva construcción, lo que permite operar a los trenes con velocidades superiores a 250 km/h en un trayecto o en la totalidad de la línea.
- Líneas convencionales que han sido reformadas para alta velocidad, llegando a alcanzar, en ciertos tramos, 200 km/h.
- Líneas que no lleguen a esa velocidad, pero en las que se reduzca sustancialmente el tiempo del viaje. Esta puntualización obedece a tratar de solucionar las dificultades relativas a consideraciones topográficas, de relieve o proximidad a cascos urbanos.

El fin de incrementar la Alta Velocidad es reducir el tiempo de viaje (Preston, 2009). España está surcada por relieves muy accidentados en comparación con los demás países de Europa, lo que implica que no se alcance la velocidad máxima prevista en todo el recorrido. La Tabla recopila los diferentes tipos de trenes de Alta Velocidad en algunos de los países en los que está instalada.

Se puede comprobar cómo, en España, la velocidad media es muy baja en comparación con la del resto de países citados, sin alcanzar la velocidad máxima durante mucho tiempo (intermitencia). En cualquier caso, se debe considerar, además, otro factor que influye en la velocidad y es la distancia entre estaciones; si están próximas el tren está continuamente acelerando y frenando y para lograr la velocidad máxima necesita un largo recorrido.

Tabla 3.1. Velocidades máximas y medias en distintos tipos de trenes de Alta Velocidad. (Torres V. , 2005).

País	Tren	V. Máx. (km/h)	V. Media (km/h)
Japón	Nozomi	300	261,8
Francia	TGV	300	254,3
Internacional (F-B-A)	Thalys	300	211,2
España	AVE	300	209,1
Alemania	ICE	280	199,7
Reino Unido	.	200	180,2
Suecia	X2000	200	168,0

3.2. Clasificación

Uno de los factores a considerar en el diseño de las líneas de Alta Velocidad o en su consideración es el radio mínimo de curva en el trazado y la pendiente longitudinal de la línea.

Los trenes, al circular a más velocidad por las líneas de Alta Velocidad, precisan de curvas con radios más grandes en su trazado, ya que los radios pequeños obligan al tren a salir por la curva hacia el exterior, o lo que es lo mismo, seguir la fuerza centrífuga. Se debe garantizar un radio mínimo de curvatura para cumplir con la seguridad y el confort de los pasajeros en la Alta Velocidad.

También se puede contrarrestar la fuerza centrífuga peraltando la vía, aunque en determinadas circunstancias no es suficiente. En algunos trenes, se dispone de un sistema de basculación que obliga a inclinar la caja hacia dentro del trazado de vía, disminuyendo así la aceleración lateral.

La empresa TALGO fue la creadora del sistema de "pendulación natural", consiguiendo elevar el "centro instantáneo de rotación" de la suspensión y generando

un sobreperalte en caja con la consiguiente disminución de la aceleración lateral que sufre el viajero al pasar por una curva a la misma velocidad. De este modo se aumenta el confort lateral (Figura 3.1) y cuando las características de la vía lo permiten, se puede aumentar la velocidad hasta un 25% (Barreiro, 2012).

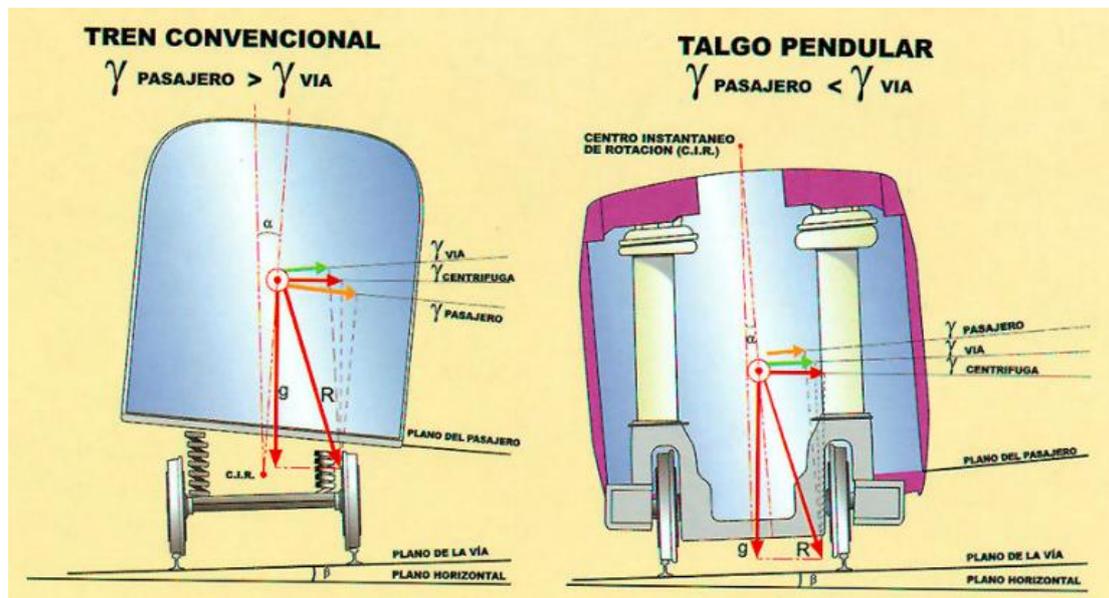


Figura 3.1. Sistema TALGO Pendular (Asociación Española de Científicos, 2019).

En cuanto a la pendiente longitudinal de la línea suele ser de 30 milésimas, aunque en ocasiones excepcionales se llega a 40 milésimas, necesitando en los túneles una sección superior con respecto a la requerida en red convencional.

Con independencia de estas dos variables, pendiente longitudinal y sección del túnel, existen otras que también forman parte del conjunto de la infraestructura, tales como ancho de vía y entrevía, gálibo, exclusividad de la vía, interoperabilidad y accesibilidad.

En la mayoría de los países europeos, el ferrocarril surgió como iniciativa de grupos empresariales, disponiendo, cada grupo, de sus propias normas. Esa es una de las razones por las que no se podía tener interoperabilidad entre los distintos concesionarios. Así, cada compañía diseñó el ancho de vía que los ingenieros constructores estimaban más adecuado: desde los 2,13 m de la Great Western inglesa hasta los 1,44 m de la vía inglesa de referencia (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Anchos existentes en Europa en el siglo XIX (Ojeda García - Escudero, J.M., 2000).

PAISES	ANCHO (m)
	2,13
Inglaterra	1,52
	1,44
Alemania	1,60
Escocia	1,67
Rusia	1,83
Irlanda	1,88
Países Bajos	1,95

Los ingenieros constructores pensaban que un mayor ancho de vía, implicaba un aumento del tamaño de las calderas para la producción de vapor y, por tanto, la velocidad. Tras la unificación del ferrocarril se apuntó que el futuro era la unión entre países, incluso entre continentes y de esta manera se redujeron las divergencias, unificándose las características de las vías.

El ancho único fue extendiéndose por el continente europeo: Europa central, Europa occidental, excepto en la península Ibérica donde se tuvo que disponer de un ancho más grande debido a la topografía, ya que había que subir grandes pendientes y se necesitaban locomotoras con más potencia. En la actualidad, el ancho ibérico es el que se emplea en el norte de África, América del Norte, China y Australia (Martin Cabo, 2017).

Hoy las nuevas líneas de Alta Velocidad tienen ancho europeo (UIC) de 1435 mm. En 1846, George Stephenson propuso sin ninguna base científica, el ancho de vía que se usaba en las explotaciones mineras de Gran Bretaña (ancho de 1435 mm). Posteriormente, se denominó “ancho Stephenson” y fue fijado como ancho estándar o ancho internacional en el Congreso Internacional de Berna, de 1887 (Hacar, 2005). Como se puede ver en la Tabla 3.3, existe el ancho de vía ibérico de 1,668 m, el de vía métrico de 1,000 m y otros anchos de 1,524 m, 1,600 m y 0,750 m.

Tabla 3.3. Países de la Union Europea con ancho de vía diferente de la U.I.C. (Ojeda García - Escudero, J.M., 2000).

Países	Ancho (m)
España	1,668
	1,435
	1,000
Finlandia	1,524
Grecia	1,435
	1,000
	0,750
Irlanda	1,600
Portugal	1,668
	1,000
TOTAL	5 anchos distintos

En los trenes de red convencional la anchura de la entrecía es de 4,2 a 4,5 m que, al incrementarse la velocidad, se tuvo que modificar, aquella, para evitar el efecto de succión.

La infraestructura de una línea de Alta Velocidad o una línea ferroviaria, en general, está formada por una sucesión de túneles, viaductos, llanuras y terraplenes, ya que el terreno no es llano y precisa de modificaciones según los requisitos de la vía, al objeto de lograr una cota continua o en su defecto, realizar cambios en el terreno para proceder a construir una elevación de cota o un descenso.

Según las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI) era preciso fijar el gálibo necesario en los túneles. Esta norma fue adoptada primero, como normativa española (UNE-EN 15273-1:2013+A1:2017) para calcular la entrecía según el gálibo (Alcover, 2012). Al tener más ancho en la entrecía, se aumentó el gálibo en los túneles para evitar el efecto aerodinámico (Martín, 2011).

Como se ha indicado con anterioridad, el gálibo es un parámetro fundamental en el diseño de una vía. La “*Union Internationale des Chemins de Fer*” (UIC) describe los gálivos que deben aplicarse a diferentes situaciones:

- Gálibo para la construcción del material circulante en tráfico internacional, diseñado para todos los nuevos vehículos ferroviarios y cuyas dimensiones se recogen en la Figura 3.2.

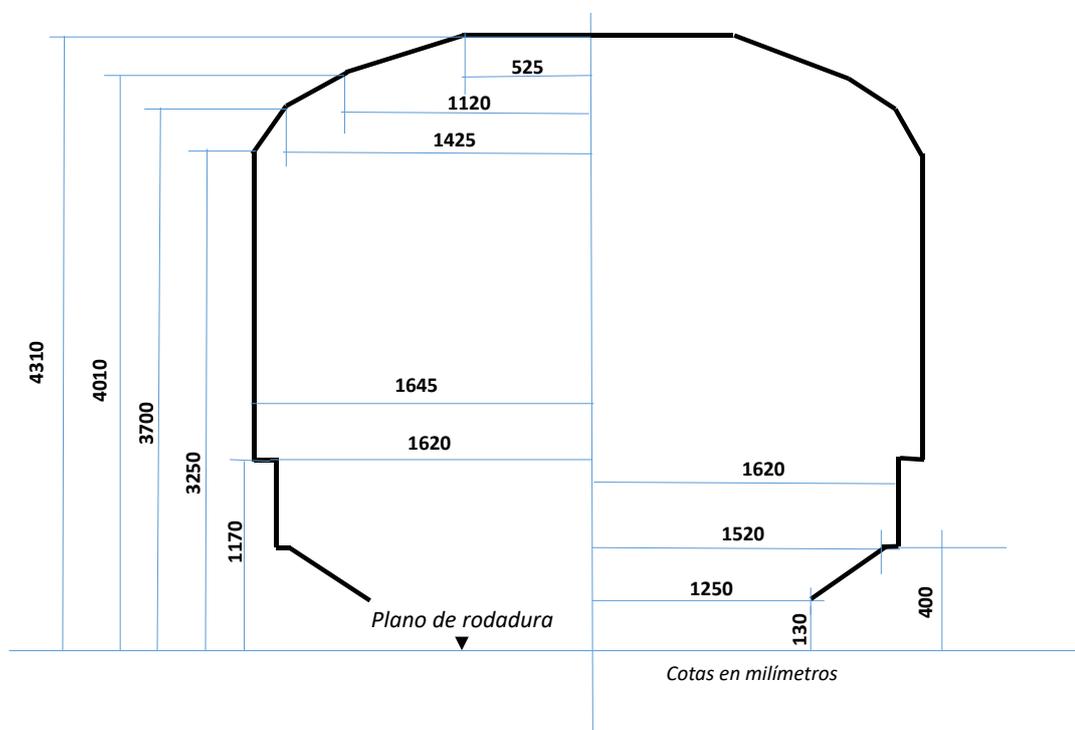


Figura 3.2. Dimensiones del galibo para construcción del material ferroviario internacional. Ficha UIC 505.

- Gálibo internacional de carga, aprobado por todas las Administraciones Ferroviarias, excepto para el Reino Unido (Figura 3.3).

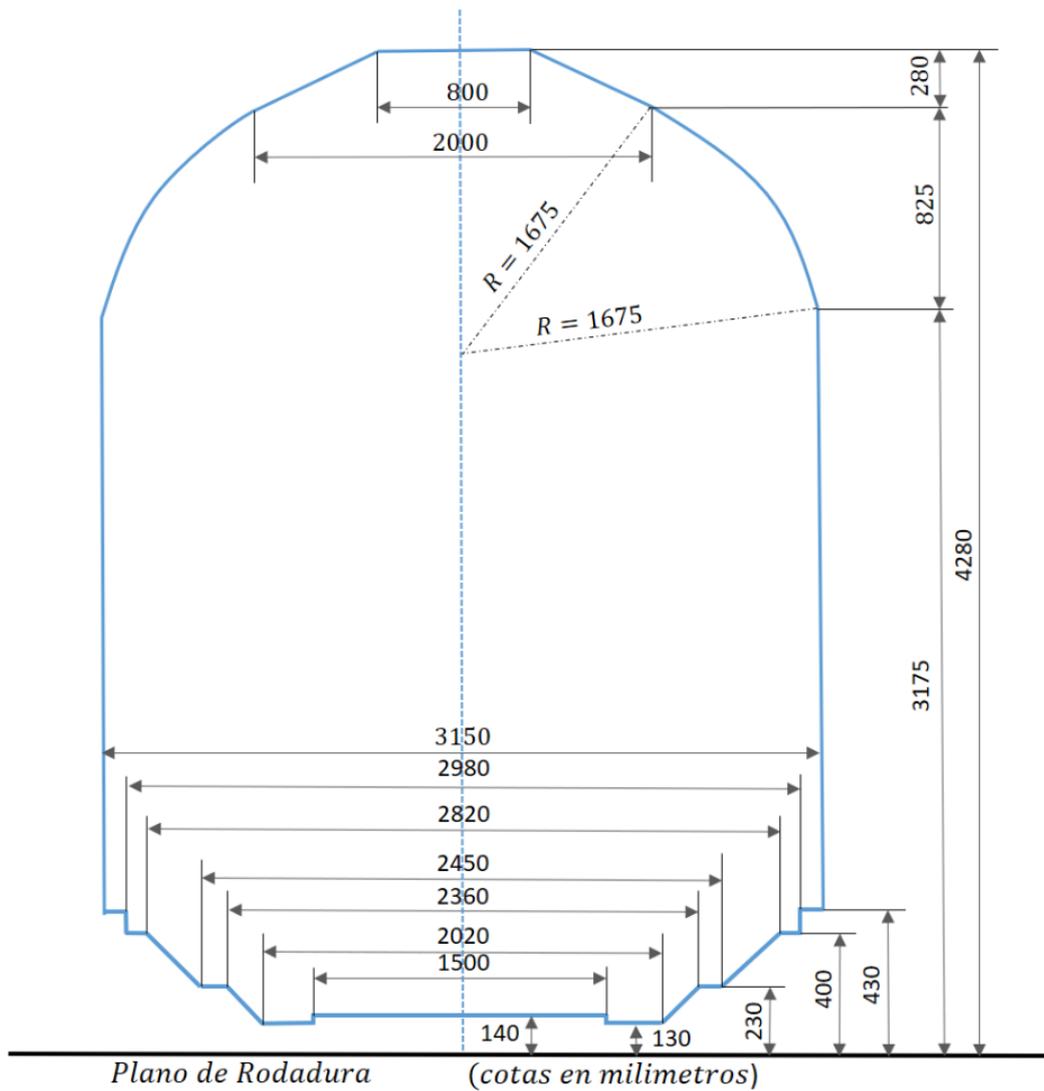


Figura 3.3. Gálibo Internacional de Carga. Ficha UIC, 505.

- Gálidos estáticos GA, GB y GC, para líneas de tráfico combinado en una renovación y actualización. Se construyen cuando hay una reducción progresiva de altura y volumen de la caja de la vía (Figura 3.4).

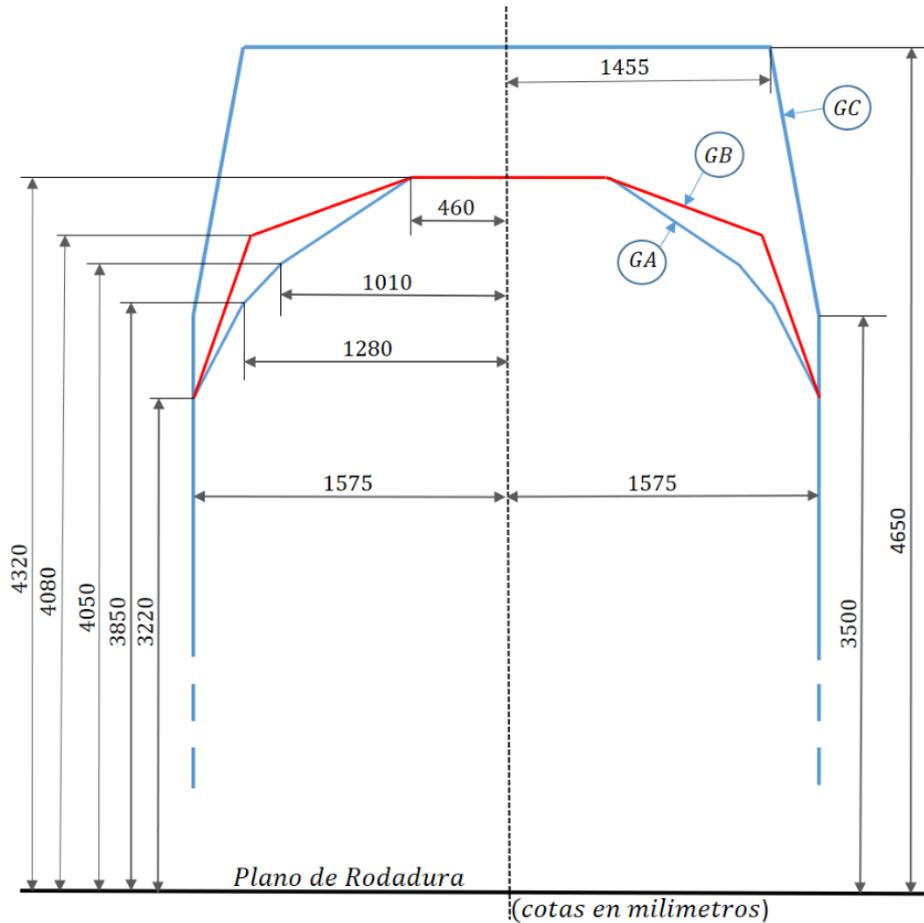


Figura 3.4. Gálíbos Estáticos GA, GB e GC. Ficha UIC, 505.

- Gálíbos cinemáticos GA, GB y GC, imprescindibles cuando los trenes son basculantes e incluyen los desplazamientos oscilatorios de los coches y furgones con carga y a la máxima velocidad permitida por la geometría de la vía (Figura 3.5) (Moreira Cravo, 2008).

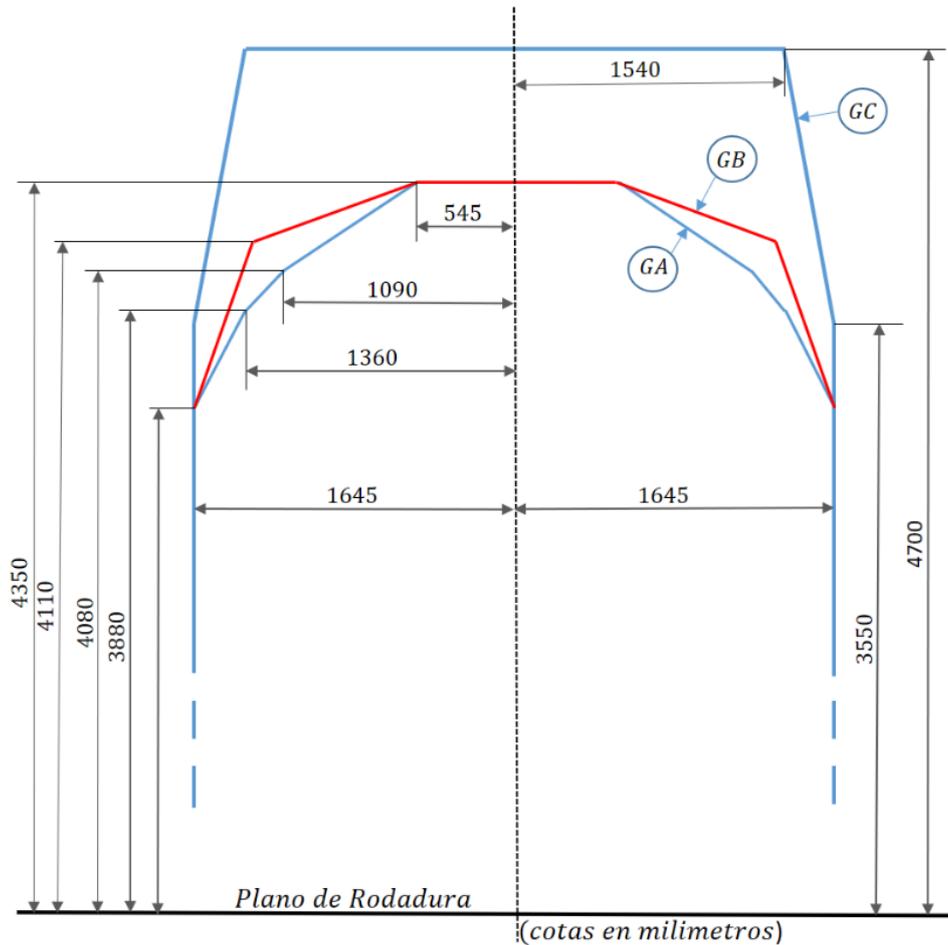


Figura 3.5. Gálibos Cinemáticos GA, GB y GC. Ficha UIC, 505.

- Gálibo de carga admitido en el Reino Unido, con dimensiones más restrictivas y considerado para el Eurotúnel y en las instalaciones de cambio de ejes de Transfesa, en las fronteras hispano-francesa de Port Bou-Cerbère e Irún-Hendaya, con ejes especiales de ruedas de menor radio, para ser aplicadas en los vagones de transporte combinado MEGACOMBI.

- Gálibo B+ que se ha creado para que Francia pueda transportar grandes contenedores. Es la solución intermedia entre los gálibos B y C.

Como resumen se proporciona la Figura 3.6, que recopila los diferentes gálibos usados en los países europeos, mostrando, por sus diferencias, la imposibilidad de interoperabilidad. Los gálibos de la red viaria española, en 2001, destinados al transporte combinado son de tipo B, con restricciones. Con una velocidad entre 100 y 120 km/h, necesitarán un gálibo tipo B en las líneas modernas, y para las nuevas infraestructuras es necesario el B+, con cargas por eje superiores a 1.500 t remolcadas y 750 m de longitud del convoy (Tabla 3.4).

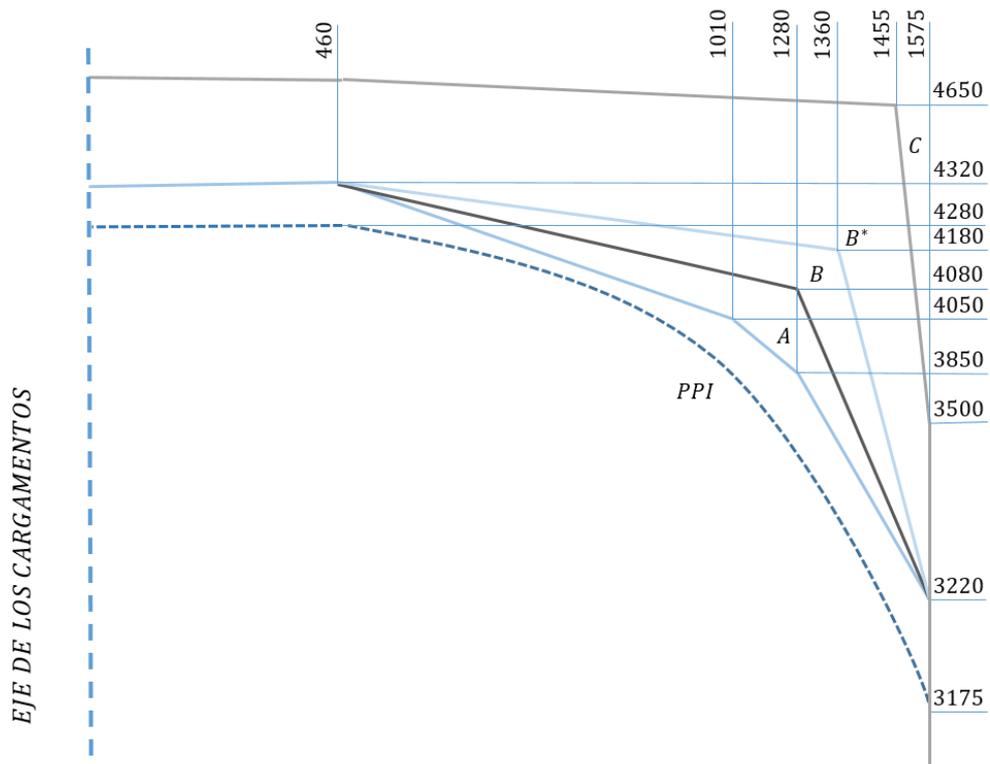


Figura 3.6. Comparación de los Gálibos de Carga A, B, B + y C (Gálibos de carga). S.N.C.F., 1990.

Tabla 3.4. Adaptación de RENFE a las características de la Red Transeuropea de Transporte Combinado. Transporte Combinado RENFE, 2001.

	Situación actual Red Española	Lineas Actuales	Nuevas Infraestructuras
Tipo de gálibo	B (Restricciones)	B	C1 (Mínimo-> B+)
Velocidad del tren (km/h)	100 – 120	120	120
Longitud del tren (m)	450	700	750
Carga Máx. tren (t)	800	1200	1500
Carga por eje (t)	22,5 / 80 20,0 / 120	22,5 / 100 20,0 / 120	22,5 / 100 20,0 / 120

Tabla 3.5. Especificación Técnica de Interoperabilidad (Unión Europea) (Sanfeliu, 2010).

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA
Rampa	Máxima 35 mm/m
Rampa del perfil medio sobre 10 km	≤25 mm/m
Longitud máxima (m) con rampa continua	6000 con 35 mm/m
Entrevía	Para líneas especialmente construidas para AV: 4,5 m
	Posibilidad de 4,2 m si $250 \leq V \leq 300$ km/h

Tabla 3.6. Especificaciones Técnicas de algunas líneas de alta velocidad (Carrasco, 2006).

LÍNEA	LONGITUD (km)	RAMPA MÁXIMA (milésimas/m)	RADIO MÍNIMO (m)
París – Lyon	414	35	3200
Roma – Florencia	232	9	3000
Mannheim – Stuttgart	99	13	7000
TGV Atlantique	308	25	4000
Tokio – Osaka	275	15	2500
Omiya – Niigata	275	15	4000

Las rampas de las líneas de Alta Velocidad nunca pueden superar las 35 milésimas (Tabla 3.5), según las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI). La Tabla 3.6 recoge un ejemplo de cada una de las distintas líneas de Alta Velocidad actuales comprobando, como la línea Tokaido (Tokio – Osaka) es la que tiene menor radio de curvatura (2500 m). Por otro lado, con un radio máximo, 7000 m, se encuentran las líneas alemanas (Mannheim – Stuttgart) del ICE o *InterCity Express*, diseñada para tráfico de pasajeros y mercancías.

Un factor adicional que condiciona el diseño de la vía es la exclusividad de la misma, ya que pueden dedicarse a transportar sólo pasajeros en red convencional, Alta Velocidad, mercancías o mixtas de pasajeros y mercancías. La adscripción a un determinado transporte influye sobre las condiciones de operación debido a que el material convencional tiene mayores masas no suspendidas que afectan a la vía. En el caso de líneas dedicadas al movimiento de mercancías, deben disponer de menores pendientes en su trazado que cuando se dedican al transporte de viajeros (Martin Cabo, 2017).

Por último, la Directiva 2006/860/CE define interoperabilidad como “la capacidad del sistema ferroviario transeuropeo para permitir la circulación segura e ininterrumpida de trenes que cumplen las prestaciones requeridas para la línea en cuestión. Dicha capacidad se basará en el conjunto de condiciones reglamentarias, técnicas y operativas que deberán cumplirse para satisfacer los requisitos necesarios para su interoperabilidad”. Según esta definición, un tren podrá circular por la red en diferentes países, con el fin de evitar tener que hacer transbordos para los pasajeros o cambios de vagones. Esa interoperabilidad afectará al galibo, ya mencionado, y a la señalización que se tratará más adelante.

Como se muestra en la Figura 3.7, la caja de la vía de una línea de Alta Velocidad, está constituida por sucesivas capas de asiento diferentes a las que presenta una línea convencional, ya que la rigidez en ambas, es distinta. Las líneas de Alta Velocidad tienen más rigidez vertical que las líneas convencionales (Figura 3.8).



Figura 3.7. Diferentes capas que forman la estructura de la vía. Elaboración propia.

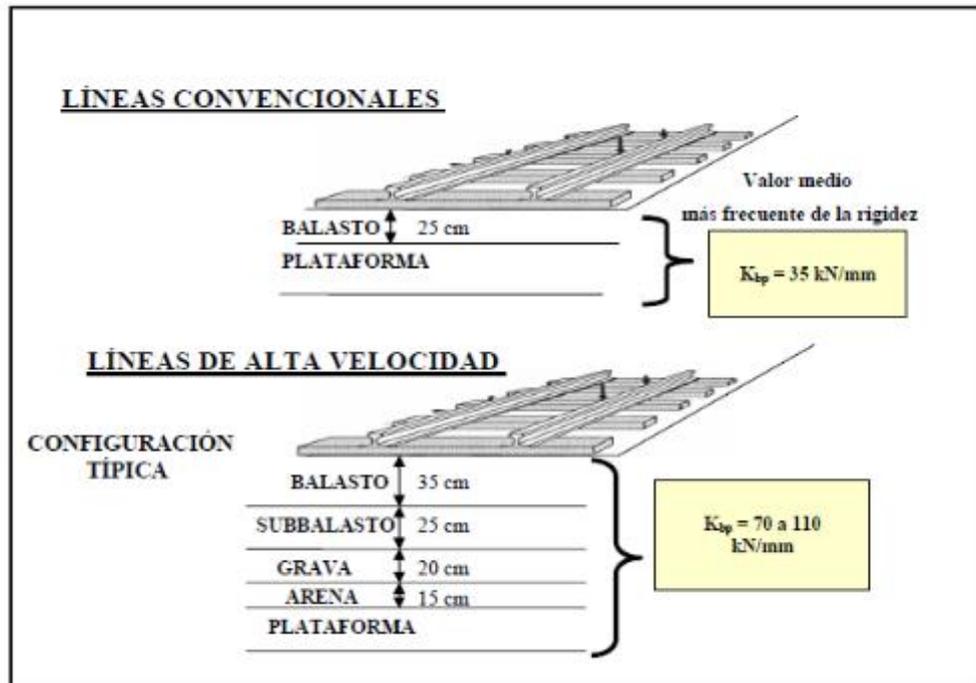


Figura 3.8. Esquema de las distintas capas de balasto para las líneas de Alta Velocidad frente a las líneas convencionales (López Pita A. , 2002).

Tabla 3.7. Vida útil aproximada de los componentes de la superestructura de la vía RENFE (Martínez Jorba, (1999).

Componente	Vida útil en millones de toneladas brutas	Vida útil en años para un tráfico aproximado de 35000 t/día
Carril UIC-60	500	40
Traviesa de hormigón	500	40
Balasto	250	20

En una línea de Alta Velocidad, la UE, en su Directiva 2008/57 (Interoperabilidad del sistema ferroviario transeuropeo de Alta Velocidad. Especificación Técnica de Interoperabilidad. Subsistema de Infraestructura, 2008), especifica cada una de las partes de la infraestructura (Tabla 3.7), el material móvil y la explotación. Según esta

normativa y como se ha descrito anteriormente, se define como línea de Alta Velocidad, aquella que cumple las siguientes características:

- Según la **infraestructura**:

Las líneas de nueva construcción deberán disponer de un trazado que permita alcanzar, en gran parte del recorrido, velocidades iguales o superiores a 250 km/h.

Las líneas en las que se ha realizado una mejora del trazado de una línea convencional (“upgraded lines”) deberán permitir la circulación de material a velocidades próximas a los 200 km/h. En los tramos donde no se pueda circular a 200 km/h por condicionantes de la topografía o limitaciones urbanísticas, la velocidad se estudiará en cada caso particular.

- Con respecto al **material móvil**:

En las líneas de nueva construcción, el material móvil ha de poder circular de forma segura y confortable, a una velocidad mínima de 250 km/h, permitiendo llegar a 300 km/h, bajo circunstancias concretas. En las líneas donde se ha producido una mejora del trazado de una línea convencional, el material móvil deberá poder circular a velocidades de hasta 200 km/h. En otras líneas, se deberá ir a la velocidad que marque el Cuadro de Velocidades Máximas (CVM) (Figura 3.9).

- En los **sistemas de operación**:

Los servicios de Alta Velocidad, en cualquier caso, deben disponer de una excelente compatibilidad entre las características de la infraestructura y las del material móvil.

Línea 322 (sentido Impar)		De : MURCIA MERCANCIAS a : AGUILAS		Línea 322 (sentido Impar)				
Eje/axo	V. MÁX. TIPO			Dist. km	Dependientes	Dist. NE	Rad	Kilometros Caract.
	M	A	B					
				0.0	MURCIA MERCANCIAS.....			7
	140	140	140	0.9	ALCANTARILLA-LOS ROMANOS (APD).....	1.7		16
				4.3				
				4.7				
	140	140	140	15.3	LIBRILLA (APD).....	14.4		6
	135	135	135	17.7				
	120	120	120	19.2				
	135	135	135	21.5				
	120	120	120	21.9				
	135	135	135	22.6	ALHAMA DE MURCIA.....	7.3	62	
	140	140	140	23.6				15
	120	120	120	24.2				
BT	140	140	140	35.0	TOTANA.....	12.4		9
	120	120	120	35.6				
				39.0				
	140	140	140	47.0	LA HOYA (APD).....	12.0		11
	60	60	60	55.5	LORCA-SAN DIEGO (APD).....	8.5		7
				56.8	LORCA-SUTULENA.....	1.3		
	140	140	140	0.2	PUERTO LUMBRERAS (APD).....	10.6		10
				10.8				
	90	90	90	16.3	KM. 16,310.....	5.5		
				17.9	KM. 17,850.....	1.6		
	140	140	140	21.4				
	110	110	110	22.5				
	80	80	80	23.7	ALMENDRICOS (APD).....	5.8		
				0.0				

Figura 3.9. Cuadro de Velocidades Máximas. ADIF.

3.2.1. La vía férrea

La estructura ferroviaria que se va a considerar es la relativa al soporte de las circulaciones y, por tanto, debe ser apta para ese fin. En algunos casos, sobre todo en Alta Velocidad, se necesita una vía especial, de calidad, y un mantenimiento cuidadoso.

La vía suele estar sustentada por traviesas de madera, de hormigón (Figura 3.10) o por una plataforma, si se trata de la vía en placa. Las traviesas se colocan sobre fragmentos de rocas, capa denominada balasto, cuya misión es soportar las cargas que se transmiten con el paso del tren por encima de ellas, además de dar apoyo a la subestructura de la vía, de forma que no sufra deformaciones.



Figura 3.10. Vista del tendido de vía con traviesa de hormigón. Elaboración propia.

Es de gran importancia conocer la calidad portante y las causas y efectos de las deformaciones y del asentamiento, para así calcular el espesor de la capa de balasto, debido a que se deben considerar los siguientes parámetros en cada uno de los tramos del tendido férreo:

- Carga por eje nominal.
- Características de los vehículos.
- Velocidad de circulación de los trenes.
- Densidad del tráfico.
- Condiciones climatológicas.

Si se utilizan materiales de buena calidad se consigue un alto grado de confort para el viajero y una reducción de los costes en la explotación. Para ello se debe estudiar (Figura 3.11):

- El sub-balasto.
- El balasto.

- La traviesa.
- El carril.
- La sujeción entre los diferentes componentes.
- Los aparatos de vía que controlan las medidas oportunas.
- Los aparatos que miden la dilatación/contracción de los diferentes componentes.
- La elasticidad de la vía.

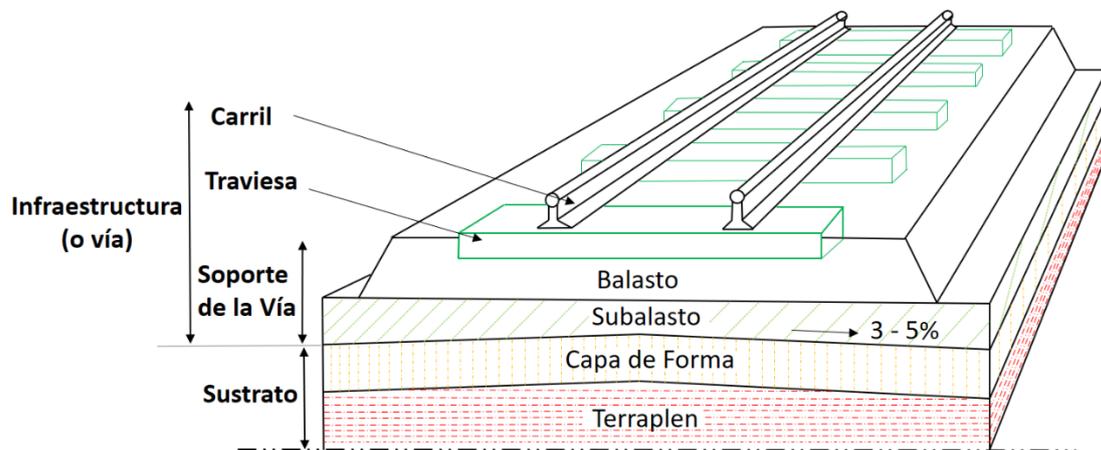


Figura 3.11. Estructura de la vía. Elaboración propia.

La infraestructura de cualquier línea ferroviaria, tanto red convencional como de alta velocidad, está formada por una sucesión de terraplenes, desmontes, viaductos y túneles para conseguir una explanación del terreno. Logrando un nivel continuo mediante cambios realizados en la topografía del terreno se consigue una amplia variación en la rigidez vertical del emparrillado de la vía

Las diferentes cotas topográficas obligan a los ingenieros constructores de la infraestructura ferroviaria a nivelarla mediante una serie de soluciones tales como:

- Desmote: parte del terreno donde se excava un montículo de tierra con el fin de bajar la rasante del suelo y, por lo tanto, disminuir la cota para asentar la infraestructura.

- Terraplén: es lo contrario al desmote, es decir, es un volumen de tierra para rellenar una zona y aumentar la cota.

- Viaducto: diseñado para unir varias zonas del terreno, salvando una gran pendiente. Son robustos y rígidos, dando continuidad a la superestructura de la vía. Se suelen clasificar en:

- Pontones: anchura inferior a 10 m.
- Puentes: anchura superior a 10 m.
- Viaductos: formados por una sucesión de varios puentes con pilares de apoyo intermedios. Tienen una anchura de 11,6 m y se pueden clasificar en viaductos hiperestáticos, formados por una viga cajón (Figura 3.12) y viaductos isostáticos, sobre vigas prefabricadas (Figura 3.13).

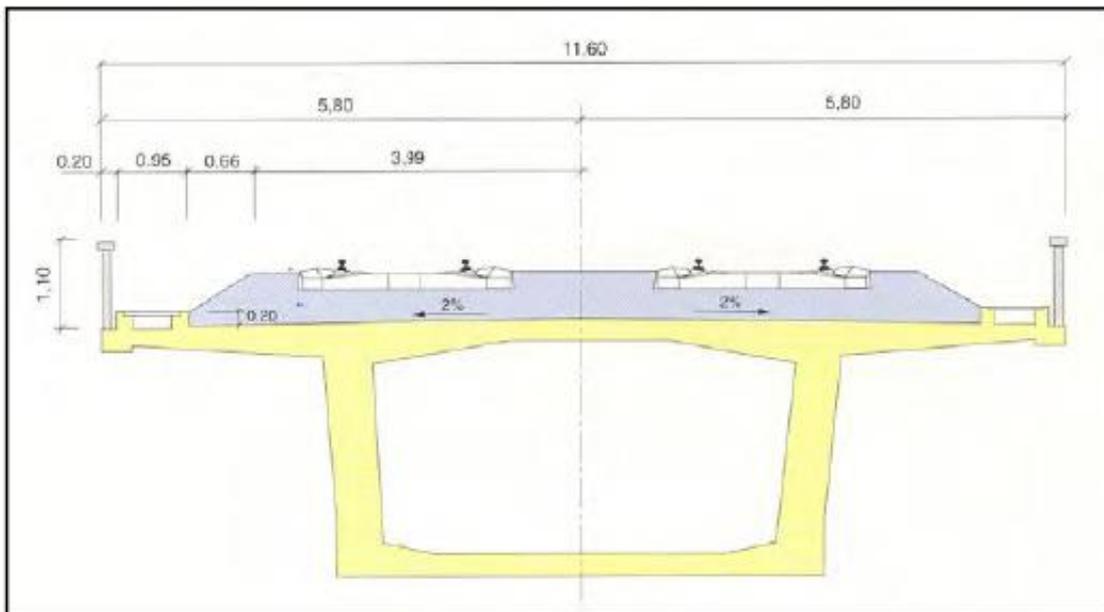


Figura 3.12. Sección tipo de viaducto de hormigón hiperestático. Dirección General de Infraestructuras de Transporte Ferroviario (1991).

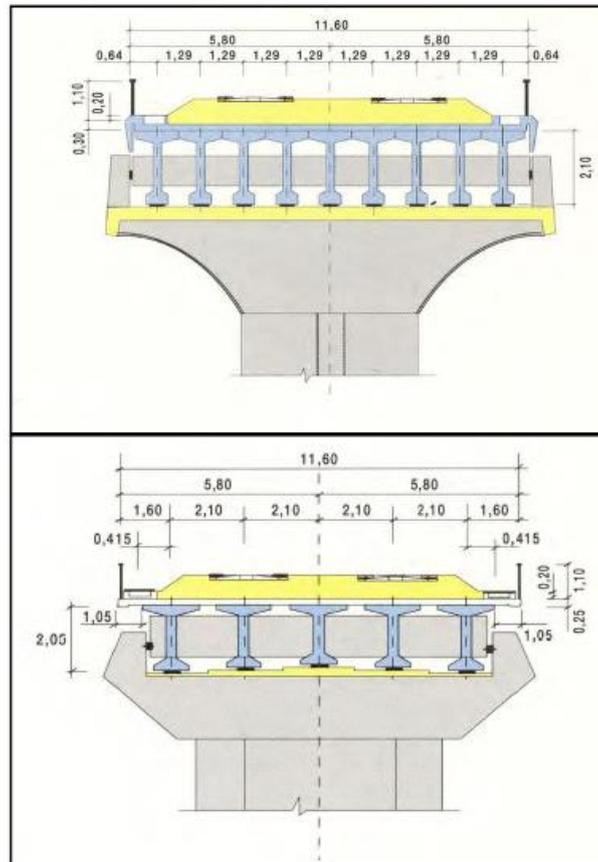


Figura 3.13. Sección tipo de viaducto de hormigón isostático. Dirección General de Infraestructuras de Transporte Ferroviario (1991).

- Túneles: sirven para traspasar un obstáculo natural consistente en una elevación del terreno de cota muy alta. Se construyen con una sección libre de 80 a 100 m² para velocidades superiores a 300 km/h. A medida que la sección libre sea mayor, la resistencia al avance en túnel será menor que la diferencia de presiones sufridas por los viajeros. Por eso se utilizan secciones grandes, lo que conlleva un aumento de la inversión; además, para túneles de grandes dimensiones se utiliza el modelo bitubo, con dos secciones unidas entre sí cada 300 m. El mayor túnel, actualmente, es el de Padornelo, de la línea Zamora a La Coruña, con 5971 m.

La variación de cota solucionada por un terraplén o un viaducto es el punto más crítico de la infraestructura, ya que sufre un cambio importante en la rigidez del terreno, con la consiguiente repercusión en la instalación y selección de los materiales

de la caja de la vía, tales como el balasto (Puebla, 2000). Tanto viaductos como terraplenes deben soportar unas tensiones superiores a las diseñadas en el cálculo del trazado de vía.

Con el fin de evitar un desgaste mayor en zonas donde se ha tenido que situar un viaducto o un túnel enlazados con un terraplén, se han diseñado unas secciones que se utilizan como “cuñas de transición”, cuya misión es la de ir cambiando gradualmente la rigidez del terreno. En los Pliegos de Prescripciones Técnicas del Gestor de Infraestructura Ferroviaria (GIF), se especifica el tipo de material granular (zahorra) mezclado con cemento, necesario para rellenar la zona inmediata al paramento de la obra de fábrica (Figura 3.14).

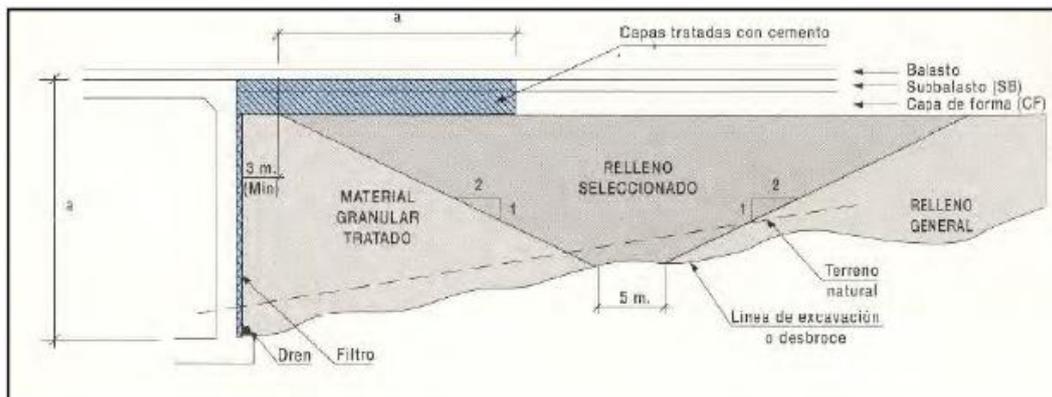


Figura 3.14. Ejemplo de cuña de transición. Dirección General de Infraestructuras del Transporte Ferroviario (1991).

Para la reducción, en un futuro, del mantenimiento de la infraestructura de vía, es necesaria la elección de ciertos tipos de materiales que forman el relleno de la caja de la vía, ya sea el diseño de taludes, la capa de forma y las cuñas de transición. Cuanto más elevada es la rigidez de la vía, mayor será la carga dinámica que ejercen los vehículos. Al contrario, si la vía es muy poco rígida, será más deformable, amortiguando los efectos dinámicos y suponiendo una mayor pérdida de energía que incrementará la resistencia al avance del tren.

3.2.1.1. El balasto

La vía sobre balasto es un sistema de vía que se utiliza en todo el mundo debido a su flexibilidad y al bajo coste de construcción (Figura 3.15). El balasto es una capa compuesta por fragmentos de rocas, sobre la cual duermen y se establecen los carriles.

Su efectividad para mantener la estabilidad de la vía depende mucho de sus condiciones mecánicas. El mantenimiento se basa, sobre todo, en reconocer las condiciones geométricas del material que, a veces, no refleja suficientemente el comportamiento mecánico del mismo y, por tanto, un control a largo plazo basado en el contorno de los fragmentos (Sol-Sánchez, M.; D'Angelo, G., 2017), (Sadeghi, Motieyan-Najar, Zakeri, Yousefi, & Mollazadeh, 2018). La deformación generada por la carga del tren es inevitable, y esto requiere trabajos de mantenimiento como el apisonamiento y reemplazo del balasto. La abrasión de los agregados de balasto se conoce como uno de los principales factores que influyen en el deterioro de la vía. El control en el cambio de morfología de los fragmentos de balasto ha sido revisado de muchas formas, por ejemplo, Kim y colaboradores (Kim, J.; Park, B.S.; Inn Woo, S.; Choi, Y.T., 2020) lo efectúan mediante estudios de imágenes 3D.



Figura 3.15. Vía sobre balasto. Elaboración propia.

Los cambios que se producen sobre el balasto pueden seguir la secuencia siguiente (Figura 3.16):

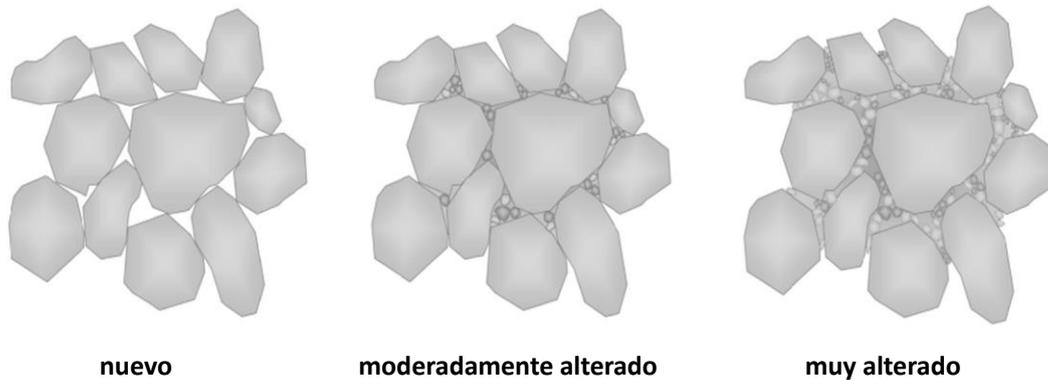


Figura 3.16. Posible evolución de los cambios que sufre el balasto en vía. Modificado de Kim y colaboradores (Kim, J.; Park, B.S.; Inn Woo, S.; Choi, Y.T., 2020).

El redondeo de las partículas de balasto se ha estudiado, recientemente, en la línea férrea para transporte de carbón en Sudáfrica, constatando que afecta negativamente al rendimiento y, por lo tanto, obliga a ciclos de mantenimiento planificados más cortos (Mvelase, Gräbe, & Anochie-Boateng, 2017) y a un estudio sistemático de la redondez de las partículas de balasto y su influencia en la resistencia del material.

El rendimiento y la deformación del balasto están significativamente influenciados por la morfología de las partículas (tamaño y forma), la reología (traslación y rotación) y la degradación (rotura y abrasión). Con respecto al tamaño, generalmente, se determina por tamizado y se controla mediante su distribución, mientras que la morfología de cada partícula se clasifica, normalmente, según forma, angulosidad y textura superficial.

En cuanto a la reología de los fragmentos de balasto, casi todos los estudios realizados se basan en simulaciones numéricas que Guoa y colaboradores (Guoa, Markinea, Zhanga, Qiangb, & Jingb, 2019) y Branson y colaboradores, entre otros (Branson, Dersch, de Oliveira Lima, Riley Edwards, & Ki, 2019), han extrapolado a

estudios en 3D, así como pruebas triaxiales monotónicas y cíclicas que generan deformaciones permanentes y cambio en la densidad (Sun, Chen, & Nimbalkar, 2017), (Sun, Y.; Zheng, C., 2017), (Sadeghi, J.; Motieyan Najar, M.E.; Zakeri, J.A., 2019).

De la misma manera se ha estudiado la interacción del lecho de balasto con diferentes presiones y derrames sobre él, como lo hacen Hesse y colaboradores (Hesse, Tinjum, & Warren, 2014) y Aikawa (Aikawa, 2015), incluso procesos de contaminación por arena que generan efectos contrarios al drenaje que se precisa en la construcción (Koohmishi & Palassi, 2018). La influencia de las condiciones climáticas sobre el balasto por procesos de gelifracción han sido estudiados por Ozgur Bezgin (Özgür Bezgin, 2015), considerando a las traviesas como componentes estructurales primarios que proporcionan el ancho de vía necesario y la estabilidad estructural de la misma. Las traviesas de hormigón de las líneas de Alta Velocidad tienen estrictos requisitos de diseño y producción para proporcionar una superestructura ferroviaria segura, útil y confiable. Las dimensiones en la producción están dentro de una baja tolerancia en los valores ofrecidos (escala milimétrica).

Ya desde el siglo pasado, Qinhua y colaboradores (Qinhua, Min, & Sufen, 1996) estudiaron los defectos que ocurrían en la infraestructura ferroviaria en el ferrocarril de Nanjing a Shanghai, para las construcciones de hormigón, llegando a que se producían efectos expansivos atribuidos a la periclasa, a la ettringita y a la reacción álcali/sílice.

Los defectos en la infraestructura se han valorado con minuciosidad por Ferdous y colaboradores (Ferdous, W.; Manalo, A., 2014) y (Ferdous W. , y otros, 2015) proponiendo diversas soluciones después del estudio de los mecanismos que suceden en la alteración de los componentes de la madera, el hormigón y el acero.

La plataforma de hormigón que soporta el carril se ha controlado mediante análisis experimentales y numéricos de elementos discretos para investigar el comportamiento para hormigón monobloque y traviesas de acero por Laryea y colaboradores (Laryea, Safari Baghsorkhi, Ferellec, McDowell, & Chen, 2014).

De la misma manera, se ha seguido el proceso de la fatiga en los prefabricados reforzados con losas de hormigón para sistemas de vía en placa en líneas de Alta Velocidad, basadas en el sistema japonés Shinkansen. Primero, se realizaron pruebas de caracterización de los materiales y el sistema de fijación, incluyendo pruebas de

fatiga por compresión sobre muestras cúbicas, para obtener los parámetros de fatiga y luego, con ensayos de fatiga por flexión (Tarifa, Zhang, Riz, & Poveda, 2016).

La plataforma de la vía debe quedar rematada por una capa llamada capa de forma, que es la más profunda de todas (Figura 3.17) y se sitúa por debajo del subbalasto. Su función es la de ayudar a soportar las demás capas, amortiguar las vibraciones y el paso de los trenes sin producir ningún tipo de hundimiento del terreno y, desde luego, facilitar el drenaje.



Figura 3.17. Instalación de la capa de forma para el posterior vertido de la capa de balasto.
Elaboración propia.

La mencionada capa se crea cuando se construye por primera vez una línea, o cuando ha habido una destrucción del trazado ferroviario por una riada o circulación anormal de agua. Por eso se genera con pendientes transversales, facilitando la evacuación de las aguas pluviales, según normativa (UIC 719-R).

Para disponer de 15 m de ancho en la línea se debe preparar 18 m de anchura en el terraplén. Su espesor debe corresponder a una capa de entre 20 a 60 cm, con las siguientes características:

- El tamaño de los materiales debe ser de grava arenosa, bien granulada, con un tamaño de grano superior a 10 cm.
- Debe estar exenta de materia vegetal o que el contenido en materia orgánica no supere 0,2% en peso.
- Si se utilizan materiales rocosos, el coeficiente de desgaste de Los Ángeles no debe sobrepasar el valor 30.

Una de las premisas para la reducción del mantenimiento de vía es una buena estabilización dinámica, que permita anticipar el asiento que experimentaría la vía tras el paso de las cargas dinámicas de la circulación de los vehículos. Si no se efectúan dichos trabajos, la carga vertical y las vibraciones horizontales, se transferirían a los áridos del balasto y tendrían una posición más compacta, con la consecuente reducción de volumen de la capa de balasto.

El soporte de vía se va a considerar constituido por el subbalasto y el balasto (Figura 3.18). El primero de ellos es la capa que soporta las vías férreas, cumpliendo unas condiciones de puesta en obra y unos controles de calidad previos a su instalación. Estará constituido por rocas o residuos inertes que serán reducidos a un tamaño prefijado y seleccionado mediante cribado, evitando la existencia de materia orgánica, metales, compuestos solubles, combustibles o materiales inadecuados. Su contenido de materia orgánica no podrá superar el 0,2%, según normativa (UNE 103-204, 1993).

Sobre la franja anterior, subbalasto, se dispone el balasto, que está constituido por sucesivas capas de fragmentos de rocas angulosas con granulometría fijada (2 a 6 cm). Su principal función es la amortiguación, ya sea por vibraciones que soporta la vía o por la velocidad en un punto, al paso del convoy. También la función del balasto es la de reparar los esfuerzos, reducir ruidos, drenar las aguas pluviales (Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, 2015) y proteger la plataforma de vía frente a las heladas. Junto a ello se debe planificar la nivelación y el peralte de la vía dando estabilidad horizontal, longitudinal y transversal.

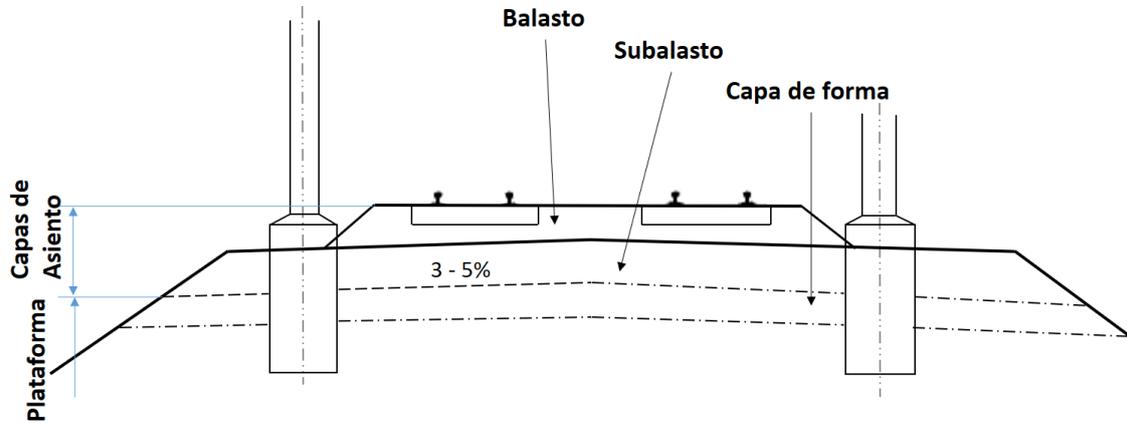


Figura 3.18. Sección de una vía de una línea ferroviaria. Elaboración propia.

En la preparación o renovación de una línea férrea es de gran importancia conocer la calidad portante, las causas y efectos de las deformaciones y del asentamiento, para así, calcular el espesor de la capa de balasto. Se debe tener en cuenta que, a mayor velocidad, mayor espesor en la capa de balasto. Dependiendo de cada línea de Alta Velocidad, el grosor es determinante y suele oscilar entre 30 a 40 cm (la altura media es bajo traviesa hasta la capa de subbalasto), disminuyendo en líneas convencionales, 25 cm o inferior (Figura 3.19).

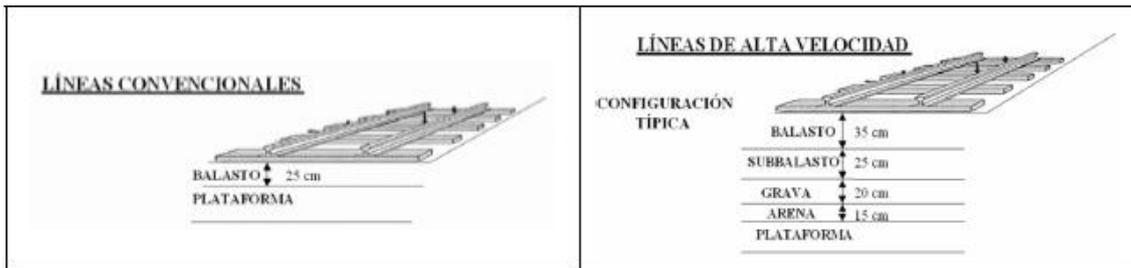


Figura 3.19. Sección transversal de vía y disposición del balasto. CENIT, 2008.

Para reflejar el efecto de la velocidad en el coste de montaje de vía se considerará, en esta Tesis Doctoral, un valor de espesor de balasto diferente según el rango de velocidad máxima (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Espesor de balasto considerado para cada rango de velocidades. Elaboración propia.

Velocidad (km/h)	Espesor bajo traviesa (cm)
< 160	25
160 – 300	30
300 – 400	35
> 400	40

También cabe reseñar la vía en placa que es el soporte que ha sustituido al balasto mediante una losa de hormigón continuo (construida “in situ” o prefabricada). La vía en placa se instala, principalmente, en túneles, puentes o lugares donde se acumula material fino como arena (desierto). La vía en placa resulta una tecnología económica para circulaciones de muy alta velocidad, pues elimina los problemas asociados a la vía en balasto ya que, al paso de la circulación, el balasto es atraído hacia ella. Los pioneros de este sistema fueron los ingenieros japoneses, aplicándolo a la Alta Velocidad, mientras que en España se ensayó, en 1975, en un tramo de vía entre Ricla/La Almunia y Calatorao, de la línea de Madrid a Barcelona. En la actualidad su uso se ha generalizado, sobre todo, en estaciones y ferrocarriles metropolitanos.

3.2.1.2. La traviesa

Las traviesas son los elementos que soportan el peso del carril de forma directa y el tipo de cada una de ellas, condiciona las características elásticas de la vía, su comportamiento y su geometría, en un lapso de tiempo.

Se sitúan transversalmente al carril y sirven para mantener unidos, y a una distancia determinada, los carriles entre sí y al balasto, con una inclinación concreta según el trazado de vía. Las traviesas transmiten las cargas verticales y horizontales procedentes del peso del material rodante cuando se detiene un tren y lo transmiten al balasto a través de su superficie de apoyo. Además, dan estabilidad a la vía. Se suelen colocar a una distancia de 60 cm entre cada una de las traviesas.

En Europa, en los inicios del ferrocarril se fabricaron de madera, especialmente con variedades de pino (Figura 3.20), ya que el roble o el haya eran especies muy caras. Su longitud era de 2,5 m con un peso cercano a 80 kg. Se suelen usar en vías secundarias, en zonas donde se sitúan aparatos de vía o de plataforma inestable. La madera se debe talar en la época de paralización en la circulación de la savia, siendo luego secada al aire y tallada, para más tarde, impregnarla en creosota y evitar la pudrición y el ataque de plagas. No obstante, se están sustituyendo las de madera por otras de hormigón más económicas. Las traviesas de madera desechadas están muy solicitadas para cercados rústicos.



Figura 3.20. Detalle de la sección de una traviesa de madera (Hernández Yagüe, 2017).

La traviesa actual de hormigón monobloque consiste en dos tacos de hormigón unidos por un tirante metálico entre ellos, que se usaron desde 1981, y se denominan traviesas polivalentes. Más tarde, se añadió a esas mismas, un sistema de sujeción con tirafondos que las permite ser utilizadas en ancho Renfe o en ancho internacional. Este tipo ofrece mayores ventajas frente a la resistencia lateral, con el fin de aumentar ésta, pero presenta un menor aislamiento eléctrico, una mayor susceptibilidad a la deformación y como consecuencia, una alteración del ancho de la vía, pudiendo provocar roturas y descarrilamientos. En la Tabla 3.9 se recogen algunas características de las traviesas mencionadas.

Tabla 3.9. Descripción general de las traviesas utilizadas en algunas líneas de Alta Velocidad en Europa. Subirós (2002).

Línea	Tipo de traviesa	Peso (k)	Área de la base (cm ²)
LGV Sud – Est LGV Atlantique	Bibloque U41	240	4872
Líneas Roma – Nápoles y Milán – Florencia	Monobloque	310	5765
AVE Madrid – Sevilla	Monobloque	304	6600
AVE Madrid – Barcelona	Monobloque	315	6500

En la actualidad, se instalan traviesas polivalentes (Figura 3.21) para poder cambiar de posición la caja de la vía y circular en distintos anchos de la misma, como ocurre en España (1668 mm) con respecto al ancho UIC (1435 mm).

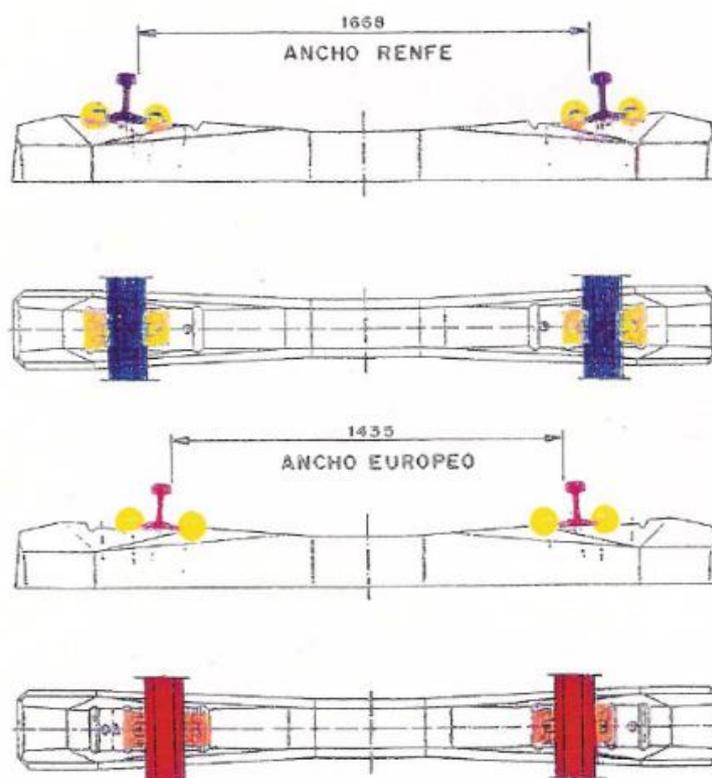


Figura 3.21. Dibujo de los distintos anchos de traviesas en España. RENFE, 1996.

La traviesa tiene que cumplir con la función de aislamiento entre los dos raíles, ya que por ella circula electricidad procedente del cable de retorno de la catenaria o de los circuitos de vía. La polivalente mide 2,60 m y pesa 315 kg, con una vida media próxima a los 50 años (Figura 3.22).

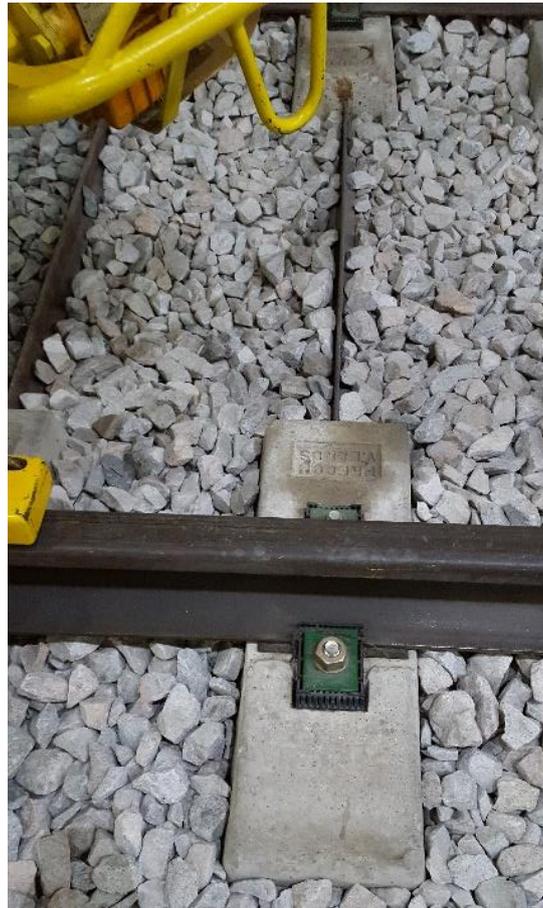


Figura 3.22. Traviesa con sus sujeciones. Elaboración propia.

3.2.1.3. El carril

Casi tan importante como la tracción es el soporte sobre el que se van a deslizar los trenes. En definitiva, esa vía compuesta por carril, traviesa y balasto, requiere una planificación precisa y detallada. Muchas han sido las propuestas para este tipo de soporte del material rodante. En un primer momento se trató de carriles de hierro fundido, apoyados sobre fragmentos de rocas, pasando luego a un carril de hierro forjado más resistente y más caro. El ferrocarril pionero en España, el de Barcelona a

Mataró, disponía de carril de hierro laminado sobre traviesa de roble. La longitud de los carriles variaba entre 5 y 8 m y se unían al cojinete mediante cuñas de roble.

En 1872, la compañía MZA (Madrid a Zaragoza y Alicante) utilizó carriles de acero sobre los que se deslizaban las ruedas del mismo material. Los perfiles del carril han sido variables; así, en 1855, en el trayecto entre Barcelona y Manresa, se empleó el carril Barlow que se colocaba sin traviesas y se sujetaba a la base por los rebordes. Entre Barcelona y Molins de Rey se instaló carril Brunel, cuya sección era una U invertida. Aunque después de muchas proposiciones se adoptó, en todas las líneas, el carril Vignole, que es de cabeza y asiento plano, apoyado sobre traviesa de madera o de hormigón.

Estos carriles, con longitud entre 6 y 18 m, denominados barras cortas y que son transportadas por los trenes carrileros, se unían mediante bridas atornilladas para evitar el efecto de dilatación/contracción. En la actualidad, reposan sobre una sujeción elástica que se une a la traviesa de hormigón mediante tirafondos. Los tramos cada vez fueron más largos, llegando a pensarse en un único carril soldado desde la cabeza al final de línea.

En el carril se pueden distinguir según su perfil, las siguientes partes (Figura 3.23):

- 1) Cabeza: parte superior donde se apoyan las ruedas del tren y por donde pasan los elementos de rodadura. Su dureza suele ser bastante elevada para evitar el desgaste.
- 2) Alma: parte estrecha que une la cabeza y el patín.
- 3) Patín: base y parte donde descansa el carril. Suele ser plana para garantizar su apoyo sobre la traviesa. Su anchura es mucho mayor que la cabeza.

El carril es un material de gran complejidad, tanto en los aspectos de diseño como en la fabricación. Su misión es guiar continuamente el material rodante por la planta y el alzado de la vía, además de absorber, resistir y transmitir las cargas del tráfico ferroviario. Sirve de conductor de corriente de retorno de tracción y circuitos de señalización.

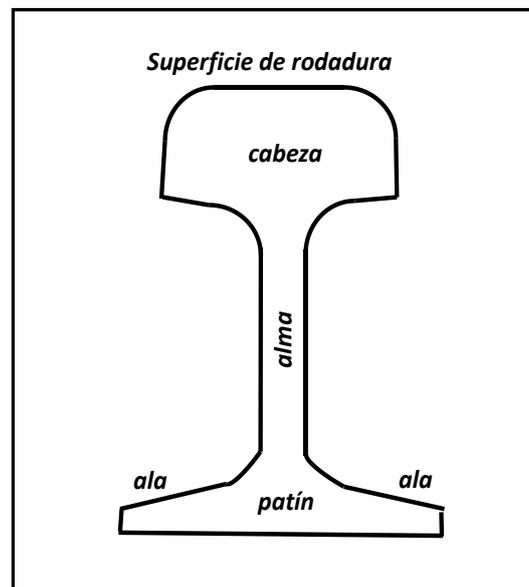


Figura 3.23. Perfil del carril con sus componentes. Elaboración propia.

En las líneas de Alta Velocidad, donde se superan los 350 km/h, los requisitos que debe cumplir el carril son:

- Seguridad
- Confort
- Durabilidad y coste
- Mínimo impacto acústico
- Servicio y
- Respeto al medio ambiente.

Existe en el mercado una amplia variedad de carriles, pero el utilizado en Alta Velocidad es el carril UIC-60, fabricado según la norma europea (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018) con un peso de 60,21 kg/m, pudiendo emplearse en la construcción de vías de Alta Velocidad y tráfico de cargas medias y pesadas (Tabla 3.10). Para el

ancho ibérico, donde se desarrollan velocidades inferiores a las de Alta Velocidad, se utiliza el carril UIC-54.

Tabla 3.10. Dimensiones del carril UIC 60E1 según la normativa EN 13674 – 1. Elaboración propia.

Tipo de carril	Estándar	Dimensiones (mm)					Sección S	Masa m
		H	B	C	D	E	cm ²	k/m
60E1 (UIC60)	EN13674 -1	172	150	72	51	16,50	76,70	60,21

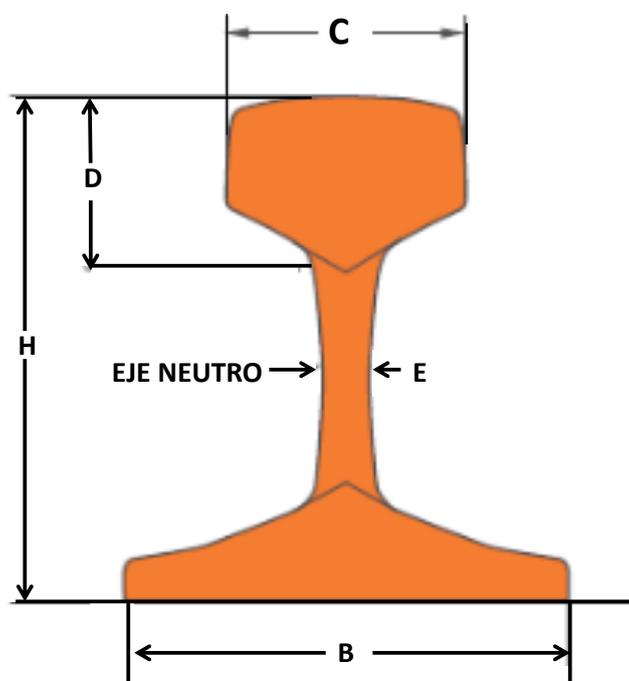


Figura 3.24. Características del carril con las dimensiones referidas en la Tabla 3.10.

En relación con el carril se deben considerar los desvíos de vía, es decir, los sistemas en los que, al necesitar la circulación cambiar de dirección en un cruce, el tren sigue por el camino deseado, previamente marcado.

Las primeras maniobras de desvío se realizaban manualmente, mediante señales; luego fueron los desvíos accionados por cables en relación con las agujas manejadas desde una estación próxima. En la actualidad, se trata de dispositivos soldados al carril accionados por motores eléctricos y controlados por enclavamientos que vinculan la señal con la posición del tren. En este momento, dada la profusión de los ordenadores, estos sistemas están regulados electrónicamente.

Los criterios para el diseño de las vías férreas sobre balasto han ido evolucionando a medida que la velocidad de los trenes crecía, con el fin de remediar las necesidades de mantenimiento y sus costes asociados. En líneas de Alta Velocidad, debido al incremento de la misma y al aumento de las cargas dinámicas que actúan sobre la vía, el diseño del sistema de vía ha ido proporcionando una mayor resistencia vertical respecto a líneas convencionales, basándose en la disposición de las capas sobre las que se asienta la vía y consiguiendo un aumento de la rigidez vertical del conjunto de la misma.

Los factores sobre los que influye la rigidez vertical de la vía son:

- 1) Calidad geométrica de la vía
- 2) Energía disipada por los vehículos
- 3) Comportamiento de los elementos de vía
- 4) Mantenimiento y sus costes y
- 5) Esfuerzos dinámicos.

La rigidez de la vía viene dada por tres grupos de parámetros: el emparrillado de la misma (que forma la sección del carril), la sección y longitud de las traviesas y la distancia entre las mismas.

En España, como el ancho de vía es diferente al ancho europeo, para permitir que sean compatibles ambos sistemas (ancho ibérico, 1668 m, y ancho UIC, 1435 m) se ha creado el sistema del tercer carril, para la circulación de trenes en ambos anchos de vía. El inconveniente es compatibilizar todos los anchos en la circulación, sobre todo en los giros a la izquierda o derecha de la dirección original, precisándose en estos casos, un cambiador de aparato de vía manual.

Este sistema implica la instalación de una traviesa que esté diseñada para albergar los tres carriles y resistir los esfuerzos dinámicos generados por la circulación de ambos anchos (Figura 3.25).

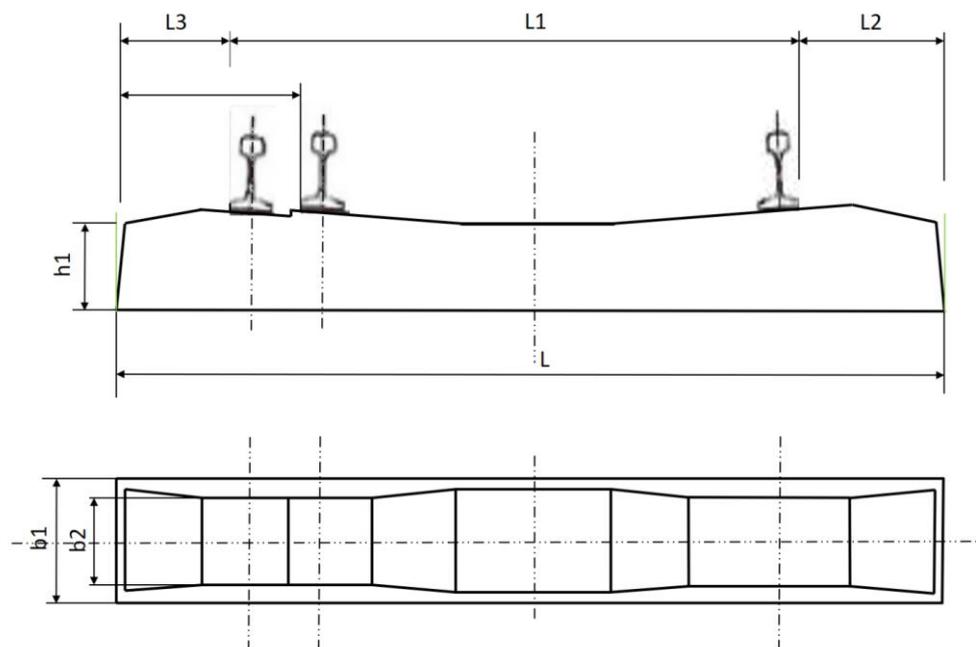


Figura 3.25. Traviesa en betón monobloque para tres carriles. RENFE, 2000.

El diseño de la traviesa viene condicionado por:

- La instalación del tercer carril en un reducido espacio entre los patines de los dos carriles contiguos, determinando la geometría de su cara superior y del conjunto de la traviesa.
- Debe disponer de la misma asimetría de esfuerzos, creando excentricidades generadoras de momentos flectores adicionales.

La traviesa está construida para circulaciones a una velocidad máxima de 250 km/h con una carga por eje de 22,5 t y se ha diseñado para todos los anchos de vía en

carril 60-E1. Este tipo de carril permite que, el espacio interrail, sea de 83 mm entre los extremos de los patines, lo que condiciona la sujeción (Tabla 3.11).

Tabla 3.11. Travesía monobloque para el sistema del tercer carril. RENFE, 2000.

DIMENSIÓN	DESCRIPCIÓN	VALOR
L	Longitud total de la travesía	2750 ± 10 mm
b1	Ancho máximo de la travesía en la base	300 ± 5 mm
b2	Ancho máximo de la travesía en el plano de apoyo del carril	270 mm
H	Largo de la travesía en el eje del plano de apoyo	232 (+5 / -3) mm
Hc	Largo de la travesía en el centro	210 mm
h1	Largo de la travesía en el extremo	240 mm
I	Inclinación del plano de apoyo del carril	1/20

La Figura 3.26 recoge las dimensiones de los tipos de carril utilizado más frecuentes, tipo 60 E1 y carril 60 E2 (Figura 3.27) como modelo comparativo (Tabla 3.12 y Tabla 3.13).

Tabla 3.12. Características del perfil de carril 60E1. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).

Area de la sección transversal	76,70 cm ²
Masa lineal	60,21 kg/m
Momento de inercia verical (eje x-x)	3038,3 cm ⁴
Módulo resistente – Cabeza	333,6 cm ³
Módulo resistente – Patín	375,5 cm ³
Momento de inercia horizontal (eje y-y)	512,3 cm ⁴
Módulo resistente horizontal (eje y-y)	68,3 cm ³
Dimensiones indicativas	A = 20,456 mm B = 52,053 mm

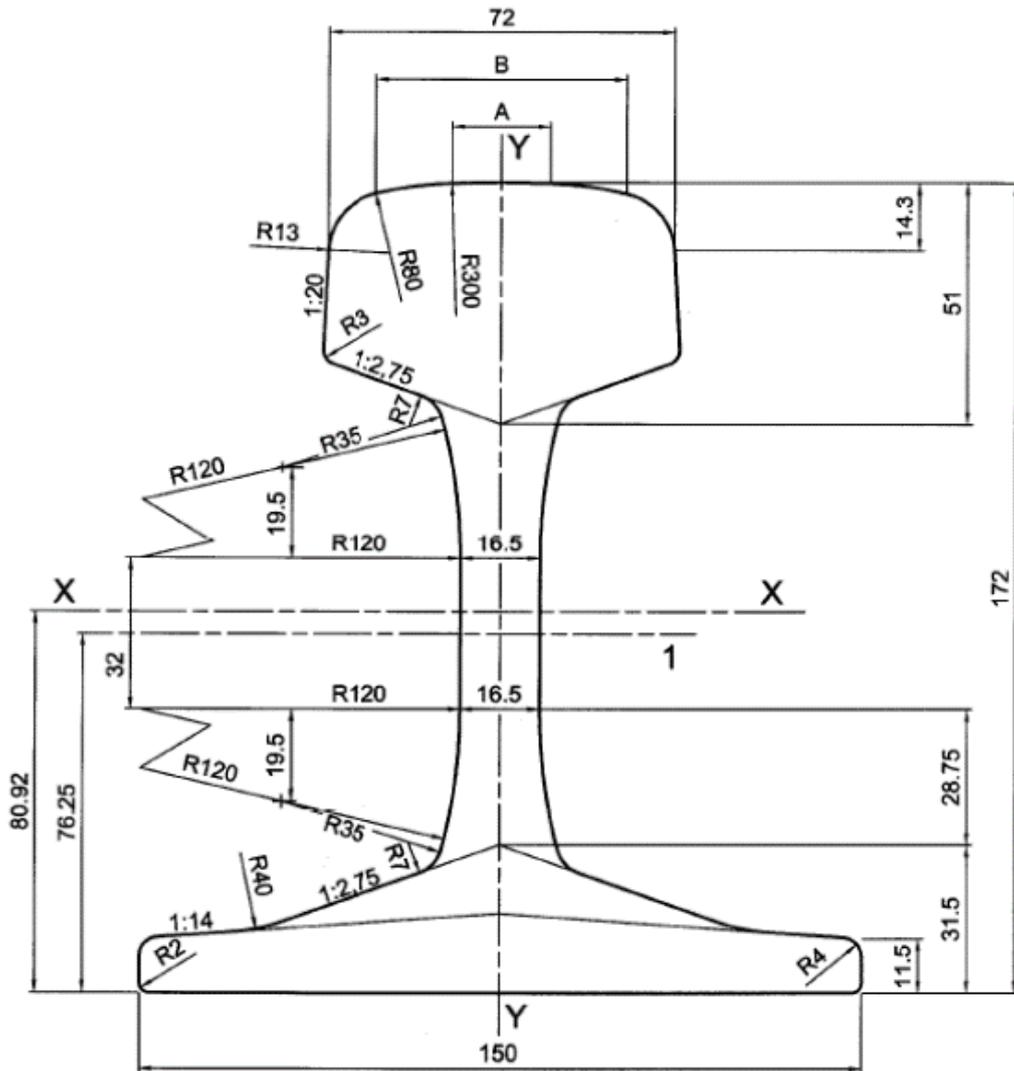


Figura 3.26. Características del perfil de carril 60E1. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).

Tabla 3.13. Características del perfil de carril 60E2. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).

Area de la sección transversal	76,48 cm ²
Masa lineal	60,03 kg/m
Momento de inercia verical (eje x-x)	3021,5 cm ⁴
Módulo resistente – Cabeza	330,8 cm ³
Moóulo resistente – Patín	374,5 cm ³
Momento de inercia horizontal (eje y-y)	510,5 cm ⁴
Módulo resistente horizontal (eje y-y)	68,10 cm ³
Dimensiones indicativas	A = 23,778 mm B = 48,913 mm

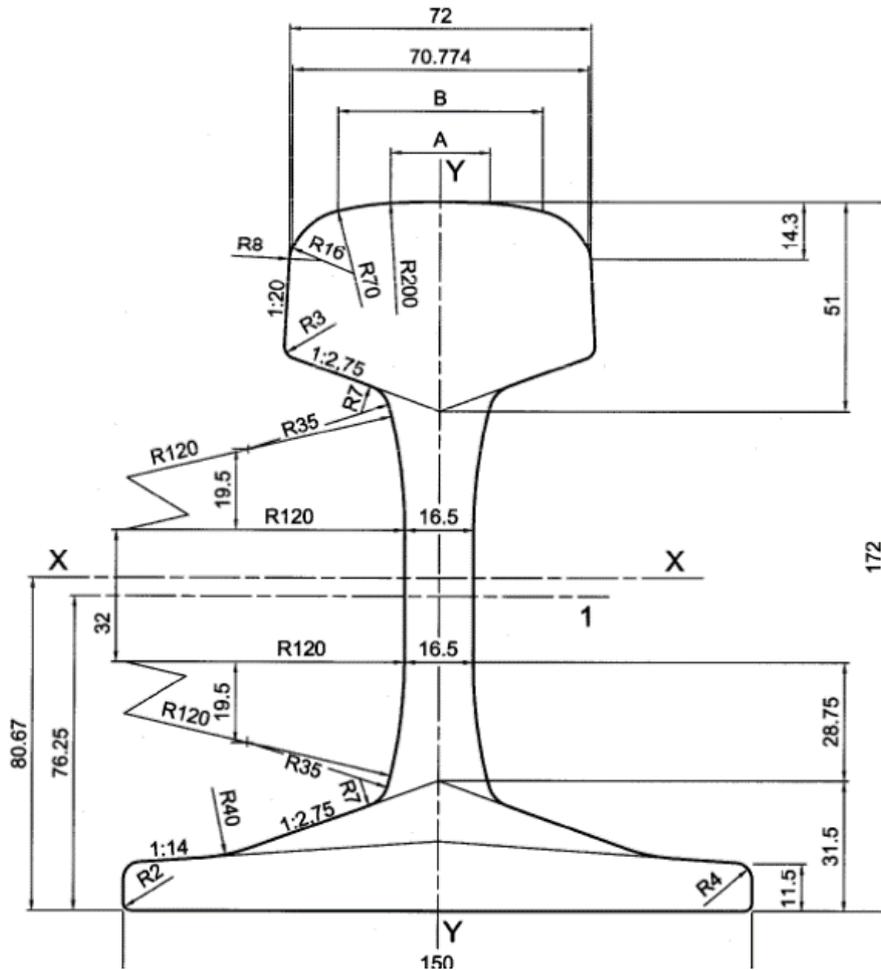


Figura 3.27. Características del perfil de carril 60E2. Norma (UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018).

3.2.1.4. La sujeción

La finalidad de la sujeción del patín del carril y la traviesa, a través de los elementos de anclaje, es asegurar el ancho de vía prefijado, además de transmitir las cargas de tráfico y mantener la inclinación del carril con respecto a su base. La frecuencia propia de vibración de la sujeción tiene que ser superior a la del carril, con el fin de garantizar una pérdida de contacto entre ambos.

La sujeción puede ser de muy diversos tipos dependiendo de la traviesa; así, las hay directas o rígidas, que constan de una pieza que une todo el conjunto, o indirectas, en donde se identifican varias piezas. Las sujeciones directas consisten en

tirafondos cuando el amarre es sobre traviesa de madera, o en pletinas, en el caso de traviesa de hormigón (Figura 3.28).



Figura 3.28. Detalle de una sujeción de tirafondos a una traviesa de madera. Elaboración propia.

Las sujeciones indirectas o elásticas (permiten absorber esfuerzos dinámicos y aumentar su vida útil) están compuestas por varias piezas, tales como el clip elástico, que sirve para incrementar la superficie de agarre, además del tirafondo. Si la traviesa es de hormigón, se emplean sujeciones indirectas con la única finalidad de sustentar el carril a la traviesa (Ubalde Claver, 2017).

Dentro de las sujeciones indirectas existen varios modelos:

- Nabra: dispone de una lámina de acero, con un espesor de entre 4 y 5 mm, con forma trapezoidal. La base mayor reposa sobre el patín del carril y el resto de la lámina sobre la traviesa. A través de una tuerca se consigue el apriete necesario (Figura 3.29).



Figura 3.29. Sujeción tipo Nabla. Elaboración propia.

- Vossloh: consiste en una capa elástica con forma de ϵ . El apriete es de tirafondos galvanizados. Entre la grapa y la propia traviesa se coloca una plantilla aislante y una placa acodada, que colabora para inmovilizar el carril. Actualmente son las habituales en las líneas férreas (Figura 3.30).

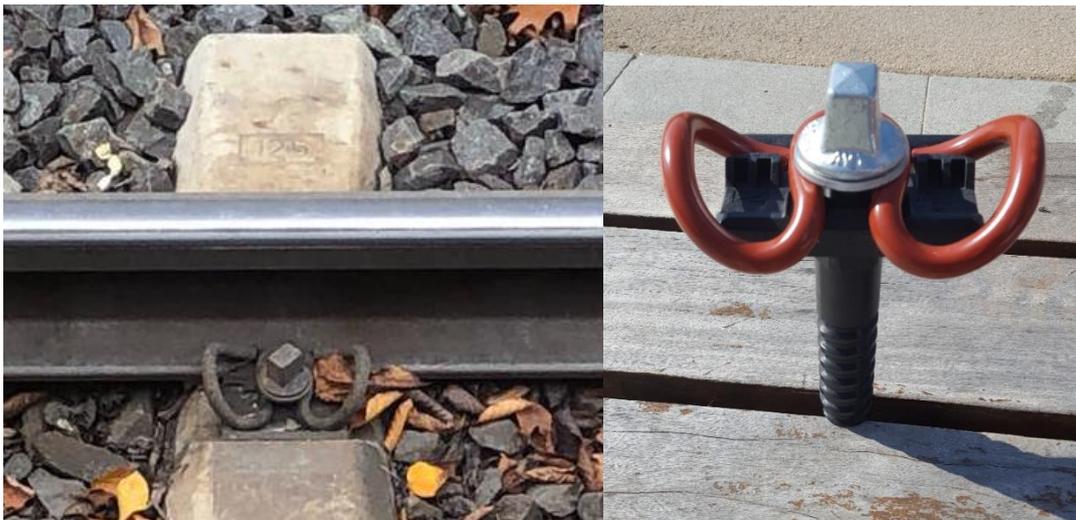


Figura 3.30. Sujeción tipo Vossloh. Elaboración propia.

- Pandrol: es distinta a los demás modelos; en realidad es un clip elástico que presiona el carril sobre el patín. Su diseño permite, por un tiempo superior al de los modelos anteriores, que actúe el par de apriete bajo los ciclos dinámicos y las vibraciones de la vía. El inconveniente que presenta con respecto a los precedentes, es el tiempo de instalación. Se ha utilizado fuera de España, en Italia, para la línea de Roma – Nápoles (Figura 3.31).

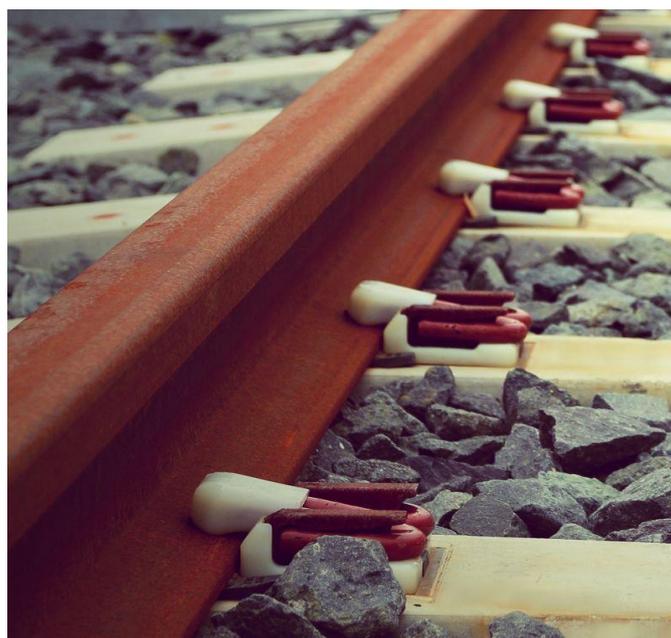


Figura 3.31. Sujeción tipo Pandrol. Tomado de (www.pandrol.com/es/product/e-clip/)

3.2.1.5. Las placas de asiento

La finalidad de la sujeción entre el carril y la traviesa, a través de los elementos de anclaje, es asegurar el ancho de vía prefijado y mantener la inclinación del carril con respecto a su base; además, de repartir las tensiones sobre la traviesa por las cargas de tráfico, rebajando la rigidez de la vía y amortiguando las vibraciones.

Entre la sujeción y el carril se adosan unos elementos denominados placas de asiento que facilitan la unión entre ambas partes. Su composición más frecuente es de caucho y polietileno. El espesor de las placas cambió de 4,5 mm, en líneas

convencionales, a 9,0 mm en las de Alta Velocidad, lo que indujo a diseñar modelos más flexibles, permitiendo reducir la frecuencia propia de las masas no suspendidas y aumentar la absorción de la energía vibratoria al paso de los trenes. En la Tabla 3.14 se recogen algunas características de las placas de asiento, tanto en línea convencional como en Alta Velocidad.

Tabla 3.14. Rigidez vertical de las placas de asiento en vías de ferrocarril diversas (López Pita A. , 2002).

LÍNEAS CONVENCIONALES	RIGIDEZ VERTICAL DE LA PLACA DE ASIENTO (kN/mm)
SNCF	150
DBAG	500
ALTA VELOCIDAD	
Paris – Lyon	90
Hannover – Würzburg	500
Mannheim – Stuttgart	500
Hannover – Berlín	60
Madrid – Sevilla	500
Madrid – Barcelona	100

Las primeras líneas de Alta Velocidad que se construyeron instalaron placas de asiento con valores de rigidez más altos que los actuales, modificando el parámetro de rodadura con una menor resistencia al avance, pero generando una mayor degradación del balasto a largo plazo. El resultado sería un mantenimiento del balasto y de las placas más frecuente, aunque en la actualidad se ha conseguido diseñar elementos más flexibles, que amortigüen las vibraciones al paso de los trenes.

En las líneas convencionales (López Pita & Teixeira, 2003), la rigidez se sitúa en torno a 50 kN/mm (200 km/h), mientras que llega a 75 kN/mm, en líneas de Alta Velocidad, de esta manera se logra reducir la rigidez de la vía, flexibilizando las placas de asiento.



Figura 3.32. Detalle de la placa de asiento de una traviesa. Elaboración propia.

3.2.1.6. Los aparatos de vía

Los aparatos de vía son instrumentos que sirven para cambiar la dirección del tren, es decir, actúan para desviar las circulaciones (Figura 3.33). Entre ellos se encuentran:

- Travesías: permiten el cruce de dos o más vías (los ejes se cortan).
- Desvíos: facilitan el paso de una vía a otra o una bifurcación de la vía. Existen varios tipos:
 - o Desvío sencillo: desarrolla el cambio de las circulaciones por una u otra vía , principal o desviada. En los programas de explotación su denominación es: “+” y “-”.
 - o Escape o agujas dobles: formado por dos desvíos sencillos, colocados sobre dos vías paralelas, pero en sentido opuesto y conjugadas sus agujas

(movimientos simultáneos); además, sus vías desviadas están en la prolongación una de la otra.

- Doble diagonal o Bretelle: con dos diagonales superpuestas; en la zona central tiene lugar la intersección de las dos vías desviadas.



Figura 3.33. Escape con corazón móvil del desvío de la línea del AVE Madrid – Sevilla. RENFE – AVE (1992).

Hay varios tipos de desvíos, clasificados en función de su longitud y de la velocidad de paso, tanto por vía desviada como por vía directa. En España existe una normalización de 6 tipos de desvíos:

- Tipo A: no soldables con la barra larga soldada. Velocidad de paso por vía directa de 140 km/h y de 30 km/h por desviada.
- Tipo B: con corazones no soldables, en los que su embrizado se hace mediante juntas encoladas o corazones soldables a cupones de carril, para integrarlos en barra larga. Velocidad de paso por vía directa de hasta 160 km/h y de hasta 60 km/h, por desviada.

- Tipo C: totalmente integrados en la barra larga soldada; los corazones están soldados a los carriles. La velocidad de paso por vía directa de 200 km/h y de hasta 60 km/h, por desviada.
- Tipo V: fabricados con carril de 60 kg/m y traviesas de hormigón. La velocidad de paso por vía directa es de 200 km/h y de 100 km/h, por desviada.
- Tipo AV: de gran longitud que utilizan corazones de punta móvil. La velocidad de paso por vía directa es de 300 km/h y de 160 km/h, por desviada.
- Tipo AV+: correspondientes a velocidad de paso por vía directa de 350 km/h y de 220 km/h por desviada.

Como aparatos de vía se consideran las agujas simples o espadines (más habitual el segundo nombre) o partes móviles del desvío, cuando se trata de desvíos convencionales. En realidad, son carriles cortados de determinada forma, que se desplazan de un lado a otro sobre unos cojinetes.

Cuando un tren pasa por una aguja, hay un punto en el cual una de las ruedas está "en el aire". El carril sobre el que va rodando está cortado y hay una discontinuidad que, además, deja a la rueda sin el guiado de la pestaña. El punto concreto es, exactamente, la punta del corazón. Ese hueco que se queda en el carril sobre el que está apoyando la rueda, es el hueco que necesitaría la pestaña de la rueda del otro lado, para poder pasar hacia la otra dirección del cambio. Para permitir el paso a grandes velocidades por los cambios (las agujas de tipos AV y AV+), no deben generarse discontinuidades en la superficie del carril y así aparecen las agujas de corazón móvil.

Su presencia en la vía puede ocasionar errores en el tratamiento de la información cuando se está auscultando la vía. Las partes principales de las que consta un aparato de vía son (Figura 3.34):

- a) Pata de liebre o prolongaciones del carril: se sitúan siempre paralelas a la otra fila de carriles. Su función es soportar el borde de la llanta desde que su centro se encuentra sobre alguna de las vías, hasta que se apoye en el corazón.

Evitan el choque de la rueda con el extremo cortado del carril y pueden ser fijas o móviles.

b) Corazón: es la zona central del aparato de vía y soporta el mayor esfuerzo. También puede ser fijo o móvil.

c) Contracarril: asegura el guiado de la rueda. Está constituido por perfiles angulares o carriles y se necesita para que se produzca la rodadura e impida el movimiento transversal que podría fracturar el corazón y llegar al descarrilamiento.

d) Laguna o espadín: pieza interior, móvil y que gira respecto a uno de sus extremos.

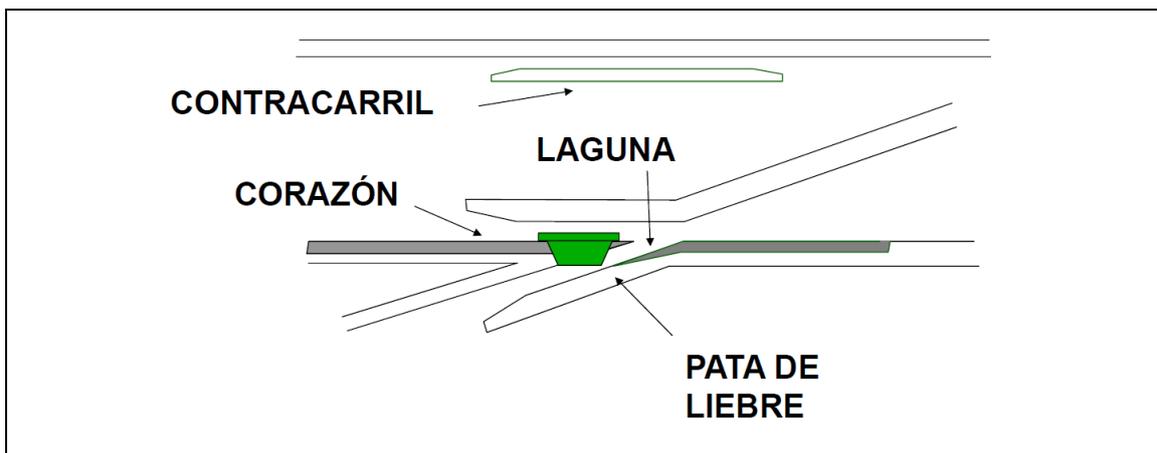


Figura 3.34. Aparatos de vía. Elaboración propia.

Las bridas son las uniones entre fragmentos de carril (Figura 3.35). Se trata de piezas metálicas con cuatro orificios, dos en cada lado, que mantienen sujeta el carril y proporcionan continuidad eléctrica. A través de los orificios se introducen unos tornillos con tuercas para mantener la sujeción (Figura 3.36). Antes, los carriles eran de 12 m, no podían ser más grandes por las limitaciones del proceso de fabricación y del transporte. Entre ellos se colocaban las bridas, aunque algunas veces no se situaban correctamente y al paso del tren se notaba el traqueteo. Estas uniones obligaban a separar el carril una determinada distancia debido a las contracciones y dilataciones por temperatura.



Figura 3.35. Brida de unión entre fragmentos de carril. Elaboración propia.

Como aparatos de vía también se pueden considerar las juntas de dilatación, que intervienen cuando hay desplazamientos entre la vía y la estructura de la misma. Debido a los cambios térmicos se generan movimientos relacionados con procesos de dilatación/contracción, produciendo variaciones longitudinales (aproximadamente 12 m de carril dilatan 0,6 cm) que, a veces, en función de la dimensión de la línea férrea, se traduce en una gran variación de la misma.

Con el fin de mejorar el confort, el ruido tras el paso de los trenes y abaratar el mantenimiento, se construyen carriles más largos. Hoy, los carriles de fábrica tienen 18 m y para que sean más largos se sueldan entre sí, formando un único carril de 396 m con 22 barras. La dilatación de ese largo carril es de 21 cm.



Figura 3.36. Tornillo que se instala en la traviesa. Elaboración propia.

Para evitar la variación en la longitud se crearon los aparatos de dilatación, que absorben las fluctuaciones en una dimensión sin interrumpir el carril. Las juntas están formadas por dos barras de acero que se deslizan una sobre otra (Figura 3.37). Los carriles más alejados se “abren” hacia fuera de la vía, y los más cercanos se “meten” dentro de la vía, pero siempre manteniendo el mismo ancho de vía, además de una contraaguja y una aguja. Su objetivo es compensar, como se ha dicho antes, las posibles dilataciones/contracciones que suceden cuando hay cambios térmicos.

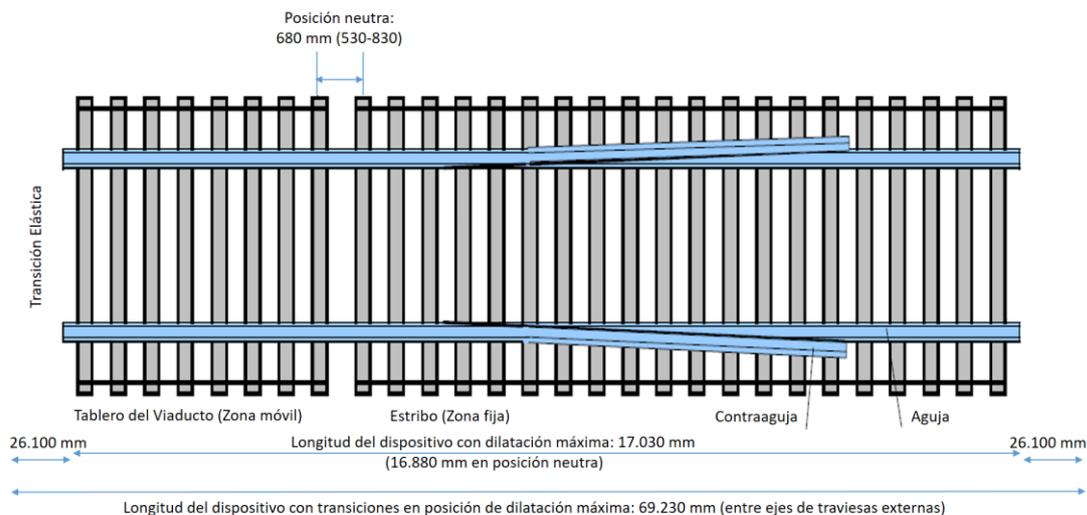


Figura 3.37. Aparato de dilatación. Elaboración propia.

Los mencionados aparatos se sitúan en los extremos de los viaductos, en aquellos casos, en los que la longitud de los mismos es superior a 90 m y también, en las salidas de los túneles. La Figura 3.37 indica la situación que ocuparía el aparato ubicado en un viaducto.

Hoy, las nuevas líneas de Alta Velocidad obligan a utilizar desvíos con diseños específicos para que el tren pueda circular por vía directa a la velocidad máxima y a 220 km/h para vía desviada. Son los desvíos AV220.

Existen desvíos también para trenes de ancho UIC y trenes de ancho ibérico que circulan por la misma vía, conocidos como tercer carril. En la Figura 3.38 se resumen las características del desvío del tercer carril para ancho ibérico.

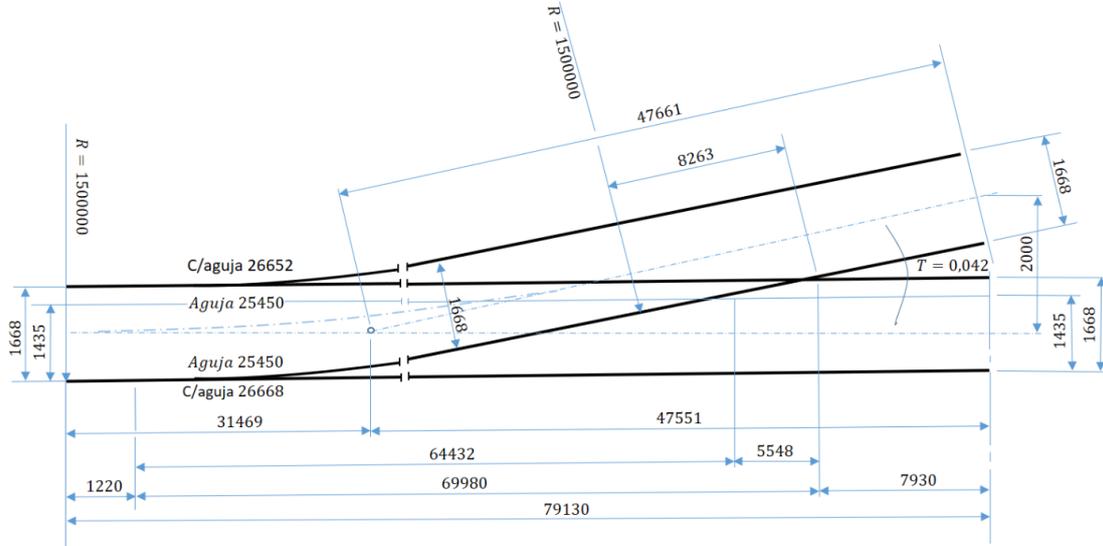


Figura 3.38. Desvío en ancho ibérico, para tres carriles. RENFE, 2000.

3.2.1.7. El trazado de la vía

En el trazado de la vía no se puede olvidar la existencia de carriles que no siguen la linealidad, es decir, la curvatura de la línea férrea, siendo éste un parámetro de cálculo preciso. Los ingenieros proyectistas sugieren en el caso de necesitar en el diseño de una curva ésta tendrá un radio entre 300 y 180 m con su correspondiente peralte, lo que lleva a que, al hacer el tendido del carril, el exterior de la curva está más alto, para inclinar el plano en el que rueda el tren. La existencia de radios menores obliga a disminuir la velocidad del tren. Es de gran importancia el desarrollo de la unión entre las dos zonas de la vía, que se lleva a cabo mediante las denominadas curvas de transición que, en España, son de tipo clotoide, y cuyo primer diseño se hizo en 1942, en el trayecto Madrid a El Escorial.

La curva tiene que ser cómoda para el viajero, limitando la aceleración transversal sin compensar, con una relación entre la velocidad de circulación y el radio de curvatura. Cada año hay una flota más moderna de trenes con una mayor potencia de motor que lleva a un aumento de las velocidades y, por tanto, obliga a cambiar los radios mínimos de 4000 m a 7000 m.

En el trazado de la infraestructura es importante considerar la inclinación de las rampas. En una línea convencional por la que circulan trenes de mercancías, la inclinación máxima es de 15 mm/m. También se puede utilizar esta misma inclinación

para líneas de tráfico mixto, pero cuando la línea es sólo de Alta Velocidad, las rampas son más pronunciadas y con pendientes de 40 mm/m. Cada vez se utilizan más rampas de estas características, ya que se utiliza un material motor de gran potencia y adherencia, debido a disponer de tracción distribuida.

En cada uno de los países de la UE, para evitar disparidad en las normas de diseño propio para las rampas, se ha creado, en el año 2000, una Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) vigente en toda la red europea, que limita las longitudes de las rampas de 35 mm/m a 6 km, ya que un tren podía perder velocidad al subir una rampa, por la resistencia al avance, efectos aerodinámicos de los túneles, etc.

Se debe recordar, también, la existencia de túneles que, como se ha mencionado anteriormente, ayudan a salvar grandes pendientes sin necesidad de elevar la cota, pero precisando de una perforación en las zonas geológicas oportunas. En España, el primer túnel, fue construido por ingenieros ingleses y fue el túnel de Montgat (Figura 3.39), en la línea de Barcelona a Mataró. El ferrocarril de Langreo con el túnel de Conhixo fue el siguiente, y luego, continuaron otros hasta llegar a los más de los 1860 túneles que existen en la red ferroviaria española. Todos eran túneles cerrados sin ventilación, de ahí la típica asfixia de maquinista, fogonero e incluso, viajeros de tracción vapor en este tipo de construcciones.

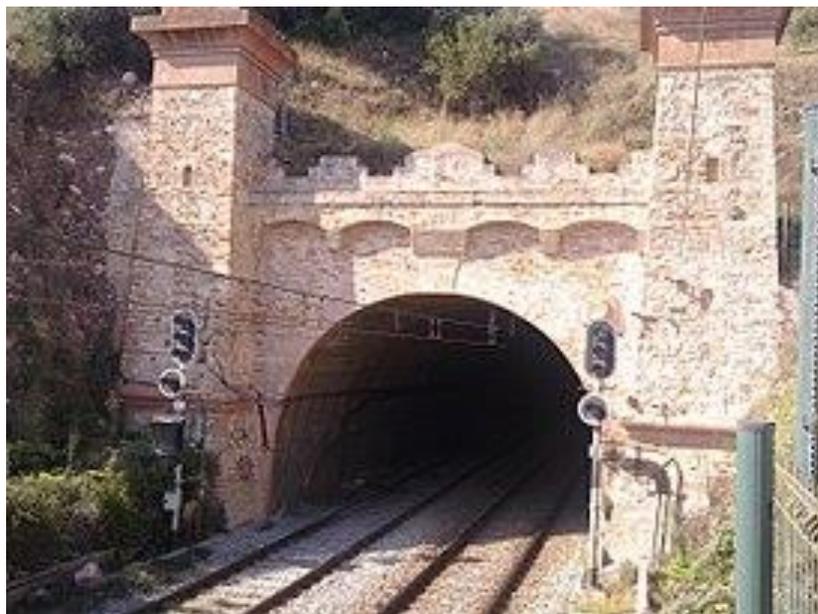


Figura 3.39. Túnel de Montgat. Forotrenes.com.

El más largo en uso es el túnel de Padornelo, en la línea de Zamora a La Coruña. Existe otro, el de La Engaña, en la línea de Santander/Mediterráneo, mucho más largo que no se llegó a inaugurar. Cabe mencionar, además, el de Paracuellos, por su dimensión, y el doble túnel de la Sierra de Guadarrama, uno de los de más longitud del mundo.

En relación con los túneles, y como estructuras de obra civil, se deben citar los puentes. Los primeros fueron de madera, como el que cruzaba el río Tajo en la línea de Madrid a Aranjuez, y que, debido a su debilidad, fue derribado por una riada poco después de su construcción. Algo similar sucedió con el que cruzaba el río Besós, en la línea de Barcelona a Mataró.

En el siglo XIX, con el desarrollo de las herrerías, los puentes serían construidos en hierro con diferentes luces, tales como la celosía doble, triple o cuádruple. El gran maestro del hierro, Eiffel, construyó, en 1883, el de Parana en Asturias, hoy inexistente. La línea de Madrid a Irún conserva el bellissimo puente de Ormaiztegui, fechado en 1863, y convertido hoy, en vía verde.

Se pasó luego a los puentes de piedra, ladrillo y hormigón, entre los que se encuentra, por su gran espectacularidad, el de Buxdel, en la línea de Barcelona a Zaragoza y quizás, uno de los más queridos, El Puente de los Franceses, construido en 1860, cercano a la antigua estación del Norte, hoy Príncipe Pío (Figura 3.40).



Figura 3.40. Proceso de construcción del Puente de los Franceses (Fontanella, 1999).

Las modalidades constructivas hicieron que, luego, se pensara en puentes de acero como el del río Salado, en la línea de Almería y más tarde, se volvió a los de fábrica de hormigón armado, como el viaducto de Martín Gil, sobre el embalse del río Esla (1942). Con las líneas de Alta Velocidad los viaductos han aumentado su longitud y luz, sobre todo se debe mencionar, los que cruzan los ríos Jarama y Jalón.

Todo lo expuesto lleva a considerar que el trazado de la vía está condicionado por los distintos elementos que la constituyen y que son los que influyen en la velocidad máxima de circulación permitida a los convoyes en los diferentes tramos.

El logro de una velocidad máxima de la línea, en España, precisa de ensayos tales como circular a velocidades superiores en un 10% a la velocidad máxima de explotación, siendo importante definir bien los parámetros que llevan a conservar la vía y los futuros trabajos para lograr un menor mantenimiento.

3.2.1.8. Tipos de circuitos de vía

Los circuitos de vía consisten en separaciones eléctricas en corriente alterna o continua, cuya misión es señalar el lugar, en un momento determinado, en el que se encuentra la circulación y que ésta, con su paso por el detector, cortocircuita la sección. Existen dos tipos:

- Circuitos de vía por audiofrecuencia (Figura 3.41).
- Circuitos de vía por contadores de ejes (Figura 3.42).

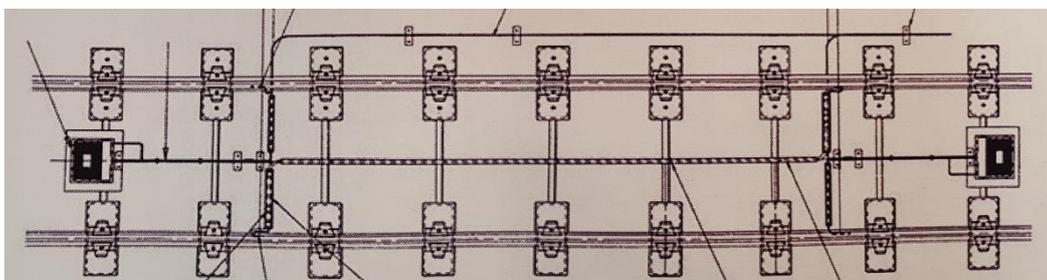


Figura 3.41. Circuito de vía. Elaboración propia.



Figura 3.42. Contador electrónico de ejes de THALES. Elaboración propia.

Los circuitos de vía por audiofrecuencia se pueden dividir, a su vez, en:

- a) Circuitos de vía para zonas de estación (de 50 m a 350 m).
- b) Circuitos de vía para trayectos y estacionamientos largos (de 200 m a 2000 m).

Estos últimos consisten en transistores y receptores, necesitando de entre uno y tres receptores, en función de las características de la línea, o de su situación (en zona de aguja). La división entre ellos se realiza mediante juntas aislantes para separar los pares de frecuencia. Por su parte, los circuitos de vía para zonas de estación están configurados mediante uno o dos receptores.

Los circuitos de vía por contadores de ejes están limitados a un cantón concreto que se justifica por el instrumento contador de ejes. Este aparato se encarga de contar el número de ejes que pasan por un punto concreto en un momento determinado. Una vez que haya contado todos los ejes, transmitirá esa información al siguiente cantón y se liberará cuando el contador se haya quedado a cero.

El sistema de circuitos de vía es más seguro ya que detecta, por cortocircuito, si la vía está ocupada o no, aunque pueden suceder ocupaciones intempestivas. Para este sistema, el mantenimiento es mayor ya que se necesita un ajuste más preciso.

3.2.1.9. Detectores de cajas calientes (DCC)

Los detectores de cajas calientes están destinados a verificar la temperatura de todos los ejes y frenos del tren, mediante un detector de rayos infrarrojos con el fin de notar posibles agarrotamientos en el sistema de frenado (Figura 3.43), y cuyo resultado sea una elevada temperatura y el consiguiente incendio. El sistema envía una señal de reducción de la velocidad, incluso llegando a la detención del tren.



Figura 3.43. Detectores de cajas calientes. Elaboración propia.

3.2.1.10. Detectores de caída de objetos (DCO)

Los detectores de caída de objetos se suelen instalar en los pasos superiores, bocas de los túneles y en laderas, con el fin de evitar accidentes por la ocupación de la vía con objetos extraños que pueden causar incidencias en la circulación de trenes (Figura 3.44). Actúan como barrera física en relación con los objetos que ocupen la vía; si los objetos son muy pesados pueden llegar a provocar la rotura de la fibra óptica de los sistemas generando la alarma en las instalaciones. Consisten en una malla de 1400 mm de altura, rematada con un ángulo de 40 mm x 40 mm y un paño

rectangular de 15 mm x 20 mm por 5 mm de diámetro, con un peso aproximado de 2 kg/m lineal.



Figura 3.44. Ubicación de los detectores de caídas de objetos. Elaboración propia.

3.2.1.11. Sistema de electrificación y señalización

Dentro de la infraestructura ferroviaria son imprescindibles para la seguridad los sistemas de electrificación y señalización. El primero condiciona el movimiento de las mismas y el segundo las regula.

- **Sistema de electrificación**

Todas las líneas de Alta Velocidad están electrificadas mediante un sistema diferente al del ferrocarril convencional. Se ha cambiado la corriente continua a 3 kV, por una corriente alterna monofásica a 25 kV y frecuencia de 50 Hz. La utilización de la corriente alterna para la Alta Velocidad implica distintos sistemas de alimentación, aunque el más utilizado es el sistema 2 x 25 kV (Figura 3.45).

Las ventajas e inconvenientes en cada sistema son:

A. Sistema 1 x 25 kV

Ventajas:

- Menor contaminación por campos electromagnéticos.
- Menor circulación de intensidad por tierra.
- Mayor distancia entre subestaciones.

Inconvenientes:

- Autotransformadores cada 15 km.
- Instalación y explotación más complejas.
- Protecciones más caras.
- Exige mayor potencia de c.c.
- Mayor tensión de alimentación de red.
- Mayor coste por km de línea de alta tensión.

B. Sistema 2 x 25 kV

Ventajas:

- Fácil de explotar.
- Más económico, si no se considera el coste de línea de alta tensión.
- Más kilómetros de líneas de alta tensión.

Inconvenientes:

- Distancia entre subestaciones debe situarse entre 40/50 km.
- Mayor número de subestaciones.
- Circular un 20 % de la corriente total por tierra.
- Más perturbaciones a entornos próximos.

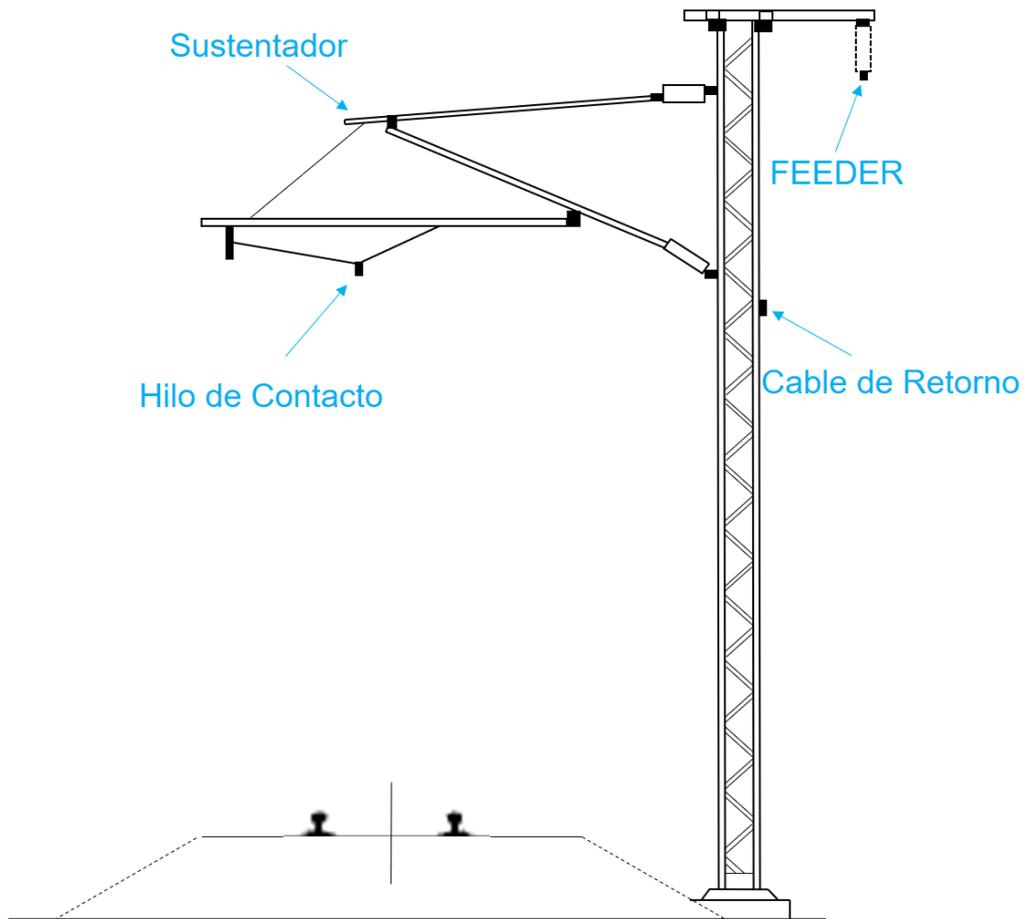


Figura 3.45. Localización de los elementos del sistema 2 x 25 kV en la infraestructura ferroviaria. Elaboración propia.

Según las características descritas, la instalación del sistema 2 x 25 kV es la más adecuada ya que las ventajas superan a los inconvenientes. Esto hace que muchas instalaciones se transformen del sistema 1 x 25 kV al 2 x 25 kV debido a sus beneficios.

- **Sistema de señalización**

Con el fin de mejorar la interoperabilidad entre los distintos países se creó el sistema ERTMS (*European Rail Traffic Management System*) o Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario. Este sistema está diseñado, en distintos niveles de

funcionamiento, para sustituir y/o sincronizar los sistemas de señalización tradicionales.

En España, el sistema de señalización utilizado es el ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático) digital. En su variedad analógica, ha quedado “*ob soletto*” desde diciembre de 2017. No obstante, en algunas líneas de Alta Velocidad, el sistema LZB, siglas alemanas de “Conducción Asistida de Trenes” (CAT), es el establecido, facilitando la circulación de los trenes equipados con sistema ERTMS y consiste en un cable que se sitúa paralelo a la vía entre los dos carriles.

El sistema ERTMS dispone de dos tipos de tecnologías. Por un lado, el ETCS (*European Train Control System*), que engloba la señalización, proporcionando datos sobre la velocidad máxima en un tramo concreto de vía e informando de la distancia a la baliza más próxima, además de supervisar la velocidad del tren en cada momento. Aún se puede reseñar otro sistema, GSM-R (*Global System for Mobile Communications-Railways*) de transmisión por radio, con tecnología GSM, que regula las comunicaciones entre el tren y el CTC (Control de Tráfico Centralizado) (Martin Cabo, 2017).

La seguridad en la circulación ferroviaria se ve controlada, también, por mecanismos más complejos como es el denominado “Sistema Da Vinci”, plataforma que gestiona el tráfico de las líneas de Alta Velocidad, integrando los subsistemas de telemando (señalización, enclavamientos, ERTMS, comunicaciones, etc.), seguimiento de la circulación en tiempo real, enrutamiento automático de trenes, ayuda a la regulación del tráfico, y control de otros sistemas desde un Centro de Regulación y Control (CRC).

Dado que la seguridad es un parámetro primordial en el trazado de vía, no hay que olvidar para ese fin, los enclavamientos (ENCE), encargados de controlar y procesar la información vital y garantizar la seguridad del tráfico ferroviario. Su medio de comunicación se verifica a través de un interfaz seguro que interacciona con los sistemas a bordo del propio tren, proporcionándole toda la información precisa para sus operaciones.

Actualmente existen distintos tipos de enclavamientos:

- Mecánicos, accionados con levas, poleas (Figura 3.46)

- Electromecánicos, funcionando con relés de seguridad (Figura 3.47)
- Electrónicos, controlados por microprocesadores (Figura 2.9)



Figura 3.46. Enclavamiento accionado con levas y poleas. Elaboración propia.



Figura 3.47. Enclavamiento electromecánico con relés modulares. Enclavamiento de Granollers – Canovelles. Hernández Yagüe, 2020

Los más utilizados son los enclavamientos electrónicos, que requieren una plataforma compuesta por equipos electrónicos de red conectados entre sí y con la red de señalización en cada ENCE, como el sistema controlador de objetos. Un sistema de diseño de este tipo de enclavamientos emplea una estructura modular, tanto a nivel software como hardware y permite al ENCE adaptar la distribución a la tipología del campo. De esta forma se minimiza el impacto de un fallo a nivel hardware. En el diseño software se sigue una estructura de tres niveles (básico, adaptación y aplicación), para garantizar toda una vida útil del enclavamiento, además de probar y validar por separado, los datos de la aplicación.

Capítulo 4. Materiales

Tradicionalmente, la utilización de residuos y subproductos industriales en los procesos de fabricación de cementos, morteros u hormigón ha constituido y permanece como un campo de investigación prolífico en contribuciones científico-técnicas y desarrollos competitivos transferidos a la industria. Residuos de tipo industrial se han utilizado para la construcción de carreteras en combinación con el cemento (Agrela, Barbudo, Ramírez, Ayuso, & Jiménez, 2012), entre otras aplicaciones.

En este sentido, la presente Tesis Doctoral tiene como objetivo el conocimiento sobre el comportamiento de nuevas adiciones minerales silico-aluminosas con actividad puzolánica, de valor añadido en la fabricación de cementos y materiales afines, obtenidas a partir del empleo de un residuo procedente de la infraestructura ferroviaria, balasto de vía, como sustitución en un cemento puzolánico de aplicación en vía en placa, o a traviesa de hormigón.

Mineralógicamente, los residuos de balasto están formados por silicatos y minerales de la arcilla de naturaleza caolinítica. La mayor parte de ellos se aplican como materiales inertes o se almacenan en escombreras o vertederos, lo que plantea importantes problemas desde el punto de vista técnico, económico y medioambiental (Lanas, Sirera, & Álvarez, 2005).

Conocido el deterioro del balasto instalado en la vía, así como los desperfectos que diferentes agentes, sobre todo de tipo climatológico, generan sobre elementos de

vía como las traviesas, se ha pensado en la reutilización de materiales y, en definitiva, en el uso de residuos voluminosos del tipo de construcción y demolición para su destino final. Se ha estudiado la adición de un flujo de residuos de construcción obtenidos desde balasto inservible, a través de ensayos del comportamiento que manifiesta el cemento así elaborado y de su durabilidad cuando se expone a ambientes agresivos que alteran la integridad de los materiales.

4.1. Rocas

Para la presente Tesis Doctoral se han utilizado tres tipos de muestras. Dos de ellas pertenecientes a canteras de las que se conoce el destino de los materiales (Figura 4.1), entre otros, aprovisionar el balasto de la vía en la renovación de la obra del tramo PB Río Duero – Estación de Valladolid Campo Grande, en la línea de Alta Velocidad Madrid – Segovia – Valladolid y una tercera, tomada en el aserradero de granitos de Cardeñosa, Ávila.



Figura 4.1. Localización en España de la provincia de Ávila.

Los materiales se han tomado a pie de cantera y proceden de:

1. Muestra **C**: se trata de una roca corneana o cornubianita con textura granoblástica, aunque en muchos ejemplares se aprecia, con claridad, la esquistosidad regional. Las corneanas son rocas oscuras, de brillo mate y colores opacos. La zona de acopio se ubica en las instalaciones de fabricación de áridos de CANTERAS y CONSTRUCCIONES S.A. (CYCASA), en Aldeavieja, Ávila (Figura 4.2).



Figura 4.2. CANTERAS y CONSTRUCCIONES, S.A. (CYCASA). Elaboración propia.

Geográficamente, la toma de muestra se sitúa en la hoja 507 de la serie Magna 1:50.000, “El Espinar” (Martín Serrano, y otros, 1991).

Las muestras seleccionadas, y según la Hoja cartográfica de “El Espinar”, pertenecen a uno de los dos conjuntos que componen la zona, es decir, rocas ígneas y rocas metamórficas, siendo a estas últimas, y procedente del Macizo Hercínico Precámbrico/Paleozoico, en el que se incluyen las cornubianitas y que coincide con el afloramiento de Ojos Albos (sector O-SO de la hoja cartográfica, limitado al E por la falla de la Cruz de Hierro y por el N, con el macizo adamelítico que se extiende desde la población de El Espinar). En realidad, se trata de rocas tipo granitoides (adamelitas) con anfíbol, que afloran con continuidad en una amplia banda irregular que se extiende desde Aldeavieja (Ávila) a San Rafael (Segovia).



Figura 4.3. Localización de las canteras Cardenosa, Cuadrado y CYCASA. Elaboración propia.

Las cornubianitas son rocas, normalmente masivas, y muy duras, que resultan de la acción térmica sobre rocas circundantes de un cuerpo de magma caliente que se emplaza en profundidad. Aparecen, por ello, formando aureolas, más o menos anchas, en el borde de un cuerpo grande de roca plutónica, normalmente granitos, granodioritas o gabros. Están formadas por cristales muy pequeños, de minerales equidimensionales, generando un agregado granular, conforma plana, pero dispuesta al azar, sin orientación preferente.

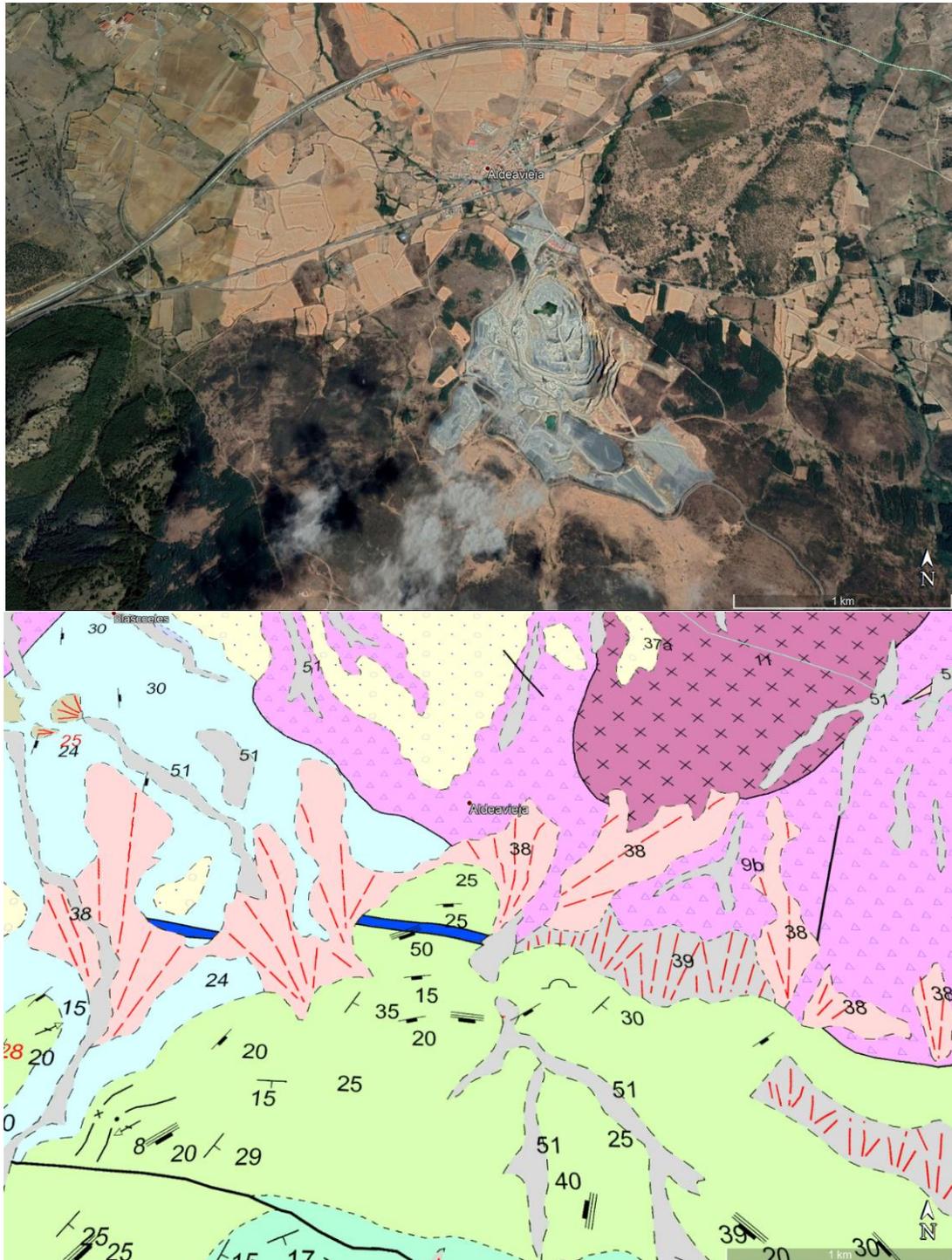


Figura 4.4. Vista aérea de la cantera de Aldeavieja y su localización en el mapa geológico.
Fuente: Google Earth Pro. Escala: 1: 1.000.

2. Muestra **CU**, procedente de Canteras **Cuadrado**, situada en el kilómetro 4 de la carretera de Ávila a Cebreros, en el término municipal de Ávila, con un frente de cantera correspondiente a un pórfido de color oscuro (Figura 4.4).



Figura 4.5. Canteras Cuadrado. Elaboración Propia.

La zona de toma de muestra se localiza en la hoja 531 del Mapa geológico de España, escala 1:50.000 (2008), “Ávila de los Caballeros” (Martín Parra, Martínez Salanova, & Moreno, 2008) (Figura 4.5). Se ubica en las estribaciones del Sistema Central reuniendo materiales consistentes en rocas ígneas y metamórficas, que se ven fracturadas por las orogenias Alpina y Hercínica. Esta última orogenia ocasionó una red de fallas en dirección E-O y ESE-ONO, que afectan a los materiales metamórficos, generando pórfidos de diferentes colores y coincide con la falla de la Cruz de Hierro localizada en el NE de la hoja geológica y cuya continuidad se detecta en la hoja vecina de “El Espinar”, antes mencionada.

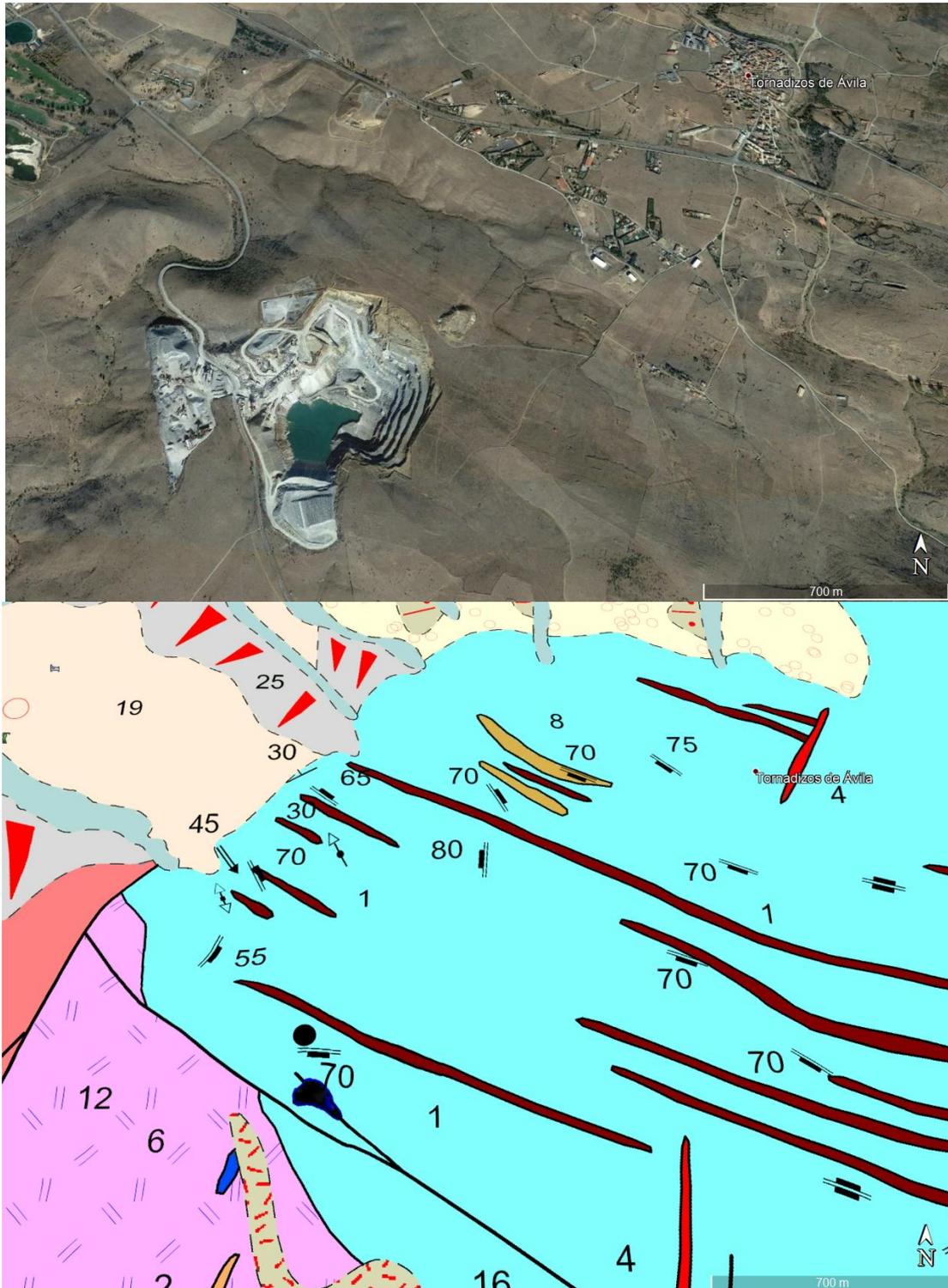


Figura 4.6. Vista aérea de la cantera Cuadrado y su localización en el mapa geológico. Fuente: Google Earth Pro. Escala: 1: 700.

Los materiales que se reconocen son adamelitas con morfología de berrocal, que pueden ser de tres tipos: 1) adamelita biotítica, de grano medio-grosso porfídica, 2) una facies porfídica con cristales de feldespato de grandes dimensiones y 3) adamelita con biotita, más oscura y de grano medio, con anfíbol y alanita. En general, se puede hablar de granitoides con tamaño de grano medio a grueso, con cuarzo, plagioclasa (feldespato calcosódico), feldespato potásico, biotita y como minerales accesorios circón, opacos, apatito, esfena, anfíbol y alanita. Suelen aparecer cloritizaciones y seritizaciones con moscovita.

3. Muestras **P**, **PR1** y **PR2**, recogidas en el aserradero de granito que explotan Granitos Cardeñosa, en Cardeñosa (Ávila), donde se cortan losas de este material (Figura 4.6), generando un gran volumen de serrín de roca. Como el corte se efectúa en húmedo, el lodo obtenido se deja secar al aire libre (muestra **P**) y además, en seco, se recoge el material del abujardado del granito gris (**PR1**) y del granito rubio (**PR2**).



Figura 4.7. Granitos Cardeñosa, en Cardeñosa (Ávila). Elaboración propia.

Todas las muestras se sitúan en las laderas de un paisaje idílico, que ocupa el embalse de Las Cogotas, yacimiento de la edad del Bronce final y de la edad del Hierro y que, geológicamente, se emplaza en la hoja 506 “Cardeñosa” (Hernández Samaniego, Fernández Carrasco, Carreras Suárez, & Olivé Davó, 1982), correspondiendo a las estribaciones septentrionales del Sistema Central en tránsito

hacia la submeseta de Castilla la Vieja, en las provincias de Ávila y Segovia (Figura 4.7).

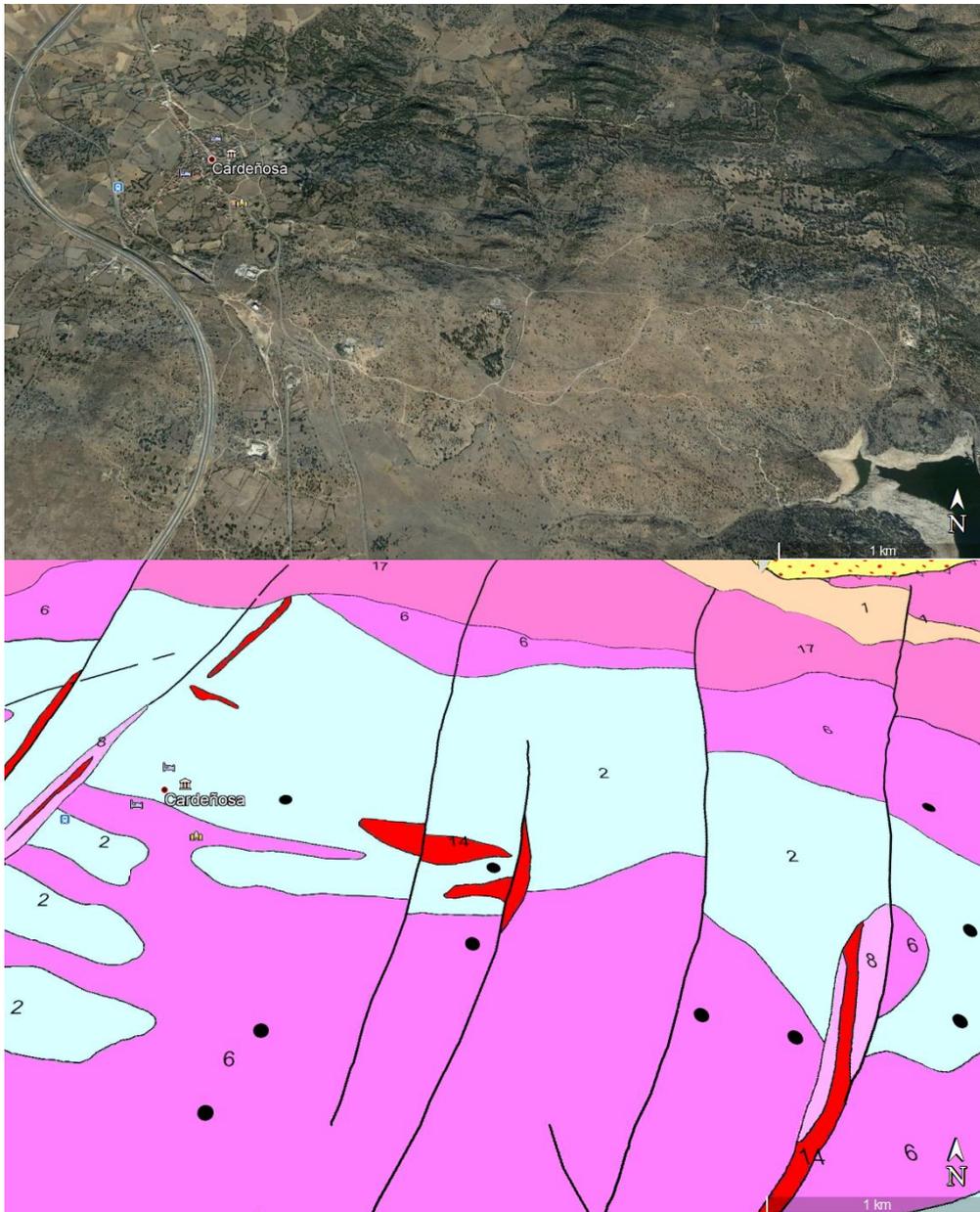


Figura 4.8. Vista aérea de la cantera de Cardenosa y su localización en el mapa geológico.
Fuente: Google Earth Pro. Escala: 1: 1.000.

En la zona se reconocen dos intrusiones graníticas separadas en el tiempo, una de los granitos de dos micas, y la segunda, de granodioritas tardías, junto a rocas filonianas relacionadas con la fracturación de los granitos.

Los granitos de dos micas (moscovita y biotita) son de grano medio a grueso y se corresponden con adamelitas y leucoadamelitas, que ocupan la franja ONO-ESE en dirección hacia la próxima localidad de Mingorría. En su composición tienen feldespato potásico (microclina, ortoclasa), cuarzo, feldespato calcosódico (anortita alterada a sericita), rutilo, biotita y moscovita, y como minerales accesorios apatito, circón, esfena, clorita y turmalina.

Las granodioritas son rocas graníticas de grano medio, en relación con la segunda intrusión, y corresponden a adamelitas más básicas, con esfena, alanita, anfíbol, plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, biotita y circón.

El nombre de adamelita se utiliza para definir una roca plutónica, poco sencilla de precisar, cuya composición varía de granítica a granodiorítica.

Las muestras **C** y **CU** se van a transformar en residuos de construcción y demolición (RCD) procedentes de los rechazos de balasto de vía cuando ésta se renueva. Para ello se va a proceder a simular el proceso de abrasión mediante un método acelerado que consiste en desgastar el balasto inicial mediante un vaivén que hace chocar unos fragmentos con otros, hasta alcanzar el límite de redondez que desecha el material como balasto y luego, recoger el polvo que se obtiene.

En definitiva, los residuos de balasto se prepararon con el material desechado en el ensayo de abrasión de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2, 2010), que se utiliza para comprobar la adecuación del balasto al uso que tiene determinado, con las condiciones especificadas en el anejo C de la norma (UNE-EN 13450, 2003). El material abrasionado se recoge, ya que, sobre él, se van a efectuar los ensayos consecutivos.

Al objeto de conocer las posibilidades de puzolanicidad de este material, se ha seguido en paralelo y según literatura consultada (Vigil de la Villa, Frías, Sánchez de Rojas, Vegas, & García, 2007), (Frías, García, Vigil de la Villa, & Villar, 2013), la calcinación del residuo de balasto, en horno eléctrico a 600°C durante 2 horas (muestra **CC**) y secado en horno 24 horas a 110°C, hasta peso constante (eliminación de la humedad).

Sobre las muestras **C** y **CC** se procedió a la determinación de la actividad puzolánica cuyo método se describirá más tarde.

En el sistema residuo/cemento se procedió a las sustituciones del 0, 6, 10 y 20% del cemento por la puzolana, es decir, el residuo calcinado a 600°C/2 horas, consiguiendo un cemento tipo CEM II-A. No obstante, sólo se utilizarán los cementos con las sustituciones mayores, es decir, 10% y 20%, comparándolos con el material sin sustitución, sometiéndolos, en todos los casos, a los mismos ensayos.

Para algunas pruebas, las muestras han sido probetas de mortero fabricadas con cemento Portland ordinario (CEM I 42,5N) y mezclas del mismo cemento con sustitución de 10% y 20% de residuo de balasto procedente de Aldeavieja (Ávila). La preparación de las probetas se ha realizado según normas (ISO/TC 74), (ASTM C150-07), (ASTM C666-97) y (ASTM C469), siendo las dimensiones de las probetas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Todas las probetas han sido expuestas en tres ambientes:

- 1) Madrid, en el centro de España, donde las condiciones ambientales corresponden a un clima de meseta.

- 2) Barcelona, con clima mediterráneo costero, y,

- 3) Como patrón una muestra situada en el laboratorio. El estudio se desarrolló durante el año 2018, con un seguimiento de los ejemplares cada 3, 6, 9 y 12 meses.

4.2. Cemento

Se utiliza, además, el cemento Portland ordinario comercial (CPO) tipo CEM I 42,5 R, suministrado por la cementera LafargeHolcim de Villaluenga de la Sagra (Toledo). Este tipo de cemento, empelado para la preparación de las distintas mezclas, se caracteriza por presentar una composición, en masa, entre 95-100% de clinker y 0-5% de componentes minoritarios (componentes inorgánicos especialmente seleccionados usados en proporción inferior al 5% en masa, respecto de la suma de

todos los componentes principales y minoritarios) (UNE-EN 197-1, 2011). Según la clasificación de los 27 cementos comunes comerciales que recoge la normativa, es un cemento Portland tipo I, ya que no contiene ningún tipo de adición puzolánica como componente mayoritario. La composición química del cemento se proporciona en la Tabla 4.1.

Como era de esperar el componente mayoritario es CaO, seguido de sílice y en menor proporción, óxidos de aluminio, azufre y hierro.

En el caso del cemento utilizado, si se asume que está constituido exclusivamente por clinker, su composición potencial es C₃S 67,4%, C₂S 8,6%, C₃A 9,28% y una fase ferrítica de composición próxima a C₄AF 9,97%, calculada a través del contenido de sus óxidos principales, mediante la ecuación de Bogue (Taylor, 1997). Este método supone que el equilibrio se alcanza en el proceso de clinkerización de las materias primas y éste se mantiene durante todo el enfriamiento. Además, se considera que todas las fases están en estado cristalino.

Tabla 4.1. Composición química del cemento CEM I 42,5 R.

Óxido	%
SiO₂	19,20
Al₂O₃	5,62
Fe₂O₃	3,08
CaO	62,44
MgO	1,21
SO₃	3,29
K₂O	0,89
Na₂O	0,27
TiO₂	0,24
P₂O₅	0,11
Pérdida a la calcinación (PPC)	2,72

4.3. Arena

La arena utilizada en los ensayos ha sido la normalizada CEN EN 196-1 (UNE-EN 196-1, 2018). Es una arena natural con contenido en sílice superior o igual al 98%.

4.4. Hidróxido de calcio

El hidróxido de calcio empleado en la reacción puzolánica es el producto comercial en polvo, marca PANREAC, con un índice de pureza extra puro *Ph Eur USP*, cuyo análisis químico se recoge en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Parámetros del hidróxido de calcio utilizado.

Análisis	% en peso
Acidimetría	96,8
Insoluble en CIH	< 0,5
Carbonatos	3,1
Cloruros	< 0,033
Sulfatos	< 0,4
Arsénico	< 0,0004
Metales pesados	< 0,02
Magnesio y metales alcalinos	< 4,0

Capítulo 5. Métodos y técnicas de medida

Las técnicas que se van a utilizar en la presente Tesis Doctoral van dirigidas al estudio de los cementos puzolánicos obtenidos desde el reciclado del balasto desechado y sus sustituciones, en diversas proporciones, en el cemento Portland ordinario. Por esta razón se ensayarán propiedades en estado fresco y una vez endurecida, fraguada, la matriz del cemento.

5.1. Métodos

5.1.1. Propiedades en estado fresco

El análisis de las propiedades en estado fresco de los materiales conglomerados con cemento (hormigones y morteros) obedece al hecho de facilitar la puesta en obra (trabajabilidad) de dichos materiales, garantizar tiempos suficientes de ejecución antes de que se produzca el endurecimiento de la pasta (fraguado), y evitar la solidificación prematura asociada a variaciones de volumen (retracción o expansión plástica), una vez que la pasta de cemento pierde plasticidad.

5.1.1.1. Trabajabilidad

La determinación de la trabajabilidad se realiza a través de la consistencia en morteros normalizados sobre una mesa de sacudidas. Esta propiedad pone de manifiesto la facilidad con la cual, un material de base cemento, puede ser colocado en el lugar al que se destina y compactado. Se determina, habitualmente, mediante ensayos empíricos dirigidos a valorar la capacidad del material a fluir, siendo los más comunes aquellos que se basan en el vaciado del material contenido en un molde troncocónico.

Previo al ensayo se realizó la mezcla de cemento con agua en un dispositivo tubular durante 5 minutos según norma (UNE-EN 196-1, 2018). Una vez finalizado el tiempo de amasado se determinó la consistencia por medio de la mesa de sacudidas. Para ello se colocó un molde troncocónico con su tolva en el centro de la mesa de sacudidas apoyado por su base mayor.

El llenado se realizó en dos capas, cada una de las cuales se compacto con 10 golpes de pisón. Una vez retirada la tolva se enrasó la superficie antes de dejar caer el tablero de la mesa 15 veces. Finalmente, se midieron dos diámetros perpendiculares de la mesa extendida, expresando el resultado de consistencia como media, en milímetros, de los diámetros resultantes. Todo el ensayo se realizó a $20^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y las medidas se efectuaron por triplicado.

5.1.1.2. Fraguado

Se denomina fraguado al paso de la pasta de cemento desde un estado plástico a un estado rígido. El tiempo en el que comienza y finaliza el fraguado es del orden de unas pocas horas y depende de la proporción en que se encuentran los principales minerales del clinker, del contenido de adiciones minerales (puzolanas, yeso, etc.), de la reología de las pastas en estado fresco y de la temperatura de curado. El fraguado de cemento se produce debido a una serie de reacciones químicas acaecidas entre los minerales del cemento y el agua.

Estas reacciones suceden durante las primeras horas de amasado, por lo que serán los minerales con mayor reactividad, los que influyan, de forma más determinante, en los tiempos de inicio y acabado de fraguado.

La velocidad de fraguado viene limitada por la normativa sobre cemento, estableciendo un periodo de tiempo, contado desde el proceso de amasado, dentro del cual se desarrolla todo el proceso. El ensayo típico de control es el ensayo de la aguja de Vicat (UNE-EN 196-3, 2017), que mide el inicio y el final del fraguado, en medidas de penetración cada 15 minutos.

En relación con el fraguado, se debe citar la finura, propiedad que influye en la velocidad de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso. Cuando los granos de cemento se ponen en contacto con el agua, solo se hidratan en una profundidad de 0,01 mm, por esta razón deben ser granos finos para que el rendimiento sea máximo; aunque si son demasiado finos, la retracción y el calor de hidratación serán muy altos y el mortero más vulnerable a la meteorización, disminuyendo la resistencia a agentes agresivos, como el agua. La finura influye sobre las propiedades de ganancia de resistencia, en especial, hasta un envejecimiento de siete días.

La determinación del tamaño de grano o de partícula se determinó mediante espectrometría de difracción de rayos láser (DRL) en un rango de 0,1 μm a 1750 μm . El fundamento de la técnica es la dispersión de la luz en todas las direcciones del espacio con un patrón de intensidad en función del tamaño de partícula. El espectrómetro empleado es marca SYPATEC HELOS 12 LA, con dos sistemas de alimentación, en seco y en húmedo.

Los tiempos de fraguado se determinaron según norma (UNE-EN 196-3, 2017), que establece, en primer lugar, la medida de la consistencia normal. La pasta de cemento de consistencia normal presenta una resistencia específica a la penetración de una sonda normalizada. El agua requerida para la preparación en dicha pasta se obtiene mediante sucesivos ensayos de penetración en pastas, de diferentes contenidos en agua, hasta garantizar una distancia (6 ± 2 mm, entre la sonda y la placa base). Para ello es imprescindible fijar el contenido de agua en esta pasta, con una aproximación del 0,5%, para la obtención de la consistencia normal del cemento.

El tiempo de fraguado se determinó en aparato automático de Vicat de marca Ibertest, midiendo la penetración de una aguja de $1,13 \pm 0,05$ mm en una pasta de cemento de consistencia normal. Se registraron los tiempos transcurridos desde el inicio del ensayo con una cadencia de 5 minutos y considerando como tiempo de principio de fraguado el que se determina en el instante cero.

5.1.1.3. Retracción

La retracción no es una fuerza sino una deformación impuesta que genera tensiones de tracción y fisuras por acortamiento del material. La pasta de cemento hidratada saturada no es totalmente estable desde el punto de vista dimensional. El cemento en estado fresco experimenta, a lo largo del curado, procesos de retracción y expansión, en función de su formulación y de las condiciones ambientales. Una vez que el cemento pierde plasticidad, una retracción alta puede ser el detonante de agrietamiento si las fuerzas de retracción son mayores que la resistencia a la tracción desarrollada. Así, la retracción química se debe a que el volumen de los productos de hidratación del cemento es inferior a la suma del volumen de los reactivos.

Cuando los tiempos están cercanos al instante inicial la depresión capilar vinculada a la autodesecación del sistema o retracción autógena y la contracción de Le Châtelier o retracción química (debida a la diferencia de densidades entre los productos de hidratación y los reactivos, es decir, el conglomerante y el agua), son los factores determinantes.

Para la medida de la retracción en fresco se utiliza un método visual mediante microscopía óptica de polarización a través de un Microscopio petrográfico ORTO PLAN POL LEITZ, siguiendo el proceso en moldes de dimensión concreta a diferentes tiempos y con dosificaciones de relación agua/cemento + adición = 0,5 en los morteros y la relación cemento + residuo/arena = 1/3.

5.1.1.4. Estabilidad de volumen

Las adiciones minerales que se están proponiendo para obtener cementos puzolánicos pueden causar fenómenos de expansión en el proceso de hidratación de

los mismos, por ejemplo, la existencia de cal libre genera expansiones volumétricas en el cemento hidratado y algo similar ocurre con el yeso y los sulfatos, en general.

La estabilidad volumétrica se determinó según norma (UNE-EN 196-3, 2017), mediante la expansión en volumen de la pasta de cemento de consistencia normal, indicada por el desplazamiento de dos agujas.

Después de preparadas las pastas se llenaron los moldes de Le Châtelier y se taparon para introducirlos en baño de agua a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Después de 24 horas se midió la distancia entre las puntas de dos agujas y más tarde, el molde se calentó a ebullición durante 3 horas y se volvió a comprobar la misma distancia. Por último, los moldes se extrajeron del baño, se dejaron enfriar, efectuando una tercera lectura. La expansividad se calcula por diferencia entre la primera y la última lectura.

5.1.1.5. Propiedades en estado endurecido

Cualquier material de base cemento (morteros u hormigones) ha de garantizar, en su estado endurecido, una determinada capacidad de soportar esfuerzos mecánicos, así como una máxima resistencia a la degradación ante agentes agresivos.

Resistencias mecánicas

La principal característica mecánica sujeta al cumplimiento de especificaciones (UNE-EN 197-1, 2011) es la resistencia a la compresión simple, puesto que los materiales compuestos de cemento, de forma genérica, ofrecen mayor resistencia a dichas sollicitaciones con relación a los esfuerzos de flexión y tracción.

En la hidratación de los cementos son los productos procedentes de los silicatos los que proporcionan más alta resistencia al producto final. La velocidad de hidratación de silicato tricálcico (C_3S) y aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) es rápida, contribuyendo al desarrollo de resistencias considerables a edades tempranas.

Por su parte, la velocidad de hidratación del silicato dicálcico, $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S), sucede lentamente y sus productos de hidratación aportan resistencias a largo plazo, iguales o superiores a las derivadas del C_3S .

La finura del cemento influye también en el desarrollo de resistencias, siendo éstas más grandes cuanto mayor superficie de reacción aporte el cemento. Además, el aumento de la relación agua/cemento conlleva una reducción exponencial de las resistencias mecánicas.

La sustitución parcial del cemento Portland por materiales puzolánicos, en este caso residuos, genera una disminución de resistencia a primeras edades de curado, mientras que a largo tiempo pueden alcanzar, e incluso superar, las resistencias del cemento Portland de referencia. El silicato cálcico hidratado, $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (gel CSH), en sus diferentes formas y estructuras, es el principal responsable de la cohesión y la resistencia. Por consiguiente, un aumento de dicho producto debido a la reacción puzolánica, origina un incremento de resistencias mecánicas a medio y largo plazo.

Cuando un cemento se endurece sigue unos patrones que dependen de las propiedades fisicoquímicas del cemento y de las condiciones de curado (temperatura y humedad), siendo muy importante la relación entre agua y cemento, debido a la influencia de la primera en la porosidad de la pasta. Según norma se suele medir a 3, 7, 14 y 28 días, tiempo en el cual se considera madura la pasta (UNE-EN 196-1, 2018).

Como resistencia de un cemento se entiende la de un mortero normalizado, amasado con arena silíceo (Jiménez Montoya, García, & Morán, 2000), (UNE-EN 196-1, 2018). Este procedimiento resulta ser el idóneo cuando se trata de comparar la influencia de la composición del cemento en las resistencias del mismo a diferentes edades, manteniendo constantes otros factores determinantes en dicha propiedad, tales como la relación agua/cemento, los tiempos de mezclado o las condiciones de curado (temperatura y humedad relativa).

La determinación de resistencias se realizó según norma (UNE-EN 196-1, 2018). Por cada tipo de cemento y tiempo de rotura, se fabricaron tres probetas prismáticas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$. Al concluir la fase de amasado, el material resultante se colocó en tres compartimentos horizontales de un molde de acero, con el fin de fabricar,

simultáneamente, tres probetas prismáticas. El llenado de los compartimentos se efectuó en dos capas, sometiendo, cada una, a 60 golpes en compactadora. Luego, el molde se cubrió con una lámina de vidrio, previo a su colocación en cámara húmeda (20°C y 90% de humedad relativa), durante 24 horas.

Después de un tiempo en cámara húmeda, las probetas se extrajeron del molde y se sumergieron en agua templada a 20°C hasta el momento de la rotura y una humedad relativa constante hasta el mismo momento. Los ensayos de resistencia se efectuaron a 2, 7, 14, 28, 90, 180 y 360 días, al objeto de analizar el efecto de la nueva sustitución a corto y medio plazo.

Los ensayos de resistencia se llevaron a cabo en prensas automáticas de la marca Ibertest Autotest 200/10 SW. Para cada tipo de cemento se obtuvieron tres valores de resistencia a flexotracción y cinco valores de resistencia a compresión.

Fluencia

Se entiende por fluencia de hormigón o mortero, la deformación que sufren éstos materiales una vez endurecidos a causa de una fuerza constante aplicada, de forma continuada, a lo largo del tiempo. A efectos prácticos, se denominará fluencia al conjunto de deformaciones diferidas a una edad de curado concreta y una carga mantenida durante un tiempo.

La fluencia depende del grado de humedad ambiente en que se encuentra la muestra, del espesor de ésta y de la composición del material de base cemento. Asimismo, influye la edad del material en el momento de aplicación de la carga, y el tiempo transcurrido hasta el momento en que se evalúa la fluencia.

La fluencia, al igual que le sucede a la retracción, es una propiedad que depende del tiempo. A la hora de aislar la deformación por fluencia, se debe tener presente el efecto de la retracción total (Lee, Yi, & Kim, 2006).

Para determinar la fluencia a compresión de los morteros, se fabricaron seis probetas cilíndricas (100 mm de diámetro y 200 mm de altura), de la misma dimensión que las utilizadas para el módulo elástico. Se curaron a 28 días y de las seis probetas, cinco se usaron para la resistencia a compresión y una para la fluencia a lo largo del tiempo.

Por cada probeta cilíndrica destinada al ensayo de fluencia y después de los 28 días de curado, se colocaron dos galgas extensiométricas sobre generatrices opuestas, centrándolas en altura. La longitud efectiva de las galgas fue superior a tres veces el tamaño del árido utilizado para preparar el mortero, de acuerdo con norma (ASTM C512-02).

Transcurrido los 28 días de curado en los baños de agua, se ensayaron las probetas a compresión simple, determinando la resistencia media de cada serie. Se utilizaron prensas de la marca Ibertest con una velocidad de aplicación de carga de 3,5 kN/s. El estado tensional del ensayo de fluencia se estableció como el 40% de la resistencia a compresión simple, calculada a partir de la media de cinco valores de rotura de cada serie de materiales objeto de estudio.

A continuación, se colocaron las probetas sobre el cajeadado y sistema de guiado coaxial, apoyando sobre la superficie superior del disco de reparto de carga, donde descansó, a su vez, la célula de carga. El sistema de transmisión de carga se acopló sobre la célula de carga, aflojando las tuercas de soporte de la placa intermedia. Sobre la cajera cilíndrica de la base intermedia, se situó el cilindro hidráulico.

Tras inmovilizar la posición de la base superior, mediante el sistema tuerca y contratuerca, se procedió a conectar la extensimetría de la probeta y de la célula de carga, al sistema de adquisición de datos, tomando como referencia de ceros las medidas del peso propio de las piezas del sistema, apoyadas, directamente, sobre probeta y célula. Finalmente, se inició la aplicación de la carga a través del pistón hasta conseguir la sollicitación del ensayo; momento en el cual se bloqueó la posición de la placa intermedia por medio de las tres tuercas dispuestas al efecto.

Durante los primeros días siguientes a la aplicación de la carga, se verificó la consecución de la misma, ajustándola cada vez que aquella sobrepasaba $\pm 2\%$ del valor inicial establecido, de acuerdo con la norma (ASTM C512-02). El estudio de fluencia sobre los morteros se dilató durante un periodo de un año para concluir el módulo de deformación para cargas permanentes de forma a lo especificado.

Retracción total de secado

La retracción total de secado de un material de base cemento puede definirse como la contracción de meniscos causada por la pérdida paulatina del agua capilar o libre y una fracción del agua absorbida en la zona de transición del árido y la pasta de cemento. La retracción de secado, junto con la baja resistencia a la tracción, constituye la propiedad limitante del cemento. Este fenómeno puede no afectar a la integridad estructural, si bien la vida útil del material se ve reducida cuanto mayor es el efecto de retracción.

La retracción genera tensiones de tracción que, pueden superar la correspondiente resistencia del material, causando fisuras y desconches (Bissonnette, Pierre, & Pigeon, 1999).

El procedimiento experimental para la determinación de la retracción de secado de los morteros elaborados con mezclas de cemento Portland y residuo se siguió según normas (ASTM C596-07) y (ASTM C490). Para este ensayo se fabricaron cuatro barras prismáticas de $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$ por cada mortero. Por el centro de las caras de $25 \times 25 \text{ mm}^2$ y perpendicularmente a ellas, quedaron embebidos unos cilindros de acero inoxidable de $6 \pm 1 \text{ mm}$ de diámetro, resultando la distancia de calibrado, entre los extremos interiores, de $254,0 \pm 2,54 \text{ mm}$.

Las probetas se mantuvieron en los moldes durante las 48 primeras horas de curado en cámara húmeda a $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y con humedad relativa superior al 90%. Transcurridos los dos primeros días, se retiraron las probetas de los moldes, sumergiéndolas en agua durante 24 horas. Luego, y después de 72 horas de curado, se extrajeron de los baños, secándolas superficialmente con un paño y procediendo a realizar la medida inicial de cada barra. Las lecturas de cada barra, conservadas en condiciones de laboratorio ($20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ y $60\% \pm 3\%$ de humedad relativa) se efectuaron mediante el uso de un reloj comparador, calibrando éste con una barra metálica patrón antes de cada serie de medidas.

El seguimiento del ensayo se prolongó durante 180 días hasta garantizar el máximo de retracción para cada mortero. Durante los primeros 90 días, se registraron cinco lecturas de retracción semanales, disminuyendo la frecuencia de registro a medida que disminuía la pendiente de la curva de retracción.

El cálculo del cambio de longitud se determinó por la Ecuación 5.1:

Ecuación 5.1:

$$\Delta L_{x \text{ días}} = (Lx - Li/G) \times 100$$

donde:

- $\Delta L_{x \text{ días}}$ es la variación de longitud a x días en %.
- Lx, la diferencia entre la lectura del comparador de una determinada probeta a “x” días de curado y la lectura de la barra de referencia a dicha edad, en mm.
- “Li”, es la diferencia entre la lectura inicial del comparador de una determinada probeta y la lectura de la barra patrón a dicha edad, en mm.
- G, es la longitud de calibrado nominal establecida en 254 mm.

Durabilidad

La durabilidad se puede definir como la capacidad que tiene un material para resistir acciones ambientales de tipo físico, químico, electroquímico, biológico o cualquier otro proceso que pueda deteriorarlo. Así, un hormigón durable será aquel que, sometido a determinadas acciones agresivas, conserve su capacidad resistente de servicio, integridad y aspecto, en su vida útil, sin que se tenga que sufrir reparaciones, ni mantenimiento superior al rutinario (Talero, 2001).

Numerosas acciones de tipo no mecánico afectan a la durabilidad, tales como:

1) Físicas, debidas a variaciones de temperatura y humedad que inducen a la aparición de tensiones internas, generando microfisuras; fenómenos de deshielo que promueven agrietamiento interno y desconches superficiales; erosión por abrasión o cavitación; corrientes eléctricas.

2) Químicas, por acción de ácidos que actúan sobre los compuestos cálcicos de hidratación del cemento (portlandita, silicatos, aluminatos cálcicos) produciendo sales cálcicas y ocasionando la destrucción de la estructura del cemento endurecido; ataque por sulfatos que reaccionan con el aluminato tricálcico del cemento hasta la aparición de ettringita, lo que lleva a un considerable aumento de volumen;

reacciones árido-álcali que pueden suceder con áridos de naturaleza silíceo, formando geles de sílice de acción osmótica y capacidad de aumentar el volumen.

3) Biológicas, acciones de microorganismos y vegetación que causan daños de tipo mecánico o por segregación de ácidos húmicos que disuelven la pasta de cemento.

Los factores que más influyen en la durabilidad son la presencia de agua y el mecanismo de transporte a través de la red capilar de gases, agua y agentes disueltos. La red capilar de dichos materiales, ubicada en la pasta de cemento, está constituida por poros con tamaños medios de dimensión cercana al nanómetro, por poros capilares con radios medios del orden de micras y macroporos con dimensión milimétrica. Las dos últimas dimensiones de los poros son las que influyen en la durabilidad. En tales circunstancias, cuanto más refinada sea la red de poros, mayor dificultad ofrecerá el material al transporte de potenciales agentes nocivos (Roy, Arjunan, & Silsbee, 2001); (Courard, y otros, 2003); (Poon, Kou, & Lam, 2006).

Los fenómenos de hielo/deshielo son una de las principales causas de degradación de morteros y hormigones, sobre todo, los utilizados en regiones frías (Cao & Chung, 2002). En España, la mayor incidencia de dichas acciones se sitúa, geográficamente, en el tercio norte de la Península Ibérica y en zonas de montaña. En general, el deterioro del material del cemento expuesto a ciclos de hielo y deshielo se puede explicar a partir de diferentes variables como:

1) Presión hidráulica, desarrollada cuando el agua, localizada en un poro saturado, incrementa su volumen (9%) durante el cambio de estado de líquido a sólido, induciendo tensiones de tracción en la pasta de cemento.

2) Presión osmótica, causada por el movimiento del agua desde los poros de tamaño pequeño hacia aquellos otros donde se ha formado hielo, que busca restablecer el equilibrio entre las concentraciones de la solución de poros (sustancias disueltas en forma iónica).

3) Presión surgida en los poros, asociada a una cristalización de sales superando su concentración crítica.

4) Diferentes contracciones térmicas entre los constituyentes del material base cemento (Penttala, 2006).

Existen varios métodos de ensayo a partir de los cuales se puede evaluar el daño interno y superficial de hormigones sometidos a ciclos térmicos, pero el más utilizado se recoge en la norma (ASTM C666-97).

Para cada tipo de mortero se fabricaron las siguientes probetas: dos prismas de $80 \times 80 \times 400 \text{ mm}^3$, sobre las que se evaluó la variación del módulo de elasticidad relativo mediante ultrasonido, así como la variación de peso. Doce prismas de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ para medir la resistencia a compresión antes del inicio de la exposición cíclica de hielo/deshielo, transcurridos 28, 62 y 114 ciclos.

Todas las probetas se elaboraron en moldes metálicos con una relación agua/conglomerante de 0,5, en masa y una proporción de conglomerante/arena silíceo normalizada de 1:3, en masa. Cada prisma de $80 \times 80 \times 160 \text{ mm}^3$ se fabricó a partir de dos amasadas simultáneas en dispositivos planetarios. Para cada tipo de mortero, el llenado se efectuó en dos tongadas; primero dos compartimentos del molde y vibrando mediante golpeo, antes de proceder al relleno superior. Todas las probetas se curaron durante 24 horas en cámara húmeda (90% de humedad relativa y 20°C) tiempo tras el cual, se desmoldaron y sumergieron en baños de agua a 20°C durante 28 días. Una vez finalizado el curado de las probetas, se inició la exposición a ciclos de hielo/deshielo.

Para este experimento se seleccionó una cámara climática capaz de garantizar ciclos continuos de hielo/deshielo en un rango de temperatura de -20°C y $+15^\circ\text{C}$ (Zaharieva, Buyle-Bodin, & Wirquin, 2004) y (Basheer & Cleland, 2006).

Antes de iniciar el ataque a la helada, se caracterizaron los materiales mediante ensayos destructivos (resistencia a compresión simple) y no destructivos (medida de propagación de ultrasonido y determinación del peso). Se completó el estudio de los materiales, analizando la porosidad de los mismos.

La velocidad de ultrasonido se midió mediante un aparato de marca TICI-PROCEQ con frecuencia de 54 Hz. El módulo de elasticidad dinámico relativo se determinó a partir de la Ecuación 5.2 (Zaharieva, Buyle-Bodin, & Wirquin, 2004).

Ecuación 5.2:

$$E_{v,n} = \left(\frac{v_n^2}{v_0^2} \right) \times 100$$

donde:

- $E_{v,n}$ es el módulo de elasticidad dinámico relativo a n ciclos (%).
- v_n , la velocidad de onda ultrasónica tras n ciclos (m/s).
- v_0 la velocidad de onda ultrasónica al inicio del ensayo (m/s).

La resistencia a compresión simple se calculó de acuerdo con la norma (UNE-EN 196-1, 2018). Por cada tipo de mortero y ciclos de exposición se obtuvo un valor medio a partir de 5 valores. Se consideró como fallo del material, en el ensayo a ciclos hielo/deshielo, el momento en que aparecieran valores del módulo dinámico relativo iguales o inferiores al 60% y cuando al romper la probeta se detectara fisuración extrema.

5.2. Técnicas de medida

Las técnicas que han permitido el estudio de las propiedades antes citadas y la caracterización de los materiales se van a mencionar a continuación, insistiendo en algunos aspectos de las técnicas menos conocidos.

5.2.1. Difracción de rayos X

El uso de esta técnica está muy extendido para la identificación de los componentes cristalinos presentes en una muestra. Además, resulta de gran utilidad al poder comprobar, obteniendo nuevos difractogramas si, después de un tratamiento térmico o químico, el producto de partida ha sufrido alguna modificación en sus

componentes iniciales con la consecuente formación de nuevas fases cristalinas que se puedan detectar.

El fundamento de la técnica consiste en que, al incidir un haz paralelo de rayos X monocromático sobre una muestra compuesta de muchos cristales orientados al azar, un número determinado de planos reticulares constitutivos de los cristales, forman, con el rayo incidente, un ángulo que satisface la ley de Bragg, es decir, para que exista difracción es necesario que las ondas reflejadas por una familia de planos paralelos estén en fase.

Los difractogramas se han realizado en un difractómetro de rayos X modelo SIEMENS D-5000. El difractograma de polvo desorientado se ha registrado desde 5 a 65 grados con una velocidad de barrido de 2 grados por minuto. En el tubo generador de rayos X se utiliza, como cátodo, un filamento de wolframio y como ánodo, una placa de cobre (Cu K α). La intensidad de corriente y voltaje aplicados al tubo generador de rayos X ha sido de 30 mA y 40kV y las rendijas de dispersión y recepción, de 1 y 0,18 grados, respectivamente.

Las preparaciones se obtuvieron con la muestra en polvo, previamente molida en mortero de ágata, hasta alcanzar un tamaño de grano inferior a 88 micras, siendo prensadas a una presión de seis atmosferas y asegurándose de que la superficie sobre la cual iba a incidir el haz de rayos X, estaba perfectamente plana. En cada una de las muestras se ha introducido una cantidad fijada (5% en peso de la muestra) de rutilo, TiO₂, como patrón interno.

Se ha utilizado el método Rietveld de cuantificación que consiste en minimizar la diferencia entre un difractograma experimental y un difractograma calculado utilizando un modelo estructural aproximado con unos parámetros que permitan distribuir las intensidades de las diferentes reflexiones en el difractograma, para así lograr una cuantificación de materias cristalinas y amorfas.

Los compuestos presentes se han analizado usando el programa Match v.3 y el Rietveld Full Prof software (Match!) con las base de datos Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) y la Crystallography Open Database (COD) (Young, 1993).

5.2.2. Microscopia electrónica de barrido (SEM) y análisis por energías dispersivas (EDX).

Utilizando estas dos técnicas de forma combinada se puede realizar un estudio morfológico y un análisis de los componentes del material que permite identificar los elementos presentes en el mismo.

El fundamento de la técnica de SEM está basado en la interacción entre la fuente que excita el material y la respuesta del mismo. En esta interacción se produce una transferencia de energía. Cuando en el cátodo se calienta un filamento, se emite un haz de electrones que incide sobre la muestra colocada en el ánodo. Al ionizarse los átomos de la muestra, se emiten electrones secundarios hacia el exterior, generando vacantes que son reemplazadas por un electrón de una órbita más externa y así sucesivamente, emitiéndose rayos X característicos, en función del número atómico (Ley de Moseley). Estos rayos X se recoge y se miden como longitudes de onda en el caso de la microscopia electrónica o bien en forma de energía cuando se trata de energía dispersiva de rayos X.

El equipo utilizado es un microscopio electrónico de barrido marca PHILIPS modelo XL con fuente de wolframio. Las muestras se fijaron al portamuestras metálico mediante una lámina adhesiva por ambas caras, de grafito, cuya superficie fue luego, metalizada con oro para garantizar la conductividad, en un equipo BIO-RAD modelo SC 502. El mismo equipo de microscopía electrónica permite realizar análisis químicos puntuales por energías dispersivas de rayos X con detector de silicio/litio y analizador DX4i de EDX.

5.2.3. Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/MS)

El análisis químico por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/MS) se basa en el empleo de una fuente de plasma, donde los iones como tales, son detectados y no la radiación que ellos emiten.

En ICP/MS la energía de la fuente es suficiente no solo para la excitación de los elementos sino también para la ionización de los mismos. El haz de iones gaseoso producido contiene, entre otros, los iones de los elementos de interés, los cuales son separados de forma específica, según su relación carga/masa en el correspondiente analizador de masas. Los iones separados inciden sobre el transductor o detector, originando una corriente eléctrica proporcional al número de iones que llega por segundo y que, una vez procesada, permite la determinación de la concentración. La medida directa de los iones, proporciona mayor sensibilidad a las determinaciones (varios ordenes de magnitud a favor de ICP-MS en relación con ICP-OES) e información sobre la composición isotópica de los elementos.

La caracterización química de las disoluciones en medio ácido (ácido fluorhídrico) se efectuó a través de un espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente, marca Perkin Elmer modelo Elan 6000 con un inyector automático AS91, que permite el análisis semicuantitativo de, prácticamente, todo el sistema periódico de los elementos.

5.2.4. Tomografía computerizada

Dado que la resistencia mecánica de los materiales de base cemento guarda estrecha relación con la microporosidad de la matriz cementante (Appa Rao, 2003), se determinaron los tamaños de poro mediante una tomografía computerizada (CT-Scanner XT-H-160 de NIKON con Target de W, filtro de 0,375 mm Cu con tiempos de 708 ms por frame con un total de 4 frames y número de proyecciones de 1100 a 155 kV y 57 μ A) para así, obtener imágenes de cortes en las diferentes estructuras internas y tamaño de poro.

La Tomografía Computarizada de rayos X (TC) es una técnica de análisis de alta resolución no destructiva y no invasiva, por la que se obtiene una imagen microscópica en 3D de la muestra a analizar, representando tanto sus características internas como externas. El funcionamiento básico de la técnica consiste en la aplicación directa de rayos X a la muestra, atenuando su señal por dispersión y absorción y proyectando así, su imagen en el detector. Los valores de intensidad de las imágenes proyectadas

permiten la reconstrucción de la estructura interna y externa en tres dimensiones del objeto analizado.

Según el método empleado para la adquisición de las proyecciones se puede distinguir entre: TC de transmisión o tradicional (obtención de la atenuación de los rayos X al traspasar un objeto), TC de contraste de fase (adquisición de la medida de los cambios de fase de un haz de rayos X al pasar a través de un objeto), TC de dispersión (reconstrucción de la distribución de la densidad de electrones en un objeto a partir de la medida de la dispersión dentro de un rango angular), TC de difracción (tiene en cuenta propiedades de difracción de los rayos X), TC de doble energía (medida de los diferentes valores de atenuación dados por la proyección de rayos X con distinta energía) y TC compresivo (aplica la técnica de muestreo compresivo a la TC convencional) (Espitia Mendoza, Mejía Melgarejo, & Arguello Fuentes, 2016).

En el nacimiento de la Tomografía Computarizada se deben destacar dos grandes hitos científicos: En primer lugar, el descubrimiento, en 1895, de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen, quien logró obtener, gracias a su aplicación sobre un objeto, la primera visión de la composición interna del mismo. En segundo lugar, la aparición de la operación matemática Transformada de Randon, desarrollada en 1917 por Johann Radon, que demuestra cómo es posible reconstruir una imagen a partir de sus múltiples proyecciones en diferentes ángulos.

Estos descubrimientos dieron paso a que, en 1967, Allan McLeod Cormack publicara sus trabajos sobre la Tomografía Computarizada, que serían, a su vez, la base de las investigaciones de Sir Godfrey Newbold Hounsfield para diseñar el primer tomógrafo cerebral, cuyo desarrollo fue de vital importancia en el campo de la tecnología sanitaria porque solucionaba las limitaciones de la radiología convencional, al mostrar la información en varias dimensiones y al permitir distinguir la densidad de los tejidos (Ramírez Giraldo, Arboleda Clavijo, & McCollough, 2008). En 1972 comenzaron a desarrollarse los primeros ensayos clínicos utilizando esta técnica, pero limitados, inicialmente, a la obtención de imágenes del cerebro y más tarde, ya en 1974, se realizó el primer escáner TC de cuerpo entero.

Los tomógrafos usados en esta técnica han ido evolucionando desde su aparición a la actualidad al objeto de lograr una mayor velocidad en la adquisición de imágenes (Ramírez Giraldo, Arboleda Clavijo, & McCollough, 2008). Para ello, se han desarrollado hasta siete generaciones de escáneres, en función de la disposición de

los componentes y del movimiento mecánico necesario para la recopilación de datos (Espitia Mendoza, Mejía Melgarejo, & Arguello Fuentes, 2016).

Así, se construyeron los escáneres axiales de una única fila de detectores (Calzado & Geleijns, 2010) que dieron paso, en 1989, a los escáneres helicoidales o espirales, donde el emisor y los detectores se desplazan en espiral sobre el objeto a escanear, logrando de esta manera un aumento en la velocidad de análisis. En 1998, aparece el escáner helicoidal multicorte en el que se incrementan las filas de detectores permitiendo así la reconstrucción volumétrica de la imagen. Estos avances tecnológicos han sido posibles gracias a la implementación de nuevos algoritmos de reconstrucción de las imágenes, tecnología más potente y al desarrollo paralelo de equipos computacionales que permiten procesar un mayor volumen de información en un tiempo menor (Bosch, 2004).

Actualmente, la utilización de escáneres TC se combina con varias técnicas de obtención de imagen, como, por ejemplo, hibridación de un escáner TC con un tomógrafo por emisión de positrones (PET), o con un tomógrafo de emisión de fotón único (SPECT) (Calzado & Geleijns, 2010).

Aunque la Tomografía Computarizada fue introducida como un procedimiento médico, en la actualidad se utiliza para el análisis de materiales en distintos campos, tales como la construcción, la geología, la agricultura, la arqueología, etc. (Espitia Mendoza, Mejía Melgarejo, & Arguello Fuentes, 2016). De tal manera que, en la actualidad, podemos destacar que la TC es la herramienta de mayor precisión a la hora de estudiar, de manera no destructiva, la microestructura de los materiales y obtener información detallada en una caracterización 3D geométrica de agregados de partículas, poros y grietas (Skarżyński & Tejchman, 2019).

Cabe destacar su uso en el análisis de materiales de construcción, tales como el cemento, en el que su compleja estructura interna, compuesta por poros y microgrietas distribuidos al azar, determina sus propiedades físicas, mecánicas y durabilidad (Tian & Han, 2018). La aplicación de esta técnica favorece la obtención de una gran cantidad de información desde la determinación del diámetro de los poros y por lo tanto, el estudio de la permeabilidad, hasta su comportamiento mecánico bajo distintos procesos de deformación, tensión, congelación, descongelación y fractura, permitiendo optimizar su diseño y seguridad (Li, Huang, Tan, Kwan, & Liu, 2018), (Zhou, Abdelhady, Liang, Wang, & Yang, 2019) y (Skarżyński & Tejchman, 2019).

Además del análisis del cemento, el escáner TC permite reconocer otros materiales de construcción como el asfalto, con la posibilidad de identificar la distribución de los agregados minerales y la medida de la profundidad de los poros, siendo un método que no se ve influido por las características ambientales y que aporta resultados más claros y precisos que otras técnicas de estudio (Gao, Liu, Wang, Xie, & Jia, 2019).

Asimismo, desde 1990 hasta la fecha, se ha aplicado la Tomografía Computarizada al campo de los materiales geotécnicos, revelando sus propiedades físicas y mecánicas, los cambios microestructurales, la evolución de las grietas y el proceso de fractura de suelos y rocas, obteniendo, de esta forma, información relevante para la exploración de recursos, eliminación de residuos nucleares, predicción de terremotos, optimización de cultivos y aumento de su productividad y para el estudio de las consecuencias en la explotación agrícola (Espitia Mendoza, Mejía Melgarejo, & Arguello Fuentes, 2016), (Périard, Gumiere, Long, Rousseau, & Caron, 2016) y (Pengfei & Xingping, 2019). Sin embargo, los resultados de esta técnica no son homogéneos, sino que varían en función de la naturaleza del material a analizar, dando buenos resultados para arenisca y carbonato cálcico, no así en muestras heterogéneas de dolomita, margas ni en rocas salinas, por ejemplo.

5.2.5. Actividad puzolánica

Para determinar la actividad puzolánica de los materiales sometidos a estudio se usa un método acelerado, con desarrollo del ensayo de puzolanicidad para cementos puzolánicos recogido en la norma (UNE-EN 196-5, 2011) o ensayo de Frattini, que se basa en la reacción del material puzolánico con la cal liberada durante la hidratación del cemento. La concentración de iones Ca^{2+} y la alcalinidad del líquido sobrenadante en contacto con la pasta es analizada a las edades fijadas por la norma (8 y 15 días) y se aplica sobre mezclas de cemento y el material a determinar.

El método usado en esta Tesis Doctoral consiste en poner en contacto el material bajo estudio, con una disolución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a 40°C , sin realizar una mezcla con cemento como en la metodología propuesta por la norma; así, se evita, la interferencia de los componentes del cemento que se han formado en la reacción;

además, la temperatura mencionada acelera el proceso obteniendo resultados a tiempos menores. Esta variación ha sido propuesta por Sánchez de Rojas y Frías (Sánchez de Rojas & Frías, 1986).

La muestra se introduce en la disolución de cal durante periodos de tiempo determinados, tales como 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días. Una vez superado este lapso temporal, a 40°C, se valora la disolución para obtener las concentraciones reales de iones Ca^{2+} y OH^- , previamente filtrada lo más rápido posible, para evitar carbonataciones, con un filtro de tamaño de poro 240. Se toman 75 mL de este filtrado y 1 g de muestra, en botes de polietileno de cierre hermético para evitar pérdidas. La mezcla se agita enérgicamente y los botes se dejan en estufa a 40°C, el tiempo deseado para proceder a la valoración de los iones Ca^{2+} y OH^- . La relativa a los iones OH^- se realiza con ClH, utilizando como indicador naranja de metilo y la de los iones Ca^{2+} con AEDT y como indicador calceína.

Para determinar la cal fijada por cada muestra se resta a la concentración de la disolución saturada de cal el valor obtenido. La concentración estimada de Ca^{2+} en la disolución saturada a esta temperatura es de 17,68 mmol/L.

Capítulo 6. Resultados y discusión

Como se ha mencionado en la Introducción de la presente Tesis Doctoral, el objetivo es estudiar la posibilidad de utilizar residuos de balasto y de serrín de granito, para mezclarlos con un cemento Portland ordinario (CPO), en una determinada proporción, y de esta manera, lograr un cemento puzolánico ecológico caracterizado por la economía en el gasto energético de su fabricación y la reutilización de residuos inertes y voluminosos.

El siguiente esquema expone cuáles son los intereses deseados (Figura 6.1):

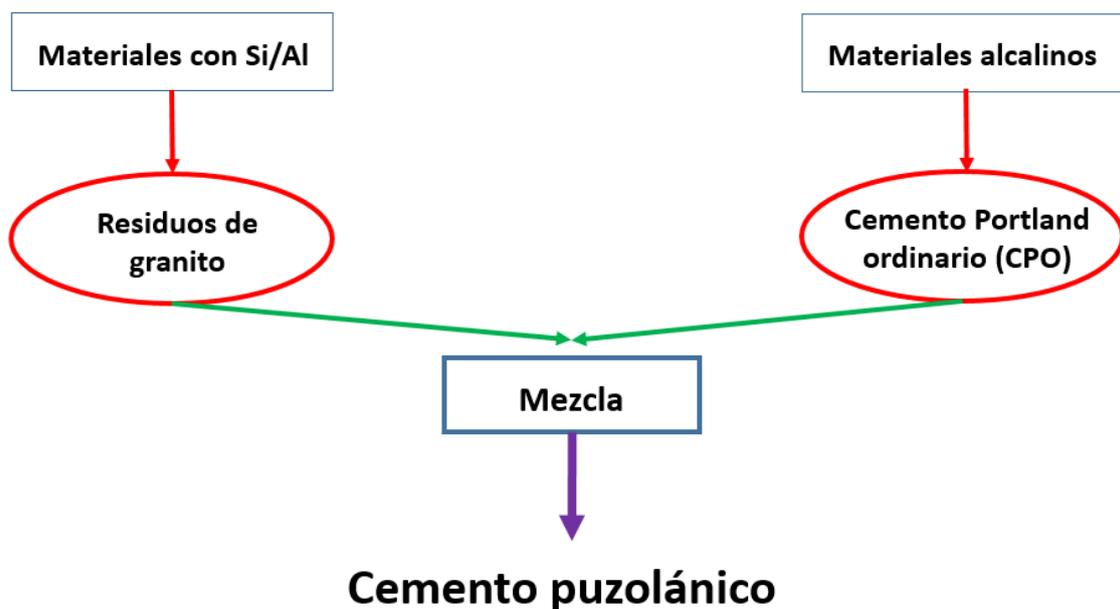


Figura 6.1. Desarrollo de los materiales que se van a tratar en la presente Tesis Doctoral.

6.1. Caracterización de materiales

Las muestras descritas en el Capítulo de “Materiales y técnicas de medida” se han caracterizado mineralógicamente por difracción de Rayos X y químicamente mediante por ICP/MS.

- Rocas

Muestra C. Se trata de una muestra de roca corneana o cornubianita, procedente de CANTERAS y CONSTRUCCIONES, S.A. (CYCASA), en Aldeavieja (Ávila, España) (Figura 6.2).



Figura 6.2. Canteras y Construcciones CYCASA. Elaboración propia.

La roca se ha estudiado mineralógica y químicamente. El análisis mineralógico ha proporcionado el resultado de la Figura 6.1 y que permite, mediante el método Rietveld, su cuantificación (Tabla 6.1).

Los residuos de balasto y de serrín de granito, ricos en silicatos (cuarzo, feldespatos, filosilicatos) aportan al CPO (rico en álcalis), una composición en donde silicio y aluminio son predominantes, lo que hace que mejoren las propiedades típicas de los cementos, tales como la trabajabilidad, generando, de este modo un cemento puzolánico de naturaleza ecológica, al introducir en el ciclo de fabricación del cemento, materiales de desecho y reciclados que sustituyen a los que se extraen de fuentes

naturales y que, en algunos casos, pueden estar casi agotados. La molienda y la finura del material provoca una desintegración de las estructuras cristalinas con una alta superficie específica que facilita la reacción puzolánica (Souri, y otros, 2015).

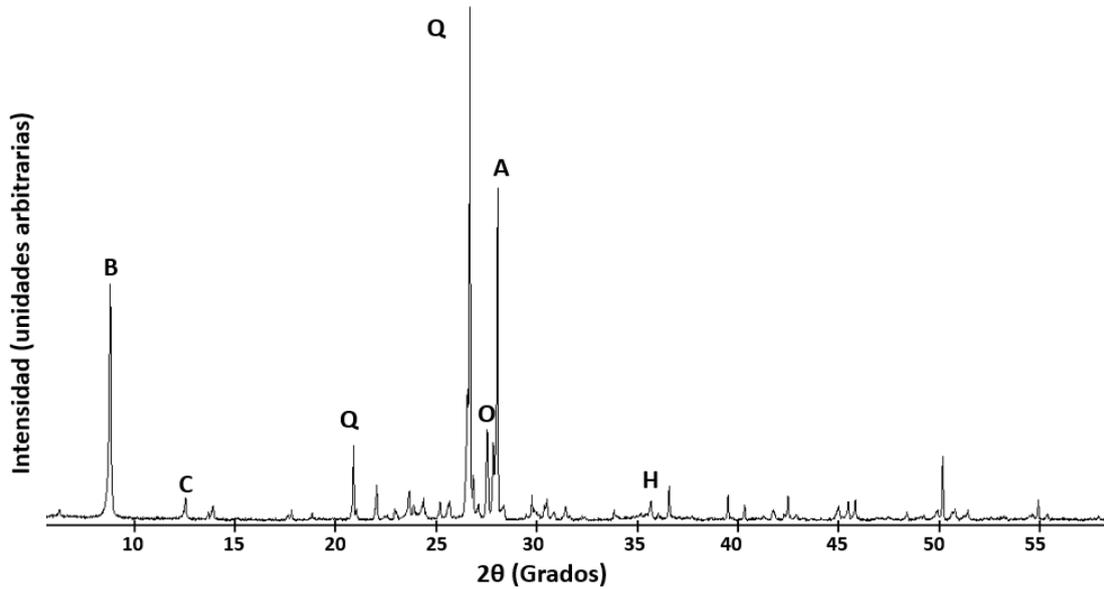


Figura 6.3. Difracción de rayos X de la muestra C (B= biotita, C = caolinita, Q = cuarzo, O = ortoclasa, A = albita, H = hematita).

Tabla 6.1. Cuantificación Rietveld de la muestra C.

Material	R _B	X ²	B (%)	C (%)	Q (%)	A (%)	O (%)	Material amorfo (%)	H (%)
Muestra C	16,5	3,3	30	7	29	18	6	6	4

Siendo R_B y X², factores de acuerdo de la muestra; B= biotita, C = caolinita, Q = cuarzo, O = ortoclasa, A = albita, H = hematita.

Se ha identificado, según las fichas PDF-4+ de la ICDD, biotita (01-074-3152), caolinita (04-013-3074), cuarzo (00-033-1161), albita (00-009-0466), ortoclasa (00-019-0931) y hematita (00-033-0664).

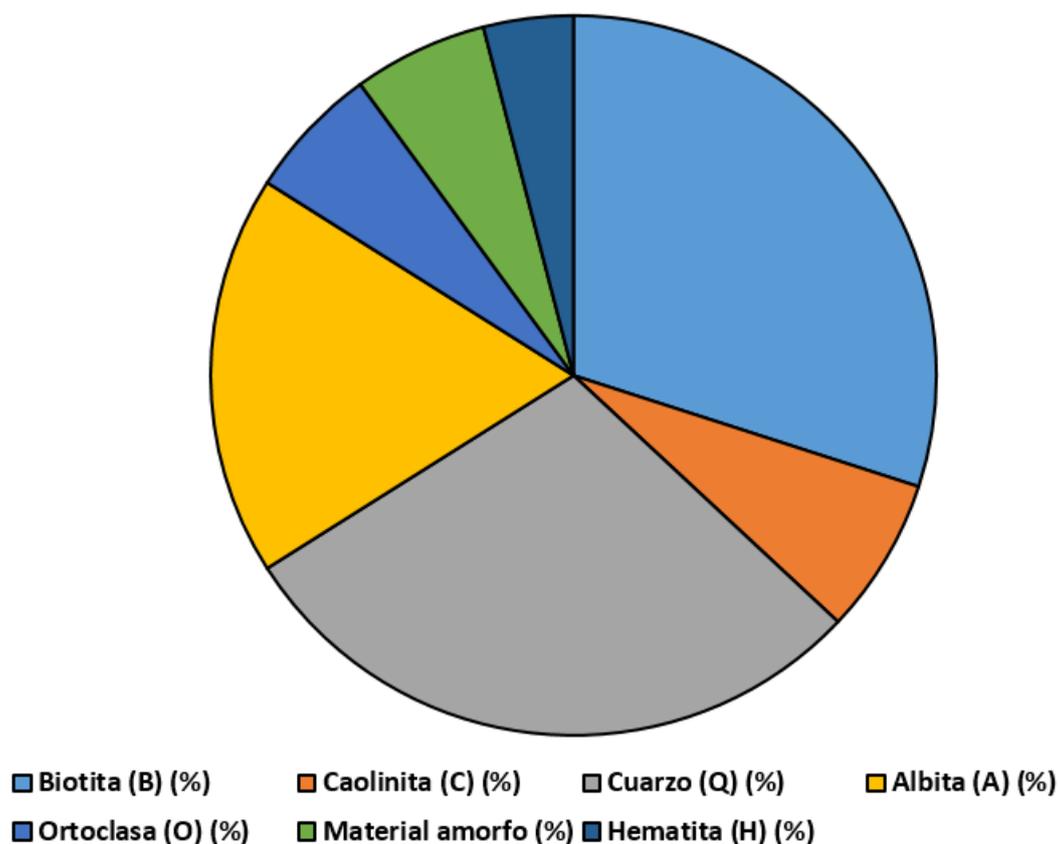


Figura 6.4. Cuantificación Rietveld de la muestra C.

Los componentes mayoritarios son los silicatos, siendo los más abundantes biotita y cuarzo, seguidos del feldespato albita (aluminosilicato sódico) y de la ortoclasa (aluminosilicato potásico). En pequeñas proporciones aparece caolinita, hematita y material amorfo (Figura 6.4).

El análisis químico de la **muestra C** mediante ICP/MS, una vez triturada en mortero de ágata y después de un ataque ácido con ácido fluorhídrico, se presenta en las Tabla 6.2 y Tabla 6.3 para elementos mayores y menores y trazas, respectivamente.

Tabla 6.2. Análisis químico de elementos mayores en las muestras estudiadas.

Óxidos (%)	Muestra CA	Muestra P	Muestra PR-1	Muestra PR-2	Muestra CU	Muestra C
Na ₂ O	3,30	4,30	1,36	1,73	4,78	2,97
MgO	0,38	0,39	0,19	0,06	0,95	1,72
Al ₂ O ₃	16,76	18,81	13,03	13,64	19,60	13,79
K ₂ O	2,60	4,14	1,10	1,05	4,06	2,85
CaO	2,09	1,65	1,47	0,52	3,26	2,77
MnO	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,11
TiO ₂	10,25	0,20	0,25	0,06	0,37	0,80
Fe ₂ O ₃	1,96	1,95	2,09	0,86	3,49	6,72
SiO ₂	62,66	68,56	78,89	82,08	63,49	68,27
Pérdida por calcinación	0,93	1,12	0,47	0,42	1,22	0,67

Tabla 6.3a. Análisis químico de elementos menores y trazas en las muestras estudiadas.

Elemento (ppm)	Muestra CA	Muestra P	Muestra PR-1	Muestra PR-2	Muestra CU	Muestra C
Li	129	148	134	96	59	110
Be	4	16	7	22	6	4
B	52	316	335	333	704	42
P	326	490	337	460	234	733
S	46	23	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sc	6	6	3	2	10	29
V	25	21	22	2	54	77
Cr	20	16	11	2	48	95
Co	5	28	5	1	7	15
Ni	11	18	12	4	35	44
Cu	11	118	3	2	22	26
Zn	37	40	44	18	9	116
Ga	21	23	21	18	8	26
Ge	3	3	1	2	3	3
As	7	7	2	4	6	5
Se	1	4	4	2	10	5
Rb	110	201	115	125	134	127
Sr	129	101	103	56	189	111
Y	13	13	10	6	25	67
Zr	75	70	90	36	91	187

n.d. = no detectado.

Tabla 6.3b. Análisis químico de elementos menores y trazas en las muestras estudiadas.

Elemento (ppm)	Muestra CA	Muestra P	Muestra PR-1	Muestra PR-2	Muestra CU	Muestra C
Zr	75	70	90	36	91	187
Nb	10	12	13	9	11	26
Mo	1	1	1	n.d.	1	1
Ru	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Rh	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Pd	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ag	n.d.	2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cd	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
In	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Sn	10	24	11	20	4	14
Sb	n.d.	1	n.d.	n.d.	1	1
Te	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cs	4	8	3	8	4	5
Ba	427	312	13912	45	n.d.	933
La	9	10	13	3	18	11
Ce	20	22	27	5	39	20
Pr	2	3	3	1	5	4
Nd	9	10	12	2	19	21
Sm	2	2	2	1	5	8
Eu	1	1	1	n.d.	1	1
Gd	2	2	2	1	4	9
Tb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1	2
Dy	2	3	2	1	4	11
Ho	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1	2
Er	1	1	1	1	2	7
Tm	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1
Yb	1	1	1	1	3	7
Lu	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1
Hf	2	2	3	1	3	6
Ta	3	5	4	6	3	8
W	3	17	5	16	3	1
Re	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Os	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ir	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d. = no detectado.

Tabla 6.3c. Análisis químico de elementos menores y trazas en las muestras estudiadas.

Elemento (ppm)	Muestra CA	Muestra P	Muestra PR-1	Muestra PR-2	Muestra CU	Muestra C
Pt	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Au	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hg	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tl	1	1	1	1	1	1
Pb	18	22	21	21	17	19
Bi	20	2	2	2	12	15
Th	3	5	5	1	n.d.	n.d.
U	3	3	3	2	6	5

n.d. = no detectado.

La composición química de los materiales estudiados es similar a la descrita por (Torres, Fernandes, Olhero, & Ferreira, 2009), (Abukersh & Fairfield, 2011), (Mármol, y otros, 2010), (Ramos, Matos, Schmidt, Rio, & Sousa-Coutinho, 2013), (Li, y otros, 2013), (Kartini, Hamidah, Norhana, & Nur Hanani, 2014) y (Medina, Sáez del Bosque, Frías Rojas, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017), entre otros autores, para residuos de diversas procedencias, pero similares en cuanto a su naturaleza a los estudiados en la presente Tesis Doctoral.

La suma de los óxidos de silicio, aluminio y hierro está próxima al 90% y, además, el contenido en elementos alcalinos supera el 5%. Todo ello induce a pensar que esta composición ácida, junto con el tamaño de partícula, en caso de que sea pequeño, tendrá una actividad puzolánica importante. La pérdida a la calcinación no es elevada (0,67%) y destaca el alto contenido en bario (933 ppm) y Zn (187 ppm) (Tabla 6.3).

Una vez analizada la roca en su conjunto, se procedió a estudiar el material descartado en el ensayo de desgaste de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2, 2010), que será el que se procesará para este estudio desde este momento (Qian, y otros, 2014), (Guo, Markine, Song, & Jing, 2018), (Kim, J.; Park, B.S.; Inn Woo, S.; Choi, Y.T., 2020). El ensayo de desgaste de Los Ángeles se emplea para aceptar/rechazar el balasto, que con el uso pierde las propiedades de angulosidad y tamaño.

La composición mineralógica y química en el residuo obtenido en el ensayo de desgaste de Los Ángeles para la roca inalterada, son las mismas que las mencionadas anteriormente y su color Munsell en muestra molida es 5 YR 6/1 gray (Munsell Soil Color Charts, 2009).

Muestra CU. Es una adamelita procedente de Canteras Cuadrado comúnmente denominada pórfido (Figura 6.5). Es de la misma familia que la muestra **C** y se tomó al objeto de tratar de diferenciar este material del anterior, dado que su coloración era más oscura.



Figura 6.5. Vista general de la explotación de Canteras Cuadrado. Elaboración propia.

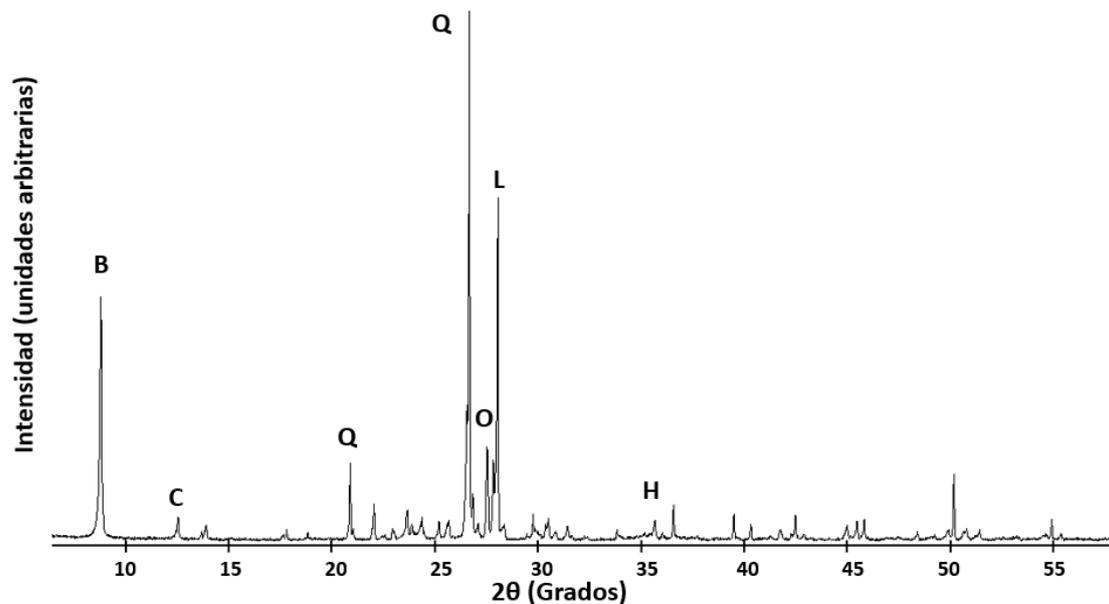


Figura 6.6. Difracción de rayos X de la muestra CU (B= biotita, C = caolinita, Q = cuarzo, O = ortoclasa, L = labradorita, H = hematita).

Mineralógicamente, se han reconocido, según las fichas PDF-4+ de la ICDD, biotita (01-074-3152), caolinita (04-013-3074), cuarzo (00-033-1161), labradorita (05-001-0013), ortoclasa (00-013-0931) y hematita (00-033-0664) (Figura 6.6).

Tabla 6.4. Cuantificación Rietveld de la muestra CU.

Material	R _B	X ²	B (%)	C (%)	Q (%)	L (%)	O (%)	Material amorfo (%)	H (%)
Muestra CU	12,3	3,5	35	6	21	23	5	6	4

Siendo: R_B y X², factores de acuerdo de la muestra; B= biotita, C = caolinita, Q = cuarzo, O = ortoclasa, L = labradorita, H = hematita.

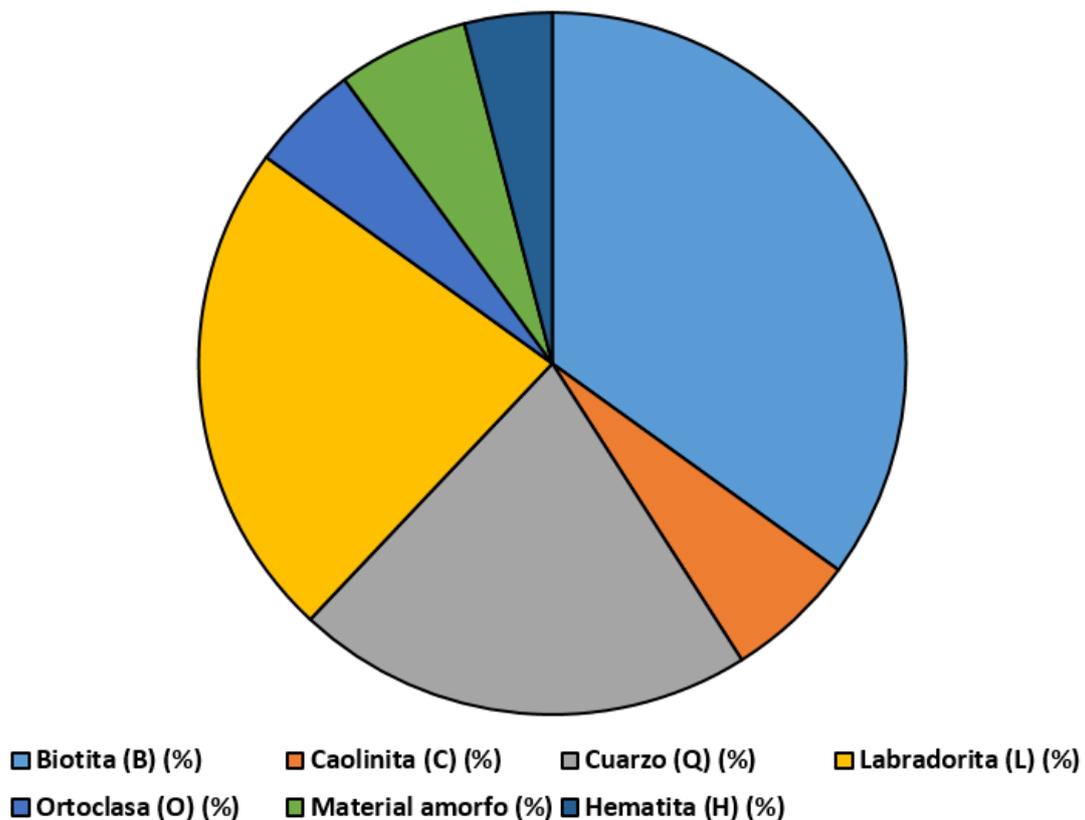


Figura 6.7. Cuantificación Rietveld de la muestra CU.

En la composición mineralógica destacan los silicatos como minerales más abundantes, predominando la biotita, la labradorita (aluminosilicato calcosódico) y el

cuarzo, seguidos de la ortoclasa (aluminosilicato potásico). En pequeñas proporciones aparece caolinita, hematita y material amorfo (Figura 6.7).

El análisis químico de la muestra **CU**, mediante ICP/MS, una vez triturada la muestra en mortero de ágata y después de un ataque ácido se presenta en la Tabla 6.3 para elementos mayores y menores y trazas, respectivamente.

De nuevo, la suma de óxidos de silicio, aluminio y hierro supera el 85% con concentraciones elevadas de sodio y calcio, al contener labradorita. Su pérdida a la calcinación es ligeramente más alta que la de la muestra **C** y como elemento minoritario a destacar hay que mencionar al Sr (189 ppm) (Tabla 6.3).

La muestra es muy similar a la muestra **C**, únicamente la composición mineralógica difiere en cuanto a variedades de feldespatos. En el caso de la muestra **CU**, la labradorita es el mineral que aporta tonos más oscuros.

• Serrín de granito

Estas tres muestras, denominadas **P**, **PR-1** y **PR-2**, proceden del aserradero de Granitos Cardeñosa (Figura 6.8) como se ha descrito antes en el capítulo de Materiales, y que se recogieron en la explotación en tamaño muy fino debido al procedimiento de obtención del material. Además, se ha tomado una muestra de granito en roca del entorno del embalse de Las Cogotas (CA), próximo a la zona de aprovisionamiento de la cantera.



Figura 6.8. Frente de cantera de Granitos Cardeñosa. Elaboración propia.

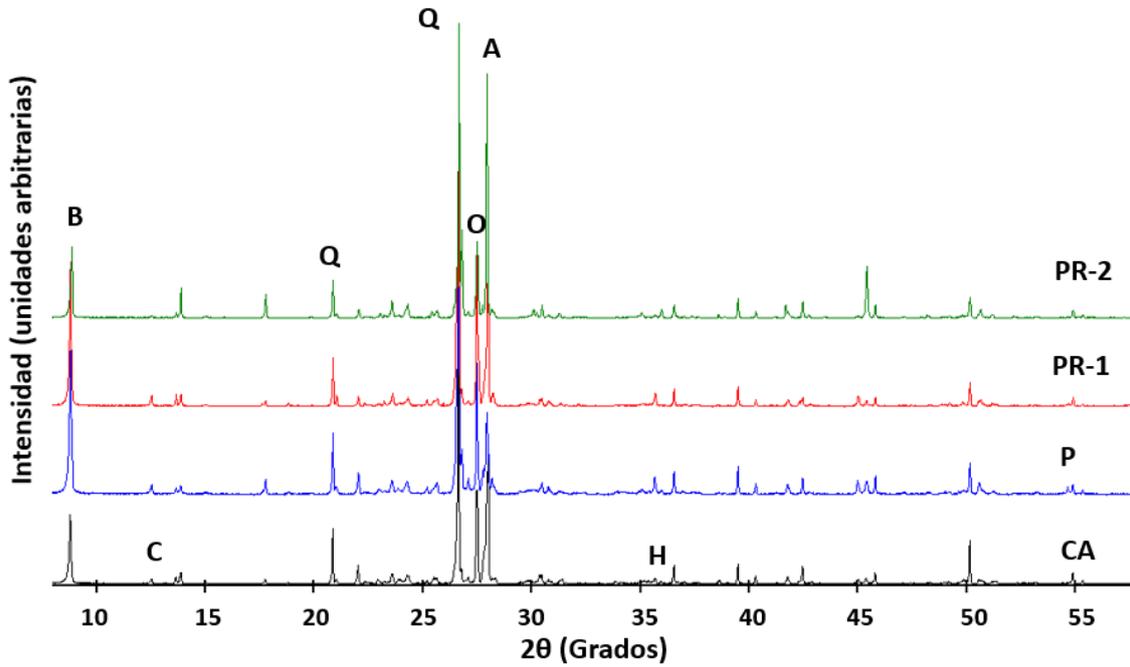


Figura 6.9. Difracción de rayos X de las muestras procedentes de Cardeñosa (B= biotita, C = caolinita, Q = cuarzo, O = ortoclasa, A = albita, H = hematita).

Tabla 6.5. Cuantificación Rietveld de las muestras procedentes de Cardeñosa.

Material	R _B	X ²	B (%)	C (%)	Q (%)	A (%)	O (%)	Material amorfo (%)	H (%)
Muestra CA	18,7	4,2	22	2	29	27	12	6	2
Muestra P	19,4	3,7	23	3	31	29	6	4	4
Muestra PR-1	17,3	3,5	20	3	30	14	10	10	3
Muestra PR-2	14,3	4,9	18	n.d.	32	34	7	7	2

Siendo: R_B y X², factores de acuerdo de la muestra; n.d. = no detectado.; (B= biotita, C = caolinita, Q = cuarzo, O = ortoclasa, A = albita, H = hematita).

Se ha identificado, según las fichas PDF-4+ de la ICDD, los minerales biotita (01-047-3152), caolinita (04-013-3074), cuarzo (00-033-1161), albita (05-001-0013), ortoclasa (00-0190931) y hematita (00-033-0664) (Figura 6.9).

La composición mineralógica de todas ellas es similar a la muestra **C**, con contenidos variables para albita y ortoclasa. La muestra **PR-2** carece de caolinita y tiene una baja concentración en biotita, siendo la muestra **PR-1**, la de mayor contenido en material amorfo de todas las que se van a estudiar, alcanzando el valor del 10%.

Químicamente todas superan el 80% en la suma de óxidos de silicio, aluminio y hierro, con pequeñas pérdidas a la calcinación. Sus composiciones químicas de elementos menores y trazas son similares entre ellas, con concentraciones destacadas de bario, estroncio y rubidio (Tabla 6.3).

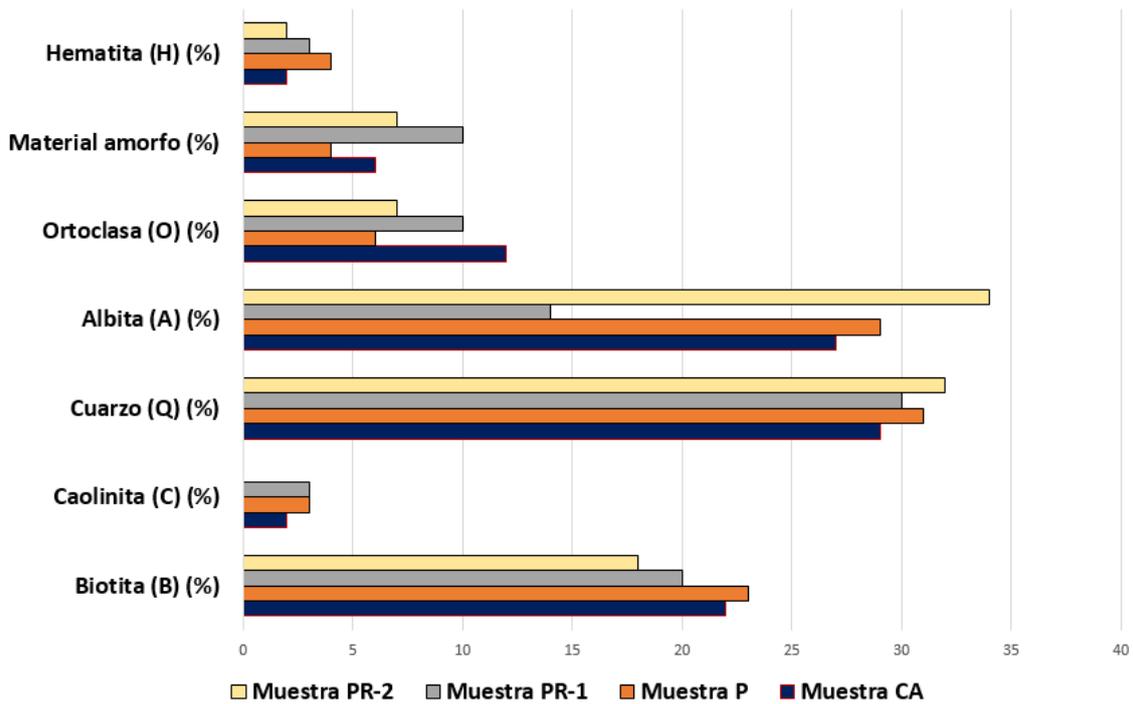


Figura 6.10. Cuantificación Rietveld de las muestras CA, P, PR-1 y PR2.

En la utilización de un material como puzolana es fundamental el tamaño de partícula, por este motivo se va a proceder a la medida del mismo para considerar la idoneidad de las muestras.

El conocimiento de la distribución del tamaño de partícula se efectuó mediante espectrometría de difracción de rayos láser (DRL) en un rango de medidas de 0,1 μm a 1750 μm . El instrumento empleado es un espectrómetro Sypatec Helos 12 LA en sistema húmedo, sometiendo las muestras a un proceso de agitación y ultrasonido para dispersar las partículas lo más posible, en un líquido no reactivo que, en este caso, fue alcohol isopropílico.

Las curvas de distribución granulométricas son similares para las muestras **C** y **CU** y por su parte, en las **P**, **PR-1** y **PR-2**. Las muestras **C** y **CU** ofrecen dos máximos, uno en torno a 6 μm para ambas y un segundo, a 9,5 μm , para **CU** y 15 μm para **C**. (Figura 6.11)

El comportamiento de las muestras **P**, procedentes del serrín de cemento, sólo ostentan un máximo, a 9,5 μm para **P** y coincidente en 5 μm para **PR-1** y **PR-2**. Estas muestras tienen una mayor homogeneidad.

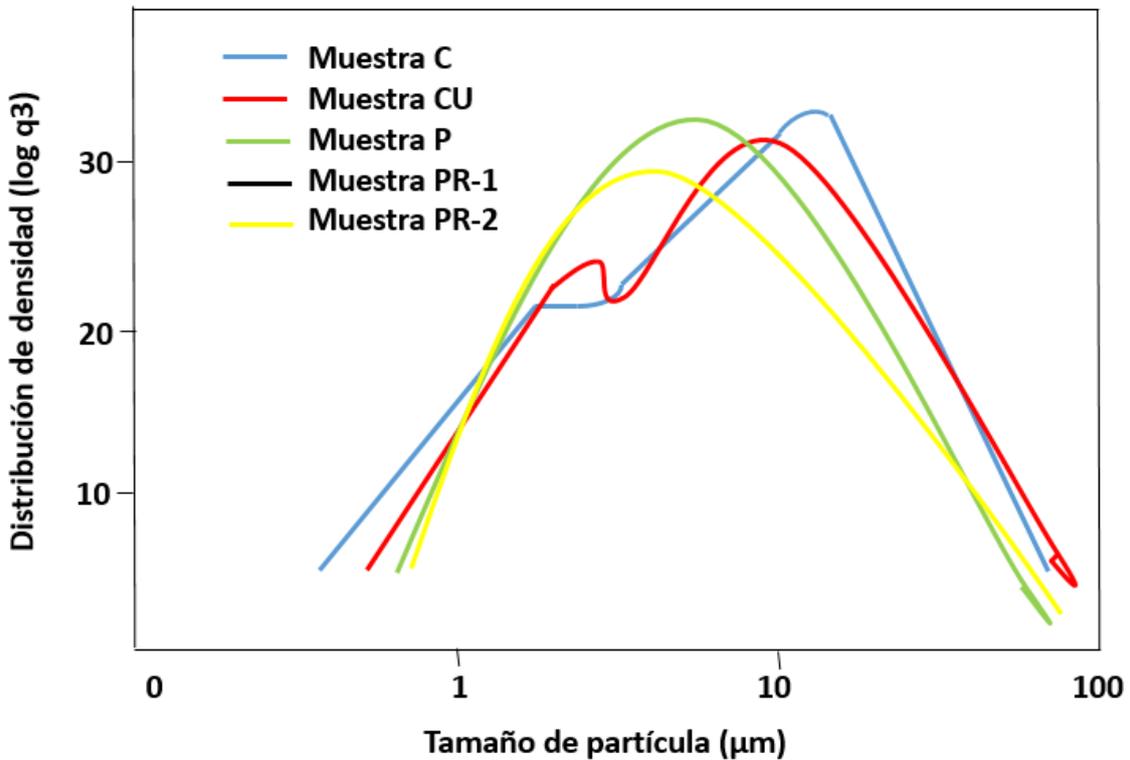


Figura 6.11. Curvas de densidad de distribución de tamaño de partícula de todas las muestras estudiadas.

La preparación de morteros con sustitución ha hecho estudiar el tamaño de grano; así, Ostrowski y colaboradores (Ostrowski, Stefaniuk, Sadowski, Krzywinski, & Rozanska, 2020) consideran que, sustituciones de residuos en torno a 7%, mejoran las propiedades mecánicas y elásticas cuando se combinan tamaños granulométricos diferentes, evitando la homogeneidad. En la misma línea se expresan Pacheco Torgal y Castro-Gomes (Pacheco Torgal & Castro-Gomes, 2006) al añadir al cemento entre 20% y 50% de polvo de granito. La Figura 6.12 que plasma los resultados conseguidos en las muestras estudiadas en la presente Tesis Doctoral apunta que todos los ejemplares pueden ser considerados como posibles puzolanas en función del tamaño de partícula.

Según la literatura consultada (Vigil de la Villa, Frías, Sánchez de Rojas, Vegas, & García, 2007) y (Frías, Vigil de la Villa, Garcia, Sánchez de Rojas, & Juan Valdés, 2013), entre otros, las muestras ricas en silicatos, sobre todo en minerales de la arcilla, incrementan sus propiedades cementantes después de la calcinación. La potenciación de estas propiedades se correlaciona con el aumento de la actividad puzolánica y es debido a la pérdida de agua estructural en los minerales de arcilla (caolinita) y en los filosilicatos (biotita, clorita, entre otros), presentes en las muestras estudiadas.

La de mayor contenido en caolinita es la procedente de Aldeavieja (muestra **C** la de mayor contenido en caolinita, 7%), y sobre ella, se va a realizar un ensayo de calcinación a 600°C, durante dos horas en un horno eléctrico de laboratorio (muestra **CC**) que, previamente se había secado durante 24 horas a 110°C para eliminar la humedad, llevándola a peso constante. La bibliografía recoge que el proceso de calcinación mejora las propiedades puzolánicas de los residuos (dos Santos Vazzoler, Lima Vieira, Rodrigues Teles, Klein Degen, & Arlêu Teixeira, 2018).

El resultado del análisis mineralógico de la muestra calcinada (**CC**), obviamente afectó a la deshidroxilación de la caolinita, que se transformó en metacaolinita amorfa, y tuvo un efecto incipiente en la estructura del filosilicato (biotita) que comenzó a perder grupos hidroxilo. Todos los demás componentes minerales permanecieron sin cambios en el difractograma sobre la muestra calcinada.

Para comprobar los efectos de la calcinación sobre la muestra **C** se procedió a la determinación de la actividad puzolánica, efectuando el ensayo sobre ambas muestras **C** y **CC**, y así conocer la capacidad de activación de este residuo de balasto, mediante el procedimiento acelerado indicado en el Capítulo de “Métodos y técnicas de medida”

y que se ha desarrollado para 1, 7, 14, 28, 90, 180 y 360 días, midiendo la concentración de ion calcio, expresada como óxido de calcio o cal fijada según norma (UNE-EN 196-5, 2011).

Los resultados de la prueba de puzolanidad en las muestras **C** y **CC** se presentan en la Figura 6.12. Las medidas de cal fijada son superiores en todos los casos, excepto a 28 días, en la muestra no calcinada (muestra **C**), aunque las variaciones son mínimas. De la citada Figura se deduce que las muestras activadas térmicamente tienen una capacidad de fijar cal muy lenta a edades cortas, aumentando con el tiempo e igualando a la muestra sin tratar a los 28 días; luego el valor de cal fijada desciende, ligeramente, manteniendo los altos valores, al año de estudio (360 días).

Por lo tanto, la activación térmica de los residuos no se consideró necesaria y, en adelante, la muestra inicial será el único material utilizado en los ensayos. Las diferencias son tan pequeñas que no se requiere activación térmica, lo que hace aumentar el valor del residuo, al no ser preciso su tratamiento térmico (economía energética).

La activación térmica del residuo de balasto no favorece la formación de mayor cantidad de productos de hidratación durante la reacción puzolánica, por tanto, la calcinación del residuo no genera una apreciable mejora de la puzolanidad. Los resultados s

on concordantes con los obtenidos por diferentes autores (Mosaferi, Fahiminia, & Nabizadeh, 2007), (Nasserdine, Mimi, Bevan, & Elian, 2009) y (Medina, Sáez del Bosque, Frías Rojas, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017), entre otros. Para Souri y colaboradores (Souri, y otros, 2015) la activación térmica influye poco en la hidratación del cemento, siendo mucho más importante el tamaño de partícula. De esta forma se incrementa la resistencia a edades tempranas (7 días) y en tiempos más largos, hasta 56 días, la resistencia a compresión es similar a la lograda con activación térmica y con una finura de grano determinada.

La inactivación térmica del residuo va a facilitar que los geles CSH se comporten de manera habitual, ya que durante experiencias realizadas con materiales curados entre 5°C y 60°C, los mencionados geles CSH sufren polimerización de las cadenas estructurales, originando, en los cementos, estructuras más porosas y gruesas que

explican la baja resistencia de los cementos curados a alta temperatura (Gallucci, Zhang, & Scrivener, 2013).

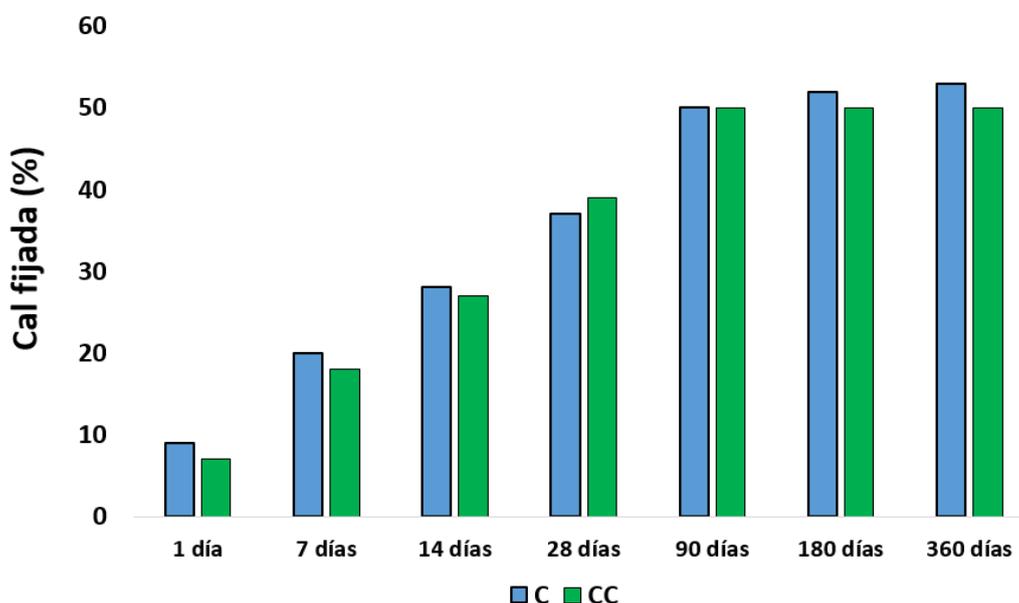


Figura 6.12. Valores de puzolanicidad de las muestras C (residuo de balasto) y CC (residuo de balasto calcinado a 600°C/2 horas).

Si se compara este tipo de adición, residuo de balasto, con adiciones normalizadas admitidas en la industria cementera, tales como humo de sílice, ceniza volante, incluso otras no normalizadas, como residuos cerámicos de tipo sanitario o escorias de la industria del acero o del cobre (Medina, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017), a corta edad, tienen un comportamiento similar con una actividad puzolánica lenta, pero que, a los 28 días, tiempo recogido en la normativa, adquiere una capacidad de fijación de cal superior a las descritas en la bibliografía.

6.2. Sistema residuo/cal

Durante el ensayo de actividad puzolánica, descrito en el Capítulo de “Métodos y técnicas de medida”, y teniendo como muestras los residuos **C**, **CU**, **P**, **PR-1** y **PR-2**, se han recogido resultados tanto de la fase líquida como de los materiales sólidos que participan en el sistema de reacción.

a) Fase líquida.

Los resultados conseguidos para las cinco muestras y para los tiempos de reacción de 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días se muestran en la Figura 6.13.

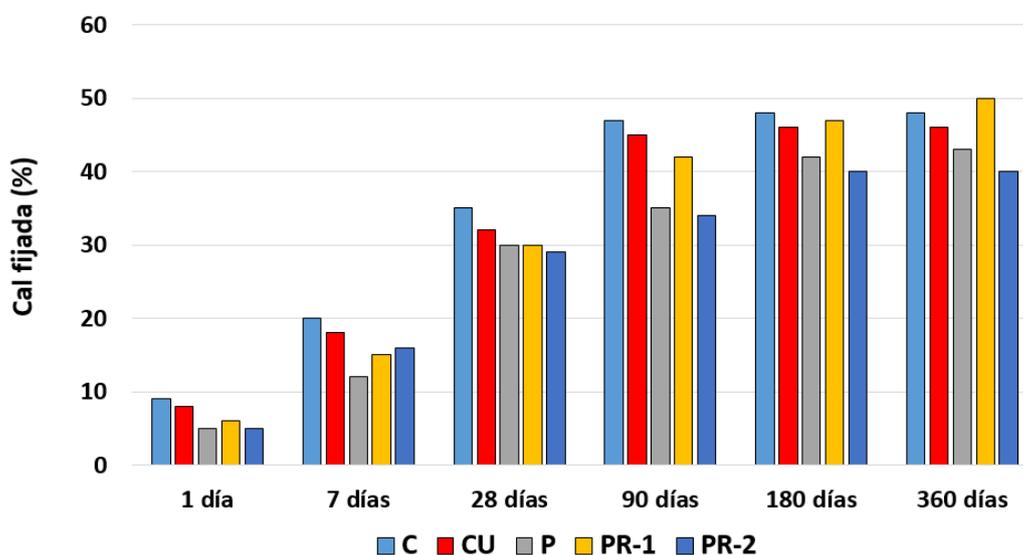


Figura 6.13. Resultados de los análisis de cal fijada por las diferentes muestras a todas las edades de curado.

De la Figura 6.13 se extrae que todas las muestras tienen actividad puzolánica a todos los tiempos de reacción. Su tendencia es de naturaleza logarítmica, con crecimiento hasta los 90 días de reacción, edad a la que se han conseguido los valores máximos, para luego estabilizarse. De entre todas las muestras estudiadas la de mayor cal fijada es la muestra **PR-1**, es decir, la de mayor actividad puzolánica.

b) Fase sólida

La cinética de la reacción puzolánica se sigue mediante el estudio de las fases hidratadas que aparecen en el sólido procedente de la reacción y que van a condicionar la aceptación o el rechazo de estos residuos como participantes en la composición de un CPO puzolánico.

Los estudios principales para la identificación de las fases se han efectuado por difracción de rayos X. Mediante esta técnica se han reconocido los compuestos neoformados a los diferentes tiempos de reacción (1, 7, 28, 90, 180 y 360 días), entre los residuos y el hidróxido de calcio de la disolución saturada de cal, relativo a la reacción puzolánica (Figura 6.14).

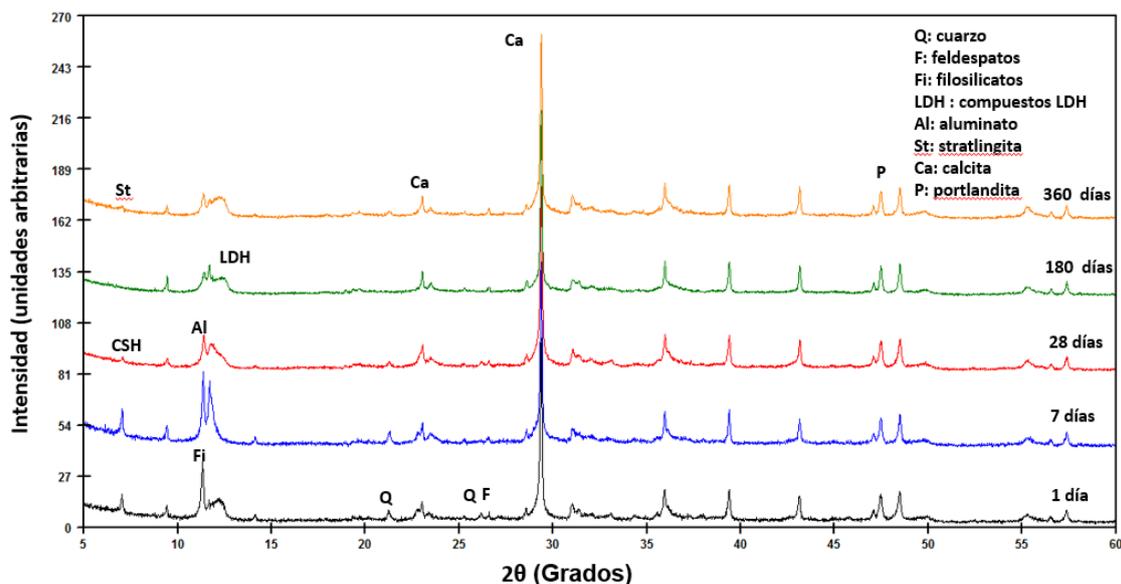


Figura 6.14. Difractogramas de las fases sólidas del sistema residuo/cal.

Los compuestos identificados mediante las fichas PDF-4 del ICDD son HT hidrotalcita o LDH (04-015-1684), aluminato cálcico hidratado (C_3AH_{13}), calcita (00-005-0586), stratlingita (01-085-8414) y geles CSH de baja cristalinidad, además de los minerales iniciales de la muestra, cuarzo, feldespatos y filosilicatos, todos ellos cuantificados en la Tabla 6.6. Esta afirmación es discordante con la expuesta por Medina y colaboradores (Medina, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017) en la que, en muestras similares, no se menciona la stratlingita.

Los compuestos tipo LDH (filosilicato/carbonato) o HT se han citado en la bibliografía como carboaluminatos, pero en los últimos tiempos se les considera óxidos dobles, formados por láminas superpuestas de una capa tetraédrica de silicio con oxígenos y una capa octaédrica de aluminio con grupos $(OH)^-$ tipo caolinita (filosilicato 1:1) que, tras sufrir la deshidroxilación por calcinación y posterior reacción con $Ca(OH)_2$, sitúan los grupos carbonato junto con los grupos hidroxilo, en el espacio interlamilar (García, y otros, 2015) y (Medina, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017).

Por su parte, los geles CSH son compuestos con una estructura poco organizada, pero dispuesta en láminas de dimensión nanométrica y organizadas en cadenas de un número finito de individuos. Dado su carácter poco cristalino, se van a

cuantificar como material amorfo (Tabla 6.6). La portlandita o hidróxido cálcico procede de los reactivos de la reacción puzolánica que se descompone pasando a CaO, debido a la manipulación de los materiales y su reacción con el CO₂ atmosférico, siguiendo un proceso de carbonatación.

La stratlingita ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$) es un aluminosilicato cálcico hidratado que se vincula con la reacción de hidratación de los cementos ricos en aluminio. La stratlingita en estos cementos puede coexistir con silicatos cálcicos hidratados o geles CSH y otros materiales como el hidrogranate (Midgley & Bhaskara Rao, 1978), (Gameiro, Santos Silva, Veiga, & Velosa, 2012); (Frías, M.; Vigil, R.; García, R.; Rodríguez, O.; Goñi, S.; Vegas, I., 2012).

La stratlingita aparece a 12,61Å, 6,29Å, 4,40Å, 4,15Å, 2,87Å, 2,61Å, 2,50Å, 2,48Å y 2,36Å, únicamente en tiempos de reacción superiores a 90 días, en una concentración que se estabiliza en una pequeña cantidad (2%). El aluminato cálcico hidratado a 7,86Å, 2,88Å y 2,86Å se identifica a todas las edades, pero en cantidades crecientes a medida que transcurre el tiempo de reacción. Por su parte, los compuestos tipo hidrotalcita, LDH, se reconocen a 7,59Å y 7,41Å para el espaciado (006) y a 3,78Å para el (003) a todas las edades, aumentando su concentración con el tiempo de reacción (Figura 6.14).

Todos estos materiales se detectan junto a la portlandita, que va disminuyendo en concentración con la edad, y la calcita, que se mantiene casi constante. A medida que el tiempo transcurre, el material amorfo aumenta, llegando a alcanzar, al año de reacción, una concentración próxima al 20%.

Las nuevas fases aparecen incrementando su concentración a costa de los feldespatos y filosilicatos iniciales que decrecen en cantidad (Tabla 6.6).

La morfología de las diferentes especies que aparecen en las muestras se ha estudiado mediante SEM/EDX y se presenta en las Figura 6.15, Figura 6.16 y Figura 6.17 que corresponden a las edades estudiadas. Los materiales que van sucediéndose a medida que evoluciona la reacción, se depositan sobre sustratos preexistentes, ocasionando agregados de composiciones variables que, por EDX, permiten su análisis y atribución a una u otra especie.

Tabla 6.6. Cuantificación Rietveld de las muestras sólidas procedentes del sistema residuo/cal a diferentes edades de curado en muestras PR-1.

Tiempo de reacción	Q (%)	F (%)	Fi (%)	LDH (%)	S (%)	C ₃ AH ₁₃ (%)	P (%)	Ca (%)	MA (%)	X ²	R _B
1 día	25	18	15	4	n.d.	1	27	6	4	11,2	4,3
7 días	26	15	12	4	n.d.	1	24	8	10	13,6	5,8
28 días	30	14	10	4	n.d.	4	16	10	12	12,6	4,2
90 días	29	12	8	4	2	6	13	11	15	13,4	4,2
180 días	30	9	4	7	2	10	12	10	16	15,8	3,9
360 días	30	8	4	10	2	11	9	6	18	14,3	4,8

Siendo, R_B y X², factores de acuerdo de la muestra, n.d. = no detectado. Q = cuarzo, F = feldespato, Fi= filosilicatos, P = portlandita, Ca = calcita, S = stratlingita, MA = material amorfo.

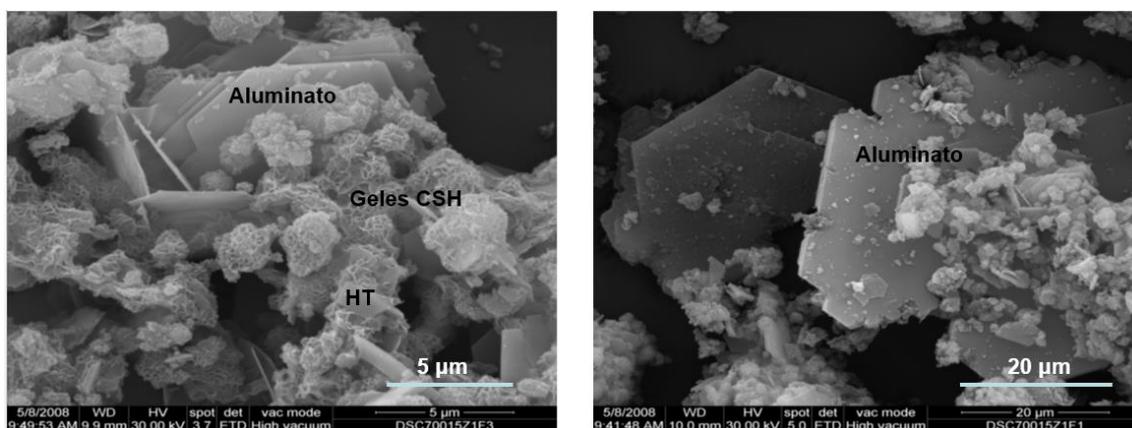


Figura 6.15. Disposición de materiales a 7 días de reacción.

Se reconoce stratlingita que, de acuerdo con los análisis químicos superficiales (Tabla 6.7), se manifiesta como láminas hexagonales dispuestas de manera intercalada con geles CSH y compuestos LDH o hidrotalcitas. Estas últimas, también de morfología hexagonal, se reconocen por su relación SiO₂, Al₂O₃ y CaO (Taylor, 1997), lo mismo que la portlandita y el aluminato cálcico hidratado.

Tabla 6.7. Análisis químico superficial mediante EDX.

Óxidos (%)	Geles CSH	LDH o HT	Stratlingita	Portlandita	Aluminato
Al₂O₃	18,20 ± 3,28	26,04 ± 0,92	18,23 ± 0,89	-	16,86 ± 0,39
SiO₂	31,07 ± 0,06	40,39 ± 0,67	16,76 ± 0,79	-	4,12 ± 0,18
CaO	50,32 ± 0,37	31,15 ± 0,89	64,50 ± 2,41	100	76,79 ± 1,34
CaO/Al₂O₃	2,79	1,20	3,54	-	4,04
CaO/SiO₂	1,63	0,77	3,85	-	18,63
SiO₂/Al₂O₃	1,61	1,55	0,92	-	0,21

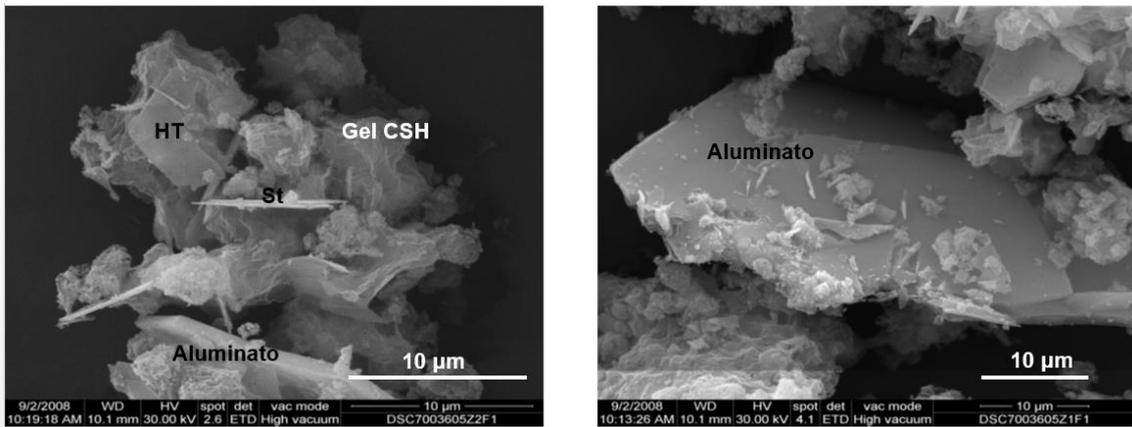


Figura 6.16. Disposición de materiales a 90 días de reacción.

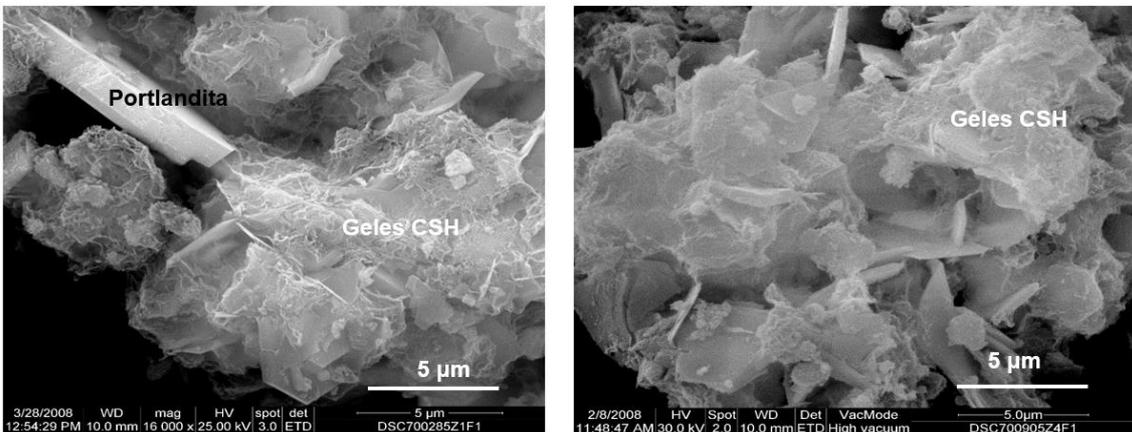


Figura 6.17. Disposición de materiales a 360 días de reacción.

6.3. Sistema residuo/cemento

Después del estudio de las reacciones de los residuos en el sistema residuo/cal, se va a estudiar el sistema residuo/cemento. Para ello se procedió a la rotura de las probetas en el ensayo Köch-Steinegger con los dos tipos de sustitución, 10% y 20%, y que han sido curadas a los tiempos previamente citados. Se siguió el estudio del sistema en cuanto a composición de materiales y morfología.

El método de Köch y Steinegger (Köch & Steinegger, 1960) es el empleado en la fabricación de probetas prismáticas de pequeño tamaño (1 cm x 1 cm x 6 cm), una vez amasadas, según norma (UNE-EN 196-3, 2017), con relación agua/cemento de 0,5, lo que permite llenar los moldes de fraguado con facilidad, y que después de ser refrentados de las probetas, se dispusieron en cámara húmeda a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y 95% de humedad durante 24 horas. Al cabo de un día, las pastas endurecidas se desmoldaron y se curaron en balsa de agua hasta que transcurriera la edad prevista en el ensayo, es decir, 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

6.3.1. Cemento Portland ordinario

Los difractogramas del CPO anhidro y curado a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días se proporcionan en la Figura 6.18.

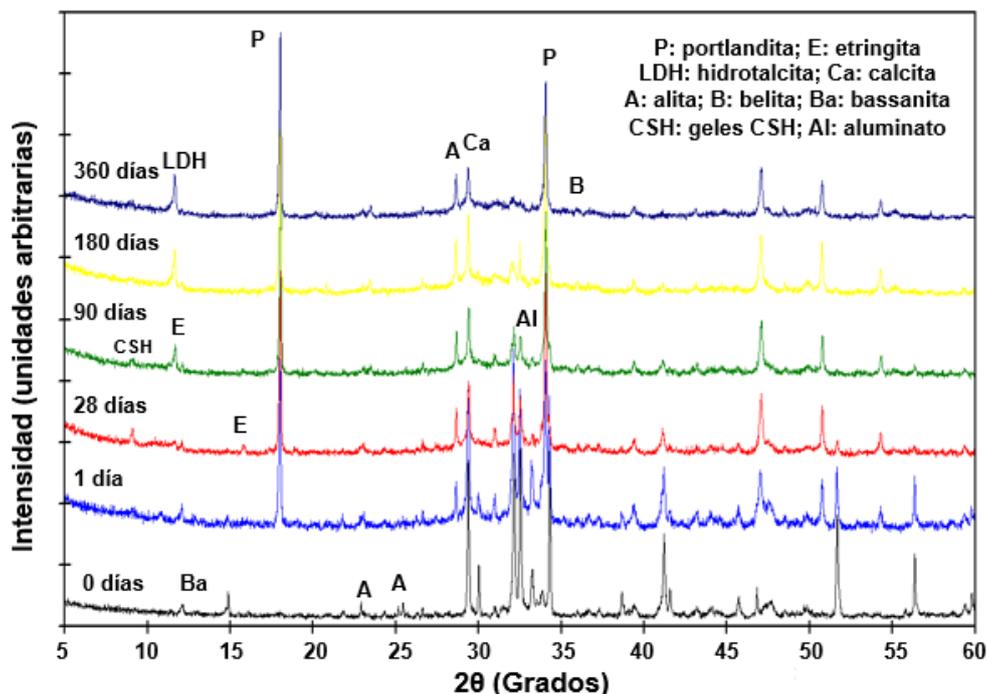
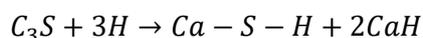


Figura 6.18. Difractogramas del cemento Portland ordinario anhidro y curado a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

Cuando se observa el difractograma del CPO anhidro se identifica calcita, con sus reflexiones típicas a 3,03Å, 2,48Å, 2,28Å, 2,09Å, 1,92Å, 1,88Å, 1,62Å y 1,60Å. Además, como componente mayoritario, aparece alita, silicato tricálcico (C₃S), a 5,90Å, 3,86Å, 3,51Å, 3,34Å, 3,22Å, 3,04Å, 2,98Å, 2,78Å, 2,75Å, 2,61Å, 2,33Å, 2,19Å, 1,99Å, 1,94Å, 1,83Å, 1,76Å, 1,63Å, 1,54 (ficha 00-005-0628). Junto a alita se reconoce también belita, silicato dicálcico (C₂S), en 2,75Å, 2,69Å, 2,19Å, 2,03Å y 1,93Å (ficha 01-085-3982); bassanita (sulfato cálcico hemihidrato) a 5,94Å, 3,45Å, 2,98Å, 2,78Å, 2,12Å, 1,84Å (ficha 00-037-0246); fase ferrítica (C₃AF) a 7,26Å, 3,64Å, 2,66Å, 2,64Å, 2,05Å, 1,92Å, 1,81Å; aluminato tricálcico a 2,71Å, 2,69Å, 2,29Å, 1,92Å, 1,91Å y 1,89Å; portlandita (ficha 00-044-1481), ettringita (ficha 00-041-1451) y aluminato tetracálcico (C₄AF). La cuantificación de todas las fases se proporciona en la Tabla 6.8.

La alita o silicato tricálcico (C₃S) es un producto de reacción en los cementos que influye en la velocidad de hidratación o fraguado (Mehta, Pirtz, & Polivka, 1979). Reacciona con el agua produciendo, en la reacción de hidratación, portlandita (CaH) y geles CSH, según la Ecuación 6.1:

Ecuación 6.1:



La belita o silicato dicálcico (C₂S), es similar a la alita aunque de tiempo de reacción más lento, cerca de diez veces menos. La reacción a la que da lugar con el agua es similar a la propuesta en la Ecuación 6.1. Como la velocidad de hidratación es lenta, la formación de belita es adecuada para cementos que requieren tiempos largos de fraguado (Kacimi, Simon-Masseron, Salem, Ghomari, & Derriche, 2009) y (Guerrero, Goñi, & Dolado, 2009).

La bassanita es el sulfato cálcico hemihidrato que se utiliza como regulador de fraguado. La fase ferrítica aparece como resultado de la consolidación del cemento y es una fase residual. La ettringita procede de la reacción del aluminato de calcio con el sulfato de calcio, ambos existentes en el cemento Portland y que, a veces, se la denomina fase AFt. Su presencia depende de la proporción de sulfato de calcio/aluminato tricálcico (C₃A); así, cuando esa proporción es baja, se forma la ettringita al principio de la hidratación y luego, se convierte en monosulfoaluminato de

calcio o fase AFm. Cuando la proporción es intermedia, solo una fracción de la ettringita se convierte en AFm y ambas pueden coexistir, mientras que es improbable que la ettringita se convierta en AFm, cuando se presenta en proporciones elevadas.

En el caso de que en un mortero coexisten trióxido de aluminio, calcita y yeso como productos de reacción, entre otros, se obtiene ettringita que se transforma en monosulfato cuando se ha consumido todo el yeso (Christensen, Jensen, & Hanson, 2004) y (Georgin & Prud'homme, 2015).

La formación de ettringita es independiente de la temperatura en el primer día de la reacción de hidratación (Fu, Gu, Xie, & Beaudoin, 1995) y la expansión de los cementos se vincula a la formación de esta fase (Diamond, 1996), ya que desarrolla grietas en la obra civil, es decir, cuando su aparición es excesiva puede considerarse como una patología del material. Tratar de solucionarla ha sido uno de los retos principales en el campo de los cementos. Así, Escadeillas y colaboradores (Escadeillas, Aubert, Segerer, & Prince, 2007) han detectado que no se produce expansión térmica cuando las mezclas de cemento con sulfato de calcio o de sodio se curan a temperatura ambiente, lo que sí ocurre cuando este curado se hace con calor, demostrando la importancia que tienen los álcalis en retardar la aparición de ettringita (Özök, Davis, & Aydilek, 2019).

El deterioro prematuro del cemento se atribuye a la aparición de ettringita que nuclea sobre todo tipo de compuestos aditivos del CPO, como por ejemplo, los plastificantes (Cody, Lee, Cody, & Spry, 2004) y ocupa huecos y grietas, con retención de líquidos (Ouhadi & Yong, 2008).

Cabe la posibilidad y así lo apuntan Shimada y Young (Shimada & Young, 2004) que, en soluciones de hidróxido sódico, parte de los iones sulfato se incorporen a los geles CSH y, con el tiempo, revierten en ettringita secundaria. No obstante, la ettringita es inestable a temperatura inferior a 120°C siempre que ocurra un proceso de deshidratación que transforme la ettringita en metaettringita, con un comportamiento diferente para la estabilidad de los morteros (Pourchez, Valdivieso, Grosseau, Guyonnet, & Guilhot, 2006), aun así el proceso es reversible (Baquerizo, Matschei, & Scrivener, 2016).

En cualquier caso, para la elaboración de cementos y morteros se debe tener un control riguroso del agua empleada. Kunther y Lothenbach (Kunther & Lothenbach,

2018) indican que la aparición simultánea de iones sulfato y bicarbonato en solución con magnesio, y cuando existen cloruros, se evita la expansión de los cementos, llegándose en esta ocasión a la fabricación de los tipos de cemento CEM I y CEM II/B. El efecto del bicarbonato favorece la precipitación de calcita, lo que reduce la disponibilidad de CaO para formar ettringita y yeso, además de minimizar la sobresaturación de la solución dentro de los poros del material.

En el mismo sentido se expresan Duan y colaboradores (Duan, Shui, Chen, & Shen, 2012), al considerar morteros realizados con agua dulce y agua de mar. Este último es un medio desfavorable para el cemento.

Por último, el aluminato tricálcico (C_3A o celita, $Al_2O_3 \cdot 3CaO$) reacciona rápidamente con el agua de manera que, al inicio del fraguado, van creciendo los cristales de aluminato, facilitando la resistencia inicial del mismo.

Tabla 6.8. Cuantificación Rietveld del CPO anhidro y curado a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

Tiempo de reacción	MA (%)	Ca (%)	A (%)	B (%)	Ba (%)	FF (%)	A3 (%)	E (%)	CSH (%)	A4 (%)	P (%)	LDH (%)	X ²	R _B
0 días	5	1	38	28	2	8	n.d.	n.d.	n.d.	18	n.d.	n.d.	17,2	4,6
1 día	17	2	14	30	2	8	T	T	T	2	23	n.d.	15,2	5,2
7 días	13	2	8	31	1	4	T	6	T	T	34	T	16,3	4,8
28 días	7	4	4	28	n.d.	3	T	2	T	T	37	13	17,5	3,9
90 días	9	4	T	25	n.d.	3	T	n.d.	T	T	38	18	13,1	5,2
180 días	10	4	T	18	n.d.	2	T	n.d.	T	T	36	24	13,2	5,9
360 días	9	4	T	14	n.d.	2	T	n.d.	T	T	46	33	14,8	3,9

Siendo, R_B y X², factores de acuerdo de la muestra, n.d. = no detectado, T = trazas. MA = material amorfo, Ca= calcita, A = alita, B = belita, Ba = bassanita, FF = fase ferrítica, E = ettringita, P = portlandita, A3 = aluminato tricálcico, A4 = aluminato tetracálcico.

Considerando la variación sufrida por el CPO a los diferentes tiempos de curado se puede decir que, en todos los casos, aparece calcita, en una proporción que se mantiene casi constante, con un ligero incremento de este mineral a tiempos largos. La justificación de la persistencia de la calcita se debe a una carbonatación de la portlandita generada en el proceso de manipulación y a la carbonatación ambiental.

A tiempos cortos, 1 y 7 días de curado, las reflexiones en difracción de rayos X del sulfato cálcico hemihidrato (bassanita) desaparecen y con el tiempo, decrece la intensidad de la fase ferrítica, el aluminato tricalcico y la alita, llegando casi a ser imperceptible esta última, al año de hidratación. Todas las fases reactivas del CPO anhidro van minimizando su concentración respecto al tiempo de curado, lo que indica el desarrollo correcto de la reacción esperada.

La belita tiene una concentración casi constante en el proceso hasta los 90 días de reacción, y desde ese momento, disminuye, lo que lleva de nuevo a pensar en su transformación en productos hidratados, siendo el que primero aparece la portlandita (hidróxido de calcio) con reflexiones a 4,90Å, 3,11Å, 2,62Å, 1,92Å, 1,79Å, 1,68Å, incrementando su concentración con el paso del tiempo. También se reconocen los geles CSH a 3,07Å, 2,80Å y 1,83Å, con poca definición debido a su poca cristalinidad.

Al año de reacción se identifica la reflexión a 9,80Å relativa a geles CSH tipo II, confirmado mediante EDX (Figura 6.17), entendiendo con Taylor (Taylor, 1997) que, en este tipo de geles CSH, la relación CaO/SiO₂ se sitúa entre los valores 1,50 y 2,00, reconocibles por su aspecto al microscopio electrónico, similar a haces de fibras (Tabla 6.8).

Se identifica también ettringita, típico material que aparece como producto de hidratación, en las reflexiones 9,73Å, 5,61Å, 3,88Å, 2,56Å y 2,20Å con su máximo desarrollo a partir de 7 días de reacción, para luego desaparecer a los 28 días. La inexistencia de ettringita a medida que pasa el tiempo de curado, es fundamental para evitar, por esta causa, la aparición de grietas o fisuras y así lo consideran Ferdous y Manalo (Ferdous & Manalo, 2014) en pruebas relacionadas con traviesas de hormigón en Australia, sin embargo Qinhuo y colaboradores (Qinhuo, Min, & Sufen, 1996) no relacionan los efectos de agrietamiento generados en los morteros con la existencia de ettringita sino con fenómenos ambientales relacionados con el clima. Poco definido

está el aluminato tetracálcico 13 hidrato, en los picos de difracción a $8,17\text{\AA}$ y $2,88\text{\AA}$, con señales de poca intensidad debido a su baja cristalinidad (Figura 6.18).

Por último, aparecen los compuestos tipo hidrotalcita o compuestos LDH a $7,60\text{\AA}$ y $7,2\text{\AA}$, que van incrementándose en cantidad hasta llegar a un valor máximo a 360 días (33%).

Mediante SEM/EDX se observan algunas de las morfologías de los compuestos presentes en el cemento Portland ordinario. Así, se reconocen belita, alita y portlandita en el momento 0 o cemento anhidro, junto a aluminato y bassanita (Figura 6.15 y Tabla 6.7).

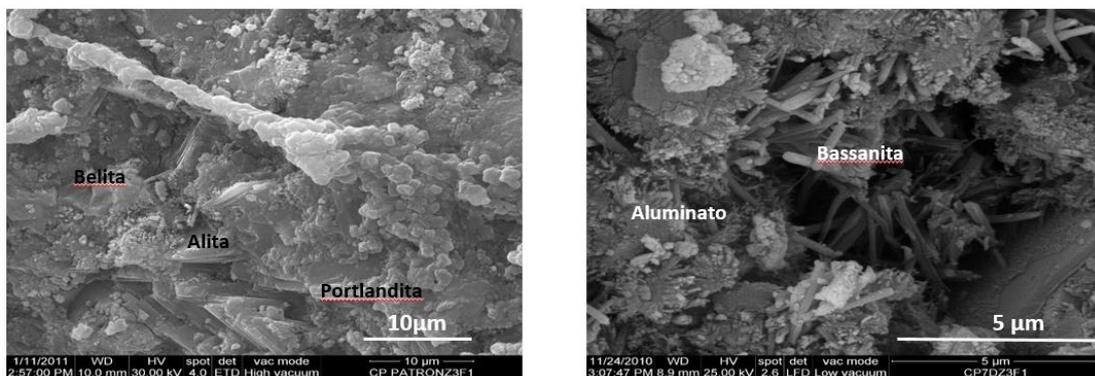


Figura 6.19. Detalle de algunos componentes del cemento portland ordinario anhidro.

A medida que avanza el tiempo de la reacción, una semana, aparecen especies nuevas, tales como la ettringita, caracterizada por las largas fibras que forman sus cristales (Figura 6.20).

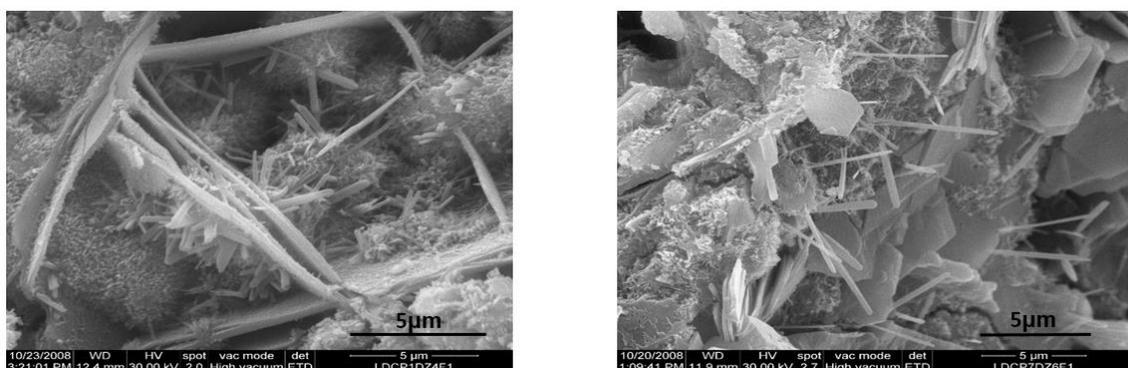


Figura 6.20. Cristales alargados de ettringita que se reconocen a la semana de reacción.

Al año, son los cristales fibrosos de ettringita y los haces de geles CSH tipo II los que crecen sobre cristales de portlandita hexagonales que les sirven de sustrato (Figura 6.21).

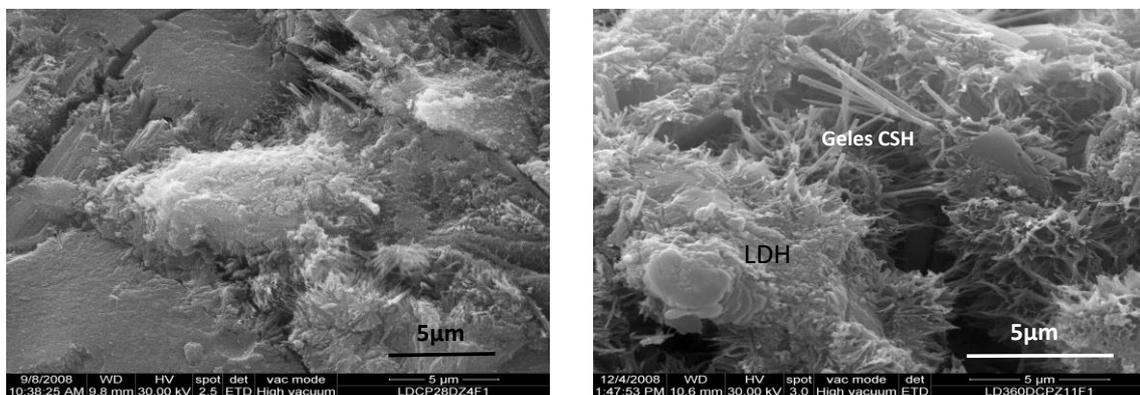


Figura 6.21. Detalles de los cristales que se aprecian al año de reacción: geles CSH tipo II y compuestos LDH, creciendo sobre portlandita.

Tabla 6.9. Análisis químico superficial mediante EDX.

Óxidos (%)	Geles CSH II	LDH o HT	Alita	Aluminato	Ettringita
Al₂O₃	8,70 ± 0,40	13,09 ± 0,80	4,30 ± 0,40	21,00 ± 1,00	39,00 ± 1,00
SiO₂	20,90 ± 0,80	26,92 ± 0,61	30,00 ± 1,00	2,03 ± 0,09	24,00 ± 2,00
CaO	59,00 ± 2,03	54,00 ± 1,04	61,21 ± 0,92	60,12 ± 2,06	33,17 ± 2,08
MgO	1,6 ± 0,4	n.d.	1,6 ± 0,1	n.d.	n.d.
SO₃	n.d.	n.d.	n.d.	3,91 ± 0,45	2,22 ± 0,32
Fe₂O₃	9,52 ± 0,21	2,11 ± 0,45	2,65 ± 0,62	0,92 ± 0,11	1,61 ± 0,25

n.d. = no detectado

Los cementos Portland durante su hidratación, generan una abundante cantidad de geles CSH que necesitan, inicialmente, un alto contenido de agua para su desarrollo, gran parte de la cual se pierde con un secado suave. Esta circunstancia se relaciona con la hidratación de la alita, a través de la adsorción de cationes calcio acuosos, totalmente hidratados, sobre láminas basales aniónicas anhidras. Tanto los cationes solvatados Ca²⁺, como los CaOH⁺, se incorporan para equilibrar la carga

negativa de la lámina basal, lo que lleva a un desorden estructural significativo y así se explica la naturaleza poco cristalina de los geles CSH formados. Parte del agua de solvatación se pierde, irreversiblemente, en el primer secado, debido a la existencia de puentes Si-O-Ca-O-Si, lo que justifica la contracción irreversible. Los geles CSH son metaestables y evolucionan hacia formas más estables formando portlandita y la consecuente eliminación de agua (Bullard, y otros, 2011), (Wu, 2014) y (Gartner, Maruyama, & Chen, 2017).

6.3.2. CPO con adición de 10 y 20% de residuo

En este apartado se van a describir los resultados obtenidos cuando en el cemento Portland ordinario se sustituye un 10% y un 20% de los residuos estudiados, en su composición.

6.3.2.1. Adición del 10% de residuo

Cuando se estudian los difractogramas logrados con la sustitución del 10% de residuos **C** y **CU** se observa que son muy similares en ambas muestras, por esta razón sólo se proporcionan los resultados relativos a la muestra **C**.

Los materiales que se reconocen son alita, belita, portlandita, calcita procedente de la carbonatación de la portlandita, ettringita, geles CSH, aluminato tetracálcico, compuestos LDH, cuarzo, filosilicatos y feldespatos, estos tres últimos procedentes de la muestra original (Figura 6.22).

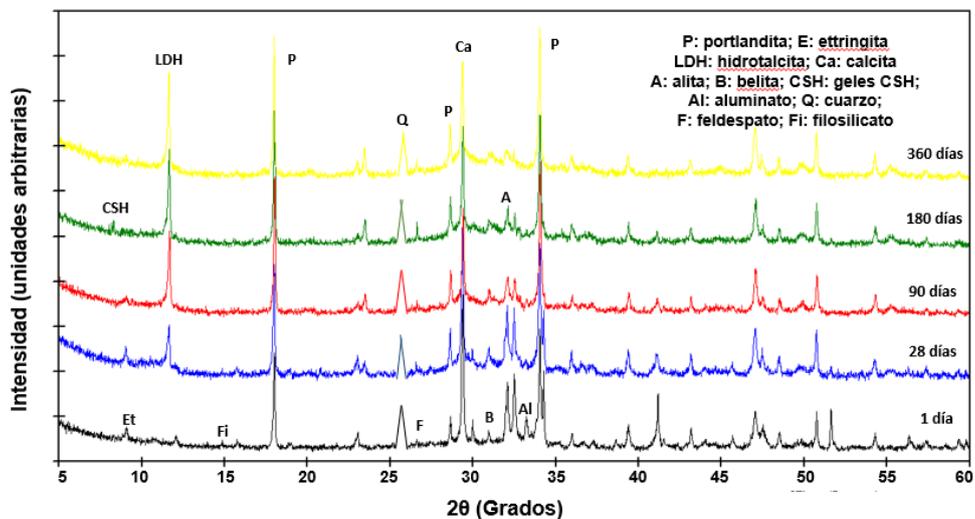


Figura 6.22. Difractogramas de las muestras de cemento Portland ordinario con una adición del 10% de residuo C, curadas a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

Comparando estos difractogramas con los del cemento CPO, la diferencia se centra en la aparición de los minerales iniciales del residuo que no se identifican en el cemento. Y con respecto a los sistemas residuo/cal, destaca la inexistencia de stratlingita en el sistema residuo/cemento. Esta diferencia se puede atribuir a la interferencia de la matriz cementante en el grado de cristalización de la stratlingita, según menciona Rodríguez (Rodríguez, 2008).

Cotejando los difractogramas entre sí, se puede decir que los productos de reacción son los mismos que los identificados en el cemento CPO estudiado anteriormente, con la salvedad de que los compuestos LDH tipo hidrotalcita, aparecen antes, a tiempos más cortos, 7 días, en comparación con el cemento Portland ordinario y que su concentración crece a medida, que transcurre el proceso de curado. El material amorfo va incrementando su cantidad con el paso del tiempo.

La alita va disminuyendo en concentración hasta llegar a una cantidad ínfima, trazas, al año de reacción, y la belita, tiene su máximo a 28 días, luego, disminuye hasta llegar al valor de partida.

La cuantificación de las muestras **C** se proporciona en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Cuantificación Rietveld de las muestras C en el sistema residuo/cemento con adición del 10% de residuo.

Tiempo de reacción	Q (%)	F (%)	Fi (%)	MA (%)	Ca (%)	A (%)	B (%)	Ba (%)	FF (%)	A3 (%)	E (%)	CSH (%)	A4 (%)	P (%)	LDH (%)	X ²	R _B
0 días	23	16	18	7	1	11	15	1	8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15,2	3,5
1 día	20	18	9	10	2	14	19	n.d.	8	T	T	T	n.d.	5	n.d.	16,5	4,1
7 días	21	17	6	11	2	8	21	n.d.	4	T	4	T	n.d.	6	T	12,6	3,8
28 días	21	16	5	11	4	4	23	n.d.	2	T	2	T	n.d.	8	4	14,1	4,7
90 días	20	16	7	15	4	T	22	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	9	5	13,7	3,9
180 días	20	14	6	15	4	T	18	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	12	9	15,3	3,6
360 días	20	14	4	16	4	T	14	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	15	11	14,8	4,2

Siendo R_B y X², factores de acuerdo de la muestra, n.d. = no detectado, T = trazas. Q = cuarzo, F = feldespatos, Fi = filosilicatos, MA = material amorfo, Ca = calcita, A = alita, B = belita, Ba = bassanita, FF = fase ferrítica, E = ettringita, P = portlandita, A3 = aluminato tricálcico, A4 = aluminato tetracálcico.

Los minerales iniciales procedentes del residuo, filosilicatos y feldespatos, disminuyen en concentración, permaneciendo el cuarzo, prácticamente constante. Por el contrario, el material amorfo va aumentando en relación al tiempo de reacción.

La observación al microscopio electrónico y el análisis EDX permite la identificación de las especies reconocidas por difracción de rayos X y que se reproducen en la Figura 6.23, con cristales de ettringita fibrosos, similares a los geles CSH, éstos más cortos, además de las láminas de portlandita y de aluminato tetracálcico. El análisis EDX permite la atribución de una u otra especie en función de la composición química.

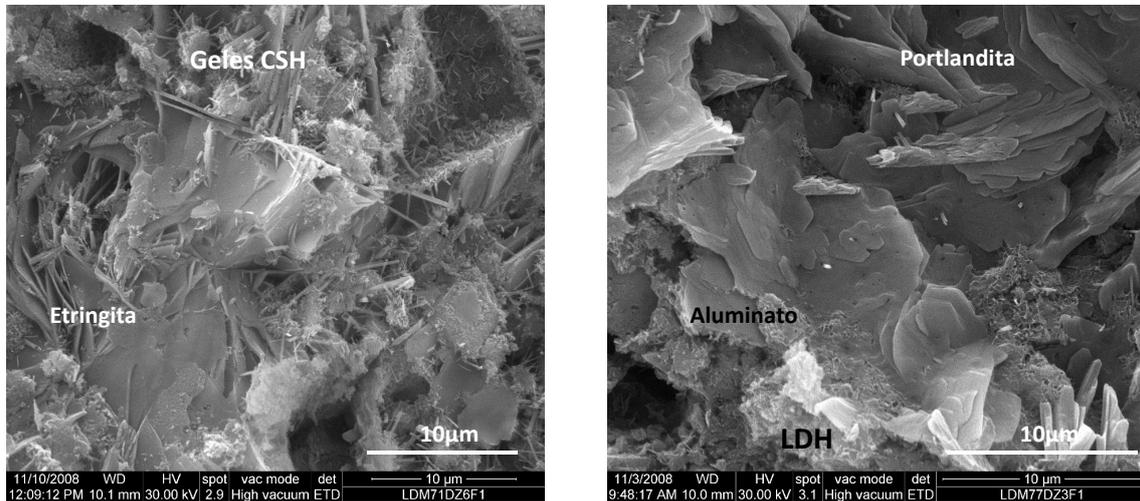


Figura 6.23. Cristales vistos al microscopio electrónico de diferentes especies en muestras C.

El estudio de los registros por difracción de rayos X de las muestras P, procedentes del serrín del granito se presenta en la Figura 6.24.

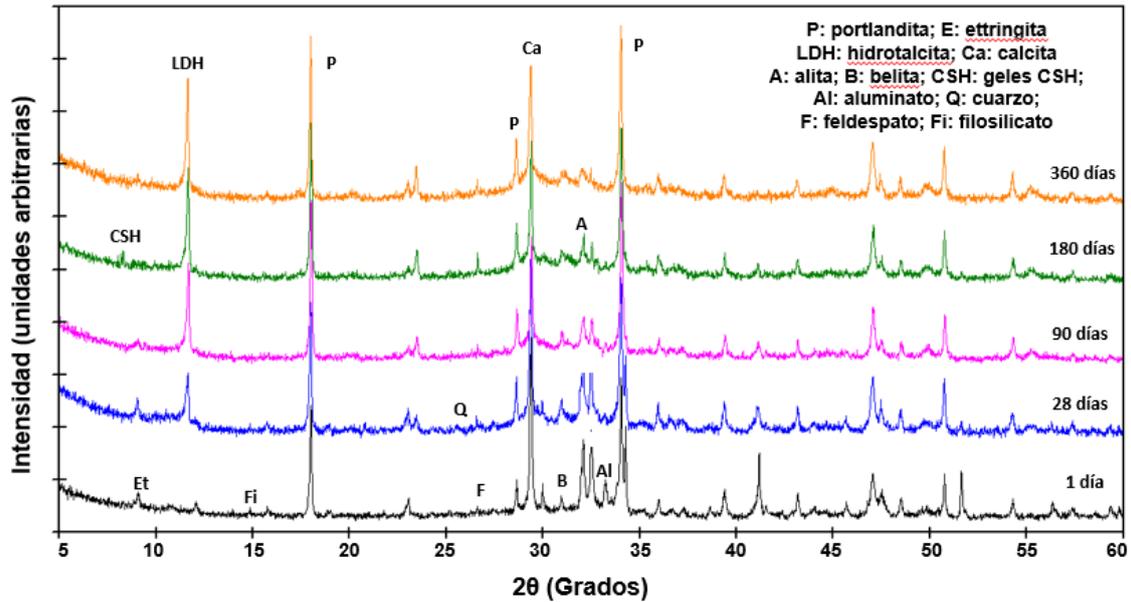


Figura 6.24. Difractogramas de las muestras de cemento Portland ordinario con un adición del 10% de residuo P, curadas a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

Si se compara con los registros de las muestras **C**, no se observa ninguna variación en los comentarios, únicamente una menor concentración en los productos de partida típicos de la muestra original. Su cuantificación se proporciona en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Cuantificación Rietveld de las muestras **P** en el sistema residuo/cemento con adición del 10% de residuo.

Tiempo de reacción	Q (%)	F (%)	Fi (%)	MA (%)	Ca (%)	A (%)	B (%)	Ba (%)	FF (%)	A3 (%)	E (%)	CSH (%)	A4 (%)	P (%)	LDH (%)	X ²	R _B
0 días	22	17	20	11	1	11	11	1	6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13,6	4,6
1 día	19	17	15	10	2	12	15	n.d.	5	T	T	T	n.d.	5	n.d.	14,5	4,9
7 días	21	17	8	11	2	8	19	n.d.	4	T	4	T	n.d.	6	T	13,5	4,8
28 días	21	16	5	11	4	4	23	n.d.	2	T	2	T	n.d.	8	4	16,2	3,5
90 días	20	16	8	14	4	T	22	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	9	5	15,6	4,9
180 días	22	14	6	15	4	T	17	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	11	9	16,1	4,6
360 días	20	14	4	16	4	T	13	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	16	11	14,8	4,7

Siendo R_B y X², factores de acuerdo de la muestra, n.d. = no detectado, T = trazas. Q = cuarzo, F = feldespatos, Fi = filosilicatos, MA = material amorfo, Ca= calcita, A = alita, B = belita, Ba = bassanita, FF = fase ferrítica, E = ettringita, P = portlandita, A3 = aluminato tricálcico, A4 = aluminato tetracálcico.

Los materiales obtenidos en la reacción relativa a las muestras **P**, todas muy similares, en un tiempo de 180 días, presentan geles CSH tipo II y abundantes cristales de LDH que nuclean sobre portlandita, formando agregados radiculares (Figura 6.25).

Los geles CSH manifiestan una morfología fibrilar que se confunde con la de los compuestos LDH, no obstante, se diferencian por medio del análisis químico puntual por EDX, donde la relación CaO/SiO_2 está próxima a 2,00 y son valores similares a los observados por Richardson (1999 y 2008) (Richardson, I.G., 1999) (Richardson, I.G., 2008). De la misma manera se expresan (Fonseca & Jennings, 2010)

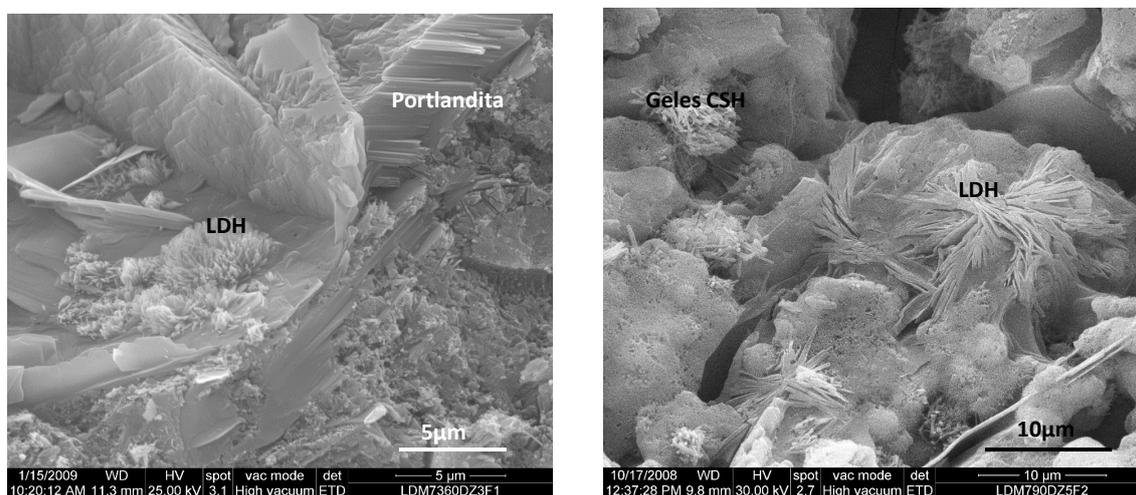


Figura 6.25. Materiales observados por SEM en los que se identifican geles CSH tipo II y abundantes LDH que crecen sobre cristales hexagonales de portlandita.

6.3.2.2. Adición del 20% de residuo de balasto.

Con esta nueva adición del 20% de residuo a los residuos **C** y **CU** se logran los difractogramas de la Figura 6.26. De nuevo se aprecia que son muy similares en ambas muestras, por esta razón sólo se proporcionan, en esta ocasión, los relativos a la muestra **CU**. Los materiales que se reconocen son portlandita, calcita procedente de la carbonatación de la portlandita, geles CSH, aluminato tetracálcico, compuestos LDH, cuarzo y feldespatos, estos últimos heredados de la muestra original.

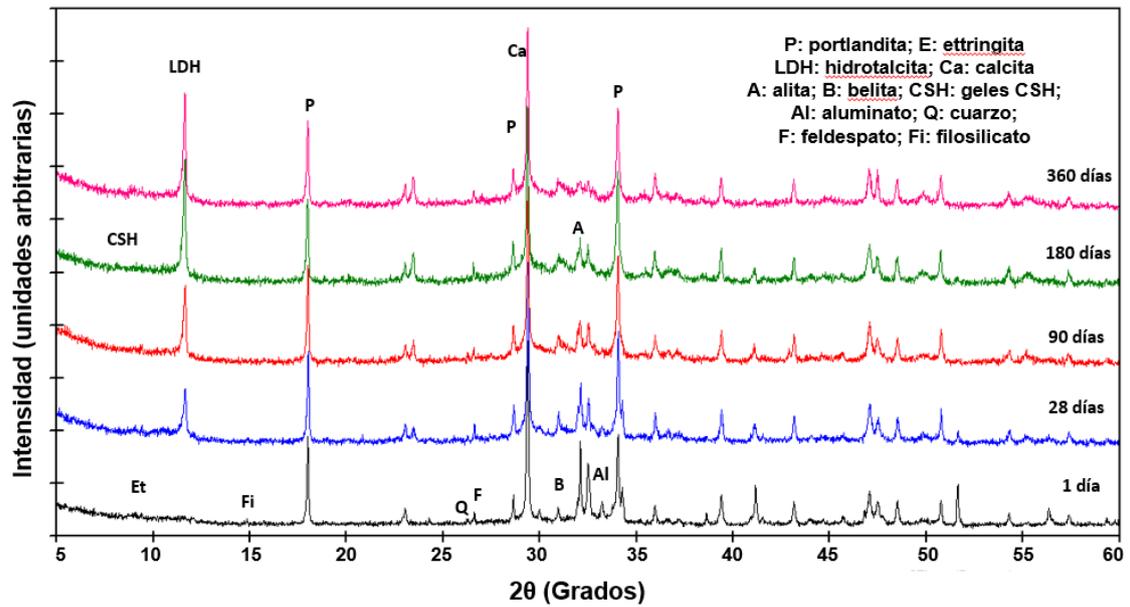


Figura 6.26. Difractogramas de las muestras de cemento Portland ordinario con un adición del 20% de residuo CU curadas a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

De nuevo, en esta ocasión los resultados indican una potenciación de los picos correspondientes a los compuestos LDH y al material amorfo, a medida que el tiempo de curado aumenta, y en contraposición, la concentración de portlandita, disminuye lo mismo que belita.

Tabla 6.12. Cuantificación Rietveld de las muestras **CU** en el sistema residuo/cemento con adición de 20% de residuo.

Tiempo de reacción	Q (%)	F (%)	Fi (%)	MA (%)	Ca (%)	A (%)	B (%)	Ba (%)	FF (%)	A3 (%)	E (%)	CSH (%)	A4 (%)	P (%)	LDH (%)	X ²	R _B
0 días	21	17	16	6	1	12	20	1	5	n.d.	n.d.	n.d.	1	n.d.	n.d.	12,9	4,2
1 día	19	12	12	7	2	10	20	n.d.	5	T	T	T	n.d.	13	n.d.	14,5	4,7
7 días	20	15	11	13	2	8	19	n.d.	4	T	5	T	n.d.	11	2	12,7	5,5
28 días	20	12	10	7	4	4	18	n.d.	3	T	2	T	n.d.	9	11	15,7	4,2
90 días	21	10	13	7	4	T	17	n.d.	3	T	n.d.	T	n.d.	10	15	16,3	4,8
180 días	21	8	12	7	4	T	20	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	9	17	16,2	3,6
360 días	22	8	10	10	4	T	20	n.d.	2	T	n.d.	T	n.d.	10	24	13,1	4,2

Siendo R_B y X², factores de acuerdo de la muestra, n.d. = no detectado, T = trazas. Q = cuarzo, F = feldespatos, Fi = filosilicatos, MA = material amorfo, Ca= calcita, A = alita, B = belita, Ba = bassanita, FF = fase ferrítica, E = ettringita, P = portlandita, A3 = aluminato tricálcico, A4 = aluminato tetracálcico.

En todos los casos, a mayor tiempo de curado la reacción del CPO con el residuo, genera portlandita y compuestos LDH, cuya cristalinidad crece con el tiempo de reacción. Hay, además, una disminución en las cantidades de C_3AF , C_3S (alita) y C_3A (aluminato) que se manifiestan en la menor definición de trazo en sus picos correspondientes y en sus menores intensidades. En contraposición, C_2S (belita) disminuye su concentración a tiempo medio, para luego crecer, siendo máxima a los 360 días, circunstancia lógica ya que este material inicia su reacción desde los 28 días, continuando hasta el tiempo final estudiado (Tabla 6.12).

Si se comparan los resultados de los dos tipos de adición, 10% y 20%, las divergencias se localizan en las fases hidratadas, compuestos LDH y portlandita. Para los compuestos LDH, a mayor cantidad de la adición (paso de 10% a 20%), la concentración de este compuesto crece, en contraposición a lo sucedido con la portlandita. La menor cantidad de portlandita indica que la reacción progresa correctamente entre el cemento y la puzolana, es decir, entre el cemento y el residuo, sucediendo en todos ellos el mismo efecto.

Los resultados para las muestras **P** y siguiendo con las mismas explicaciones se presenta la Figura 6.27 con el registro de la muestra **P**, dado que son similares los tres estudiados, **P**, **PR-1** y **PR-2**, en este emplazamiento.

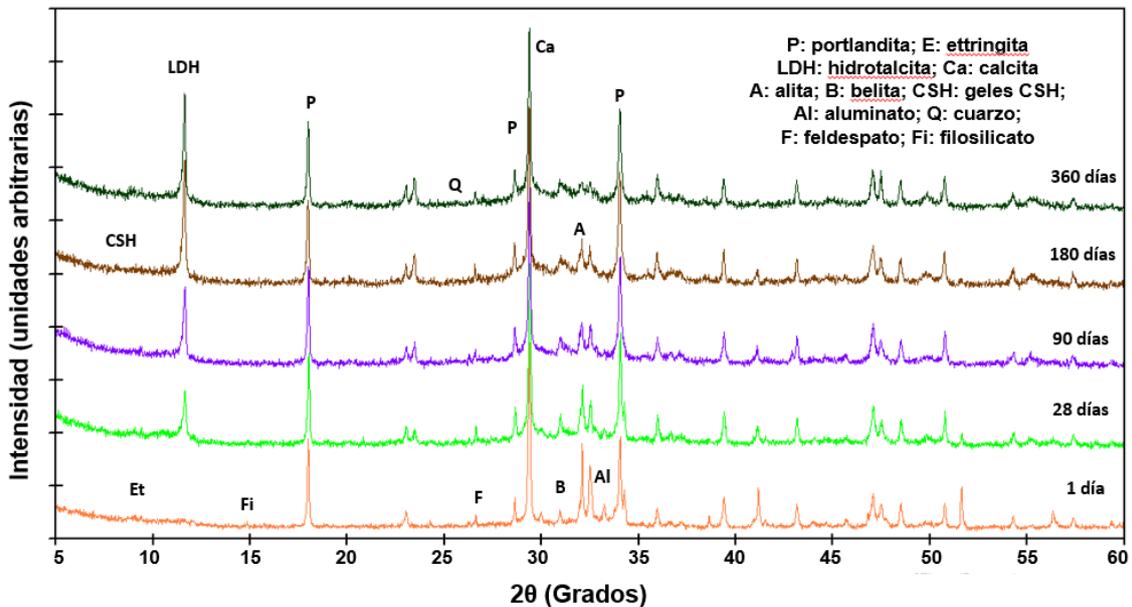


Figura 6.27. Difractogramas de las muestras de cemento Portland ordinario con un adición del 20% de residuo P, curadas a 1, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

Si se compara con los registros de las muestras **C**, no se observa ninguna variación en los comentarios y su cuantificación Rietveld se proporciona en la Tabla 6.13.

En líneas generales, todas las adiciones y tipos de residuos, no afectan de una manera ostensible a los productos de hidratación generados en la reacción puzolánica en el sistema residuo/cemento, pues los productos de la reacción son los mismos.

Tabla 6.13. Cuantificación Rietveld de las muestras **P** en el sistema residuo/cemento con adición del 20% de residuo.

Tiempo de reacción	Q (%)	F (%)	Fi (%)	MA (%)	Ca (%)	A (%)	B (%)	Ba (%)	FF (%)	A3 (%)	E (%)	CSH (%)	A4 (%)	P (%)	LDH (%)	X ²	R _B
0 días	21	16	17	2	1	8	12	2	5	n.d.	n.d.	n.d.	4	12	n.d.	12,6	4,6
1 día	21	14	15	6	2	8	11	n.d.	4	T	T	T	4	15	n.d.	16,5	4,5
7 días	20	14	14	7	2	8	12	n.d.	4	T	6	T	T	15	T	13,6	4,5
28 días	22	13	12	8	4	4	10	n.d.	3	T	2	T	T	12	10	12,1	5,7
90 días	21	12	10	14	4	T	11	n.d.	3	T	n.d.	T	T	10	15	14,7	4,5
180 días	20	12	9	12	4	T	12	n.d.	2	T	n.d.	T	T	8	21	13,2	3,9
360 días	20	12	10	7	4	T	13	n.d.	2	T	n.d.	T	T	6	26	15,6	6,7

Siendo R_B y X², factores de acuerdo de la muestra, n.d. = no detectado, T = trazas. Q = cuarzo, F = feldespatos, Fi = filosilicatos, MA = material amorfo, Ca= calcita, A = alita, B = belita, Ba = bassanita, FF = fase ferrítica, E = ettringita, P = portlandita, A3 = aluminato tricálcico, A4 = aluminato tetracálcico.

6.4. Preparación de morteros con residuos

Para la preparación de los morteros con residuos de balasto se utilizó arena CEN estandarizada con una granulometría entre 1 mm y 0,08 mm, que cumplió con los requisitos especificados en la norma UNE EN 196-1 (UNE-EN 196-1, 2018). El cemento empleado es CEM I 42,5 tipo R (CPO). Se la seleccionado este cemento por su alta reactividad a tiempos cortos (Richardson, 2000) y cuya composición se ha proporcionado en el capítulo de “Materiales y técnicas de análisis”. Dispone de un componente mayoritario, CaO, seguido de la sílice, con pequeñas contribuciones de alúmina, óxidos de hierro, de magnesio y elementos alcalinos.

La mezcla de los residuos y el cemento Portland sirvió para preparar materiales que garantizaran la homogeneidad. Se elaboraron sustituciones de 10% y 20%, en peso, en el CPO por los residuos objeto de estudio, en un intento de diseñar cementos tipo II / A (6/20%) y IV / A (11/35%), según la norma UNE EN 197-1 (UNE-EN 197-1, 2011).

Una vez preparados, se procedió al estudio de sus propiedades en estado fresco y endurecido, que se describen a continuación.

6.4.1. Propiedades en estado fresco

El estado fresco en materiales base cemento coincide con el lapso de tiempo entre la hidratación del cemento y el momento de fraguado, y es, en este periodo, en el que el material tiene un comportamiento plástico. En este estado se van a considerar las propiedades de trabajabilidad, fraguado, estabilidad en volumen y retracción.

6.4.1.1. Trabajabilidad

Según se ha mencionado anteriormente, los resultados obtenidos a través de la trabajabilidad se relacionan con las propiedades reológicas (Taylor, 1997), siendo la reología la disciplina que considera la fluidez y la deformación de los materiales. En el caso de los cementos, el comportamiento es viscoelástico, equivalente al de un fluido no newtoniano.

Los ensayos de trabajabilidad se han efectuado sobre los mismos cementos anteriores con sustitución del 10% y 20% de residuos de balasto y serrín de granito, respectivamente. Las relaciones agua/cemento seleccionadas para el ensayo son de 0,5 y la proporción de cemento con sustitución/arena es de 1 a 3.

Antes de proceder al amasado, el cemento de referencia y los residuos, se mezclaron en un dispositivo tubular durante cinco minutos para evitar segregaciones en el amasado, que se efectuó, según norma UNE EN 196-1 (UNE-EN 196-1, 2018), en dispositivos de la marca Controls.

La consistencia de los morteros de cemento se presenta en la Tabla 6.14. Por cada tipo de cemento se proporcionan valores medios correspondientes a tres determinaciones de consistencia. Además, se detalla, en la misma Tabla, la pérdida de fluidez de los cementos con adición, en relación al cemento patrón (CPO), que se calcula según la Ecuación 6.2:

Ecuación 6.2:

$$\text{Pérdida de fluidez} = \frac{(\text{Cons. media del patrón} - \text{Cons. media del cemento})}{\text{Consistencia media del patrón}} \times 100$$

Tabla 6.14. Consistencia de morteros fabricados con diferentes sustituciones de residuos.

Mortero	Consistencia media (mm)	Pérdida de fluidez (%)
CPO - 10% C	150,2	13,15
CPO - 20% C	134,6	28,32
CPO - 10% CU	148,5	17,28
CPO - 20% CU	129,3	25,12
CPO - 10% P	142,6	18,47
CPO - 20% P	136,8	35,17
CPO - 10% PR1	140,1	20,11
CPO - 20% PR1	137,2	36,22
CPO - 10% PR2	140,4	19,15
CPO - 20% PR2	138,4	35,78

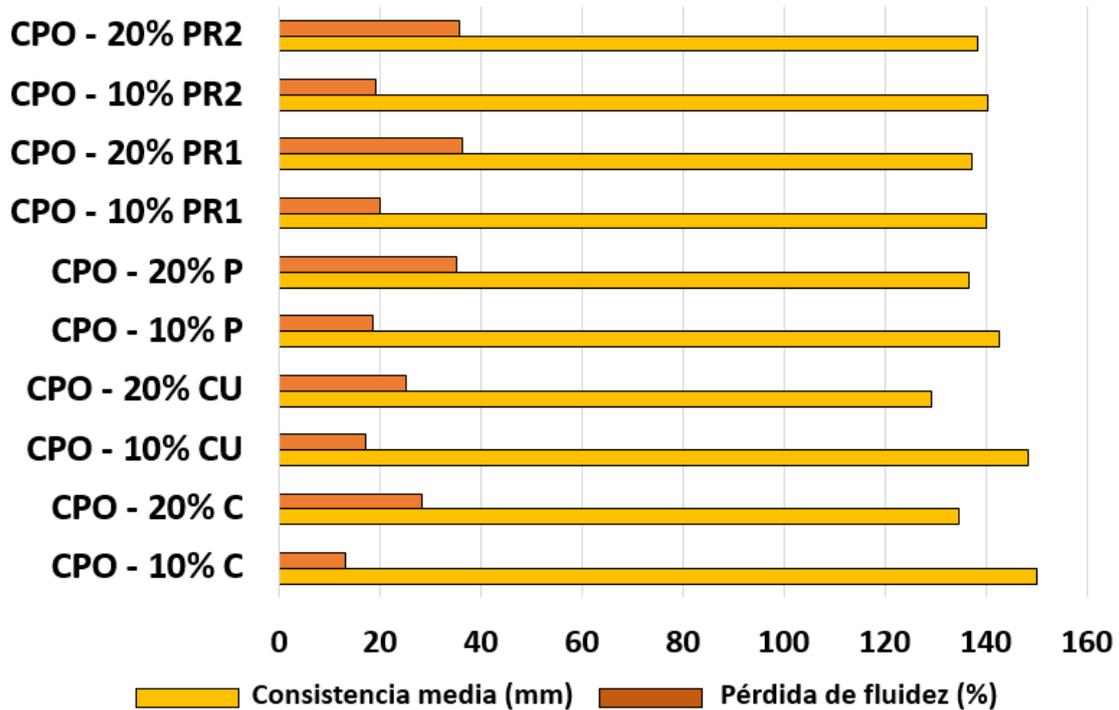


Figura 6.28. Representación de los valores de la pérdida de fluidez y consistencia media en todas las muestras estudiadas.

En líneas generales, se detecta una disminución en la medida de los diámetros de la masa extendida (consistencia media), al aumentar el porcentaje de sustitución de 10% a 20%. La pérdida de fluidez de los cementos con sustitución tiene una tendencia lineal al incrementar el porcentaje de residuo sustituido (de 10% a 20%) (Figura 6.28).

En todas las muestras estudiadas las mayores consistencias medias corresponden a las muestras **C** y **CU**, siendo muy similares los valores para las muestras **P**. En cuanto a la pérdida de fluidez, las cantidades más elevadas las ostentan las muestras **P**.

Estudios sobre cementos con sustitución en los que se emplea metacaolín (Sabir, Wild, & Khabit, 1996), (Qian & Li, 2001), (Sabir, B.B.; Wild, S.; Bai, J., 2001) y (Jones, 2002) demuestran, que, las mezclas resultantes incrementan la demanda de agua necesaria para mantener la trabajabilidad de las mismas. La sustitución de bajos contenidos de cemento (5% en masa) por metacaolín, prácticamente, no afectan a la fluidez de la pasta. Sin embargo, con porcentajes mayores de sustitución (superiores al 10%), se suele necesitar la adición de productos reductores de agua o superplastificantes, para garantizar esa trabajabilidad.

Por lo tanto, para una sustitución en masa de cemento por metacaolín, se genera una reducción de la relación volumétrica agua/conglomerante, siendo esa relación el parámetro que controla la reología de las pastas en estado fresco. En esta línea se pronuncia Rodríguez (Rodríguez, 2008) al indicar que estas sustituciones incrementan el valor de la tensión de cizalla umbral (τ_0) y que este valor es cada vez mayor al crecer el porcentaje de sustitución que, en la presente Tesis Doctoral, es el 20%.

La mencionada tensión de cizalla umbral de una suspensión concentrada depende de las fuerzas intermoleculares, de la fracción en volumen de la fase sólida, del tamaño de partícula y de la distribución de tamaño de las mismas partículas (Buscall, y otros, 1987). De esta manera el residuo de serrín de granito, tiene mayor porcentaje de partículas más finas y mayor número de contactos entre ellas y, por tanto, más resistencia a fluir.

En relación con la trabajabilidad se ha efectuado la determinación de la puzolanicidad en los cementos con sustitución de las cinco muestras estudiadas, mediante el ensayo de Frattini, con tiempos de ensayo a 8 y 15 días, según norma y se han representado los valores en la Figura 6.29.

Todas las muestras con adiciones de 10% y 20% a un tiempo de 8 días, se sitúan por encima de la curva de solubilidad del CaO, con una tendencia a colocarse a la izquierda de la curva de solubilidad CaO/OH^- relativa al cemento Portland de referencia y que coincide con un incremento en la concentración de iones Ca^{2+} liberados durante el proceso de hidratación de los nuevos cementos con sustitución.

A los 15 días, se detecta que, en el cemento con adición del 10%, para todos los casos, sucede una disminución del contenido en ion calcio liberado durante la hidratación, con respecto a los ensayos de 8 días. Por su parte, los cementos con adición del 20% están por debajo de la curva límite de solubilidad del CaO, debido a un menor contenido en ion Ca^{2+} liberado en la reacción de hidratación. Esta circunstancia y según norma (UNE-EN 197-1, 2011) permite catalogar a estos cementos como cementos tipo puzolánico Clase IV.

La situación parece coincidir con los datos de actividad puzolánica, es decir, con la baja actividad a tiempos tempranos hasta 28 días y que Juenger y Siddique

(Juenger & Siddique, 2015), atribuyen a un efecto filler en esos momentos iniciales de la reacción, provocando un proceso de nucleación en el que se dispone de un mayor espacio para que precipiten los productos de hidratación. En contraposición, a tiempos mayores, superiores a 28 días, el efecto filler es sustituido por el efecto puzolánico, con una disminución del contenido en portlandita y del ion Ca^{2+} desprendido. Además, las elevadas concentraciones de iones sulfato y cloruro que los mencionados autores consideran como condicionante de la actividad puzolánica, en la presente Tesis Doctoral, están dentro de norma, con cantidades inferiores a 4% para los primeros, y 0,1 %, para los segundos.

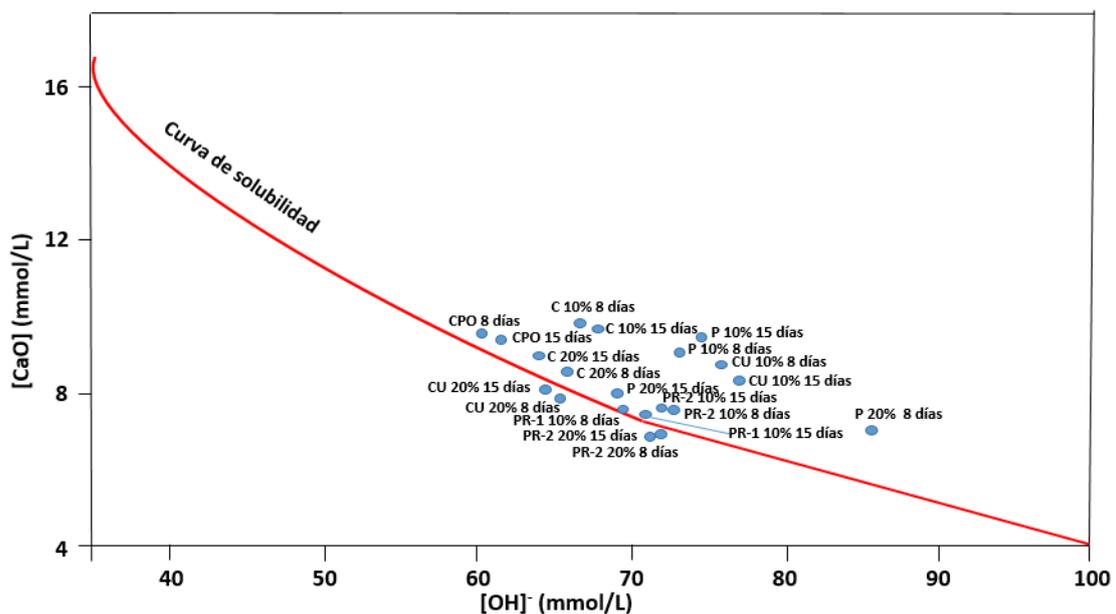


Figura 6.29. Diagrama de Frattini con los valores obtenidos en las muestras objeto de estudio.

6.4.1.2. Fraguado

Se entiende por fraguado la etapa que convierte una pasta de cemento en un material sólido y que se determina según la norma (UNE-EN 196-3, 2017). Este ensayo se ha realizado con las diferentes muestras en las que, además, se ha estudiado, una vez fraguadas, su mineralogía para conocer las fases cristalinas que contenían.

Al finalizar la etapa de fraguado, las muestras se introdujeron en una mufla a 60°C para interrumpir el proceso de hidratación del cemento y se mantuvieron en la

estufa hasta peso constante, evitando, así el agua de hidratación. El estudio mineralógico se ha seguido por difracción de rayos X (composición de fases) y la textura, por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Los resultados, en cuanto a contenido en agua de amasado de consistencia normal, y tiempos de fraguado inicial y final, con una desviación de cinco minutos, se proporcionan en la Tabla 6.15 y en la Figura 6.30.

Tabla 6.15. Parámetros de fraguado para las muestras estudiadas.

Mortero	Agua de consistencia normal (cc)	Relación agua/ conglomerante	Tiempo de principio de fraguado (min)	Tiempo final de fraguado (min)
C	150	0,27	142	198
CPO - 10% C	162	0,32	142	195
CPO - 20% C	170	0,37	111	154
CU	143	0,35	135	187
CPO - 10% CU	158	0,37	133	172
CPO - 20% CU	174	0,41	117	133
P	158	0,3	108	179
CPO - 10% P	158	0,33	108	147
CPO - 20% P	163	0,38	87	92
PR1	162	0,31	110	203
CPO - 10% PR1	162	0,33	110	195
CPO - 20% PR1	164	0,36	79	90
PR2	161	0,32	92	173
CPO - 10% PR2	165	0,34	91	162
CPO - 20% PR2	167	0,39	76	88

Se han añadido como referencia los residuos de partida (muestras **C**, **CU**, **P**, **PR-1** y **PR2**) sin mezclar (Figura 6.30).

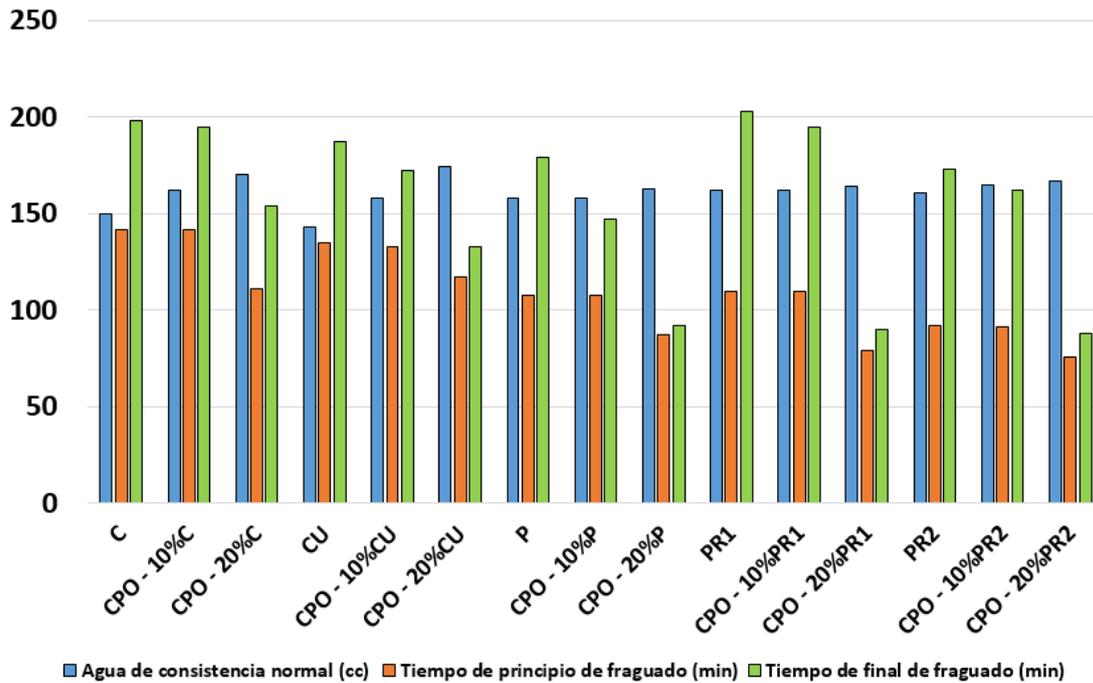


Figura 6.30. Parámetros relacionados con el fraguado en los residuos iniciales y las mezclas.

La adición de residuo genera un aumento de la tendencia parabólica en la demanda de agua de consistencia normal. La mayor demanda de agua se corresponde con la superficie específica más elevada y la distribución de tamaño más fina en algunos residuos que se añaden al cemento, dificultando la fluidez de la pasta cementante. Se requiere más cantidad de agua para humedecer toda la superficie del cemento al ser ésta mayor.

Los tiempos de fraguado más pequeños corresponden a las sustituciones de residuo en el cemento de porcentaje más alto y siguen una tendencia parabólica en su comportamiento: tiempo de fraguado y porcentaje de sustitución en el residuo son inversamente proporcionales. La justificación de este proceso se puede vincular con el tamaño de partícula; así, las partículas más finas servirán como núcleos de cristalización que ayudan en la formación de las fases hidratadas (Darweesh, 2004).

Según se ha descrito anteriormente, los productos de reacción que se obtienen en el sistema residuo/cemento, en todos los casos y adiciones estudiados, son, sobre todo, compuestos LDH, cuya concentración se incrementa con el tiempo de fraguado y con el aumento en la cantidad de portlandita, así como del material amorfo. La presencia de LDH, según Duan y colaboradores (Duan, P.; Yan, C.; Zhou, W., 2018),

aminoran la carbonatación del cemento, que se visualiza en la alta concentración de portlandita.

Todos estos productos potencian su aparición en el caso de la sustitución del 20% y, por tanto, se les vincula directamente al tiempo de fraguado, con el que mantienen una relación inversa: mayor concentración de los productos de reacción, menos tiempo de fraguado.

Taylor (Taylor, 1997) considera que la presencia de cloruros ayuda a la floculación de las partículas, no obstante, el análisis químico de las muestras consideradas, no revela la presencia en cantidades considerables de este ion. Es por esta razón que esta explicación se puede descartar.

Otra posible justificación se relaciona con el contenido en material amorfo; así, Ambroise y colaboradores (Ambroise, Maximilien, & Pera, 1994), atribuyen a la metacaolinita, material amorfo, un efecto acelerante sobre la hidratación del C_3S , cuando la relación entre este producto de la reacción y el material amorfo no supera un porcentaje del 30%. La muestra de mayor contenido en material amorfo es **PR-2**, lo que justificaría un mayor tiempo de fraguado.

Aún hay otra explicación vinculada a la mayor reactividad del carbonato de calcio (calcita), pero en este caso los residuos estudiados carecen de este compuesto y, por tanto, las opiniones de Vuk y colaboradores (Vuk, Tinta, Gabrovsek, & Kaucic, 2001) y Darweesh (Darweesh, 2004) no son de aplicación.

En resumen, la disminución en los tiempos de fraguado se vincula con el efecto filler de los residuos que ayudan a la hidratación de las fases aluminato C_3A y C_3AF , y a la de alita C_3S , según mencionan Frías y colaboradores (Frías, y otros, 2014). Todo esto se une al efecto acelerador de los óxidos alcalinos de sodio y potasio en la hidratación del aluminato tricálcico C_3A (Li, Afshinnia, & Rangaraju, 2016).

Para Medina y colaboradores (Medina, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017) este tipo de adición permitiría diseñar cementos de bajo contenido de clinker II/A y IV/A que cumplan la norma (UNE-EN 197-1, 2011).

En cualquier caso y aunque el método de determinación de fraguado es el que se utiliza habitualmente, Reinhardt y Grosse (Reinhardt & Grosse, 2004) consideran

que no es demasiado fiable y sugieren el empleo de una determinación del fraguado mediante ondas ultrasónicas que, en sus estudios, han dado mejores resultados.

6.4.1.3. Retracción

En los ensayos de retracción efectuados se considera la influencia de las adiciones en la contracción dimensional del cemento a diferentes edades, que, en este caso, se estudia en estado fresco, desde que se mezcla con agua hasta que se endurece totalmente, fragua.

Mediante el método visual de medir la contracción de la pasta, se calculó la retracción longitudinal, según la Ecuación 6.3:

Ecuación 6.3:

$$\text{Retracción longitudinal} = \frac{(D_{\text{inicial}} - D_{t \text{ concreto extremo molde}}) + (D_{\text{inicial}} - D_{t \text{ concreto otro extremo molde}})}{\text{Longitud del molde}} \times 100$$

Siendo

- D, la distancia.
- T, el tiempo.

Las medidas de retracción se han efectuado sobre la muestra **PR-1**, como representante de las ensayadas (Figura 6.31). De la observación de la gráfica se deduce que la retracción aumenta con el tiempo de fraguado. En todos los supuestos el patrón CPO es el que retrae más y en contraposición, la mezcla del 20% es la que alcanza menores valores. En los primeros tiempos de reacción existe una diferencia significativa entre las dos adiciones, pero con el tiempo prácticamente se igualan los resultados de ambas; en cualquier caso retraen menos que el cemento patrón.

El resultado es concordante con el obtenido por Özgür Bezgin (Özgür Bezgin, 2015) en traviesas convencionales, expuestas a diferentes niveles de humedad relativa, entre 30% y 50%, en la línea férrea Ankara-Polath-Konya de Alta Velocidad (Turquía es un país integrante de la UIC). En líneas generales, se puede decir que la contracción aumenta al disminuir la humedad.

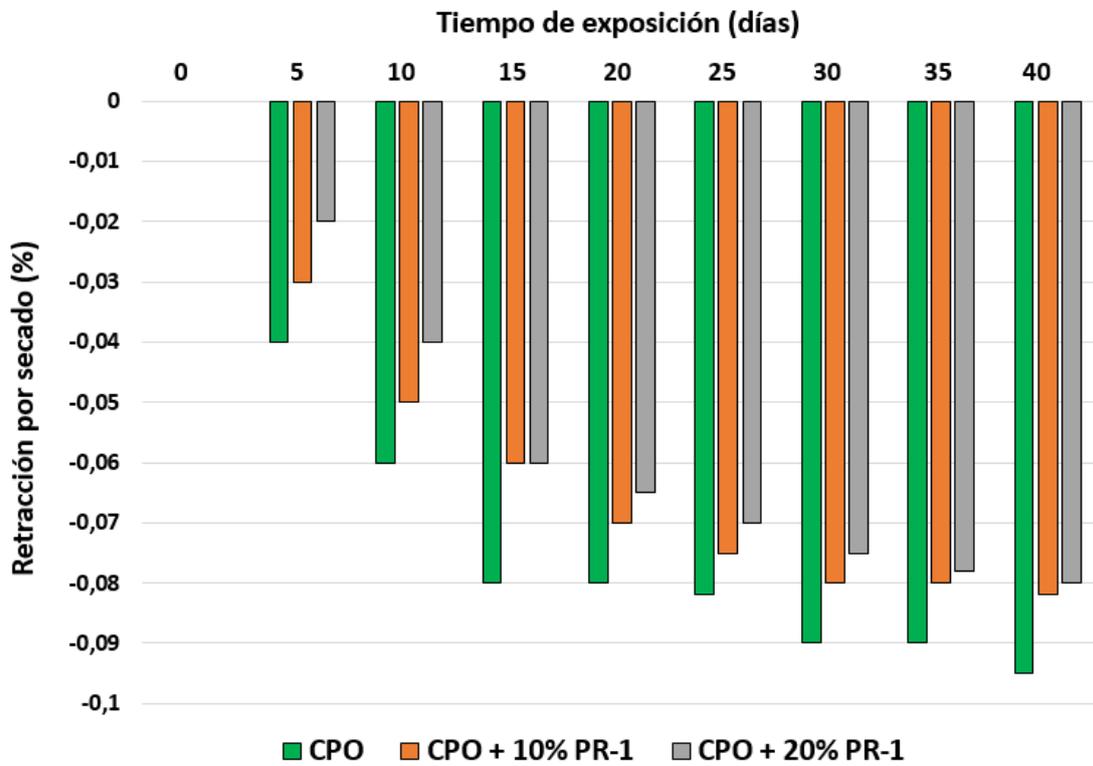


Figura 6.31. Variación de la retracción por secado en la muestra PR-1.

6.4.1.4. Estabilidad de volumen

La estabilidad volumétrica se determinó según norma (UNE-EN 196-3, 2017), utilizando una pasta de cemento de consistencia normal, indicada por el desplazamiento de dos agujas.

Según el método descrito en el Capítulo de “Métodos y técnicas de medida”, se realizaron las medidas indicadas entre las puntas de dos agujas. La primera después de 24 horas de sumergir el molde en agua; la segunda, comprobando la misma distancia tras calentar a ebullición, durante 3 horas, y la tercera, cuando se han extraído los moldes del baño y enfriarse. La expansividad se calcula por diferencia entre la primera y la última lectura (Tabla 6.16).

Tabla 6.16. Medidas obtenidas en laboratorio para determinar la expansividad de volumen en todas las muestras estudiadas.

Cemento	Primera lectura (mm)	Segunda lectura (mm)	Tercera lectura (mm)
CPO	0,75	0,95	1,20
10% C + 90% CPO	0,95	1,15	1,40
20% C + 80% CPO	1,10	1,30	1,50
10% CU + 90% CPO	1,02	1,25	1,55
20% CU + 80% CPO	1,15	1,35	1,55
10% P + 90% CPO	0,90	1,15	1,42
20% P + 80% CPO	1,00	1,30	1,50
10% PR-1 + 90% CPO	0,88	1,10	1,45
20% PR-1 + 80% CPO	1,10	1,40	1,60
10% PR-2 + 90% CPO	0,90	1,10	1,40
20% PR-2 + 80% CPO	0,95	1,20	1,45

Mediante las lecturas parciales se detecta un ligero incremento de la expansión de las pastas en el porcentaje de adición del 10%. La explicación puede deberse a la incorporación de cal libre vinculada a la descomposición de la calcita y a la posible formación de ettringita (Bonavetti, Rahhal, & Irassar, 2001), con un aumento de volumen adicional.

En cualquiera de los resultados de la Tabla 6.17 se comprueba que la diferencia entre la tercera y la primera lectura no influye en la variación de volumen para las pastas de cemento. Los valores de ensayo son inferiores a los recogidos en la norma aplicada.

Los resultados, en cuanto a las propiedades mecánicas y durabilidad de los morteros con sustitución, se igualan con el tiempo, siendo desfavorables estos cementos con adición en sus propiedades a tiempos cortos de fraguado cuando se

ubican en ambiente marino, según estudian Thomas y colaboradores (Thomas, Setién, Polanco, Alaejos, & Sánchez de Juan, 2013).

6.4.2. Propiedades en estado endurecido

Con el transcurso del tiempo los materiales base cemento fraguan, se endurecen, adquiriendo las propiedades de un cuerpo sólido que debe mantenerse íntegro en una serie de ensayos relativos a su estabilidad y resistencia a los agentes atmosféricos, según indican las normas. Como ensayos idóneos a control se estudian la resistencia a la flexión y a la compresión, la fluencia, la durabilidad y la resistencia a los ciclos hielo/deshielo.

6.4.2.1. Resistencias mecánicas

Resistencia a la flexión es la resistencia que presenta un mortero normalizado, amasado con arena silíceo CEN EN 196-1 (UNE-EN 196-1, 2018), con relación agua cemento igual a 0,5, según norma (UNE-EN 196-1, 2018) para los efectos que generan determinadas pruebas físicas.

Tarifa y colaboradores (Tarifa, Zhang, Riz, & Poveda, 2016) han desarrollado pruebas de fatiga aceleradas en traviesas de hormigón que han dado buenos resultados tanto en ancho ibérico como ancho UIC. En la presente Tesis Doctoral se debe considerar que las adiciones de residuos estudiadas presentan tamaños de partícula menores que el cemento de referencia (CPO) utilizado, es por esta razón, que se produzca un refinamiento de la matriz del cemento y un aumento relativo de la capacidad de resistencia.

Para considerar la resistencia en los cementos con adiciones se va a iniciar un estudio del comportamiento de los mismos, durante un año, a la resistencia a la flexión. Los resultados se representan en la Figura 6.32 junto al patrón CPO. Comparando con el cemento patrón todas las adiciones manifiestan valores inferiores, tanto más bajos cuanto mayor es la adición. Los valores más distantes corresponden a tiempos cortos, que, al año, casi se igualan, además, en todos los supuestos, los valores más parecidos al cemento CPO, son los de menor sustitución, excepto a los 28 días, tiempo en el que ocurre lo contrario.

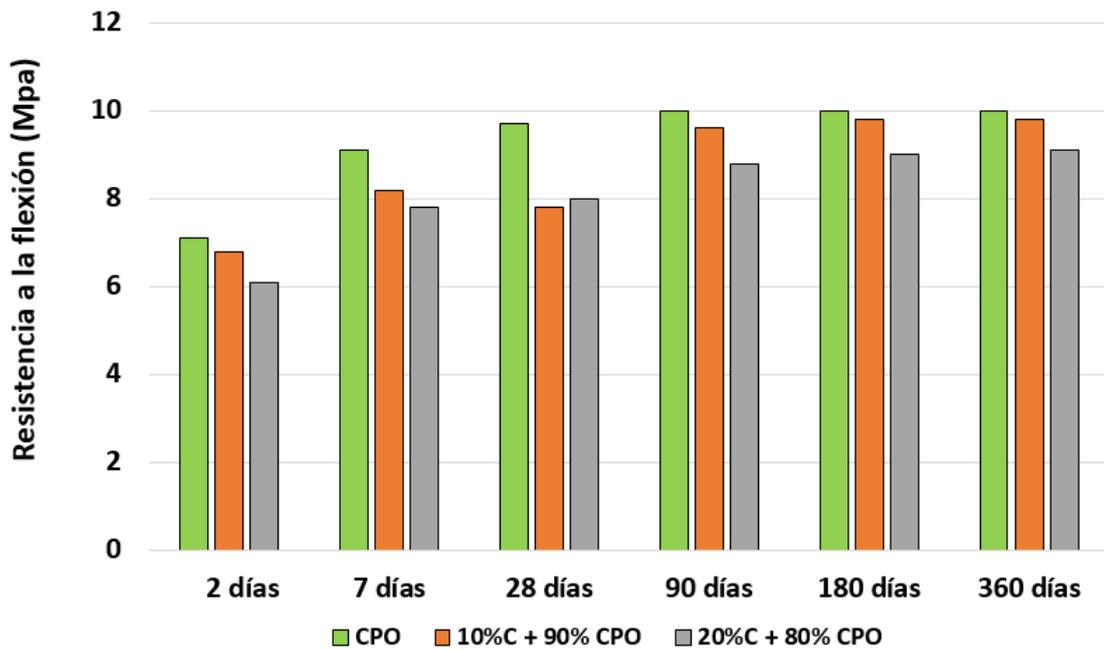


Figura 6.32. Variación de los valores de resistencia a la flexión de las mezclas con el residuo C.

Para las adiciones con residuo **CU** los comentarios son similares a los realizados para el residuo **C** y en el presente caso, la aseveración de que la mayor adición tiene menor resistencia ocurre a todas las edades (Figura 6.33).

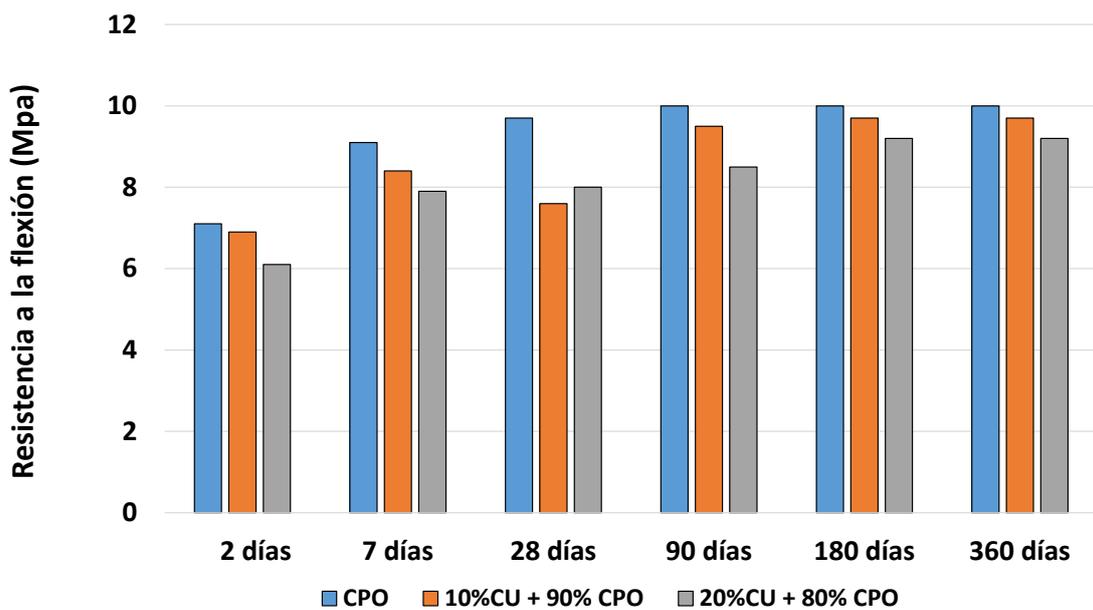


Figura 6.33. Variación de los valores de resistencia a la flexión de las mezclas con el residuo CU.

Cuando el grupo de muestras que se utilizan para preparar las adiciones son las correspondientes al serrín de granito, el comportamiento es muy próximo a los descritos para los residuos **C** y **CU**. En todas las adiciones y muestras se logran medidas de resistencia a la flexión, inferiores a las del cemento CPO, igualándose, casi con ese valor, en la sustitución del 10% a 360 días, mientras que la adición del 20%, queda con valores inferiores (Figura 6.34).

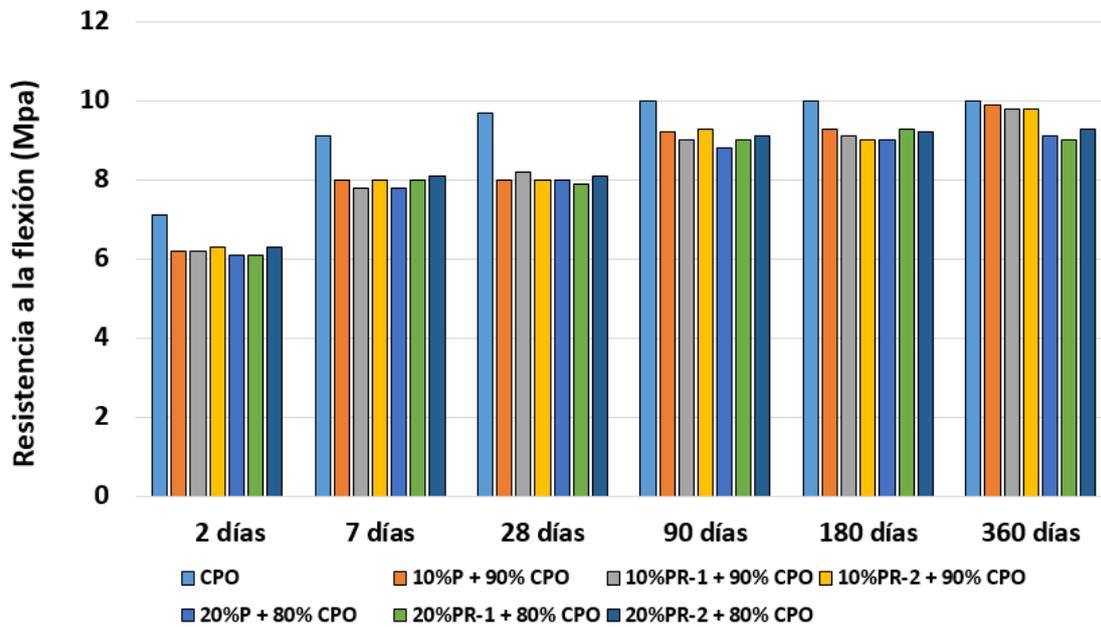


Figura 6.34. Variación de los valores de resistencia a la flexión de las mezclas con los residuos P, PR-1 y PR-2.

Según la norma (UNE-EN 197-1, 2011) los morteros que se pretenden obtener deben ser de la clase de resistencia a la compresión, después del fraguado, 42,5 N (resistencia normal) ó 42,5 R (alta resistencia inicial), con valores de resistencia inicial a dos días, superior o igual a 10 MPa para 42,5 N e igual o superior a 20 MPa en 42,5 R, pasando luego, a los 28 días, a valores iguales o superiores a 42,5 MPa, en ambas clases.

La resistencia a compresión a tiempos cortos se incrementa sustancialmente con la formación de materiales amorfos, tipo geles CSH, y descenso de la concentración en portlandita (Cassagnabère, Mouret, & Escadeillas, 2009). El tiempo de fraguado, la

resistencia mecánica y la contracción están vinculadas de manera, que una mayor resistencia mecánica, implica una menor contracción (Sern, Cheah, & Ramli, 2019).

Si se considera el módulo de elasticidad, Qian y Li (Qian & Li, 2001) establecen que, el mencionado módulo a compresión, aumenta a medida que crece el porcentaje de sustitución de cemento por materiales silíceos.

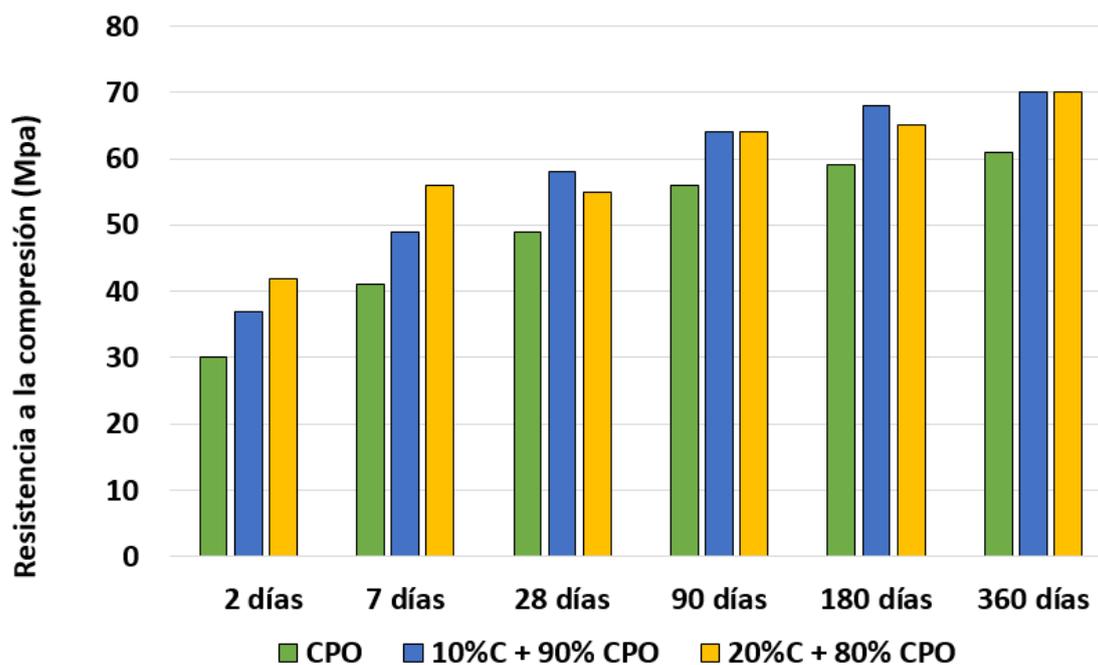


Figura 6.35. Variación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas con el residuo C.

Los materiales amorfos generan una ganancia en la resistencia para tiempos recientes (Caldarone, Bruber, & Burg, 1994), (Wild & Khabit, 1997) y (Poon, Kou, & Lam, 2006), debido a:

- 1) El efecto filler (o de relleno), que es inmediato y facilita la aceleración de la hidratación del cemento durante las primeras 24 horas.
- 2) La reacción puzolánica, cuyo máximo efecto se produce entre 7 y 14 días, para porcentajes de sustitución entre 5% y 30%. A partir de 14 días de curado, la ganancia en el valor de resistencia es menor.

La incorporación de residuo de balasto a los morteros no modifica la tendencia logarítmica que vincula la composición y el tiempo de curado, independientemente del porcentaje de sustitución (10% ó 20%) (Yagüe, González Gaya, & Claver Gil, 2019). La tendencia se puede controlar mediante el coeficiente de correlación R^2 que en todas las representaciones es superior a 0,9 (Figura 6.35), excepto en la sustitución del 20%, como se puede ver en las curvas que representan la tendencia:

De la gráfica de la Figura 6.35 se obtienen estas ecuaciones:

$$Y_{CPO} = 6,18 \ln(x) + 41,64$$

$$R^2 = 0,985$$

$$Y_{10\%+90\%CPO} = 6,39 \ln(x) + 34,88$$

$$R^2 = 0,984$$

$$Y_{20\%+80\%CPO} = 6,24 \ln(x) + 28,23$$

$$R^2 = 0,792$$

Cuando se añade un 10% de residuo **C**, la resistencia a la compresión se incrementa con el tiempo y en todos los casos supera al valor del CPO (Figura 6.35). No obstante, la sustitución del 20% y a partir de 28 días de reacción, la tendencia cambia y coincide con la propuesta por Ramos y colaboradores (Ramos, Matos, Schmidt, Rio, & Sousa-Coutinho, 2013), en morteros convencionales y con resultados similares a los de Frías y colaboradores (Frías, y otros, 2014) y Vardhan y colaboradores (Vardhan, Goyal, Siddique, & Singh, 2015), en adiciones de lodos y materiales calcáreos, respectivamente, para la manufactura de nuevos cementos puzolánicos.

En el supuesto de la adición de residuo **CU**, la observación es similar, quizás con diferencias no tan acusadas a los 28, 90 y 180 días como en el residuo **C**, pero lográndose igualar, al año de reacción, los valores de la resistencia a la compresión. En todos los casos el comportamiento de la adición del 10% sigue una tendencia logarítmica (Figura 6.36).

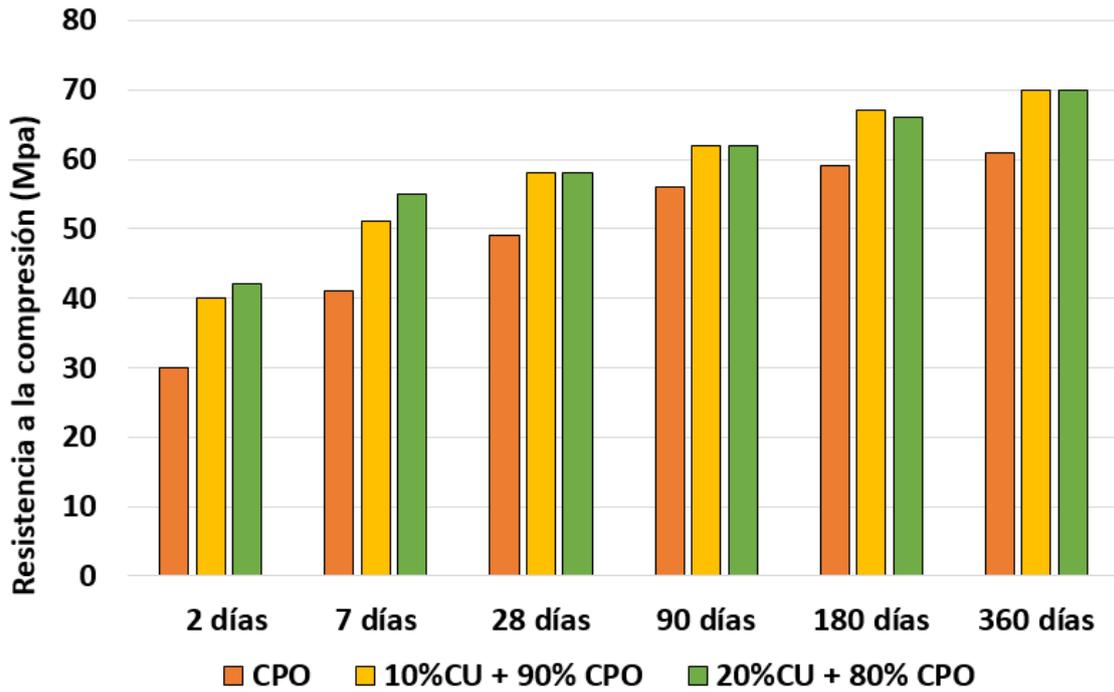


Figura 6.36. Variación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas con el residuo CU.

Por último, la resistencia a la compresión de los residuos **P**, **PR-1** y **PR-2**, continua con una tendencia similar a las descritas en los dos casos anteriores, con valores más altos, en líneas generales, para las muestras **PR-2**, aunque de nuevo, al cabo del año, las resistencias a la compresión se igualan (Figura 6.37).

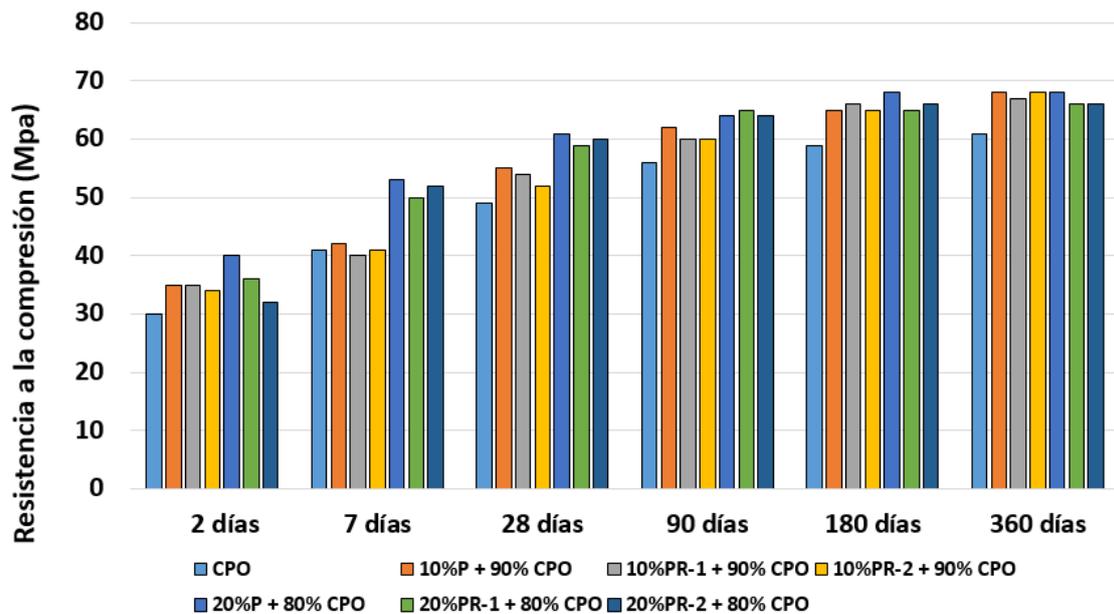


Figura 6.37. Variación de los valores de resistencia a la compresión de las mezclas con los residuos P, PR-1 y PR-2.

Abd Elmoaty (Abd Elmoaty, 2013) considera sustituciones de polvo de granito de diferentes porcentajes, entre 5% y 10%, para el cemento, exponiendo que la adición óptima es la de 10%, ya que genera un efecto positivo sobre la resistencia a la tracción y no se detectan cambios en las fases químicas de la mezcla con respecto al CPO.

6.4.2.2. Fluencia

El término fluencia, creep en la terminología anglosajona, en los materiales ligados con cemento, se refiere a la deformación que experimentan dichos productos a un determinado tiempo de curado, bajo la aplicación de una carga mantenida a lo largo del tiempo.

El estudio de fluencia sobre los diferentes morteros se ha realizado durante un año, transcurrido el cual se determinó el módulo de deformación para cargas permanentes según norma. En todos los casos se ha considerado el CPO como mortero sin adición y para cada residuo, las adiciones de 10% y 20%.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 6.38 para la muestra **C**, donde se observa que la menor deformación la presenta el mortero fabricado con CPO a largo tiempo, con un comportamiento similar, líneas paralelas, a la que sigue el mortero con adición del 10%, que es el de deformación intermedia bajo carga mantenida, después del año de ensayo. La figura no cubre todo el lapso de tiempo al estabilizarse los valores de deformación a partir de los 250 días y hasta los 360 días, que es el tiempo estudiado.

Comportamiento diferente manifiesta el mortero con 20% de adición: tiene la menor deformación a tiempo corto, sobrepasando a los valores del CPO y la adición del 10%, desde los 100 días de curado.

Se han representado los resultados de la muestra **C**, dado que los relativos a la muestra **CU**, son similares, con un comportamiento idéntico en cuanto a respuesta a la deformación.

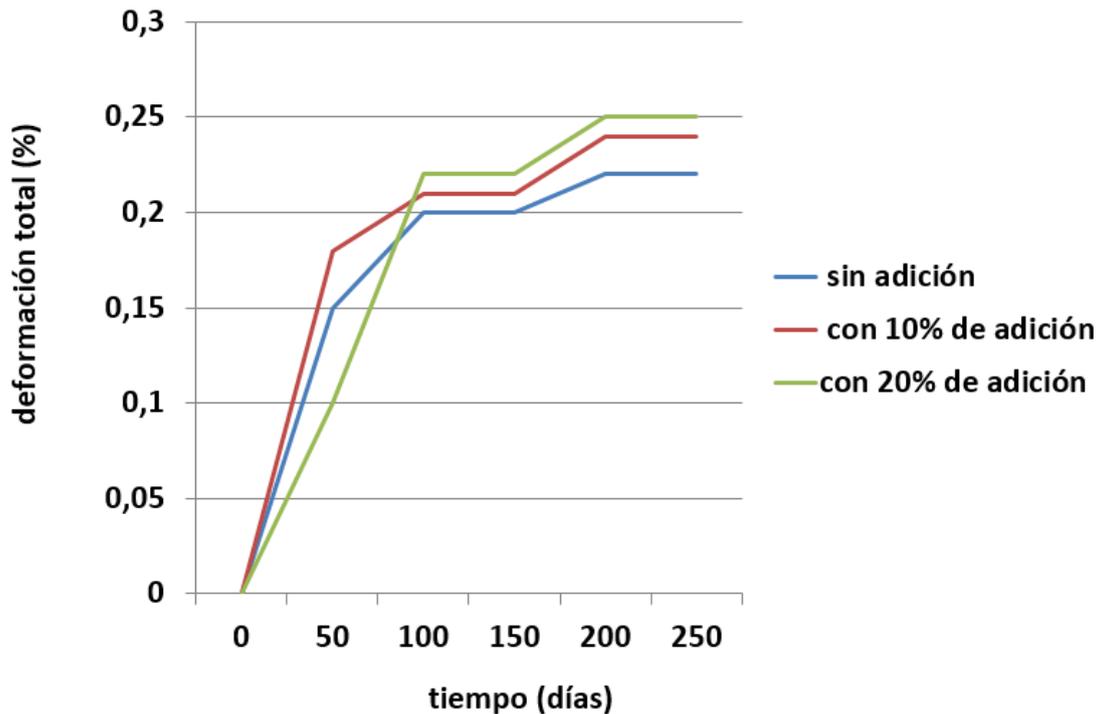


Figura 6.38. Deformación total bajo carga mantenida en morteros con y sin adición de muestra C.

Realizando los mismos ensayos para las muestras **P**, los resultados conseguidos son similares entre ellas, por esta razón se reproduce la gráfica relativa a la muestra **PR-1** en la Figura 6.39.

Considerando los resultados respecto al mortero con CPO es, en esta ocasión, cuando a tiempos largos el mortero con 10% de sustitución presenta la menor deformación, con una excepción a 150 días de curado, momento en el cual el mortero de CPO es el de menor de los gelesformación. En estas muestras el tiempo para igualar la deformación y no sufrir ninguna más, se extiende hasta 300 días, es decir, prácticamente casi necesita el año de curado para no presentar ningún tipo de deformación a la carga mantenida.

Comparando los resultados logrados en todas las muestras se pueden vincular con la existencia de una estructura de poros más densa y una matriz cementante más resistente, así como a una adherencia más fuerte entre la pasta de cemento y la arena (árido) (Brooks & Megat Johari, 2001); (Jones, 2002).. Cuando se crea una red porosa más fina se impide el movimiento del agua libre, que es la responsable de la fluencia en un momento inicial. De la misma manera, la actividad puzolánica consume mucha agua al poco tiempo de empezar la reacción y reduce la fluencia en esos instantes.

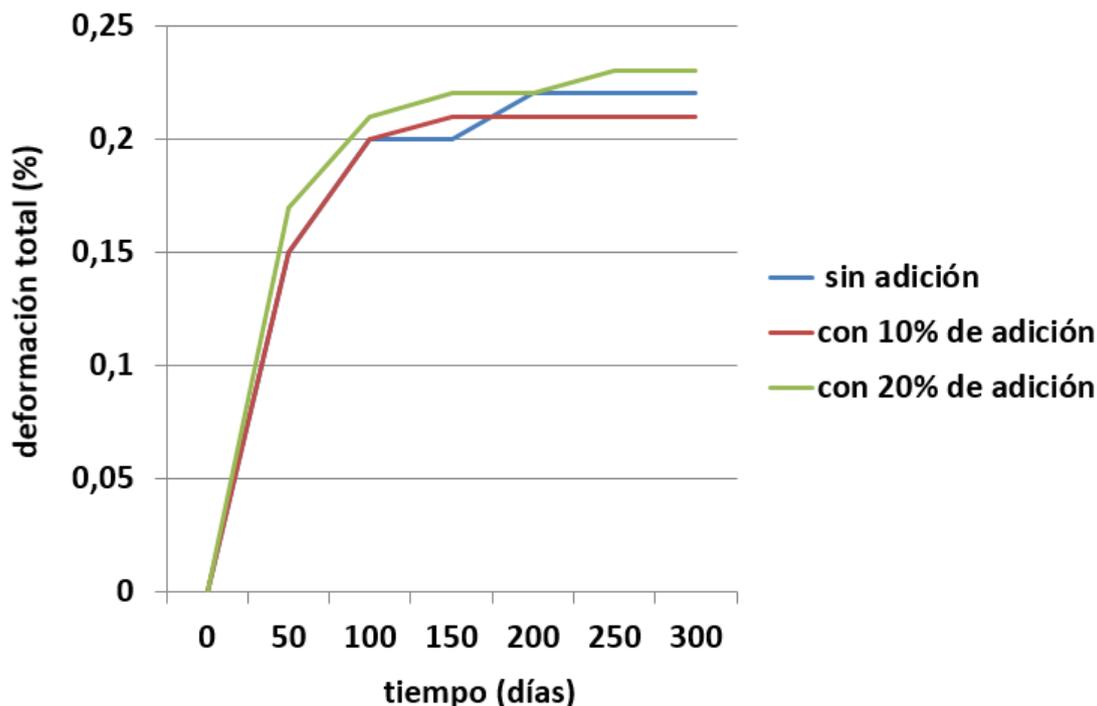


Figura 6.39. Deformación total bajo carga mantenida en morteros con y sin adición de muestra PR-1.

6.4.2.3. Retracción total de secado

El estudio de esta propiedad en los morteros fabricados con mezclas de CPO y las dos adiciones de 10% y 20% de todos los residuos, se efectuó según normas ASTM C596-07 y ASTM C490-93.

Los resultados logrados en la muestra **C**, similares a los de la muestra **CU**, y por tanto sólo representados los de la primera de ellas, se ofrecen en la Figura 6.40.

Existe una gran diferencia entre los resultados de la retracción en seco de CPO y los morteros con adición. Los valores más bajos corresponden al mortero CPO, es decir, al que no tiene adición de ningún residuo. Superando, y en gran medida, se sitúan los resultados de los morteros con adiciones: a edades cortas la retracción menor es la relativa a la adición del 10% de residuo **C**, no obstante, a medida que transcurre el tiempo se invierte la situación y el que más retrae es el de 10% de adición. A partir de 100 días de curado la retracción se estabiliza y es prácticamente constante y asintótica con el tiempo en el año que ha durado el estudio.

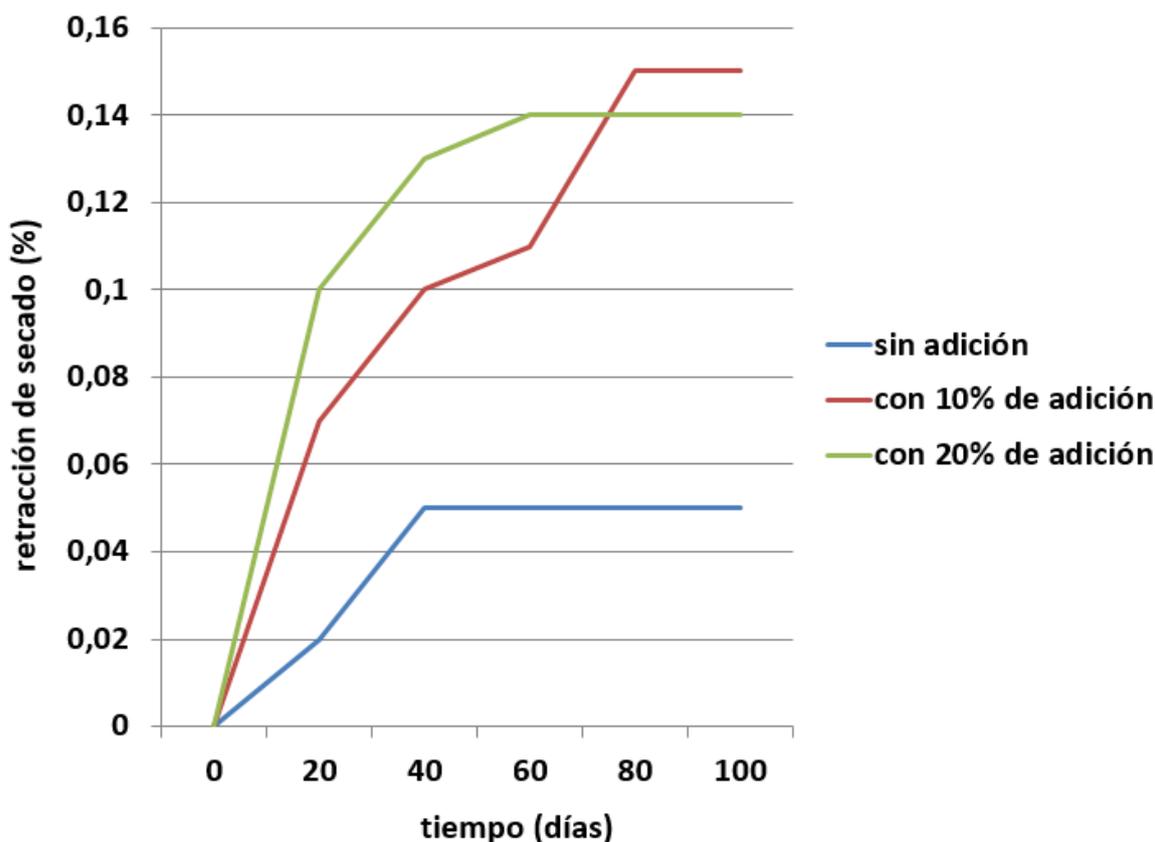


Figura 6.40. Retracción en seco de morteros con y sin adición de muestra C.

Con valores muy similares se comportan las muestras **P**, es por esta razón que se representen sólo los datos logrados para la muestra **PR-1**.

De nuevo hay gran diferencia entre los resultados de la retracción en seco de CPO y los morteros con adición. La menor retracción en seco es la del mortero CPO, es decir, sin residuo. En este supuesto y a todos los tiempos, la muestra que más retrae es la del 20% de adición, lográndose el valor constante a los 100 días de curado, aunque la prueba continuó hasta el año de duración.

Superando los valores del CPO se posicionan los resultados de los morteros con adiciones; a tiempos cortos, la retracción menor es la correspondiente a la adición del 10% de residuo **PR-1**, durante todo el tiempo en el que dura el ensayo. Por su parte, la adición del 20% es la que tiene mayores valores de retracción en seco. No obstante, los datos para las dos adiciones son similares.

La mayor retracción en los morteros con residuo se puede justificar siguiendo a Gleize y colaboradores (Gleize, Cyr, & Escadeillas, 2007), porque la nucleación de los productos de hidratación sobre las partículas de la adición, ayudan y aceleran la hidratación del cemento; además, la reacción puzolánica precisa de un consumo alto de agua, sobre todo en los momentos iniciales, lo que acelera la desecación y coincide con el acusado aumento de la retracción en los primeros días del proceso. Y, por último, se genera un aumento de la tensión capilar debido al refinamiento del tamaño de poro.

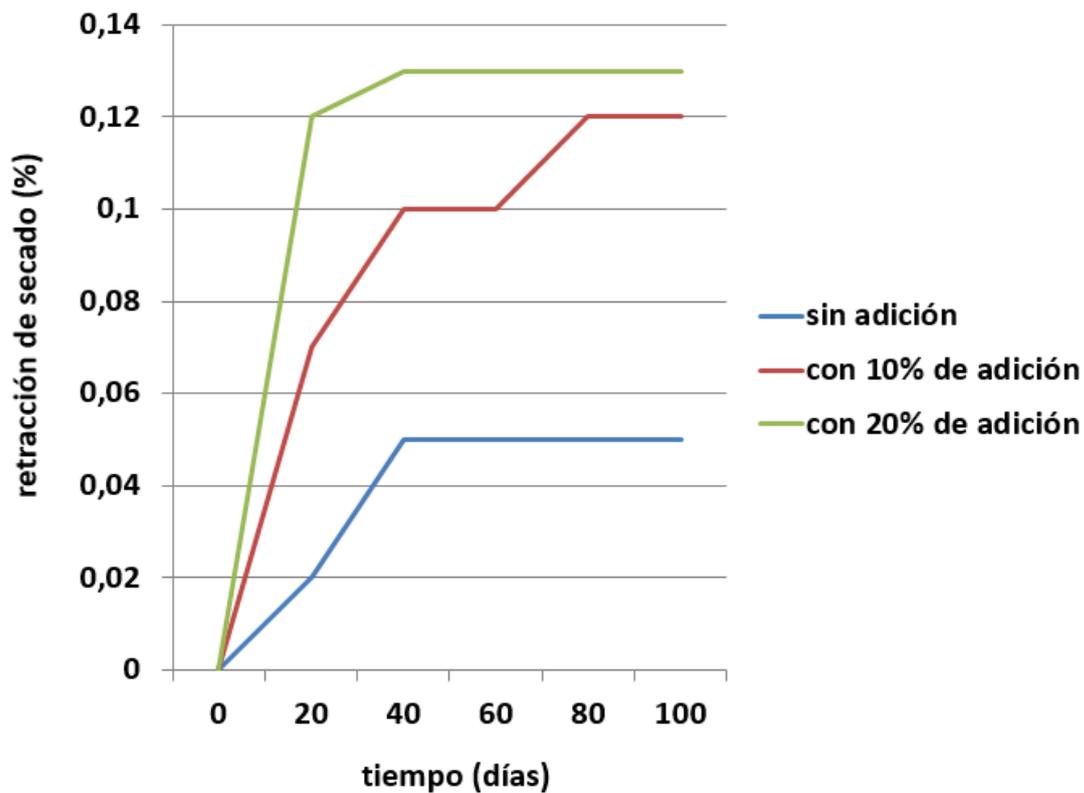


Figura 6.41. Retracción en seco de morteros con y sin adición de muestra PR-1.

6.4.2.4. Porosidad

La estructura porosa de los morteros hace referencia al sistema formado por todos los poros contenidos en él y su distribución en el interior del mismo. El comportamiento frente a las diferentes acciones agresivas del medio (físicas, químicas y biológicas), está condicionado por el transporte de sustancias en el interior de su estructura porosa.

Dentro de la porosidad es fundamental la relativa a los poros interconectados y representa el reservorio del máximo contenido reversible en agua. Esta porosidad está relacionada con el transporte de líquidos, gases y el intercambio de sustancias disueltas.

Según el tamaño de los poros se puede hablar de macroporos, meso o poros capilares y microporos: Los primeros corresponden a las burbujas de aire atrapadas naturalmente (poros de compactación) y/o a las incluidas intencionalmente (poros de aire ocluido); los segundos son los poros que se encuentran rodeando a los compuestos en forma de geles de cemento, son de forma variable, y pueden o no estar interconectados y abiertos al exterior; y los últimos, están constituidos por los poros de la pasta hidratada y endurecida. Generalmente estos últimos, no intercambian fluidos con el medio circundante. Los poros que están relacionados directamente con la durabilidad y el transporte de sustancias son los macroporos y los poros capilares.

Se ha realizado una tomografía computerizada (CT-Scanner XT-H-160 de NIKON con Target de W, filtro de 0.375mm Cu con tiempos de 708 ms por frame con un total de 4 frames y número de proyecciones de 1100 a 155kV y 57 μ A) para obtener imágenes de cortes en las diferentes estructuras internas y tamaño de poro, como se ha descrito en el capítulo de "Métodos y técnicas de análisis".

Realizando una cuantificación de los macroporos en las muestras **C** se obtiene el resultado de la Figura 6.42, donde destaca el elevado número de poros, de pequeño tamaño, en la adición del 20% al comienzo de la reacción de hidratación del material que, al cabo de un año, se reducen a menos de la mitad en la misma adición. Los poros de mayor tamaño son muy abundantes en la adición del 10%, al año de reacción.

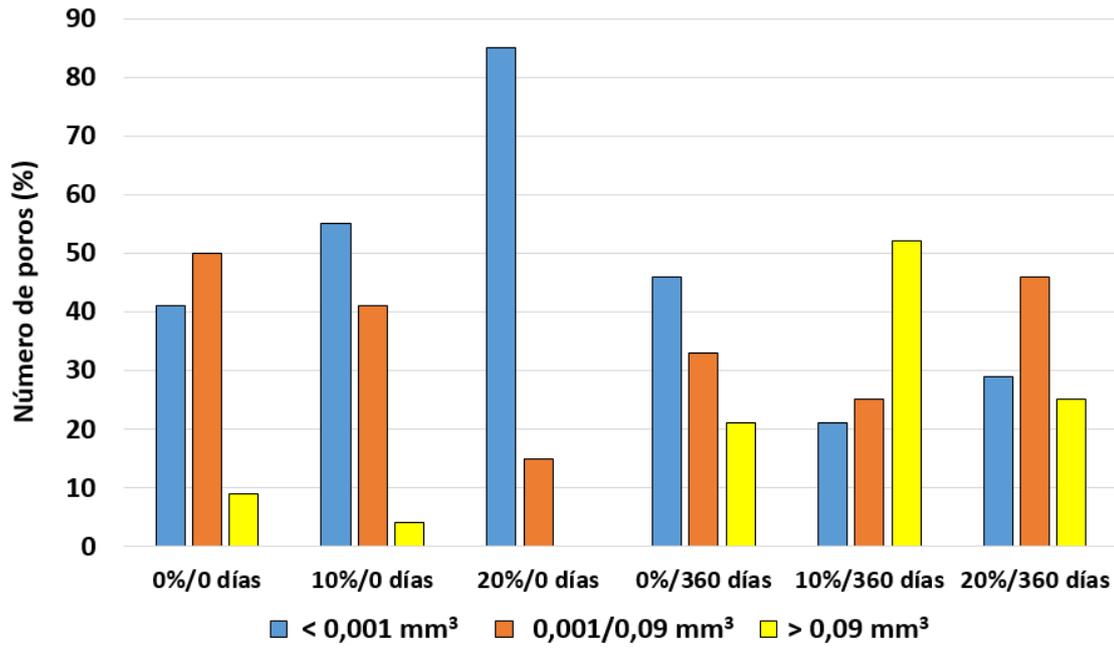


Figura 6.42. Cuantificación de la macroporosidad (en % de número de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $0.09 \text{ mm}^3 - 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$), para los residuos C.

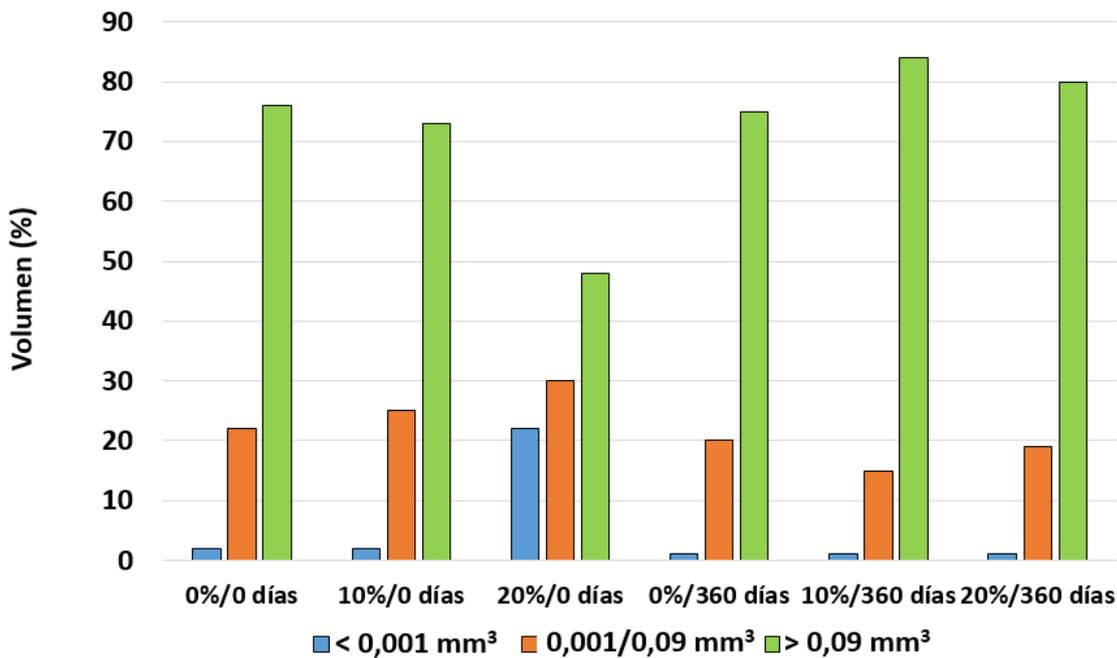


Figura 6.43. Cuantificación de la macroporosidad (en % del volumen de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $< 0.09 \text{ mm}^3 > 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$) para los residuos C.

Los poros de mayor volumen son escasos en todos los tiempos de reacción y adiciones, excepto en la de 20%, donde existe un volumen de poro superior, que luego se reduce, al año de reacción (Figura 6.43).

Los poros de volumen intermedio en el CPO presentan un número casi constante durante todo el tiempo de la reacción, quizás con una ligera disminución, al año, y, por último, los poros de menor volumen, son los mayoritarios, manteniéndose constantes para el CPO a lo largo del tiempo. Cuando la adición es del 10%, estos poros aumentan en cantidad con el trascurso del tiempo, tendencia que se repite muy acusada para la adición del 20%, donde, al cabo del año, casi igualan a la adición del 10%.

Los valores de porosidad total y tamaño de poro promedio en los morteros con adición de residuos de balasto y serrín de granito al año de curado, se ven modificados con respecto al CPO, provocando una disminución en la porosidad media ($0,001$ a $0,09 \text{ mm}^3$) de los morteros con sustituciones de 10% y 20% que, al año del proceso de hidratación, cambia de tendencia en el porcentaje del 20%.

La evolución del tamaño de poro promedio, con un refinamiento del sistema de poros a medida que avanza el proceso de hidratación del cemento, muestra un tamaño menor con el tiempo de curado en el nivel de sustitución de residuo menor, con respecto a los morteros iniciales y así lo indican Zhang y colaboradores (Zhang, y otros, 2019) que, manifiestan la importancia del diámetro de poro, en lugar de considerar el volumen total de los mismos.

Para los poros pequeños, tamaño predominante en los morteros con adición, su cantidad disminuye con el tiempo, al contrario que sucede con los de mayor volumen. La anterior observación se detecta claramente desde las imágenes de microscopio electrónico estudiadas en los morteros, que permiten apreciar en los bordes de grano de los morteros que, cuando el cemento no tiene sustitución, como se muestra en la Figura 6.44 izquierda, el contacto entre granos está formado por geles CSH y fibras de ettringita, que le dan la apariencia ligeramente porosa de la Figura 6.44 derecha.

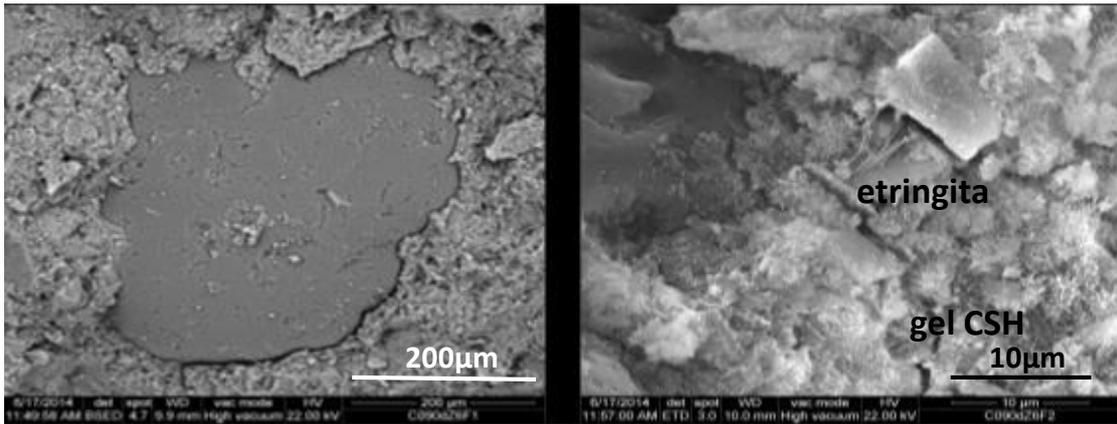


Figura 6.44. Muestra de mortero CPO sin adición. Izquierda) imagen ampliada del contacto entre granos. Derecha) cristales de etringita con geles porosos CSH.

A su vez, la Figura 6.45 izquierda pone de manifiesto la poca definición del contacto entre granos cuando la adición es del 20%, mientras que si la adición es del 10%, el borde de grano es muy nítido (Figura 6.45 derecha).

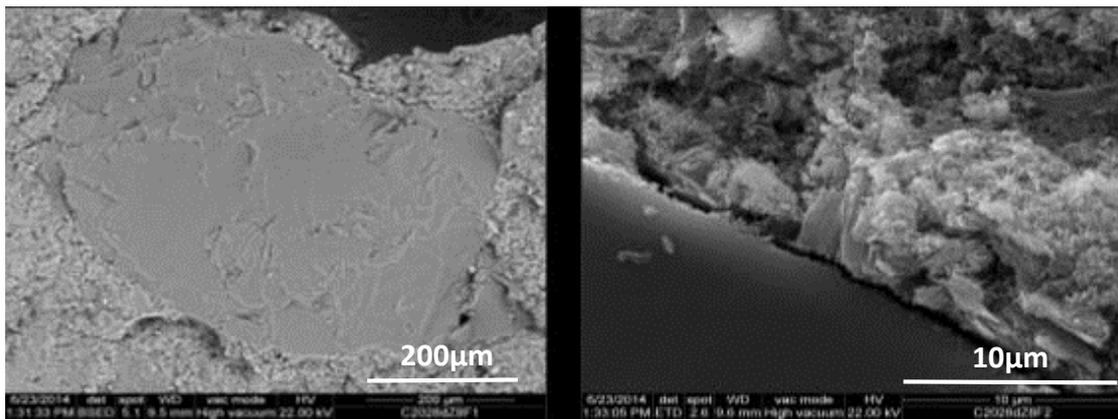


Figura 6.45. Izquierda) Imagen ampliada del contacto entre granos de la muestra de mortero con 20% de adición. Derecha) Borde de grano en muestras de mortero del 10% de adición.

Cuando la adición es del 10% (Figura 6.46 arriba izquierda y derecha), el contacto es menos nítido, aunque los contactos entre los granos se ven bien definidos en comparación con la sustitución del 20% (Figura 6.46 abajo, izquierda y derecha).

La consideración de los resultados de las pruebas anteriores significa que la adición del 10%, permitiría elaborar un cemento tipo II / A (6/20%) en lugar del previsto tipo IV / A (11–35%) de acuerdo con la norma (UNE-EN 197-1, 2011) (Yagüe Garcia & Gonzalez Gaya, 2019).

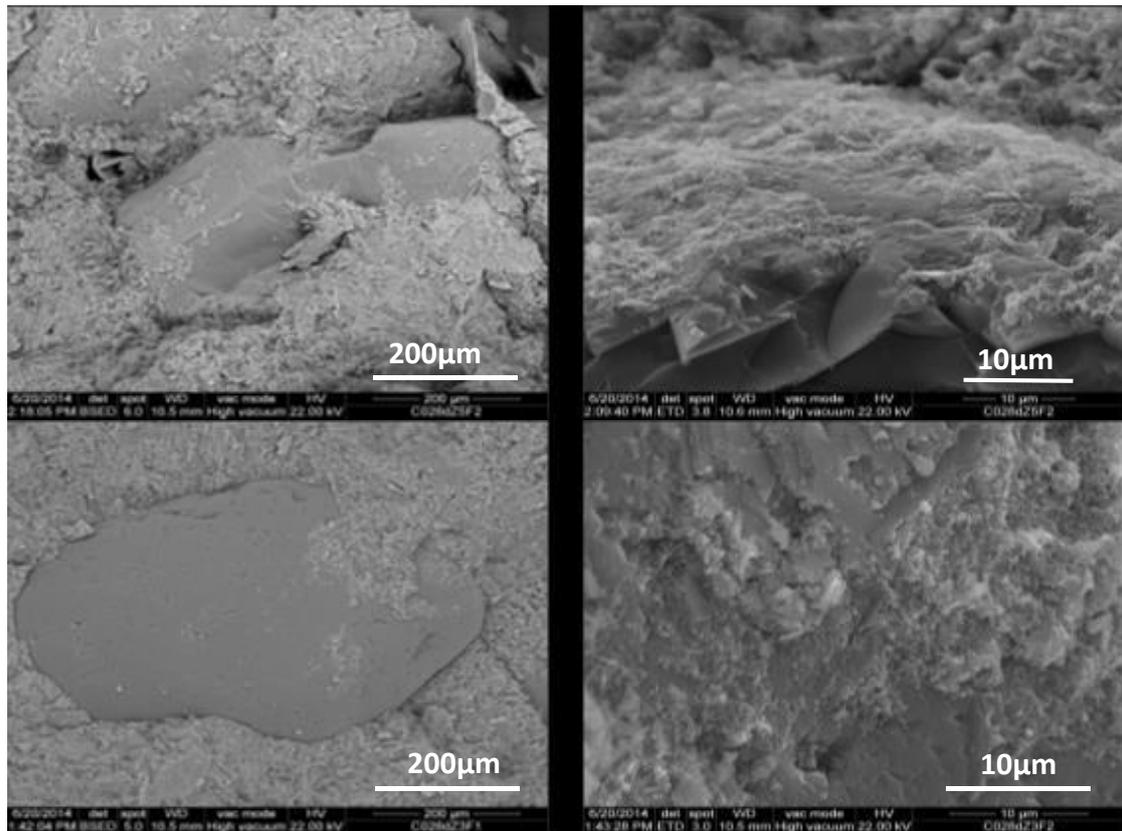


Figura 6.46. Bordes de grano en: arriba izquierda y derecha) adición del 10%. Abajo izquierda y derecha) adición del 20%.

Los resultados descritos para macroporosidad, en % de volumen de poros y % en número de poros, en la muestra **C**, se repiten para la muestra **CU**.

Para la muestra **PR-1**, seleccionada de las del tipo **P**, los comentarios son similares a los expuestos con anterioridad para las muestras **C** y **CU**. El mayor número de poros en los morteros con adición corresponden al tamaño pequeño en el momento inicial de la reacción de hidratación, disminuyendo notablemente más tarde. Esto se puede vincular con el tamaño de partícula del residuo de serrín de granito que es inferior al del CPO (Figura 6.47).

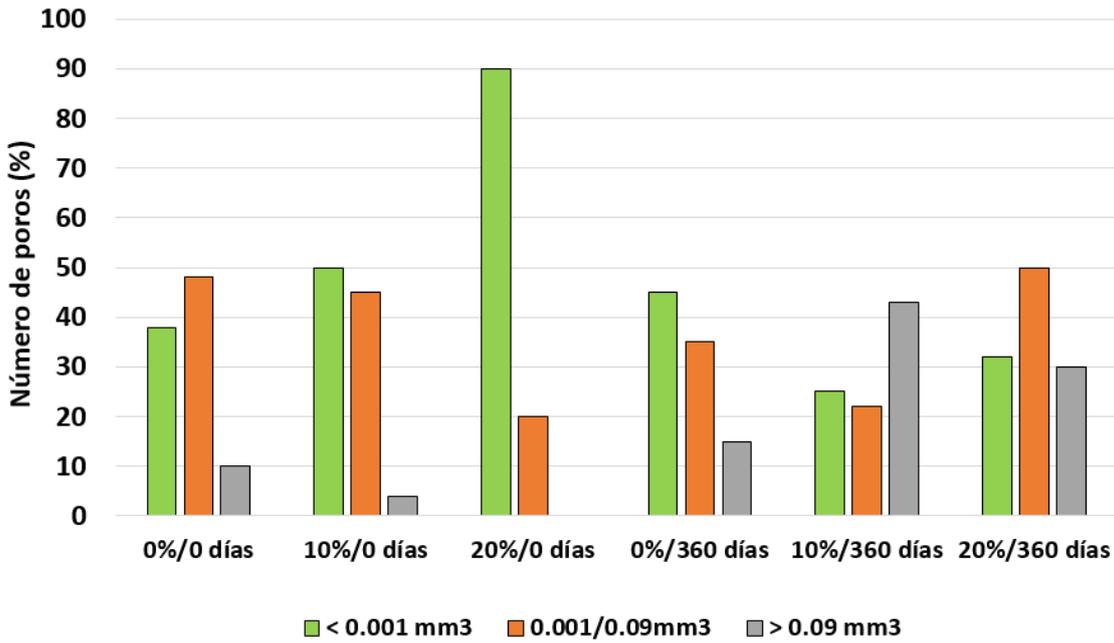


Figura 6.47. Cuantificación de la macroporosidad (en % de número de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $0.09 \text{ mm}^3 - 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$), para los residuos PR-1.

En cuanto a volumen de poro los más numerosos son los de tamaño superior a $0,09 \text{ mm}^3$ y cuyo número se mantiene constante a lo largo de toda la reacción de hidratación. Los poros intermedios disminuyen en la adición del 10% y en el 20%; los más grandes son casi inexistentes en todos los casos (Figura 6.48).

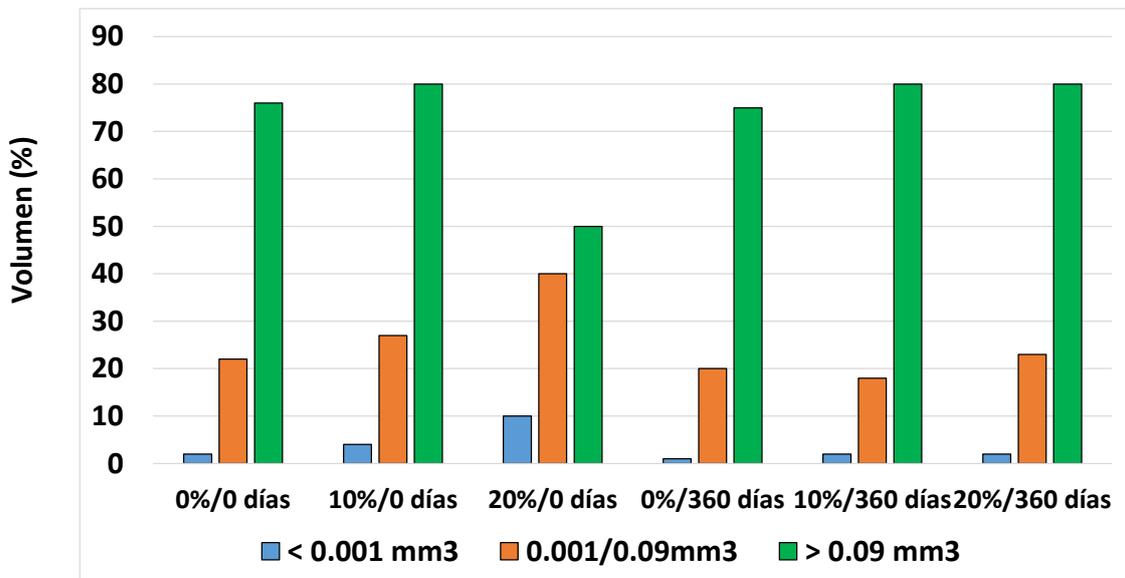


Figura 6.48. Cuantificación de la macroporosidad (en % del volumen de poros) agrupados en tres intervalos de volumen de poro ($> 0.09 \text{ mm}^3$, $< 0.09 \text{ mm}^3 > 0.001 \text{ mm}^3$ y $< 0.001 \text{ mm}^3$) para los residuos PR-1.

La porosidad se encuentra relacionada con la existencia de geles CSH como ponen de manifiesto Liu y colaboradores (Liu, Wang, Chen, & Wan, 2016), cuando estudian los cementos en condiciones de alta humedad relativa. Para Fonseca y Jennings (Fonseca & Jennings, 2010), los compuestos CSH son geles que cambian de morfología según su grado de hidratación; así, la morfología acicular que algunos de ellos manifiestan, se forma naturalmente con el tiempo y su desarrollo se acelera por secado rápido, siendo interrumpido su crecimiento, por secado lento. Los geles CSH son materiales altamente sensibles a la temperatura y su densidad aparente está directamente unida a los cambios térmicos de curado en el intervalo de 5°C a 50°C. El aumento significa que los geles ocupan menos espacio, resultando una porosidad capilar más alta que proporciona un efecto perjudicial en las propiedades mecánicas y la durabilidad a alta temperatura, como lo exponen Bullard y colaboradores (Bullard, y otros, 2011) y Gallucci y colaboradores (Gallucci, Zhang, & Scrivener, 2013).

Los geles CSH, al principio de su formación, son metaestables y pueden evolucionar lentamente hacia el desarrollo de portlandita y la expulsión de agua (Gartner, Maruyama, & Chen, 2017).

La presencia de material amorfo produce un refinamiento sobre la red de poros generados durante la hidratación del cemento. La precipitación sucesiva de geles CSH origina una pasta de mayor densidad con menor porosidad abierta, así como un incremento de la proporción de microporos en detrimento de los meso y macroporos, esto hace que la permeabilidad del material disminuya (Talero, 2001).

6.4.2.5. Durabilidad en los procesos de gelificación

Los procesos de hielo/deshielo constituyen una de las causas principales de degradación de morteros y hormigones en regiones de clima frío (Cao & Chung, 2002). En España, estas situaciones se suceden localmente en la mitad norte de la península y en regiones de montaña, no obstante, sirven para verificar la adecuación de los morteros fabricados con adiciones y es un ensayo adicional para estos cementos puzolánicos que se proponen.

Según Penttala (Penttala, 2006) el deterioro del material expuesto a procesos de gelificación se explica en función de:

- 1) La presión hidráulica desarrollada cuando el agua ocupa los poros del mortero y con el descenso de temperatura, aumenta de volumen, generando tensiones de tracción en la pasta cementante.
- 2) La presión osmótica causada por el movimiento del agua en los poros de tamaño pequeño hacia aquellos otros donde se ha formado el hielo, para equilibrar el sistema en donde aparecen solutos con cationes calcio, potasio o sodio.
- 3) La presión producida en los poros vinculada con la nucleación y la precipitación de sales por encima de la concentración crítica.
- 4) Las contracciones de tipo térmico entre los materiales que constituyen el cemento.

La manera de medir los daños por el proceso mencionado con anterioridad se basa en la norma ASTM C666 (ASTM C666-97) y cuyo método se ha descrito en el Capítulo de “Materiales y técnicas de ensayo”.

En la presente Tesis Doctoral el lapso de tiempo que se ha adoptado es de doce horas, para de este modo tener seguridad de que la fusión del hielo formado en el ciclo de enfriamiento, se funde totalmente y pasa a estado líquido.

Antes de empezar los ensayos en la cámara climática (previo a la exposición a la helada), los materiales se estudian a través de pruebas de resistencia a la compresión, comportamiento a ultrasonido y determinación del peso, además de la medida de la porosidad del material. En todos los casos la muestra ensayada ha sido la denominada **PR-1**, que ha dado buenos resultados en los ensayos precedentes.

La velocidad de la onda ultrasónica se midió en un medidor de ultrasonidos TICO PROCEQ con frecuencias de 54 Hz y el módulo de elasticidad dinámico relativo se determinó desde la Ecuación 5.2 (Zaharjeva, Buyle-Bodin, & Wirquin, 2004). La

determinación del peso se efectuó con una balanza electrónica y todas las variables se repitieron cada 15 ciclos.

La resistencia a la compresión se determinó según norma (UNE-EN 196-1, 2018) adoptando como valor la media de cinco ensayos realizados. La porosidad fue medida por intrusión de mercurio con BET.

Para determinar la resistencia a la gelifracción se consideró cuando ocurría:

- a) Módulo elástico relativo igual o inferior a 60°C.
- b) Rotura de la probeta con fisuración externa.

Los resultados obtenidos se presentan en las Figura 6.49 y Figura 6.50 para morteros con sustitución del 10% y del 20% de adición del serrín de granito **PR-1**. Como patrón se ha considerado el número máximo de ciclos hielo/deshielo en la que la estructura permanece después ensayar dos probetas, según los datos mencionados en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17. Número de ciclos antes de que se produzca el fallo.

	Morteros sin adición (ciclos)	Morteros con adición del 10% de PR-1 (ciclos)	Morteros con adición de 20% de PR-1 (ciclos)
Fallo por fisura	30	64	82
Umbral del 60%	35	86	110
Media	32,5	75	95

Los resultados de la variación del módulo dinámico relativo para los morteros con sustitución se presentan en las Figura 6.49 y Figura 6.50, observándose que los morteros con sustitución tienen un comportamiento muy similar hasta 45 ciclos, hecho relevante ya que el mortero sin adición manifiesta un deterioro por fallo paulatinamente llegando a cruzar el valor umbral a esos 45 ciclos. En la Figura 6.49 correspondiente al

60% de fallos, se puede observar que el mortero con 20% de adición es más resistente a la gelifración que el de 10% de adición.

En la Figura 6.49 para fallos de fisuración ocurre algo similar. La paridad de los morteros con sustitución, tanto 10% como 20%, es diferente a la del mortero sin adición y llega a tiempos más largos en cuanto a número de ciclos.

Los valores de porosidad obtenidos se proporcionan en la Tabla 6.18.

Tabla 6.18. Porosidad total de morteros expuestos a ciclos de gelifración

Ciclos	Sin adición (%)	Adición 10% (%)	Adición 20% (%)
0	10,15	13,23	12,96
64	17,12	15,32	11,53
92	19,21	15,30	15,22

De la Tabla 6.18 se desprende que los valores de porosidad total se sitúan entre 10% y 14%, con números similares a los conseguidos por Pera y colaboradores (Pera, Ambroise, & Chabannet, 2001) y (Pera, Ambroise, & Chabannet, 2001), para cementos puzolánicos procedentes de lodos de papel calcinados y que también coinciden con los conseguidos por Frías y Cabrera (Frías, M.; Cabrera, J., 2000), en puzolanas a base de metacaolin.

Las mayores resistencias de los morteros fabricados con adiciones se vinculan con el tamaño de poro. Cuando se llega a 65 ciclos los morteros se comportan presentando una distribución en la que aparece un pico secundario entre 1 μ y 300 μ , es decir, hacia tamaño de poro más pequeño; por su parte, el mortero sin adición, tiene tamaño de poro superior.

Las determinaciones de la resistencia a compresión en morteros con adición vuelven a incidir en los mejores resultados cuando se trata de cementos binarios, es decir, con adición. Esta valoración ya se hizo por Sabir (Sabir, B.B., 1997) en adiciones de humo de sílice y por Girodet y colaboradores (Girodet, Chabannet, Bosé, & Pera, 1997), en metacaolines.

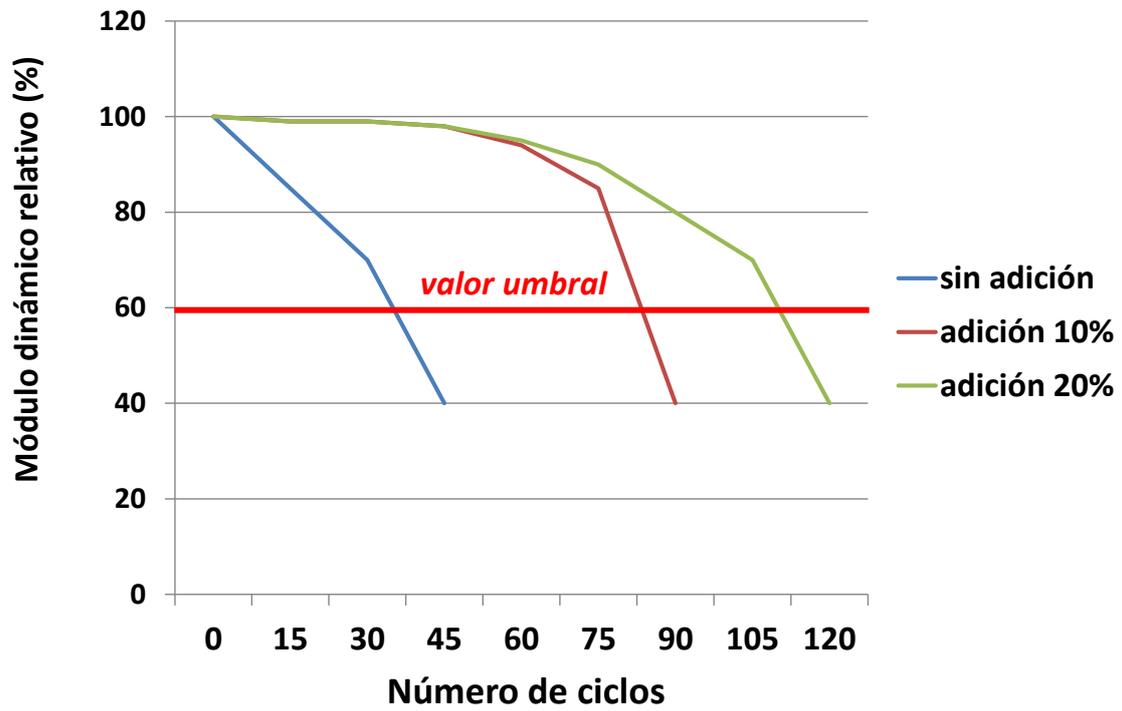


Figura 6.49. Variación del módulo dinámico relativo por fallo al alcanzar el 60% de fallo.

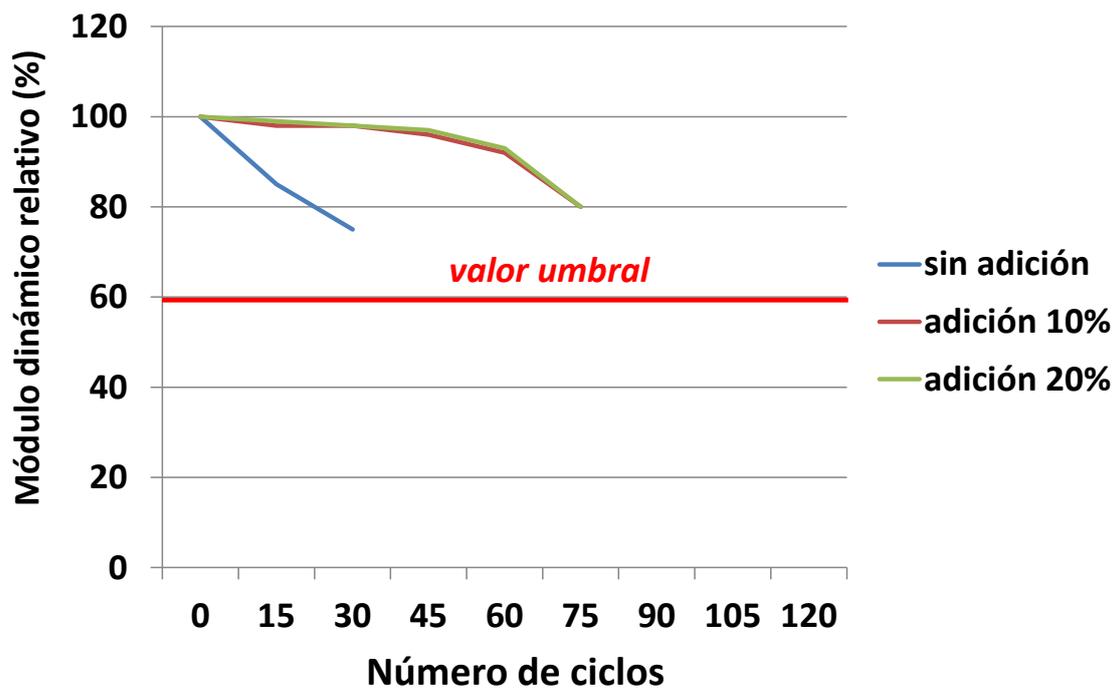


Figura 6.50. Variación del módulo dinámico relativo por fallo de fisuración.

6.4.2.6. Movilidad iónica

El estudio de la resistencia de los morteros a los agentes externos constituye parte de la durabilidad de los mismos y en la presente Tesis Doctoral se ha optado por conocer la movilidad iónica de algunos iones que se encuentran en la atmósfera, en determinados ambientes medioambientales.

Para ello se han expuesto los morteros con las dos adiciones y el patrón, a dos ambientes extremos durante el año 2018, estudiando los episodios desde el momento cero, inicio de la exposición, hasta un año, con un seguimiento cada tres meses.

Se han seleccionado dos ubicaciones, Madrid y Barcelona, cuyas condiciones climatológicas se pasan a describir y a justificar su elección.

Barcelona se ha tomado como modelo de clima mediterráneo de ambiente marino y para el estudio se han utilizado los datos climáticos de la estación meteorológica de Barcelona aeropuerto, pertenecientes al año 2018. El clima en Barcelona es cálido y templado. Las precipitaciones más abundantes se dan a finales del otoño y principios de invierno. Dentro de la clasificación de Köppen-Geiger correspondería a un clima mediterráneo Csa. En el año 2018, la temperatura media anual fue de 17,5°C y la precipitación anual de 612 mm, con una media mensual de 51 mm. El mes más seco correspondió a julio con una precipitación de 25 mm (Figura 6.51A).

Respecto a las temperaturas máximas y mínimas más altas se registraron en agosto, mientras que las temperaturas máximas y mínimas más bajas fueron en febrero, de hecho, este mes es el de temperatura media más baja de todo el año, con un valor de 8,8°C. Es importante destacar que no hubo ningún día con heladas, la temperatura más baja registrada corresponde al día 9 de febrero con 0,6°C. Por su parte, la dirección de vientos (Figura 6.52A) muestra una dirección predominante del viento en la dirección N (24%), seguido de dirección E (15%). Para ubicar las muestras y exponerlas a esta situación se orientaron al N.

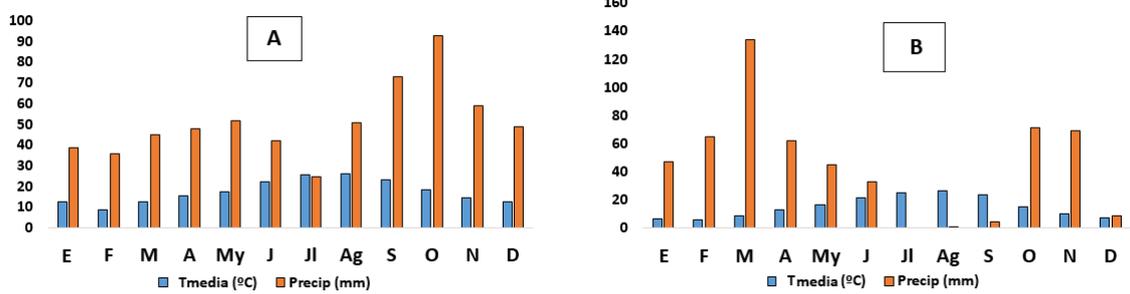


Figura 6.51. Climograma de Barcelona (A) y Madrid (B).

Madrid está situado en el centro de la Meseta castellana, con un clima estudiado a través de los datos que proporciona la estación meteorológica de Madrid-Barajas aeropuerto (Figura 6.51B). Según la clasificación de Köppen-Geiger es de tipo Csa, con veranos cálidos, de temperatura máxima registrada el día 3 de agosto, con un valor de 40,5°C, y con inviernos, de temperatura mínima de -5,5°C. La mayor amplitud térmica se produjo a finales del mes de agosto con un valor de 20,2°C. Las precipitaciones medias fueron de 542 mm, distribuidas, sobre todo, en los meses de primavera y otoño, siendo los meses más secos, julio y agosto. Por su parte, la dirección de vientos (Figura 6.52B) indica que la dirección predominante del viento en la NE (28%), con componente S (10%), siendo la orientación NE en la que se situaron las muestras que se han estudiado.

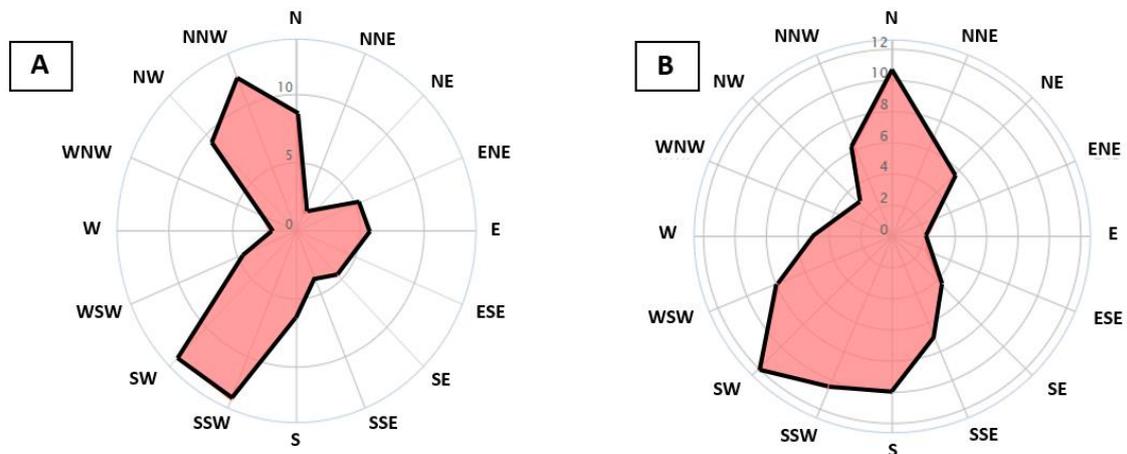


Figura 6.52. Rosa de los vientos para las estaciones de Barcelona (A) y Madrid (B).

El seguimiento de la movilidad iónica se ha realizado mediante EDX con *line scan* en la dirección de penetración (cara expuesta del mortero) hacia el interior, con análisis químico cada 491 μm , espacio del spot del microscopio electrónico, además de lograr imágenes de la zona de observación. Se han analizado, en cada periodo de tiempo, una muestra de control situada en el laboratorio y las expuestas a la intemperie, una en Madrid y otra en Barcelona. Los morteros se han fabricado con las dos adiciones, 10% y 20%, correspondientes al serrín de granito muestra **PR-1**, que ha dado buenos resultados en análisis precedentes.

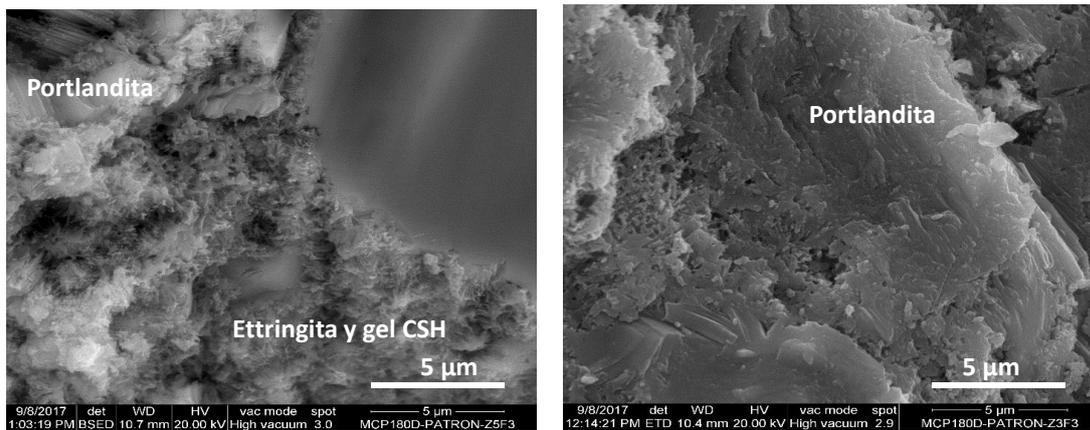


Figura 6.53. Ettringita y geles CSH (izquierda). Portlandita (derecha).

En la observación de los morteros se aprecia la portlandita con su típica estructura laminar, que aporta una dimensión tupida y densa en el contacto entre granos. La ettringita y los geles CSH son estructuras fibrosas, no muy largas, que confieren el aspecto esponjoso y ligeramente poroso (Figura 6.53).

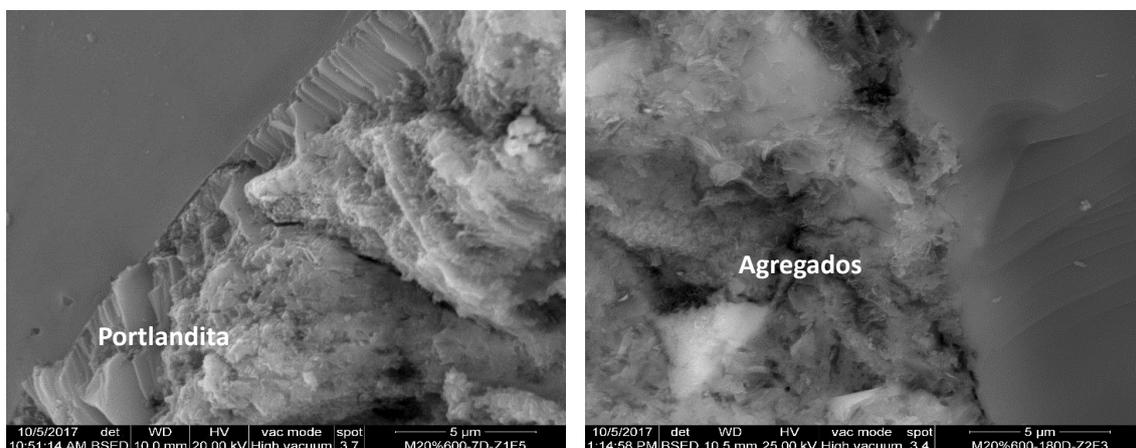


Figura 6.54. Cemento con el 10% de sustitución y un año de curado (izquierda). Contacto entre granos (derecha).

Con el 10% de sustitución y al año de curado (Figura 6.54), aparecen en los bordes de los granos láminas de portlandita orientada, que difumina el contacto, con agregados laminares y fibrosos.

Con el 20% de sustitución se produce una disminución progresiva de portlandita; el contacto entre granos queda constituido por agregados fibrosos de geles CSH y ettringita, con otras fases cristalinas, tales como los compuestos LDH y el carboaluminato, que aumentan de tamaño al disponer de más espacio, produciendo agregados cada vez más esponjosos y porosos.

Se va a describir seguidamente el comportamiento de los iones estudiados tales como silicio, aluminio, hierro, sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfato, cloruro, bromuro, plomo, haciendo un *line scan* desde la superficie expuesta al medio correspondiente, hasta una profundidad de muestra de 33879 μm a intervalos de 491 μm , en total 69 zonas (Yagüe García & Gonzalez Gaya, 2020).

En todos los casos estudiados, la distribución de silicio y calcio son casi lineales a lo largo de todo el barrido, es decir, la concentración para ambos es constante en toda la muestra, por esta razón no se comentarán.

El mortero sin sustitución y expuesto al ambiente de Madrid, indica que los iones más destacados en la distribución de su movilidad son magnesio, sulfato, cloruro, potasio y hierro (Caré, 2008). El hierro se difunde en toda la muestra y el potasio avanza con facilidad, incluso en dos etapas sucesivas durante el año de curado (Figura 6.55 superior). Por su parte, en la muestra ubicada en Barcelona, potasio y aluminio se difunden con rapidez, coincidiendo con el hierro y el cloruro (Figura 6.55 inferior).

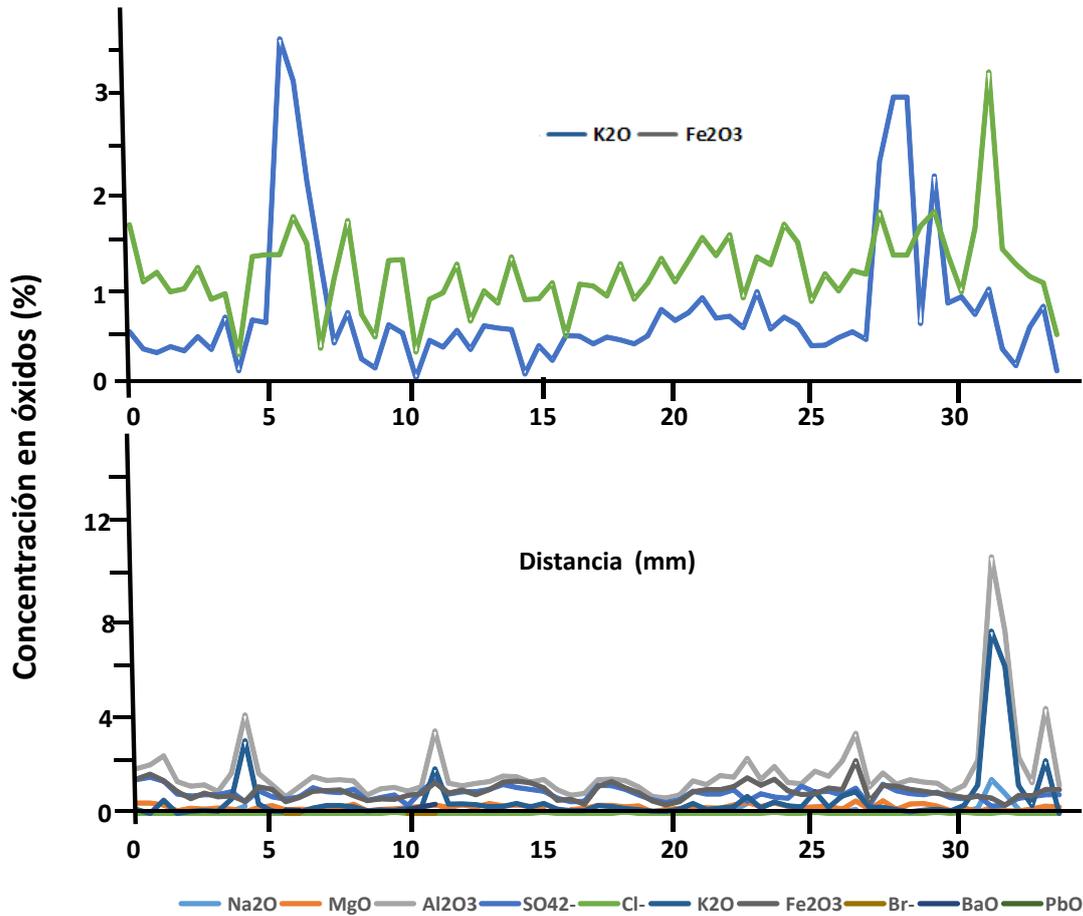


Figura 6.55. Movilidad iónica en el cemento sin adición expuesto a los dos ambientes: Madrid (superior), Barcelona (inferior).

Los resultados obtenidos para la exposición natural del cemento en Madrid, indican que el plomo en la adición del 10%, tiene una concentración máxima en la superficie, es decir, no penetra en el cemento puzolánico; por su parte, haciendo el mismo estudio en la sustitución del 20%, el plomo se desplaza al interior de la muestra un mayor espacio. Algo similar ocurre con la muestra expuesta en ambiente salino, Barcelona, que además, reproduce los resultados conseguidos por Fitzgerald (Fitzgerald, 1991). La misma situación se repite con las dos sustituciones, 10% y 20% (Figura 6.56 y Figura 6.57).

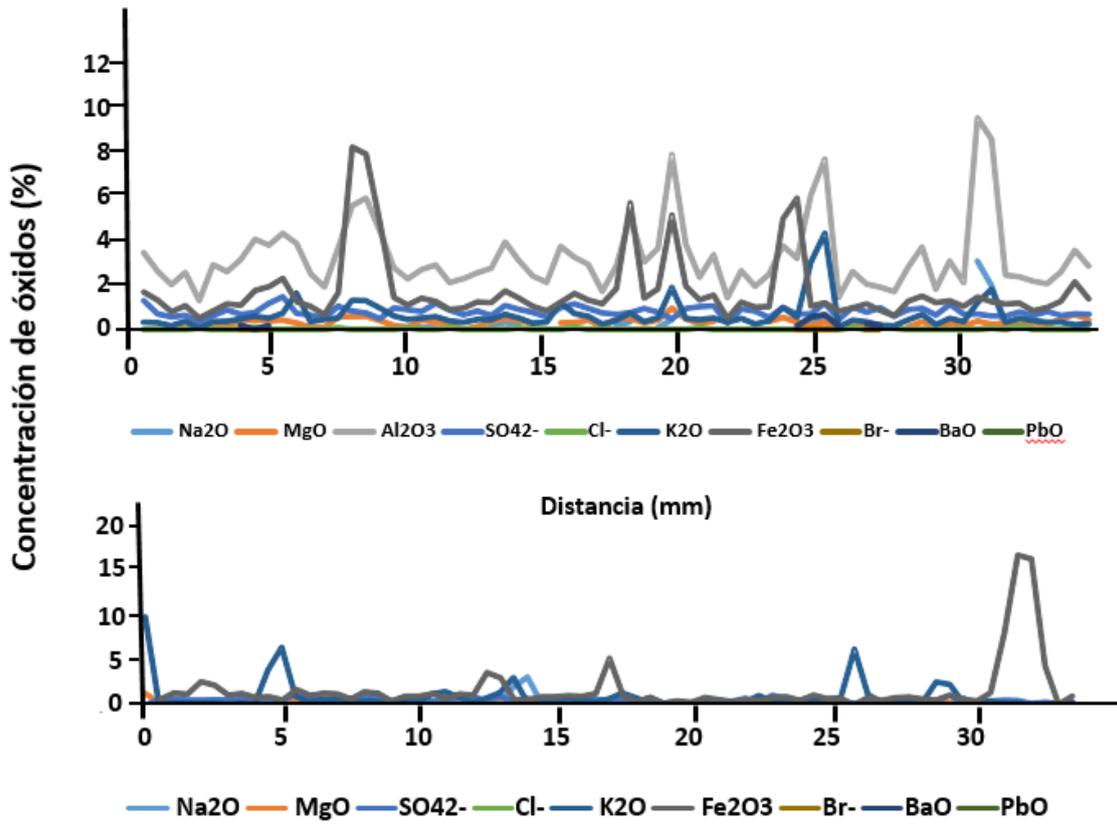


Figura 6.56. Movilidad iónica en el cemento con adición puzolánica del 10% expuesto a los dos ambientes: Madrid (superior), Barcelona (inferior).

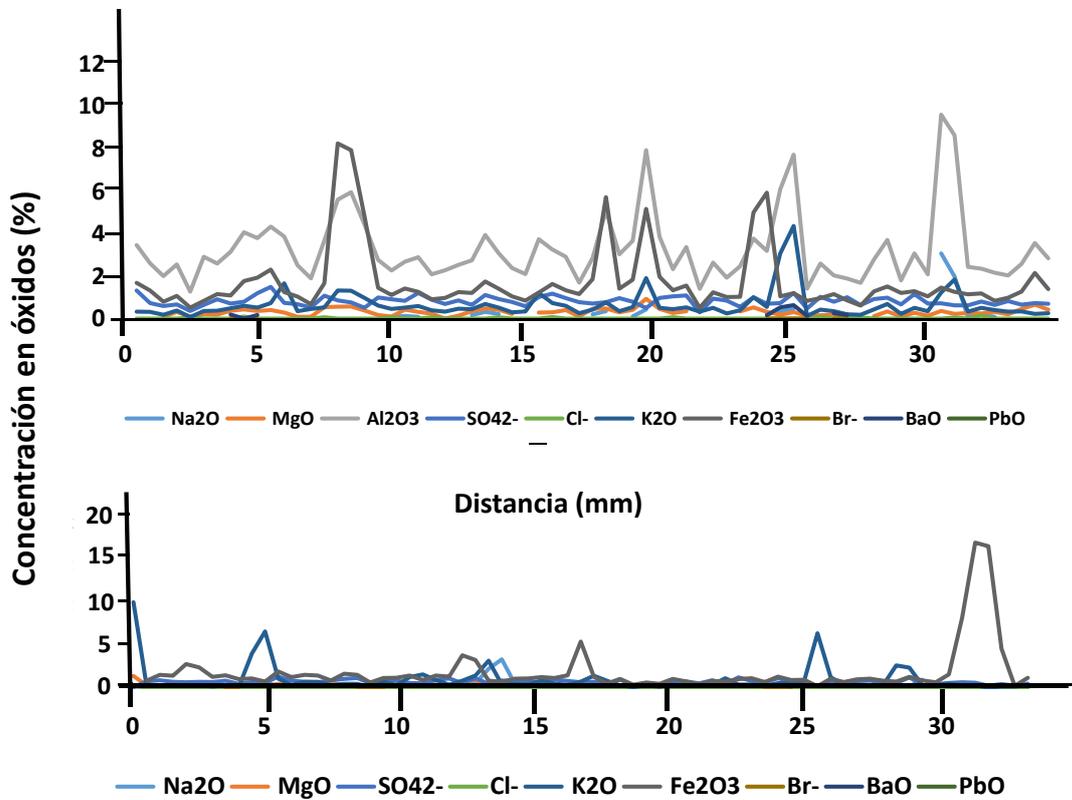


Figura 6.57. Movilidad iónica en el cemento con adición puzolánica del 20% expuesta a los dos ambientes. Madrid (superior), Barcelona (inferior).

En el caso del elemento bario, se detecta una penetración en la probeta en el supuesto del ambiente salino, Barcelona, y en los morteros con adición del 20%. En las muestras estudiadas en el ambiente no salino, Madrid, el bario penetra poco en el mortero permaneciendo cercano a la superficie.

Los haluros (cloruro y bromuro) tienen un comportamiento similar en todos los ambientes y se difunden con facilidad (su máximo de concentración se sitúa en las zonas más profundas de los morteros), relacionándose su difusión con la porosidad y sobre todo con el tamaño de poro, donde determinados iones tienen un mayor coeficiente de difusión en los de tamaño capilar (Schueremans, Van Gemert, & Giessler, 2007), (Chindaprasirt, Rukzon, & Sirivivatnanon, 2008), (Giasuddin, Sanjayan, & Ranjith, 2013) y (Osio-Norgaard, Gevaudan, & Srubar, 2018). Los sulfatos se movilizan mucho en la adición del 10% en la muestra no salina (Madrid).

Hierro y potasio presenta una movilidad parecida en su proceso de difusión: en la muestra patrón situada en el laboratorio, permanecen prácticamente en superficie, pero en las muestras de exposición natural, tanto Madrid como Barcelona, se han movilizadado hacia el interior de la probeta.

El magnesio sigue la tendencia de máxima movilidad, en las muestras expuestas a los dos ambientes agresivos estudiados. La concentración mayor de este ion se localiza en las zonas superficiales.

Finalmente, el ion sodio se mueve rápidamente en las muestras con adición del 10%, para todos los ambientes: los especímenes preparados con 10% de sustitución en ambientes sujetos a ambientes salinos favorecen la movilidad iónica y el transporte se observa cuando la exposición medioambiental es prolongada.

Tomando como modelo la sustitución del 10% y un año de exposición en Madrid, se puede decir que el comportamiento de difusión para los diferentes iones es variable. Sin embargo, todos ellos alcanzan un máximo de penetración iónica entre 8,40 mm y 12,60 mm, lo que hace pensar en la difusión a velocidades entre $5,0 \times 10^{-10}$ m/s y $8,0 \times 10^{-10}$ m/s.

Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros

En el presente Capítulo se pretende destacar las principales conclusiones derivadas de los trabajos de investigación acometidos en el marco de esta Tesis Doctoral, así como los desarrollos futuros. La exposición de las mismas se agrupa en torno a los diferentes apartados abordados, esto es:

- Características de los materiales estudiados.
- Características del sistema residuo/cal.
- Características del sistema residuo/cemento.
- Propiedades en estado fresco de las mezclas basadas en cemento y residuo.
- Propiedades físico mecánicas en estado endurecido de morteros de cemento elaborados con residuos.
- Consideraciones sobre la movilidad iónica en ambientes agresivos.
- Consideraciones sobre la durabilidad de las nuevas matrices de cemento.
- Consideraciones finales sobre la viabilidad de utilización de residuos en la fabricación de cementos binarios para Infraestructura Ferroviaria.

7.1. Conclusiones

Los residuos de balasto se pueden aplicar como adición puzolánica en el cemento Portland ordinario, al objeto de reutilizar este tipo de RCD, con elevada cantidad de materiales aluminosilicatados en su composición, y dedicarlos a la Infraestructura Ferroviaria.

El residuo estudiado no precisa de ninguna activación, ni térmica ni química, para su incorporación al cemento. Con su adición se reducen los tiempos de fraguado, disminuye la retracción en seco y la deformación por fluencia, además de presentar una mejor resistencia ante los fenómenos de hielo/deshielo.

Las adiciones, tanto del 10% como del 20% de residuo, al CPO han dado resultados satisfactorios.

La adición del 10% de residuo se dirige hacia la elaboración de un cemento tipo II / A (6/20%), mientras que la adición del 20% de residuo llevaría a un tipo IV / A (11/35%), de acuerdo con la norma (UNE-EN 197-1, 2011), en todos los casos.

Sobre los materiales utilizados

Se han estudiado dos muestras de procedencia diversa, de rocas para aprovisionamiento de balasto en línea AVE (Aldeavieja y Ávila) y tres de serrín de granito, facilitadas desde el aserradero de piedra ornamental de Cardeñosa, en Ávila.

Con las rocas que se destinan como balasto se ha simulado su desgaste en vía empleando, como residuo, el material fino que se obtiene de someter las rocas al ensayo de desgaste de Los Ángeles, siendo éste el material a estudiar.

Las rocas procedentes de Aldeavieja son rocas silíceas, pórfidos, cuya composición está formada por cuarzo, biotita, caolinita, material amorfo y feldespatos (albita y ortoclasa), para Aldeavieja y, la misma descripción, pero sustituyendo albita por labradorita, en la zona de Ávila.

El serrín de granito de Cardeñosa tiene una composición similar a las arriba indicadas, con albita y ortoclasa, y elevadas cantidades de biotita y material amorfo.

Desde el punto de vista químico, se han analizado todas las muestras y son ricas en sílice, alúmina, óxidos de hierro y elementos alcalinos, en definitiva, una composición ácida. Con bario y cinc como elementos minoritarios.

El tamaño de partícula obtenido por difracción de rayos láser, se sitúa entre 5 μm y 15 μm para todas las muestras, con un tamaño más fino en las procedentes de serrín de granito.

Para controlar la actividad puzolánica de los materiales se ha procedido a realizar un ensayo de puzolanidad con una activación térmica de 600°C durante 2 horas, según recomienda la bibliografía. Para este ensayo se seleccionó la muestra de Aldeavieja, con mayores cantidades de filosilicatos y material amorfo, susceptibles de perder agua de cristalización y transformarse, por calefacción, en materiales puzolánicos. El resultado fue que las muestras tratadas térmicamente, fijan cal a edades cortas muy lentamente, igualando luego los valores de las muestras sin activar. Ante este resultado y por economía energética, los materiales que se van a estudiar son los no activados térmicamente.

Sobre el sistema residuo/cal

Con las muestras naturales se han realizado ensayos de puzolanidad, logrando resultados tanto en los componentes de la fase sólida como en los del sobrenadante (fase líquida).

Después de un año de reacción y seguimiento a tiempos 1, 7, 28, 90 180 y 360 días, todas las muestras tienen actividad puzolánica, con los valores más altos para la muestra **PR-1** correspondiente a serrín de granito gris, que contiene mucho material amorfo, en su fase inicial.

En la caracterización del sólido aparecen diferentes fases hidratadas, generadas desde los materiales iniciales, que permanecen casi inalterables y los de la reacción con hidróxido cálcico o portlandita. Se han identificado compuestos LDH o hidrotalcitas, aluminato cálcico hidratado, calcita, stratlingita y geles CSH de baja

cristalinidad. Aunque las nuevas fases van apareciendo a todos los tiempos estudiados desde el momento inicial hasta el año, lo hacen en diferentes proporciones, con una mención especial para el incremento de los materiales amorfos, a medida que transcurre el tiempo.

Los compuestos amorfos, tipo geles CSH, por SEM, se visualizan como agregados que actúan como núcleos de cristalización de las nuevas especies.

Sobre el sistema residuo/cemento

En este sistema los análisis se han desarrollado con residuos que participan en diferentes proporciones, reemplazando al cemento Portland ordinario, en cantidades de adición de 10% y 20% del correspondiente residuo.

El CPO, desde el momento inicial hasta el año de reacción, desarrolla en este sistema calcita, alita, belita, bassanita, fase ferrítica, portlandita, compuestos LDH, ettringita y aluminatos cálcicos. Con el tiempo la reacción de hidratación evoluciona con una disminución de la bassanita lo mismo que la fase ferrítica, el aluminato, la belita y la alita.

Al cabo del tiempo y sobre todo desde el medio año, la reacción de hidratación produce numerosos geles CSH tipo II, con relación CaO/SiO_2 entre 1,50 y 2,00, y compuestos LDH.

Cuando se adiciona el 10% de residuo sustituyendo a idéntico porcentaje de cemento Portland ordinario en las muestras de residuo de balasto, se producen los mismos compuestos que los mencionados en el caso del CPO, y coexisten con los minerales iniciales del residuo (cuarzo, feldespatos, biotita, hematites).

La diferencia con el sistema residuo/cal, antes mencionado, es la inexistencia de stratlingita y la aparición de ettringita, con los mismos productos de reacción en el caso del CPO, a excepción de que los compuestos LDH se forman a tiempos más cortos que en el caso de CPO inicial sin sustitución y que la cantidad de geles CSH se potencia con el paso del tiempo durante el que transcurre la reacción de hidratación. Los geles son tipo II en la clasificación de Taylor, idénticos a los obtenidos en el caso

del CPO sin sustitución. Es importante considerar el aumento de la concentración de portlandita que se estabiliza a tiempos largos.

Cuando se consideran las muestras de serrín de granito, los resultados son similares a los descritos para los residuos de balasto.

Al sustituir un 20% de CPO por residuo, el estudio de los procesos indica un comportamiento similar al mencionado para el 10% en cuanto a los productos de hidratación obtenidos y a los heredados de la composición inicial. Se mantiene la formación de geles CSH y compuestos LDH en gran cantidad, pero el comportamiento de la portlandita es diferente. En este caso la portlandita disminuye a tiempos medios y se mantiene en los largos.

Para el serrín de granito se reproducen situaciones similares tanto para la adición del 10% como para la del 20%, sólo que, con este residuo, la mayor sustitución hace que la portlandita disminuya a tiempos largos.

Sobre los morteros

a) Para las propiedades en estado fresco

Se ha estudiado la trabajabilidad dando como resultado la pérdida de fluidez al aumentar el porcentaje de adición, sobre todo, en las muestras de serrín de granito; no obstante, todos los valores logrados para esta propiedad son muy similares.

En el fraguado, los tiempos de fraguado más pequeños, corresponden a adiciones de residuo con porcentaje más alto, cuestión que se relaciona con el tamaño de partícula y la presencia de material amorfo y, por lo tanto, las muestras de serrín de granito serán las que tarden menos en fraguar.

Los valores de retracción que se han medido son directamente proporcionales al tiempo, siendo las adiciones del 20% las que consiguen cantidades menores. Al cabo de un año, el porcentaje de adición no influye en la retracción y todos los residuos se igualan en el comportamiento.

La estabilidad de volumen manifiesta un ligero incremento de la expansión de las pastas con el porcentaje de adición del 10%, pero todos los valores obtenidos en las adiciones y muestras están dentro de norma.

b) Para las propiedades en estado endurecido

La resistencia a flexión para todos los residuos y en todas las adiciones logra valores más bajos que el CPO, tanto más bajos cuanto mayor es la adición. Los menores resultados coinciden con tiempos de curado cortos, pero que se igualan con el transcurso del tiempo. La resistencia a la compresión se va incrementando en todos los residuos y adiciones, estabilizándose al cabo del año.

Los valores de porosidad total y tamaño de poro promedio en los morteros con adición de residuos de balasto y serrín de granito, al año de curado, se ven modificados con respecto al CPO: hay una disminución en la porosidad media (0,001 a 0,09 mm³) de los morteros con sustituciones de 10% y 20%.

Los poros pequeños, tamaño predominante en los morteros con adición, disminuyen con el tiempo de curado, en contraposición con los de mayor volumen.

Los resultados descritos para macroporosidad, en % de volumen de poros y % en número de poros, para los residuos de balasto son similares. La muestra **PR-1**, seleccionada entre las de serrín de granito, ofrece comentarios similares a los expuestos con anterioridad. El mayor número de poros en los morteros con adición corresponden al tamaño pequeño en el momento inicial de la reacción, disminuyendo notablemente con posterioridad. Esto se puede vincular con el tamaño de partícula del residuo de serrín de granito, que es inferior al del CPO.

El volumen de poro más abundante es el superior a 0,09 mm³, manteniéndose constante su número durante toda la reacción de hidratación. Los poros intermedios disminuyen en número en la adición del 10% y en el 20%, los mayores son casi inexistentes, en todos los casos.

Sobre la movilidad iónica

Se han estudiado morteros de cemento con sustitución puzolánica de 10% y 20% con residuo de balasto, exponiéndolos a ambientes agresivos: frío extremo (Madrid) e incidencia de niebla salina (Barcelona).

En ambos ambientes, las muestras se comportan de manera similar en cuanto a la difusión iónica estudiada para iones plomo, hierro, potasio, magnesio, sodio y bario, bromuro, cloruro y sulfato, que responden a efectos aditivos de contaminación ambiental, tamaño de poro y velocidad iónica.

Los poros de mayor tamaño permiten la movilidad, así como procesos de rotura por los cambios térmicos y de precipitación de sales en los macroporos.

Elementos vinculados con la contaminación como el plomo, se mueven con más rapidez en los medios salinos, independientemente de si el mortero lleva o no adición puzolánica. De la misma manera, el elemento bario se difunde más en ambiente salino y cuando la adición es del 20%.

El mayor tiempo de exposición a un medio, favorece la penetración de los iones considerados, lo que se observa con claridad en las muestras de Madrid, para el elemento bario, donde al comienzo del proceso se detecta una retención del ion, que luego, se difunde por toda la muestra.

El plomo es más rápido en el medio salino, independientemente, si se considera en un cemento con o sin adición. El azufre penetra más lentamente que el cloruro.

En los dos ambientes, los especímenes preparados con un 10% de sustitución, ayudan a la retención de los iones estudiados.

Tomando como modelo la sustitución del 10% y un año de exposición en Madrid, se puede decir que el comportamiento de difusión para los diferentes iones es variable. Sin embargo, todos ellos alcanzan un máximo de penetración de iones entre 8,40 mm y 12,60 mm en las probetas estudiadas, lo que hace pensar en la difusión a velocidades entre $5,0 \times 10^{-10}$ m/s y $8,0 \times 10^{-10}$ m/s.

Sobre la durabilidad

Los morteros elaborados con adiciones de 10% y 20% de residuos de balasto y serrín de granito, tienen una durabilidad mayor en cuanto a los procesos de gelificación, con respecto a morteros sin adición. La durabilidad es mayor cuanto mayor es la sustitución.

7.2. Desarrollos futuros

Como líneas de investigación futura se proponen las siguientes:

- Profundizar en el efecto de la adición de los residuos para la durabilidad de las mezclas de cementos, en aspectos tales como carbonatación, resistencia ante soluciones ácidas y reacción álcali/sílice.

- Validar el comportamiento físico-mecánico y la durabilidad de las mezclas basadas en el cemento con adición.

- Estudiar las prestaciones de las mezclas con cemento Portland ordinario mediante ensayos en vía para reproducir el comportamiento de los ecocementos en situaciones reales.

- Ensayar las mismas propiedades estudiadas en adiciones superiores al 20% y comprobar su viabilidad.

- Realizar los mismos ensayos con otros materiales tipo de residuos de balasto o residuos de piedra ornamental de composición carbonatada, al objeto de verificar la adecuación y utilización de los nuevos residuos.

Capítulo 8. Bibliografía

- Abd Elmoaty, M. (2013). Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction and Building Materials*, 47, 743–752. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.054
- Abukersh, S., & Fairfield, C. (2011). Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement. *Construction and Building Materials*, 25 (10), 4088-4094. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.047
- Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria. (2015). *Instrucción para el Proyecto y Construcción de Obras Ferroviarias, IF-3. Vía sobre Balasto. Cálculo de Espesores de Capas de la Sección Transversal. (Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio).*
- Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., & Jiménez, J. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98-106. doi:10.1016/j.resconrec.2011.11.003
- Aikawa, A. (2015). Dynamic characterisation of a ballast layer subject to traffic impact loads using three-dimensional sensing stones and a special sensing sleeper. *Construction and Building Materials*, 92, 23-30. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.005
- Akcil, A., Agcasulu, I., & Swain, B. (2019). Valorization of waste LCD and recovery of critical raw material for circular economy: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 134-143. doi:10.1016/j.resconrec.2019.06.031
- Alcover, M. (2012). Estudio de repercusiones de las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad en obras de permeabilización de la red ferroviaria de interés general española. *Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Railway R & D*, 21 - 36.
- Alejandre, F.J. (2002). *Historia, caracterización y restauración de morteros* (1 ed.). Sevilla: Univ. Sevilla, instituto Universitario de Ciencias de la construcción.

- Ambroise, J., Maximilien, J., & Pera, J. (1994). Properties of Metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, 1, 161-168. doi:10.1016/1065-7355(94)90007-8
- Angulo, S., Angulo, C., Carrijo, P., Carrijo, M., Figueiredo, A., Figueiredo, D., . . . John, M. (2010). On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. *Materials and Structures*, 519-528. doi:10.1617/s11527-009-9508-9
- Appa Rao, G. (2003). Investigations on the performance of silica fume incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 33 (11), 1765-1770. doi:10.1016/S0008-8846(03)00171-6
- Asociación Española de Científicos. (2019). <http://www.aecientificos.es/escaparate/verpagina.cgi?idpagina=2056521&refcompra> =. Recuperado el 9 de Septiembre de 2019
- ASTM C131/C131M-14. (s.f.). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM C150-07. (s.f.). Standard: Especificación Normalizada para Cemento Portland. ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM C469. (s.f.). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM INTERNATIONAL. doi:10.1520/C0469_C0469M-14
- ASTM C490. (s.f.). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete. ASTM INTERNATIONAL.
- ASTM C512-02. (s.f.). Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. ASTM INTERNATIONAL. doi:10.1520/C0512_C0512M-15
- ASTM C596-07. (s.f.). Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement.
- ASTM C666-97. (s.f.). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. ASTM INTERNATIONAL. doi:10.1520/C0666-97
- Baeza, F., Payá, J., Galao, O., Saval, J., & Garcés, P. (2014). Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 66, 645-653. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089
- Baquerizo, L., Matschei, T., & Scrivener, K. (2016). Impact of water activity on the stability of ettringite. *Cement and Concrete Research*, 79, 31-44. doi:10.1016/j.cemconres.2015.07.008
- Barceló, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures*, 47, 1055-1065.
- Barnes, P., & Bensted, J. (2002). *Structure and performance of cements* (second ed.). London: J. Bensted and P. Barnes.
- Barreiro, J. (2012). La historia tecnológica no es retroactiva. *Alta Velocidad*, 2, 39 - 43.

- Basheer, L., & Cleland, D. (2006). Freeze-thaw resistance of concretes treated with pore liners. *Construction and Building Materials*, 20 (10), 990-998. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.06.010
- Bermúdez Alvite, L. (2005). Gestión de residuos urbanos. Situación actual y perspectivas futuras. *Sociedade Galega do Medio Ambiente (SOGAMA)*.
- Bilgin, N., Yeprem, H., Arslan, S., Bilgin, A., & Marsoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, 29, 449-457. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011
- Bissonnette, B., Pierre, P., & Pigeon, M. (1999). Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 29 (10), 1655-1662. doi:10.1016/S0008-8846(99)00156-8
- Bonavetti, V., Rahhal, V., & Irassar, E. (2001). Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, 31 (6), 853-859. doi:10.1016/S0008-8846(01)00491-4
- Bonen, D., Tasdemir, M., & Sakar, S. (2011). The evolution of cementitious materials through history. (págs. 159-168). Materials Research Society. doi:10.1557/PROC-370-159
- Bosch, E. (2004). Sir Godfrey Newbold Hounsfield y la Tomografía Computada, su contribución a la medicina moderna. *Revista Chilena de radiología*, 10 (4), 29-37. doi:10.4067/S0717-93082004000400007
- Branson, J., Dersch, M., de Oliveira Lima, A., Riley Edwards, J., & Ki, J. (2019). Analysis of geometric ballast plate for laboratory testing of resilient track components. *Transportation Geotechnics*, 20, 100240. doi:10.1016/j.trgeo.2019.04.003
- Brooks, J., & Megat Johari, M. (2001). Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23 (6), 495-502. doi:10.1016/S0958-9465(00)00095-0
- Bullard, J., Jennings, H., Livingston, R., Nonat, A., Scherer, G., Schweitzer, J., . . . Thomas, J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41 (12), 1208-1223. doi:10.1016/j.cemconres.2010.09.011
- Buscall, R., McGowan, I., Mills, P., Steward, R., Sutton, D., White, L., & Yates, G. (1987). The rheology of strongly-flocculated suspensions. *Journal on Non Newtonian fluid mechanics*, 24 (2), 183-202. doi:10.1016/0377-0257(87)85009-7
- Bustillo, M. (2008). *Morteros y hormigones*. Madrid, España: Fuego Editores.
- Caldarone, M., Bruber, K., & Burg, R. (1994). High reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture. *Concrete International*, 16 (11).
- Calleja, J. (1987). Justificación científica, tecnológica y económica de los cementos con adiciones. *IX Conferencias interamericana sobre tecnología de materiales*. Chile: Universidad de Chile.
- Calzado, A., & Geleijns, J. (2010). Tomografía Computarizada. Evolución, principios técnicos y aplicaciones. *Física Medica*, 11 (3), 163-180.

- Cao, J., & Chung, D. (2002). Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Research*, 32 (10), 1657-1661. doi:10.1016/S0008-8846(02)00856-6
- Caré, S. (2008). Effect of temperature on porosity and on chloride diffusion in cement pastes. *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1560–1573. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.03.018
- Cassagnabère, F., Mouret, M., & Escadeillas, G. (2009). Early hydration of clinker–slag–metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 39 (12), 1164–1173. doi:10.1016/j.cemconres.2009.07.023
- Chen, J., Kwan, A., & Jiang, Y. (2014). Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 56, 87-93. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.066
- Chindapasirt, P., Rukzon, S., & Sirivivatnanon, V. (2008). Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials*, 22 (5), 932–938. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.001
- Choudhary, R., Gupta, R., & Nagar, R. (2020). Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*, 239, 117-888. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117888
- Christensen, A., Jensen, T., & Hanson, J. (2004). Formation of ettringite, $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$, AFt, and monosulfate, $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)\cdot 14\text{H}_2\text{O}$, AFm-14, in hydrothermal hydration of Portland cement and of calcium aluminum oxide—calcium sulfate dihydrate mixtures studied by in situ synchrotron X-ray powder. *Journal of Solid State Chemistry*, 177 (6), 1944-1951. doi:10.1016/j.jssc.2003.12.030
- Cody, A., Lee, H., Cody, R., & Spry, O. (2004). The Effects of Chemical Environment on the Nucleation, Growth, and Stability of Ettringite $[\text{Ca}_3\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3\cdot 26\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, 34 (5), 869–881. doi:10.1016/j.cemconres.2003.10.023
- COM. (2014). Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de COM (2014) 15 Change our Energy System - Decarbonisation Energy Supply System - A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030: http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/documentation_en.htm
- Courard, L., Darimont, A., Schouterden, M., Ferauche, F., Willem, X., & Degeimbre, R. (2003). Durability of mortars modified with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 33 (9), 1473-1479. doi:10.1016/S0008-8846(03)00090-5
- Darweesh, H. (2004). Limestone as an accelerator and filler in limestone substituted alumina cement. *Ceramics International*, 30 (2), 145-150. doi:10.1016/S0272-8842(03)00073-7
- Davraz, M., Ceylan, H., Bekir Topcu, I., & Uygungoglu, T. (2018). Pozzolanic effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 494-503. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.043

- Diamond, S. (1996). Delayed ettringite formation — Processes and problems. *Cement and Concrete Composites*, 18 (3), 205-215. doi:10.1016/0958-9465(96)00017-0
- Ding, Q., Guan, Z., Li, Y., & Li, Y. (2018). Elastic modulus damage model of cement mortar under salt freezing circumstance based on X-ray CT scanning. *Construction and Building Materials*, 191, 1201-1209. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.097
- dos Santos Vazzoler, J., Lima Vieira, G., Rodrigues Teles, C., Klein Degen, M., & Arlêu Teixeira, R. (2018). Investigation of the potential use of waste from ornamental stone processing after heat treatment for the production of cement-based paste. *Construction and Building Materials*, 177, 314-321. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.098
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2012). Influence of metakaolin on pore structure-related properties and thermodynamic stability of hydrate phases of concrete in seawater environment. *Construction and Building Materials*, 36, 947–953. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.073
- Duan, P.; Yan, C.; Zhou, W. (2018). Effects of calcined layered double hydroxides on carbonation of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 160, 725–732. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.099
- Escadeillas, G., Aubert, J., Segerer, M., & Prince, W. (2007). Some factors affecting delayed ettringite formation in heat-cured mortars. *Cement and Concrete Research*, 37 (10), 1445–1452. doi:10.1016/j.cemconres.2007.07.004
- Espitia Mendoza, Ó. J., Mejía Melgarejo, Y. H., & Arguello Fuentes, H. (2016). Tomografía computarizada: proceso de adquisición, tecnología y estado actual. *Tecnura*, 20 (47), 119-135. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a10
- Ferdous, W., & Manalo, A. (2014). Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – Review of current practice. *Engineering Failure Analysis*, 44, 17-35. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.04.020
- Ferdous, W., Manalo, A., Van Erp, G., Aravinthan, T., Kaewunruen, S., & Remennikov, A. (2015). Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. *Composite Structures*, 134, 158-168. doi:10.1016/j.compstruct.2015.08.058
- Ferdous, W.; Manalo, A. (2014). Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – Review of current practice. *Engineering Failure Analysis*, 44, 17-35. doi:10.1016/j.engfailanal.2014.04.020
- Ferestade, I., Hosseini Tehrani, P., & Heidary, R. (2017). Fracture toughness estimation of ballast stone used in Iranian railway. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9 (5), 892-899. doi:10.1016/j.jrmge.2017.03.017
- Fernández Cánovas, M. (2013). *Hormigón* (Décima ed.). Madrid: Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos.
- Fitzgerald, J. (1991). Marine aerosols: a review. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 25 (3-4), 533–545. doi:10.1016/0960-1686(91)90050-H

- Fonseca, P., & Jennings, H. (2010). The effect of drying on early-age morphology of C–S–H as observed in environmental SEM. *Cement and Concrete Research*, *40* (12), 1673–1680. doi:10.1016/j.cemconres.2010.08.007
- Fontanella, L. (1999). Clifford en España. Un fotógrafo en la corte de Isabel II. 86. Madrid: El Viso.
- Frías Rojas, M., Sánchez de Rojas, M., & Rodríguez, C. (2015). Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Construction and Building Materials*, *74*, 37-48. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007
- Frías, M., García, R., Vigil de la Villa, R., & Villar, E. (2013). The effect of binary pozzolan mix on the mineralogical changes in the ternary activated paper sludge-fly ash-Ca(OH)₂ system. *Construction and Building Materials*, *38*, 48-53.
- Frías, M., Vigil de la Villa, R., Garcia, R., Sánchez de Rojas, M. I., & Juan Valdés, A. (2013). The Influence of Slate Waste Activation Conditions on Mineralogical Changes and Pozzolanic Behavior. *Journal of American Ceramic Society*, *96* (7), 2276–2282. doi:10.1111/jace.12387
- Frías, M., Vigil, R., García, R., de Soto, I., Medina, C., & Sánchez de Rojas, M. (2014). Scientific and technical aspects of blended cement matrices containing activated slate wastes. *Cement and Concrete Composite*, *48*, 19-25. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.01.002
- Frías, M.; Cabrera, J. (2000). Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin–cement pastes. *Cement and Concrete Research*, *30* (4), 561-569. doi:10.1016/S0008-8846(00)00203-9
- Frías, M.; Vigil, R.; García, R.; Rodríguez, O.; Goñi, S.; Vegas, I. (2012). Evolution of mineralogical phases produced during the pozzolanic reaction of different metakaolinite by-products: Influence of the activation process. *Applied Clay Science*, *56*, 48-52. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10261/45252>
- Fu, Y., Gu, P., Xie, P., & Beaudoin, J. (1995). A kinetic study of delayed ettringite formation in hydrated portland cement paste. *Cement and Concrete Research*, *25*, 63-70. doi:10.1016/0008-8846(94)00113-D
- Galetakis, M., & Soultana, A. (2016). A review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, *102*, 769-781. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204
- Gallucci, E., Zhang, X., & Scrivener, K. (2013). Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). *Cement and Concrete Research*, *53*, 185–195. doi:10.1016/j.cemconres.2013.06.008
- Gameiro, A., Santos Silva, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2012). Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica Acta*, *535*, 36-41.
- Gao, L., Liu, M., Wang, Z., Xie, J., & Jia, S. (2019). Correction of texture depth of porous asphalt pavement based on CT scanning technique. *Construction and Building Materials*, *200*, 514-520. doi:doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.154

- García, R., Vigil de la Villa, R., Frías, M., Rodríguez, O., Martínez-Ramírez, S., Fernández-Carrasco, L., . . . Villar-Cociña, E. (2015). Mineralogical study of calcined coal waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system. *Applied Clay Science*, *108*, 45-54. doi:10.1016/j.clay.2015.02.014
- Gartner, E., Maruyama, I., & Chen, J. (2017). A new model for the C-S-H phase formed during the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, *97*, 95-106. doi:10.1016/j.cemconres.2017.03.001
- Georgin, J., & Prud'homme, E. (2015). Hydration modelling of an ettringite-based binder. *Cement and Concrete Research*, *76*, 51–61. doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.009
- Giasuddin, H., Sanjayan, J., & Ranjith, P. (2013). Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions. *Fuel*, *107*, 34–39. doi:10.1016/j.fuel.2013.01.035
- Girodet, C., Chabannet, M., Bosé, J., & Pera, J. (1997). Influence of the type of cement in the freeze-thaw resistance of the mortar phase of concrete. En: Setzer, M.J., Aurberg, R. Editores, Proceedings of the international RILEM workshop on the frost resistance of concrete. (M. Setzer, R. Aurberg, & J. Keck, Edits.) 31-40.
- Gleize, P., Cyr, M., & Escadeillas, G. (2007). Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, *29* (2), 80-87. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.09.005
- Guerrero, A., Goñi, S., & Dolado, J. (2009). Belite Cements: Modifications of Calcium Silicate Hydrate (CSH) Gel by Alkaline Hydrothermal Activation. *ACI Material Journal*, *106* (2), 138-145.
- Guo, Y., Markine, V., Song, J., & Jing, G. (2018). Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles abrasion test and image analysis. *Construction and Building Materials*, *169*, 414-424. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.170
- Guoa, Y., Markinea, V., Zhanga, X., Qiangb, W., & Jingb, G. (2019). Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review. *Transportation Geotechnics*, *18*, 173–211. doi:10.1016/j.trgeo.2018.12.001
- Hacar, F. (2005). De la diligencia de Larra al AVE. *Cimbra*, *361*, 20-35.
- Hernández Samaniego, A., Fernández Carrasco, J., Carreras Suárez, F., & Olivé Davó, A. (1982). Cardeñosa. En *Serie Magna*, *1:50.000* (pág. 506). Madrid: IGME.
- Hesse, D., Tinjum, J., & Warren, B. (2014). Impact of increasing freight loads on rail substructure from fracking sand transport. *Transportation Geotechnics*, *1* (4), 241-256. doi:10.1016/j.trgeo.2014.06.003
- Hewlett, P. (2017). *Lea's Chemistry of cement and concrete* (5 ed.). London: PC. Hewlett.
- Horton, R. (2001). Factor ten emission reductions: The key to sustainable development and economic prosperity for the cement industry. En *Proceedings of 3rd CANMET/ACI sustainable development of cement and concrete* (págs. 128-135). Michigan, USA: V.M. Malhotra.
- ISO/TC 74. (s.f.). ISO/TC 74, Cementos y Cales.

- Jain, A., Gupta, R., & Chaudary, S. (2019). Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 221, 539-552. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.104
- Jawed, J., Skalny, J., & Young, F. (1983). *Structure and performance of cements*. London, U.K.: Barnes, Spoon Press.
- Jiménez Montoya, P., García, A., & Morán, F. (2000). *Hormigón armado* (15 ed.). Barcelona, España: Gustavo Gil.
- Jones, T. (2002). Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete. En *Structure and performance of cements* (Segunda ed., págs. 372-398). J. Bensted and P. Barnes.
- Juenger, M., & Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 71-80. doi:10.1016/j.cemconres.2015.03.018
- Kacimi, L., Simon-Masseron, A., Salem, S., Ghomari, A., & Derriche, Z. (2009). Synthesis of belite cement clinker of high hydraulic reactivity. *Cement and Concrete Research*, 39 (7), 559-565. doi:10.1016/j.cemconres.2009.02.004
- Kartini, K., Hamidah, M., Norhana, A., & Nur Hanani, A. (2014). Quarry dust fine powder as substitute for ordinary Portland cement in concrete mix. *Journal of Engineering Science and technology*, 9 (2), 191-205.
- Kheshgi, H., de Coninck, H., & Kessels, J. (2012). Carbon dioxide capture and storage: Seven years after the IPCC special report. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 17 (6), 563-567. doi:10.1007/s11027-012-9391-5
- Kim, J.; Park, B.S.; Inn Woo, S.; Choi, Y.T. (2020). Evaluation of ballasted-track condition based on aggregate-shape characterization. *Construction and Building Materials*, 232, 117082. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117082
- Köch, A., & Steinegger, H. (1960). A rapid test method for cements for their behavior under sulphate attack. *Zement Kalk Gips*, 7, 317-324.
- Koohmishi, M., & Palassi, M. (2018). Effect of gradation of aggregate and size of fouling materials on hydraulic conductivity of sand-fouled railway ballast. *Construction and Building Materials*, 167, 514-523. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.040
- Kumar Gupta, L., & Kumar Vyas, A. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*, 191, 155-164. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.09.203
- Kumar Khyaliya, R., Syed Ahmed Kabeer, K., & Kumar Vyas, A. (2017). Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste. *Construction and Building Materials*, 147, 598-607. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.199
- Kumar Sharma, N., Kumar, P., Kumar, S., Skariah Thomas, B., & Chandra Gupta, R. (2017). Properties of concrete containing polished granite waste as partial substitution of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 151, 155-164. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.081

- Kunther, W., & Lothenbach, B. (2018). Improved volume stability of mortar bars exposed to magnesium sulfate in the presence of bicarbonate ions. *Cement and Concrete Research*, *109*, 217–229. doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.022
- Lanas, J., Sirera, R., & Álvarez, J. (2005). Compositional changes in lime based mortars exposed to different environments. *Thermochimica Acta*, *429* (2), 219-226. doi:10.1016/j.tca.2005.03.015
- Laryea, S., Safari Baghsorkhi, M., Ferrellec, J., McDowell, G., & Chen, C. (2014). Comparison of performance of concrete and steel sleepers using experimental and discrete element methods. *Transportation Geotechnics*, *1* (4), 225–240. doi:10.1016/j.trgeo.2014.05.001
- Lee, H., Cody, R., Cody, A., & Spry, P. (2005). The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*, *35* (2), 332–343. doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.029
- Lee, Y., Yi, S., & Kim, J. (2006). Evaluation of a basic creep model with respect to autogenous shrinkage. *Cement and Concrete Research*, *36* (7), 1268-1278. doi:10.1016/j.cemconres.2006.02.011
- Li, L., Huang, Z., Tan, Y., Kwan, A., & Liu, F. (2018). Use of marble dust as paste replacement for recycling waste and improving durability and dimensional stability of mortar. *Construction and Building Materials*, *166*, 423-432. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.154
- Li, Y., Yu, H., Zheng, L., Wen, J., Wu, C., & Tan, Y. (2013). Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes. *Construction and Building Materials*, *38*, 1-7. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.016
- Li, Z., Afshinnia, K., & Rangaraju, P. (2016). Effect of alkali content of cement on properties of high performance cementitious mortar. *Construction and Building Materials*, *102*, 631-639. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.110
- Liu, L., Wang, X., Chen, H., & Wan, C. (2016). Microstructure-based modelling of drying shrinkage and microcracking of cement paste at high relative humidity. *Construction and Building Materials*, *126*, 410–425. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.066
- López Pita, A. (2002). Contribución a la modernización de la mecánica vía-vehículo en líneas de Alta Velocidad. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*. Cádiz.
- López Pita, A., & Teixeira, P. (2003). Very high speed running and track design. *Railway Engineering 2003 Congress*. Londres.
- Lozano Carbayo, P. (2004). *El libro del tren*. Editorial Oberon, Grupo Anaya.
- Malhotra, V.M. (1999). Making concrete greener with fly ash. *Concrete International*, *21* (5), 61-66.
- Malhotra, V.M.; Metha, P.K. (2002). *High performance, high volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties*. Ottawa, Canada: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development.

- Mármol, I., Ballester, P., Cerro, S., Monrós, G., Morales, J., & Sánchez, L. (2010). Use of granite-sludge wastes for the production of coloured cement based mortars. *Cement and Concrete Composites*, 32 (8), 617-622. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.06.003
- Martin Cabo, S. (2017). *La Red Española de Alta Velocidad: Estructuración, Expansión e Impactos Derivados. Tesis Doctoral*. Madrid: Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid.
- Martín Parra, L., Martínez Salanova, I., & Moreno, F. (2008). Ávila de los Caballeros. En *serie Magna, 1:50.000* (pág. 531). Madrid: IGME.
- Martín Serrano, A., del Olmo Sanz, A., Bellido Mulas, F., Fuster, J., Navidad, M., de Pablo Macía, J., & Villaseca, C. (1991). El Espinar, IGME. En *serie Magna 1:50.000* (Vol. 507). Madrid.
- Martín, J. (2011). El tren del tiempo. *Público*, 143.
- Mashaly, A., Shalaby, B., & Rashwan, M. (2018). Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 169, 800-818. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046
- Massazza, F. (2002). *Properties and applications of natural pozzolans* (Second ed.). J. Bensted and P. Barnes.
- Medina, G., Sáez del Bosque, I., Frías Rojas, M., Sánchez de Rojas, M., & Medina, C. (2017). Granite quarry waste as a future ecoefficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. *Journal of Cleaner Production*, 148, 467-476. doi:10.1016/j.jclepro.2017.02.048
- Medina, G., Sáez del Bosque, I., Frías, M., Sánchez de Rojas, M., & Medina, C. (2017). Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system. Influence of the activation process. *Applied Clay Science*, 135, 362-371. doi:10.1016/j.clay.2016.10.018
- Mehta, P., Pirtz, D., & Polivka, M. (1979). Properties of alite cements. *Cement and Concrete Research*, 9 (4), 439-450. doi:10.1016/0008-8846(79)90041-3
- Midgley, H., & Bhaskara Rao, P. (1978). Formation of stratlingite, 2CaO.SiO₂.Al₂O₃.8H₂O, in relation to the hydration of high alumina cement. *Cement and Concrete Research*, 8 (2), 169-172. doi:10.1016/0008-8846(78)90005-4
- Miller, S., John, V., Pacca, S., & Horvath, A. (2018). *Carbón dioxide reduction potential in global cement industry by 2050*. Construction and Building Materials. doi:10.1016/j.cemconres.2017.08.026
- Mingarro, F. (1996). *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Tesis Doctoral*. Madrid, España: Univ. Complutense Madrid.
- Mora Peris, P. (2007). Reciclado y valorización energética en el cemento. *CEMCO XVII edición. S12: Reciclado de materiales en el sector de la construcción* (págs. 51-61). Madrid: CSIC.
- Moreira Cravo, R. (2008). *Contribución de los Ferrocarriles de Elevadas Prestaciones en las Rutas Ibéricas de las Redes Transeuropeas de Transporte. Tesis Doctoral*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

- Mosaferi, M., Dianat, I., Shaker Khatibi, M., Nemati Mansour, S., Fahiminia, M., & Asl Hashemi, A. (2014). Review of environmental aspects and waste management of stone cutting and fabrication industries. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *16*, 721-730.
- Mosaferi, M., Fahiminia, M., & Nabizadeh, R. (2007). Environmental management of the solid wastes of stone cutting industries: a case study of Qom Province. *Journal of Environmental Science and Technology*, *9* (2 (33)), 65–73.
- Munsell Soil Color Charts*. (2009). USA.
- Mvelase, G., Gräbe, P., & Anochie-Boateng, J. (2017). The use of laser technology to investigate the effect of railway ballast roundness on shear strength. *Transportation Geotechnics*, *11*, 97–106. doi:10.1016/j.trgeo.2017.05.003
- Nasserdine, K., Mimi, Z., Bevan, B., & Elian, B. (2009). Environmental management of the stone cutting industry. *Journal of Environmental Management*, *90* (1), 466–470. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.11.004>
- Noor E-Khuda, S., Albermani, F., & Veidt, M. (2017). Flexural strength of weathered granites: Influence of freeze and thaw cycles. *Construction and Building Materials*, *156*, 891-901. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.049
- Oficemen Homepage*. (2019). Recuperado el 25 de 8 de 2019, de Agrupación de fabricantes de cementos de España: www.oficemen.com
- Ojeda García - Escudero, J.M. (2000). *Optimización de la Interoperabilidad del Ferrocarril Español en el Marco Europeo, Tesis Doctoral*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniero Industriales.
- Osio-Norgaard, J., Gevaudan, J., & Srubar, W. (2018). A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete. *Construction and Building Materials*, *186*, 191–206. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.119
- Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, L., Krzywinski, K., & Rozanska, M. (2020). Potential use of granite waste sourced from rock processing for the application as coarse aggregate in high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, *238*, 117-794. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117794
- Ouhadi, V., & Yong, R. (2008). Ettringite formation and behaviour in clayey soils. *Applied Clay Science*, *42* (1-2), 258–265. doi:10.1016/j.clay.2008.01.009
- Özgür Bezgin, N. (2015). Climate effects on the shoulder width measurements of prestressed concrete high speed railway sleepers of ballasted tracks. *Measurement*, *75*, 201-209. doi:10.1016/j.measurement.2015.07.057
- Özkök, E., Davis, A., & Aydilek, A. (2019). Ettringite and monosulfate formation to reduce alkalinity in reactions of alum-based water treatment residual with steel slag. *Waste Management*, *84*, 1–12. doi:10.1016/j.wasman.2018.11.018
- Pacheco Torgal, F., & Castro-Gomes, J. (2006). Influence of physical and geometrical properties of granite and limestone aggregates on the durability of a C20/25 strength class concrete. *Construction and Building Materials*, *20* (10), 1079-1088. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.01.063

- Pengfei, S., & Xingping, L. (2019). Influence of CT scanning parameters on rock and soil images. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 58, 642-650. doi:10.1016/j.jvcir.2018.12.014
- Penttala, V. (2006). Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze-thaw loads. *Cement and Concrete Research*, 36 (5), 921-928. doi:10.1016/j.cemconres.2005.10.007
- Pera, J., Ambroise, J., & Chabannet, M. (2001). Transformation of Wastes into Complementary Cementing Materials. *Materials Science*, 199, 459-476. doi:10.14359/10529
- Périard, Y., Gumiere, S. J., Long, B., Rousseau, A. N., & Caron, J. (2016). Use of X-Ray CT scan to characterize the evolution of the hydraulic properties of a soil under drainage conditions. *Geoderma*, 279, 22-30. doi:10.1016/j.geoderma.2016.05.020
- Philips, C. (2001). *Sustainability Business and Brand. Current Status Report*. Recuperado el 4 de Febrero de 2020, de //www.philips.es/
- Piasta, W., Góra, J., & Turkiewicz, T. (2016). Properties and durability of coarse igneous rock aggregates and concretes. *Construction and Building Materials*, 126, 119-129. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.022
- Poon, C., Kou, S., & Lam, L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20, 858-865. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001
- Pourchez, J., Valdivieso, F., Grosseau, P., Guyonnet, R., & Guilhot, B. (2006). Kinetic modelling of the thermal decomposition of ettringite into metaettringite. *Cement and Concrete Research*, 36 (11), 2054–2060. doi:10.1016/j.cemconres.2006.06.007
- Preston, J. (2009). *The case of high-speed rail: a review of recent evidence*. London: RAC Founfation. Obtenido de <http://worldcat.org/issn/09091386>
- Puebla, J. (2000). La geotecnia de las líneas de alta velocidad. *Simposio sobre geotecnia de las infraestructuras de transporte. Barcelona: Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica*.
- Puertas, F. (2001). Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de los cementos con adiciones (I). Madrid: CEMCO XV edición, S1: conglomerantes hidráulicos: naturaleza, comportamiento y limitaciones. CESIC.
- Puig Monraveta, J. (2007). Utilización de residuos y subproductos industriales en el cemento: tendencias europeas. Madrid: CEMCO XVII Edición S12. Reciclado de materiales en el sector de la construcción. CSIC.
- Qian, X., & Li, Z. (2001). The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 31 (11), 1607-1611. doi:10.1016/S0008-8846(01)00612-3
- Qian, Y., Boler, H., Moaveni, M., Tutumluer, E., Hashash, Y., & Ghaboussi, J. (2014). Characterizing ballast degradation through Los Angeles abrasion test and image analysis. *Transportation Research Board*, 2448 (1), 142-151. doi:10.3141/2448-17

- Qinhua, J., Min, D., & Sufen, H. (1996). Investigation of deteriorated concrete railway ties. *Cement and Concrete Research*, 26 (7), 999-1006. doi:10.1016/0008-8846(96)00086-5
- R.A. , Y. (1993). The Rietveld Method. *International Union of Crystallography, Oxford University Press*.
- Ramírez Giraldo, J., Arboleda Clavijo, C., & McCollough, C. (2008). Tomografía computarizada por rayos X: fundamentos y actualidad. *Revista de Ingeniería Biomédica*, 2 (4), 25-32.
- Ramos, T., Matos, A., Schmidt, B., Rio, J., & Sousa-Coutinho, J. (2013). Granitic quarry sludge waste in mortar: Effect on strength and durability. *Construction and Building Materials*, 47, 1001-1009. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.098
- Reinhardt, H., & Grosse, C. (2004). Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 18 (3), 145–154. doi:10.1016/j.conbuildmat.2003.10.002
- Richardson, I. (2000). The nature of the hydration products in hardened cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 22 (2), 97-113. doi:10.1016/S0958-9465(99)00036-0
- Richardson, I.G. (1999). The nature of C-S-H in hardened cements. *Cement and Concrete Research*, 1131-1147. doi:10.1016/S0008-8846(99)00168-4
- Richardson, I.G. (2008). The calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 38 (2), 137–158. doi:10.1016/j.cemconres.2007.11.005
- Rodríguez, O. (2008). *Valorización de un residuo industrial procedente de la industria papelera como material puzolánico. Tesis Doctoral*. Madrid: UAM. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10486/1842>
- Roy, D., Arjunan, P., & Silsbee, M. (2001). Effect of silica fume, metakaolin and low-calcium fly ash on chemicals resistance of concrete. *Cement and Concrete Research*, 31 (12), 1809-1813. doi:10.1016/S0008-8846(01)00548-8
- Sabir, B., Wild, S., & Khabit, J. (1996). On the workability and strength development of metakaolin concrete. In: Proceedings of the international conference concrete in the service of Mankind. *Environmental Enhancement and protection*, 651-661.
- Sabir, B.B. (1997). Mechanical properties and frost resistance of silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites*, 19 (4), 285-294. doi:10.1016/S0958-9465(97)00020-6
- Sabir, B.B.; Wild, S.; Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23 (6), 441-454. doi:10.1016/S0958-9465(00)00092-5
- Sadeghi, J., Motieyan-Najar, M., Zakeri, J., Yousefi, B., & Mollazadeh, M. (2018). Improvement of railway ballast maintenance approach, incorporating ballast geometry and fouling conditions. *Journal of Applied Geophysics*, 151, 263–273. doi:10.1016/j.jappgeo.2018.02.020
- Sadeghi, J.; Motieyan Najar, M.E.; Zakeri, J.A. (2019). Development of railway ballast geometry index using automated measurement system. *Measurement*, 138, 132–142. doi:10.1016/j.measurement.2019.01.092

- Sánchez de Rojas, M., & Frías, M. (1986). La espectrometría de emisión con fuente de plasma de acoplamiento inductivo. *Materiales de Construcción*, 202, 31-48. Obtenido de <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Sanfeliu, C. (2010). *Interés de la Alta Velocidad en Australia*. Tesina d' Especialitat. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals y Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Schueremans, L., Van Gemert, D., & Giessler, S. (2007). Chloride penetration in RC-structures in marine environment – Long term assessment of a preventive hydrophobic treatment. *Construction and Building Materials*, 21 (6), 1238–1249.
- Sern, L., Cheah, C., & Ramli, M. (2019). The setting behavior, mechanical properties and drying shrinkage of ternary blended concrete containing granite quarry dust and processed steel slag aggregate. *Construction and Building Materials*, 215, 447–461. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.162
- Shimada, Y., & Young, J. (2004). Thermal stability of ettringite in alkaline solutions at 80 °C. *Cement and Concrete Research*, 34 (12), 2261–2268. doi:10.1016/j.cemconres.2004.04.008
- Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2017). An investigation on effect of partial replacement of cement by waste marble slurry. *Construction and Building Materials*, 134, 471-488. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.155
- Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2019). Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. *Construction and Building Materials*, 198, 553-569. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.005
- Skarżyński, Ł., & Tejchman, J. (2019). Experimental investigations of damage evolution in concrete during bending by continuous micro-CT scanning. *Materials Characterization*, 154, 40-52. doi:10.1016/j.matchar.2019.05.034
- Sol-Sánchez, M.; D'Angelo, G. (2017). Review of the design and maintenance technologies used to decelerate the deterioration of ballasted railway tracks. *Construction and Building Materials*, 157, 402–415. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.007
- Soria Santamaría, F. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los Materiales de Construcción. En *Materiales de construcción* (Vol. 33, págs. 190-191, 69-84).
- Sorrentino, F. (2008). Lime saturation factor: new insight. Cement Wapno Beton.
- Souri, A., Kazemi-Kamyab, H., Snellings, R., Naghizadeh, R., Golestani-Fard, F., & Scrivener, K. (2015). Pozzolanic activity of mechanochemically and thermally activated kaolins in cement. *Cement and Concrete Research*, 77, 47–59. doi:10.1016/j.cemconres.2015.04.017
- Stark, J. (2011). Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 666-678. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.028
- Sun, Y., Chen, C., & Nimbalkar, S. (2017). Identification of ballast grading for rail track. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9 (5), 945-954. doi:10.1016/j.jrmge.2017.04.006

- Sun, Y.; Zheng, C. (2017). Breakage and shape analysis of ballast aggregates with different size distributions. *Particuology*, 35, 84–92. doi:10.1016/j.partic.2017.02.004
- Talero, R. (2001). *Patología químico-física del hormigón. Influencia del cemento en la misma. SI: Conglomerantes hidráulicos: naturaleza, comportamiento y limitaciones, Capítulo 9*. Madrid: CEMCO XV edición. CSIC.
- Tarifa, M., Zhang, X., Riz, G., & Poveda, E. (2016). Full-scale fatigue tests of precast reinforced concrete slabs for railway tracks. *Engineering Structures*, 100, 610–621. doi:10.1016/j.engstruct.2015.06.016
- Taylor, H. (1997). *Cement Chemistry*. London, U.K.: Academic Press.
- Teixeira Marvila, M.; Alexandre, J.; R. G. de Azevedo, A.; Bernabé Zanelato, E. (2019). Evaluation of the use of marble waste in hydrated lime cement mortar based. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21, 1250-1261. doi:10.1007/s10163-019-00878-6
- Thomas, C., Setién, J., Polanco, J., Alaejos, P., & Sánchez de Juan, M. (2013). Durability of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 1054–1065. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.106
- Tian, W., & Han, N. (2018). Pore characteristics (>0.1mm) of non-air entrained concrete destroyed by freeze-thaw cycles based on CT scanning and 3D printing. *Cold Regions Science and Technology*, 151, 314-322. doi:10.1016/j.coldregions.2018.03.027
- Torres, P., Fernandes, H., Olhero, S., & Ferreira, J. (2009). Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 29 (1), 23-30. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.045
- Torres, V. (2005). ¿AVE o ferrocarril? *Boletín CF+S, Ciudades para un futuro más*, 12-23. Obtenido de <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n28/avtor>
- Ubalde Claver, L. (2017). *La Auscultación y los Trabajos de Vía en la Línea del AVE Madrid - Sevilla: Análisis de la Experiencia y Deducción de Nuevos Criterios de Mantenimiento*. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña.
- UIC 719-R. (s.f.). UIC 719-R. Obras de tierra y capas de asiento ferroviarias. Capas de asiento ferroviarias. NAV 2.1.0.1.
- UNE 103-204. (1993). *Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico*. Dirección General de Política Tecnológica, por la que se publica la relación de normas UNE aprobadas durante el mes de septiembre de 1993.
- UNE-EN 1097-2. (2010). Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 13450. (2003). Áridos para balasto. Asociación española de normalización y certificación.

- UNE-EN 13674-1:2012+A1:2018. (s.f.). Aplicaciones ferroviarias. Vía. Carriles. Parte 1: Carriles Vignole de masa mayor o igual a 46 kg/m. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 15273-1:2013+A1:2017. (s.f.). Aplicaciones ferroviarias. Gálibos. Parte 1: Generalidades. Reglas comunes para infraestructuras y material rodante. Asociación española de normalización y certificación.
- UNE-EN 196-1. (2018). Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 196-3. (2017). Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 196-5. (2011). Métodos de ensayo de cementos. Parte 5: Ensayo de puzolanidad para los cementos puzolánicos. Asociación española de normalización y certificación.
- UNE-EN 197-1. (2011). Cemento. Parte 1. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. Asociación española de normalización y certificación.
- Vantsi, O., & Karki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2, 62-72. doi:10.1007/s10163-013-0170-5
- Vardhan, K., Goyal, S., Siddique, R., & Singh, M. (2015). Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement building materials. *Construction and Building Materials*, 96, 615-621. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071
- Vigil de la Villa, R., Frías, M., Sánchez de Rojas, M., Vegas, I., & García, R. (2007). Mineralogical and morphological changes of calcined paper sludge at different temperatures and retention in furnace. *Applied Clay Science*, 36, 279-286. doi:10.1016/j.clay.2006.10.001
- Vuk, T., Tinta, V., Gabrovsek, R., & Kaucic, V. (2001). Limestone filled pozzolanic cement. *Cement and Concrete Research*, 30 (11), 135-139. doi:10.1016/S0008-8846(00)00402-6
- Wais y San Martín, F. (1974). *Historia de los ferrocarriles españoles*. Madrid: Nacional Madrid.
- Wild, S., & Khabit, J. (1997). Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 27 (1), 137-146. doi:10.1016/S0008-8846(96)00187-1
- Wu, H. (2014). Re-examination of cement hydration: Sol-gel process. *Advances in Cement Research*, 26 (5), 292-301. doi:10.1680/adcr.13.00032
- www.pandrol.com/es/product/e-clip/. (s.f.). Recuperado el 4 de 4 de 2018
- Xu, A.; Sarkar, S.L.; Nilsson, L.O. (1993). Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar. *Materials and Structures*, 26 (7), 414-424. doi:10.1007/BF02472942
- Yagüe García, S., & Gonzalez Gaya, C. (2019). Reusing Discarded Ballast Waste in Ecological Cements. *Materials*, 12 (23), 3887. doi:10.3390/ma12233887

- Yagüe García, S., & Gonzalez Gaya, C. (2020). Durability analysis of pozzolanic cements containing recycled track ballast: Sustainability under extreme environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 242. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.117999
- Yagüe, S., González Gaya, C., & Claver Gil, J. (2019). An approach to the eco-efficient railway using ballast and ecological cement. *8th MESIC Manufacturing Society Engineering International Conference*, (pág. 123). Madrid.
- Young, R. (1993). The Rietveld Method (International Union of Crystallography on Crystallography). 312.
- Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., & Wirquin, E. (2004). Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 34 (10), 1927-1932. doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.025
- Zhang, L., Qian, X., Yu, C., Fang, M., Qian, K., & Lai, J. (2019). Influence of evaporation rate on pore size distribution, water loss, and early-age drying shrinkage of cement paste after the initial setting. *Construction and Building Materials*, 226, 299–306. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.143
- Zhang, T., Gao, P., Wei, J., & Yu, Q. (2013). Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 134-143.
- Zhou, H., Abdelhady, A., Liang, X., Wang, H., & Yang, B. (2019). Experimental investigation on the effect of pore characteristics on clogging risk of pervious concrete based on CT scanning. *Construction and Building Materials*, 212, 130-139. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.310