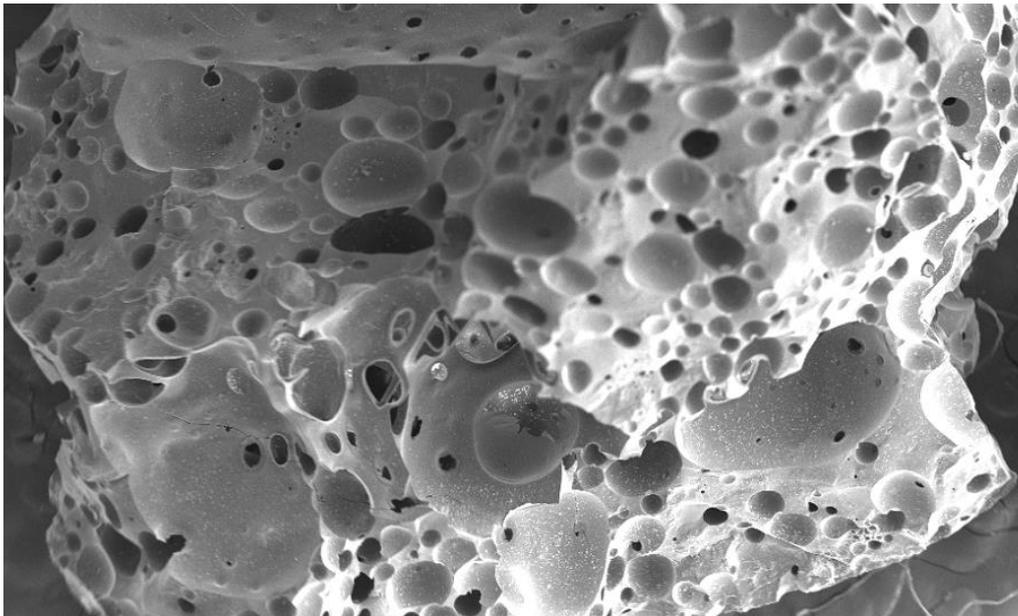




UNIVERSIDADE DA CORUÑA
Escola Universitaria de Arquitectura Técnica

Cenizas de fondo de carbón: problemática, caracterización y uso como árido en morteros y hormigones



Autor: Rey Bouzón, Emilio José
Directores: Pérez Ordóñez, Juan Luis
González Fonteboa, Belén

Septiembre 2017
Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Tecnologías de la Edificación Sostenible

Este proyecto se enmarca dentro del proyecto de investigación:

“Valorización de cenizas de central térmica mediante el desarrollo de materiales y productos para la eco-construcción de obra civil y edificación” financiado por la Axencia Galega de Innovación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Financiado por el Programa CONECTA PEME y desarrollado por el consorcio de empresas Extraco Construcción e Proxectos S.A. , Galaicontrol S.L. , Prefhorvisa S.L. e Indutec Ingenieros, en colaboración con el grupo de construcción gCons de la Universidade da Coruña y el grupo de investigación de Ingeniería Civil y Energías Marinas de la Universidade de Santiago

Agradecementos

Para comezar, teño que agradecer os meus titores Juan Luis e Belén por todo o traballo realizado iluminándome o camiño deste TFM e tamén a todas as empresas do consorcio ao que pertence este proxecto de investigación polo seu apoio e axuda.

Seguirei con todos os membros do grupo de investigación gCons por facerme sentir parte do equipo dende o primeiro momento, por toda a súa axuda e polos coñecementos e experiencias compartidas.

Agradecemento especial a Rober, o meu mando intermedio no laboratorio e pilar fundamental deste TFM; a María por cantar comigo Camela durante as longas xornadas de amasado; á toda a tropa dos tan necesarios cafés de media mañá (necesarios pola cafeína e pola compañía) e ás empresas con ensaios necesarios para onte que fixeron que o laboratorio en Agosto non fora un lugar solitario, triste e aburrido.

Tamén importantes son os amigos, os coñecidos e os descoñecidos que parei pola rúa durante estes 7 meses por me aguantar historietas de laboratorio cada semana.

Non podo rematar sen dar o máis sincero e caloroso dos agradecementos á miña familia polo seu apoio incondicional, polos seus ánimos e por todo ese cariño.

GRAZAS A TODOS!!

Resumen

El sector de la construcción es uno de los que genera mayor contaminación a nivel mundial, tanto residuos sólidos como emisiones de CO₂. En concreto, la fabricación de cemento y la de hormigones es una de las actividades con mayor impacto dentro del sector.

En este proyecto se busca desarrollar hormigones mas sostenibles y con menor impacto en el entorno, reutilizando las cenizas de fondo de central térmica que hasta ahora eran un residuo y reduciendo la extracción de nuevas áridos evitando el impacto ambiental que esto conlleva.

Tras recopilar toda la información posible sobre el uso de las cenizas de fondo y en concreto experiencias previas en su uso en hormigones se decidió realizar un mortero de revestimiento y un hormigón para prefabricados. Planificando realizar otros hormigones en siguientes fases del proyecto de investigación.

Para conocer la aptitud de las cenizas de fondo disponibles como sustitutos del árido natural se hizo una extensa campaña de caracterización del material. Una vez realizada se pudieron ajustar las dosificaciones de los morteros y el hormigón.

El programa experimental se desarrolla pensando en analizar las características más importantes y las que más pueden variar con la sustitución del árido natural.

Estos morteros y hormigones para prefabricados desarrollados tienen un comportamiento muy similar, afectando de la misma manera el uso de cenizas de fondo. Las densidades y resistencias bajan, subiendo a su vez la porosidad, contenido de aire y absorción entre otras características.

El análisis de estos resultados muestra la viabilidad del uso de las cenizas de fondo como sustituto del árido natural en algunas de las aplicaciones de los morteros y hormigones para prefabricados.

Palabras clave

Ceniza de fondo, Ceniza de carbón, Mortero, Hormigón, Eco-hormigón.

Resumo

O sector da construción é un dos que xera maior contaminación a nivel mundial, tanto residuos sólidos como emisións de CO₂. En concreto, a fabricación de cemento e a de formigóns é unha das actividades con maior impacto dentro do sector.

Neste proxecto búscase desenvolver formigóns mais sustentables e con menor impacto na contorna, reutilizando as cinzas de fondo de central térmica que ata agora eran un residuo e reducindo a extracción de novos áridos evitando o impacto ambiental que isto leva.

Tras recompilar toda a información posible sobre o uso das cinzas de fondo e en concreto experiencias previas no seu uso en formigóns decidiuse realizar un morteiro de revestimento e un formigón para prefabricados. Planificando realizar outros formigóns en seguintes fases do proxecto de investigación.

Para coñecer a aptitude das cinzas de fondo dispoñibles como substitutos do árido natural fíxose unha extensa campaña de caracterización do material. Unha vez realizada puidéronse axustar as dosificacións dos morteiros e do formigón.

O programa experimental desenvólvese pensando en analizar as características máis importantes e as que máis poden variar coa substitución do árido natural.

Estes morteiros e formigóns para prefabricados desenvolvidos teñen un comportamento moi similar, afectando da mesma maneira o uso de cinzas de fondo. As densidades e resistencias baixan, subindo á súa vez a porosidade, contido de aire e absorción entre outras características.

A análise destes resultados mostra a viabilidade do uso das cinzas de fondo como substituto do árido natural nalgunhas das aplicacións dos morteiros e formigóns para prefabricados.

Palabras chave

Cinza de fondo, Cinza de carbón, Morteiro, Formigón, Eco-formigón.

Abstract

Construction and civil engineering are known to be responsible for a high pollution percentage worldwide, generating solid wastes and CO₂ emissions. Actually, cement production and concrete manufacturing are responsible for most of the environmental footprint in this field.

This project aims to develop more sustainable concretes with a lower environmental impact. To carry out this task, bottom ashes recovered from thermal power stations are going to be introduced in different concrete mixes, reducing the need of new aggregates and allowing the re-utilization of a product that, by the moment, was considered a waste.

A comprehensive literature review was performed to collect as much information as possible about bottom ashes, focusing the efforts on finding previous experiences about its applicability in concrete manufacturing. Once analyzed the state of art, it was decided to center this study in concrete and mortars suitable for precast applications. Although it was found that bottom ashes are also compatible with other concrete types, these applications will be studied in next phases of this research.

One of the main goals of this project was to study the feasibility of replacing part of the natural aggregates of a concrete mix by bottom ashes. For this reason, an exhaustive experimental characterization was executed, allowing the researchers to design and fine-adjust different dosages of concrete and mortars. Once this task was accomplished, the most relevant features of the designed mortars and concretes were analyzed, with a remarkable emphasis on those properties more susceptible to be affected by the aggregate replacement.

The mortars and concretes studied in this research work presented a very similar behaviour, the presence of bottom ashes affected their properties in an analogous way. While the density and the strength showed a noticeable decrease, the porosity, air content and water absorption experienced an increment. The further analyses concluded that the replacement of natural aggregates by bottom ashes is possible in some precast applications.

Keywords

Coal Bottom Ash, Mortar, Concrete, Eco-concrete.

Índice de Contenido

Índice de Figuras	10
Índice de Tablas	14
Introducción	16
1 Producción de cenizas y problemática	20
1.1 Centrales termoeléctricas	21
1.1.1 Centrales termoeléctricas de ciclo combinado	21
1.1.2 Centrales termoeléctricas convencionales	22
1.1.3 Las centrales termoeléctricas de carbón en España	23
1.2 Producción de cenizas	26
1.3 Problemática	28
2 Estado del Arte: las cenizas de fondo	31
2.1 Caracterización física	32
2.1.1 Tamaño	32
2.1.2 Forma y textura.....	33
2.1.3 Estructura del poro.....	35
2.2 Caracterización química	35
2.2.1 Composición química.....	35
2.2.2 Difracción de rayos-X (XRD).....	36
2.3 Caracterización mecánica	38
2.3.1 Absorción de agua	38
2.3.2 Cinética de la absorción y desorción de agua	38
2.3.3 Eficiencia en el curado interno	39
2.4 Materiales de base cemento con cenizas de central térmica.....	39
2.4.1 Dosificación. Consideración de las cenizas.....	40
2.4.2 Estado fresco.....	41
2.4.3 Composición y microestructura	42
2.3.4 Propiedades mecánicas.....	46
2.3.5 Conductividad térmica.....	49
2.3.6 Durabilidad.....	49
3 Caracterización de materiales y dosificaciones	53
3.1 Materiales.....	54
3.1.1 Agua	54
3.1.2 Cemento	54
3.1.3 Áridos naturales.....	55
3.1.4 Cenizas de fondo.....	59

3.2 Dosificaciones	69
3.2.1 Morteros de revestimiento.....	69
3.2.2 Hormigón para prefabricados.....	72
4 Programa experimental.....	75
4.1 Morteros de revestimiento	76
4.1.1 Estado fresco.....	76
4.1.2 Estado endurecido.....	82
4.1.3 Tabla resumen.....	86
4.2 Hormigón para prefabricados	87
4.2.1 Estado fresco.....	87
4.2.2 Estado endurecido.....	88
4.2.3 Tabla resumen.....	90
5 Resultados y conclusiones.....	91
5.1 Morteros de revestimiento	92
5.1.1 Estado fresco.....	92
5.1.2 Estado endurecido	95
5.2 Hormigón para prefabricados	104
5.2.1 Estado fresco.....	104
5.2.2 Estado endurecido.....	105
5.3 Conclusiones.....	107
6 Futuras líneas de investigación.....	108
6.1 Hormigón autocompactante.....	109
6.1.1 Materiales	109
6.1.2 Dosificación	110
6.1.3 Plan de ensayos	112
6.2 Hormigón autosellante.....	117
7 Bibliografía.....	118
8 Anejos.....	125
8.1 Anejo 1: Método propio para determinar la absorción y la densidad en cenizas de fondo de central térmica.....	126
8.1.1 Procedimiento de la UNE-EN 1097-6.....	126
8.1.2 Procedimiento de la NY 703-19 E	128
8.1.3 Procedimiento propio	129
8.2 Anejo 2: fotografías	131
8.2.1 Recepción, acopio de materiales y caracterización.....	131
8.2.2 Fotos SEM (Microscopio de barrido electrónico)	134

8.2.3 Amasadas y curado de probetas.....	139
8.2.4 Ensayos en fresco y ensayos en endurecido	142

Índice de Figuras

Figura 1: Emisiones por actividad en millones de toneladas equivalentes de CO ₂ en España [2]	17
Figura 2: Emisiones de CO ₂ asociadas a la generación anual nacional [3]	18
Figura 3: Central termoeléctrica de ciclo combinado [13]	22
Figura 4: Central termoeléctrica convencional de carbón [14]	22
Figura 5: Estructura de generación anual de energía eléctrica peninsular durante 2015 [3]	24
Figura 6: Centrales termoeléctricas españolas que emplean carbon como combustible[16]	25
Figura 7: Tipos de carbón[18]	26
Figura 8: Producción e importación de carbón en Europa[19]	27
Figura 9: Proporciones de los distintos residuos sólidos producidos de las centrales termoeléctricas de carbón en la UE 15 en el año 2010, elaboración propia, datos [21].	28
Figura 10: Producción y proporción de valorización de las cenizas de fondo en España, elaboración propia, datos extraídos de [20]	29
Figura 11: Usos a nivel mundial de las cenizas de alto horno, elaboración propia a partir de [23] Datos extraídos de [21], [30], [31] y [32]	30
Figura 12: Usos a nivel europeo de las cenizas de alto horno, elaboración propia, datos extraídos de [20]	30
Figura 13: Distintas fracciones de ceniza de fondo [34]	32
Figura 14: Distintas fracciones de ceniza [35]	33
Figura 15: Diferentes fracciones de ceniza de fondo [36]	33
Figura 16: Imágenes de microscopio de barrido electrónico de las cenizas [41]	33
Figura 17: Imágenes de microscopio de barrido electrónico de las cenizas [42]	34
Figura 18: Imágenes de microscopio de barrido electrónico de las cenizas usadas en el artículo [34]	34
Figura 19: Izquierda árido natural, derecha ceniza de fondo [43]	34
Figura 20: Difracción de rayos-X de ceniza [53]	36
Figura 21: Difracción de rayos-X de ceniza [33]	36
Figura 22: Difracción de rayos-X de ceniza [54]	37
Figura 23: Difracción de rayos-X de ceniza [55]	37
Figura 24: Difracción de rayos-X de ceniza [56]	38
Figura 25: Porosidad de partículas de ceniza de fondo en el hormigón [66]	42
Figura 26: Partículas de ceniza rodeadas parcial y totalmente por pasta de cemento [57]	42
Figura 27: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón de control y del hormigón con un ratio de sustitución del 25% [64]	43
Figura 28: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón con un ratio de sustitución del 50% y del hormigón con un ratio de sustitución del 75% [64]	43
Figura 29: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón con un ratio de sustitución del 100% [64]	43
Figura 30: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón de control, del hormigón con un ratio de sustitución del 50% y del hormigón con un ratio de sustitución del 100%, a la izquierda 28 días a la derecha 90 días [64]	44

Figura 31: Fotografías de la porosidad del hormigón con distintas fracciones de ceniza, a la izquierda 0-2 y 8-11 y a la derecha 2-8 y 8-11[42].....	45
Figura 32: Áridos utilizados.....	56
Figura 33: Curvas granulométricas de los áridos naturales.....	57
Figura 34: Distintas fracciones de la ceniza de fondo de la central 1 20-4, 4-2, 2-1 y 1-0	59
Figura 35: Distintas fracciones de la ceniza de fondo de la central 2 16-4, 2,5-2, 1-0,063 y 0.....	60
Figura 36: Curvas granulométricas de la ceniza de la central 1	61
Figura 37: Curvas granulométricas de la ceniza de la central 2	62
Figura 38: Difracción de rayos X (DRX) de una muestra de ceniza de la central 1.	66
Figura 39: Difracción de rayos X (DRX) de una muestra de ceniza de la central 2.	67
Figura 40: Fotografías SEM (microscopio de barrido electrónico) de la ceniza de la central 1.....	68
Figura 41: Fotografías SEM (microscopio de barrido electrónico) de la ceniza de la central 2.....	69
Figura 42: Curvas granulométricas de ceniza y áridos para mortero 1.....	70
Figura 43: Curvas granulométricas de ceniza y áridos para mortero 2.....	72
Figura 44: Curvas granulométricas de ceniza y áridos para hormigón de prefabricados	73
Figura 45: Molde de mortero lleno, pesándose en báscula para calcular la densidad fresca.....	76
Figura 46: Máquina para ensayo minislump.....	77
Figura 47: Torta tras ensayo minislump y ser medida	77
Figura 48: Aparato para ensayo de penetración de pistón	78
Figura 49: Ensayo de penetración de pistón y detalle del resultado.....	78
Figura 50: Recipiente lleno de mortero para ensayo de exudación	79
Figura 51: Aparato para realizar el ensayo de contenido de aire en morteros.....	79
Figura 52: Resultado del ensayo de contenido en aire.....	80
Figura 53: Proceso del ensayo de tiempo abierto de trabajabilidad	81
Figura 54: Recipiente aislado para realizar el ensayo	81
Figura 55: Probeta de mortero, con sensor de temperatura y tarjeta de toma de datos, tras finalizar el ensayo	82
Figura 56: Probetas en agua hirviendo durante el ensayo de absorción	83
Figura 57: Dispositivo de ensayo a compresión y probeta ensayada	83
Figura 58: Dispositivo de ensayo a flexión y probeta ensayada	84
Figura 59: Aparato para ensayo de resistividad	84
Figura 60: Medición de probeta para ensayo de retracción.....	85
Figura 61: Probetas de mortero durante el ensayo de capilaridad	86
Figura 62: Molde de probetas cúbicas listo para ser pesado.....	87
Figura 63: Moldes antes y después de vibrado.....	88
Figura 64: Probeta cúbica de hormigón ensayada a compresión	89
Figura 65: Dispositivo para realizar ensayo a tracción de probetas cilíndricas.....	89
Figura 66: Máquina para ensayo de permeabilidad al agua del hormigón.....	90
Figura 67: Resultados de los ensayos de consistencia de morteros con ceniza de la central 1.....	92
Figura 68: Resultados de los ensayos de consistencia de morteros con ceniza de la central 2.....	93

Figura 69: Densidad en fresco y contenido en aire de morteros con ceniza de la central 1 y 2.....	94
Figura 70: Temperatura de fraguado de morteros con cenizas de la central 1	95
Figura 71: Absorción y porosidad de morteros con ceniza de la central 1	96
Figura 72: Absorción y porosidad de morteros con ceniza de la central 2.....	96
Figura 73: Resistencias a compresión de morteros con cenizas de la central 1	97
Figura 74: Resistencias a compresión de morteros con cenizas de la central 2.....	97
Figura 75: Resistencias a flexión de morteros con cenizas de la central 1	98
Figura 76: Resistencias a flexión de morteros con cenizas de la central 2.....	99
Figura 77: Evolución de resistividad en morteros con ceniza de la central 1	100
Figura 78: Evolución de resistividad en morteros con ceniza de la central 2.....	100
Figura 79: Evolución de la retracción en los morteros de con ceniza de la central 1 .	101
Figura 80: Evolución de la pérdida de peso en los morteros de con ceniza de la central 1	101
Figura 81: Evolución de la retracción en los morteros de con ceniza de la central 2 .	102
Figura 82: Evolución de la pérdida de peso en los morteros de con ceniza de la central 2	102
Figura 83: Resultados de ascensión capilar.....	103
Figura 84: Compactación con peso y sin peso tras vibrado del hormigón de prefabricados con ceniza de la central 1	105
Figura 85: Gráfica de resistencias a compresión de hormigones de prefabricados con cenizas de la central 1	106
Figura 86: Curvas granulométricas de la mezcla de los áridos del hormigón autocompactante y de la mezcla con ceniza	111
Figura 87: Reómetro.....	113
Figura 88: pesado de picnómetro una vez eliminado todo el aire.....	127
Figura 89: realización de cono con ceniza de la central 1	128
Figura 90: Recipiente y equipo para realizar vacío	129
Figura 91: Motor y controlador de equipo de vacío	129
Figura 92: Proceso de secado superficial de cenizas con papel	130
Figura 93: Recepción de cenizas de fondo de la central 1	131
Figura 94: Acopio de áridos en el CITEEC.....	131
Figura 95: Acopio de cenizas y cementos en el CITEEC	131
Figura 96: Tamizado de arenas para granulometrías.....	131
Figura 97: Tamizadora de gran tamaño para cortar en fracciones la ceniza	132
Figura 98: Secado de árido para ensayo norma UNE-EN 1097-6.....	132
Figura 99: Realización de cono para ensayo de la norma UNE-EN 1097-6	132
Figura 100: Eliminación de aire en la muestra dentro del picnómetro	132
Figura 101: Distintos momentos en los ensayos para la caracterización de cenizas.	133
Figura 102: Microscopio de barrido electrónico.....	134
Figura 103: SEM Ceniza de central 1 fracción 4-25 mm	134
Figura 104: SEM Ceniza de central 1 fracción 1-2,5 mm	135
Figura 105: SEM Ceniza de central 1 fracción 0,125-1 mm	136
Figura 106: SEM Ceniza de central 1 fracción 0,063-0,25 mm	136
Figura 107: SEM Ceniza de central 2 fracción 4-25 mm	137
Figura 108: SEM Ceniza de central 2 fracción 2-2,5 mm	138
Figura 109: SEM Ceniza de central 1 fracción 0,063-1,25 mm	138
Figura 110: Amasado de los morteros	139

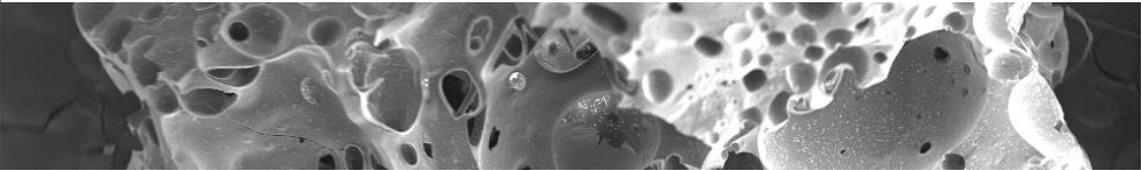
Figura 111: Amasado de los hormigones para prefabricados	139
Figura 112: Desmoldado de probetas	139
Figura 113: Curado de las probetas de hormigón para prefabricados en la cámara climática.....	139
Figura 114: Curado de probetas de mortero en la cámara climática	140
Figura 115: Probetas de mortero con ceniza de la central 1 ordenadas de mayor a menor cantidad de cenizas	140
Figura 116: Probetas de mortero con ceniza de la central 2 ordenadas de menor a mayor contenido de ceniza	140
Figura 117: Probetas de hormigón para prefabricados ordenadas de menor a mayor contenido de ceniza	141
Figura 118: Tarado y llenado de moldes de mortero	142
Figura 119: Ensayos de trabajabilidad en morteros	142
Figura 120: Llenad de moldes con hormigón de prefabricados	142
Figura 121: Probetas de mortero para ensayo de capilaridad	142
Figura 122: Ensayo a compresión de probetas cúbicas de hormigón para prefabricados	143

Índice de Tablas

Tabla 1: Composición química de distintas cenizas	35
Tabla 2: Absorción a 24 h de distintas cenizas de fondo usadas en artículos	38
Tabla 3: Características del cemento para morteros (elaboración propia a partir de ficha técnica del producto).	54
Tabla 4: Características del cemento para hormigones de prefabricados (elaboración propia a partir de ficha técnica del producto).	55
Tabla 5: Áridos utilizados en cada hormigón y moertero	56
Tabla 6: Granulometrías de los áridos naturales.....	57
Tabla 7: Densidades y absorciones de áridos naturales	58
Tabla 8: Granulometrías de las cenizas de la central 1	61
Tabla 9: Granulometrías de las cenizas de central 2.....	62
Tabla 10: Densidad y absorción de la ceniza de la central 1	63
Tabla 11: Densidad y absorción de la ceniza de la central 2.....	63
Tabla 12: Características relevantes de la ceniza de la central 1	64
Tabla 13: Características relevantes de la ceniza de la central 2.....	64
Tabla 14: Resultados del BET de la ceniza de la central 1	65
Tabla 15: Resultados del BET de la ceniza de la central 2	65
Tabla 16: Principales componentes químicos de la ceniza de la central 1	66
Tabla 17: Principales componentes químicos de la ceniza de la central 2	66
Tabla 18: Granulometrías para la dosificación del mortero 1	70
Tabla 19: Dosificación del mortero con ceniza de central 1.....	71
Tabla 20: Granulometrías para la dosificación del mortero 2	71
Tabla 21: Dosificación del mortero con ceniza de central 1.....	72
Tabla 22: Granulometrías para hormigón de prefabricados	73
Tabla 23: Dosificación para hormigón de prefabricados.....	74
Tabla 24: Programa de ensayos de morteros	86
Tabla 25: Programa de ensayos de hormigones prefabricados	90
Tabla 26: Tiempo abierto de trabajabilidad del mortero con ceniza de la central 1	93
Tabla 27: Exudación de los morteros con ceniza de la central 1 y 2	94
Tabla 28: Densidad aparente y densidad seca de los morteros con ceniza de la central 1 y la central 2	95
Tabla 29: Variaciones de la resistencia a compresión entre morteros de control y morteros con ceniza de la central 1 y la central 2	98
Tabla 30: Variaciones de resistencia a flexión entre morteros de control y morteros con ceniza de la central 1 y la central 2	99
Tabla 31: Densidades en fresco del hormigón para prefabricados con cenizas de la central 1.....	104
Tabla 32: Densidad de los hormigones de prefabricados con cenizas de la central 1.....	105
Tabla 33: Características del cemento para hormigones autocompactante (elaboración propia a partir de ficha técnica del producto).	109
Tabla 34: Áridos utilizados para fabricar el hormigón autocompactante.....	110
Tabla 35: Características aditivo	110
Tabla 36: Granulometrías áridos para hormigón autocompactante y mezcla equivalente con ceniza de la central 1	111
Tabla 37: Dosificación para hormigones autocompactantes y los distintos ratios de sustitución.....	112

Tabla 38: Plan de ensayos y edades para el hormigón autocompactante..... 116

Introducción



Introducción

En pleno siglo XXI y cuando las consecuencias del cambio climático empiezan a ser cada vez más perceptibles, reducir el impacto de las actividades humanas en el medio es una prioridad a nivel mundial, como demuestra el Acuerdo de París [1]. Con el objetivo de mantener la temperatura media global por debajo de la media preindustrial más 2°C, los esfuerzos se centrarán principalmente en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los GEI se miden en equivalentes de CO₂, el gas más asociado al efecto invernadero y las tres actividades que más generan son la producción de energía eléctrica con combustibles fósiles en centrales termoeléctricas, los procesos industriales y la construcción y el sector del transporte[2].

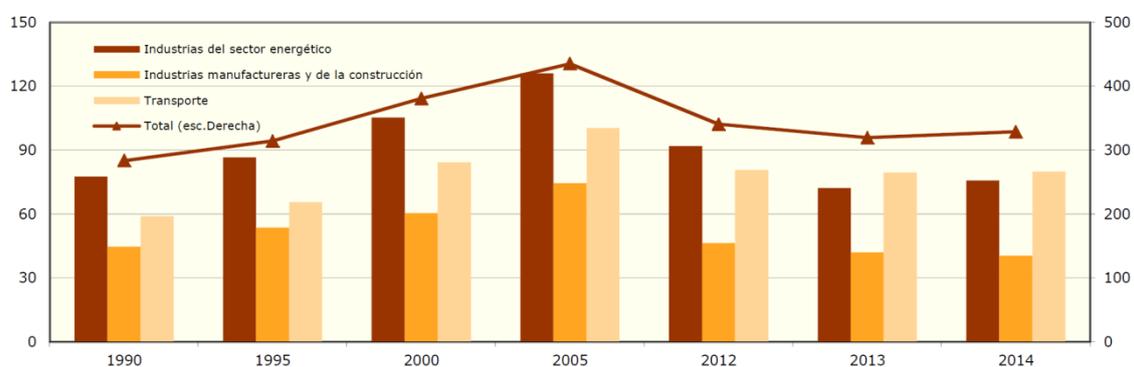


Figura 1: Emisiones por actividad en millones de toneladas equivalentes de CO₂ en España [2]

La producción y consumo de energía eléctrica va ligada al desarrollo de un país y a su PIB. A mayor desarrollo industrial, mayor PIB y mayor consumo de energía eléctrica. La generación de energía eléctrica según su origen se divide en renovables y no renovables. En el año 2016 en España, el 38,9% de la energía eléctrica producida provenía de fuentes renovables y el restante 61,1% de fuentes no renovables [3].

Las fuentes de energía más usadas para la generación eléctrica en España son la nuclear, la eólica y el carbón. En años lluviosos la hidráulica puede estar entre las tres más usadas. De estas tres la que tiene mayor impacto en cuanto a la producción de GEI y residuos es el carbón, generando en 2016 el 56% de las emisiones de CO₂ asociadas a la generación eléctrica [3]. Por cada MW generado en una central térmica de carbón se consumen entre 15 y 18,75 toneladas de carbón y se generan residuos por un valor entre un 25 y un 60% del total del carbón quemado [4].

	2015	2016
Carbón	50.149.589	35.600.353
Fuel + Gas ⁽¹⁾	5.257.557	5.491.481
Ciclo combinado ⁽²⁾	12.154.925	12.068.683
Térmica renovable ⁽³⁾	0	0
Térmica no renovable/Cogeneración y resto/Cogeneración ⁽³⁾	9.416.313	9.542.298
Residuos	791.558	813.665
Emisiones (tCO₂)	77.769.941	63.516.480
Factor de emisión de CO₂ (tCO₂/MWh)	0,290	0,242

⁽¹⁾ En el sistema eléctrico de Baleares y Canarias se incluye la generación con grupos auxiliares.

⁽²⁾ Incluye funcionamiento en ciclo abierto. En el sistema eléctrico de Canarias utiliza gasoil como combustible principal.

⁽³⁾ Incluye residuos hasta el 31/12/2014.

Figura 2: Emisiones de CO₂ asociadas a la generación anual nacional [3]

Estos residuos son las cenizas de alto horno, que a su vez pueden dividirse en cenizas volantes y en cenizas de fondo. La proporción de cenizas volantes generadas está entre el 65-95% y el restante 5-35% son las cenizas de fondo [5]. En Europa en el año 2010 e generaron en torno a 100 millones de toneladas de cenizas de alto horno [6].

Por otra parte el impacto del sector de la construcción se debe a la extracción de materiales, fabricación, transporte, colocación... En el año 2005, en España, la construcción consumía el 40% de los materiales, generaba el 40% de los residuos y consumía el 40% de la energía primaria [7] la relación entre construcción y generación de CO₂ es evidente, así como su impacto ambiental.

Un ejemplo es la fabricación de cemento, la producción de una tonelada genera 0,8 toneladas de CO₂ [8]. Solo la fabricación mundial de cemento genera el 7% del CO₂ emitido a la atmósfera por los humanos [9] y esta consume un total de 2500TWh/año, además esta no deja de aumentar. Desde el año 1998 al año 2012 se pasó de una producción mundial de 1500 a 3400 millones de toneladas [10].

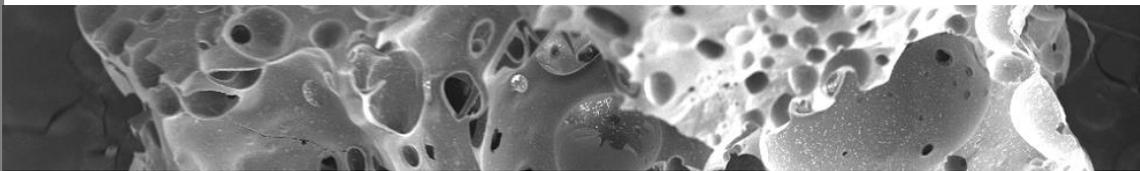
Dada esta problemática el uso mas eficiente de materiales, así como su reutilización y nuevos usos son claves en la construcción del futuro, haciéndola así compatible con los objetivos medioambientales.

Estas dos situaciones hacen que buscar una nueva vida a las cenizas de centrales térmicas de carbón como material para la elaboración de cementos y hormigones sea una muy buena solución. Lo que antes era un residuo se reutiliza, evitando así la extracción de nuevas materias primas reduciendo el impacto ambiental y el CO₂ emitido a la atmósfera.

Las cenizas volantes son un material con gran uso en construcción e ingeniería, siendo un componente importante en algunos tipos de cementos. Por otra parte las cenizas de fondo no suelen ser aprovechadas y habitualmente son almacenadas en vertederos. En este TFM enmarcado dentro del proyecto de investigación "Valorización de cenizas de central térmica mediante el desarrollo de materiales y

productos para la eco-construcción de obra civil y edificación” financiado por la Axencia Galega de Innovación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Se busca desarrollar hormigones con sustitución parcial del árido fino por cenizas de fondo dando una nueva vida a este subproducto generado en la combustión de carbón en centrales termoeléctricas.

1 Producción de cenizas y problemática



1 Producción de cenizas y problemática

Las cenizas de fondo son un subproducto de la combustión del carbón y otras fuentes de energía como algunos tipos de biomasa en las centrales termoeléctricas.

1.1 Centrales termoeléctricas

Una central termoeléctrica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de combustibles fósiles, tales como: petróleo y sus derivados, gas natural, carbón y biomasa. Existen otro tipo de centrales termoeléctricas, las nucleares, que usan el uranio como combustible.

En general, una central típica (se excluyen las nucleares) se compone de: una caldera donde se produce la combustión, una turbina o motor de calor que transforma la energía térmica proveniente de la combustión en energía mecánica y un generador que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Según el tipo de combustión estas a su vez se pueden dividir en dos tipos, centrales termoeléctricas de ciclo convencional o de ciclo combinado [11].

1.1.1 Centrales termoeléctricas de ciclo combinado

Una central de ciclo combinado es aquella en la que la energía térmica del gas usado como combustible es transformado en electricidad mediante el acoplamiento de dos ciclos termodinámicos individuales, uno de alta temperatura y otro de baja. Estas centrales combinan dos ciclos termodinámicos, el de Brayton y el de Rankine, el primero trabaja con gas y el segundo con agua-vapor. La unión termodinámica de estos ciclos conduce a la obtención de un rendimiento global superior a los ciclos por separado [12].

Las centrales de ciclo combinado consisten en una instalación de turbina de gas (ciclo Brayton) tras la cual, los gases de escape pasan por un generador de vapor que es utilizado para generar electricidad (ciclo Rankine). La utilización de ciclos de turbinas de gas-vapor deriva del buen acoplamiento térmico entre ambas tecnologías.

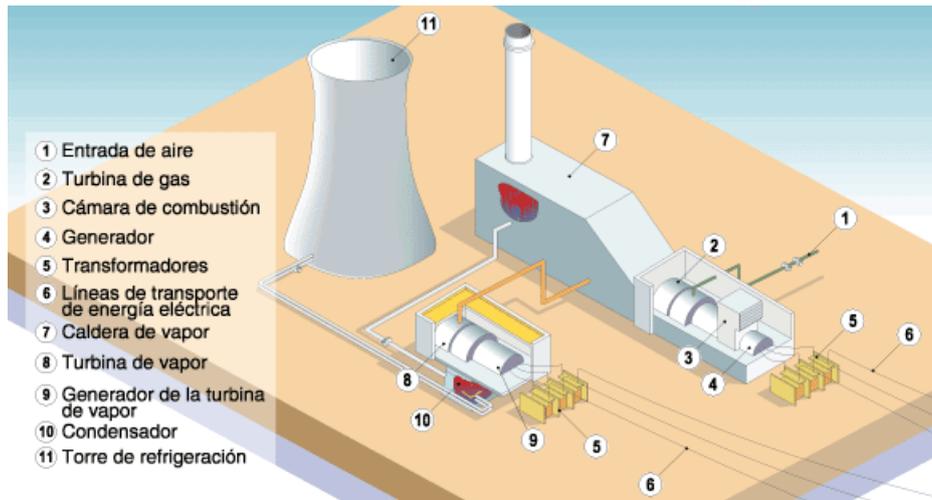


Figura 3: Central termoeléctrica de ciclo combinado [13]

Este tipo de centrales termoeléctricas prácticamente no generan residuos sólidos y por tanto no generan cenizas de alto horno.

1.1.2 Centrales termoeléctricas convencionales

Una central térmica convencional es aquella en la que las máquinas motrices son turbinas de vapor que se usan para accionar los generadores eléctricos, estas a su vez pueden mover elementos auxiliares como el bombeo de agua o ventiladores. El vapor necesario para el funcionamiento de las máquinas motrices se produce quemando combustible en las calderas. El combustible más habituales es el carbón [12].

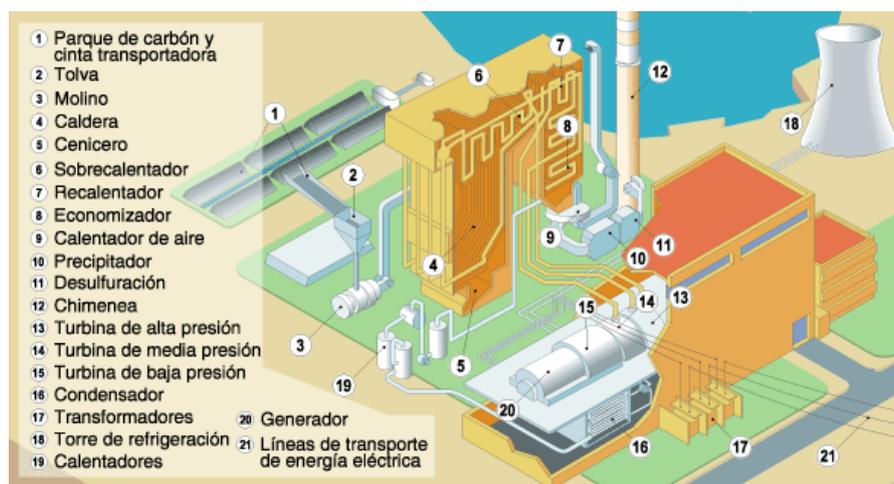


Figura 4: Central termoeléctrica convencional de carbón [14]

El funcionamiento se basa en el ciclo de Rankine, un proceso en el cual la energía contenida en un combustible se transforma por combustión en energía calorífica, esta energía es absorbida por un fluido que al expandirse y pasar por una turbina la transforma en energía mecánica. Por último es transformada en energía eléctrica a través de un generador.

Este tipo de plantas en las que se quema carbón son las que generan las cenizas de alto horno como residuo fruto de la combustión. El 65-95% de estas cenizas son las volantes, que se recogen por captación electrostática o por captación mecánica de los polvos presentes en los gases de combustión. La parte restante 5-35%, son las cenizas de fondo [5], estas se acumulan en la parte inferior de la caldera y están formadas por partículas más gruesas que las cenizas volantes lo que hace que se depositen por acción de la gravedad [11].

En este tipo de central existen distintas técnicas de combustión del carbón [15]:

- Caldera de fondo seco: se caracteriza por la descarga de ceniza seca al situarse las temperaturas de combustión entre 900°C y 1200°C. Esta técnica se utiliza principalmente para la combustión de hullas, antracitas y lignitos.
- Caldera de fondo húmedo: las temperaturas típicas de combustión son superiores a 1400°C lo que conlleva una descarga fluida de la escoria. En este tipo de calderas se utilizan especialmente hullas y antracitas. Los residuos producidos son distintos a los de las calderas de fondo seco.
- Combustión en lecho fluidificado: también conocida como gasificación en ciclo combinado (GICC). La combustión de carbón no es directa sino que se queman unos gases obtenidos al inyectar oxígeno en él. La central funciona como una de ciclo combinado con una turbina de vapor y otra para los gases de combustión. Con esta técnica disminuyen las emisiones de CO₂, además de la inyección de aire en etapas, se consigue con la adición de caliza y bajas temperaturas de combustión que oscilan entre 750°C y 950°C.
- Parrilla: los combustibles sólidos se colocan en masa sobre una parrilla fija o en movimiento lento. Las temperaturas de combustión oscilan entre 1000°C y 1300°C.

1.1.3 Las centrales termoeléctricas de carbón en España

Las centrales eléctricas de carbón representan el 10,3% de la potencia eléctrica instalada en España en el año 2015 y el 14,5% de la potencia instalada de energías no renovables [3]. Aunque dentro del conjunto este porcentaje no es muy alto, sí que representa una parte importante de la energía generada.

El arranque y parado de una central de este tipo es laborioso y requiere tiempo, por lo que su producción se usa para cubrir la demanda base, al igual que las nucleares. Los

aumentos de demanda puntuales se suelen cubrir con centrales hidráulicas, ciclo combinado... dado que su puesta en marcha y parada es más rápido y sencillo. Este factor, ligado a que tanto la eólica como la hidráulica dependen de factores climáticos para su funcionamiento hacen que el carbón tenga un peso del 20,3% del total de la generación de energía eléctrica en España en el año 2015, solo por detrás de la nuclear [3].

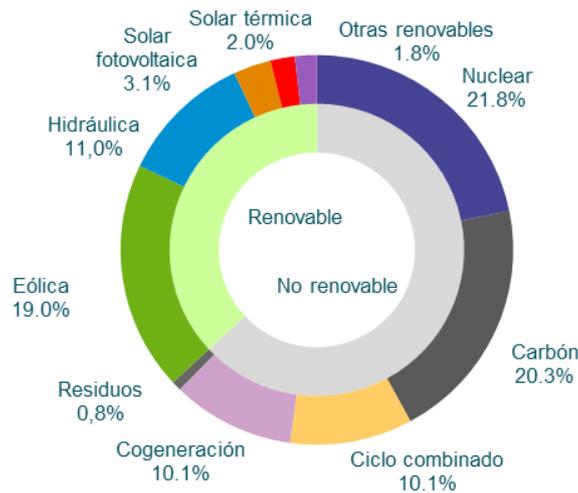


Figura 5: Estructura de generación anual de energía eléctrica peninsular durante 2015 [3]

En función del tipo de carbón disponible se aplican las distintas técnicas de combustión en las centrales termoeléctricas. Esta disponibilidad generalmente es geográfica, ya sea por un yacimiento cercano o la posibilidad de importarlo gracias a un puerto, buenas comunicaciones por vía férrea...

En España la práctica totalidad de las centrales son de lecho seco, siendo la más grande de ellas la de As Pontes (A Coruña). Existe también una central GICC como es la de Puertollano (Ciudad Real), este sistema más avanzado le permite ser más eficiente y menos contaminante, además de generar otro tipo de residuos.



Figura 6: Centrales termoeléctricas españolas que emplean carbon como combustible[16]

El carbón, materia prima de la combustión en este tipo de centrales, es un mineral que se formó durante el periodo carbonífero hace 365 millones de años. En este periodo grandes extensiones del planeta estaban cubiertas de vegetación en pantanos que al morir y quedar sumergida comenzaba su descomposición. Durante este proceso pierde los átomos de hidrógeno y oxígeno, dejando un depósito con un elevado porcentaje de carbono, originando las turberas, que son la primera etapa de formación del carbón. Con el paso del tiempo la arena y lodo del agua fueron acumulándose sobre algunas turberas, debido esta presión, movimientos de la corteza terrestre y en ocasiones el calor volcánico, estas se comprimieron y endurecieron hasta formar los distintos tipos de carbón [17]:

- Turba: es la primera etapa de formación, tiene bajo contenido en carbono y alto índice de humedad
- Lignito: es carbón de formación reciente ya que sus estratos se encuentran entre el cretácico y el terciario. Tiene una capacidad calorífica inferior a la de los otros carbones y gran contenido de agua. Es frecuente en yacimientos de Europa del este y España.
- Carbón bituminoso o hulla: se forma a partir de turba en condiciones alcalinas y anaerobias, tiene un contenido de carbono superior al lignito y menor contenido de agua y materia volátil.
- Antracita: se formó a finales del periodo carbonífero como consecuencia de movimientos tectónicos y terremotos en la corteza terrestre. Contiene aproximadamente un 87% de carbono un 10% de cenizas y un 3% de materia volátil. Aunque su inflamación es mas dificultosa que la de los otros carbones libera una gran cantidad de energía al quemarse.



Figura 7: Tipos de carbón[18]

En España existen yacimientos de hulla y antracita en Asturias, Castilla y León, Ciudad Real y Córdoba y de lignito en Teruel. La tendencia es a que estas explotaciones se vayan agotando y cerrando, actualmente la mayoría del carbón es importado [19].

1.2 Producción de cenizas

La producción de cenizas, como resulta evidente, va ligada al consumo de carbón. En Europa se consumieron en el año 2015 un total de 690 millones de toneladas [19]. Este consumo se va reduciendo año tras año, debido principalmente a las energías renovables y la concienciación sobre el cambio climático. En el año 2014 se consumieron 712 millones, en 2013 737 millones y en 2012 un total de 772 millones de toneladas [19]. La tendencia es clara hacia una disminución del uso del carbón en Europa.

Coal in Europe 2015

lignite production, hard coal production & imports

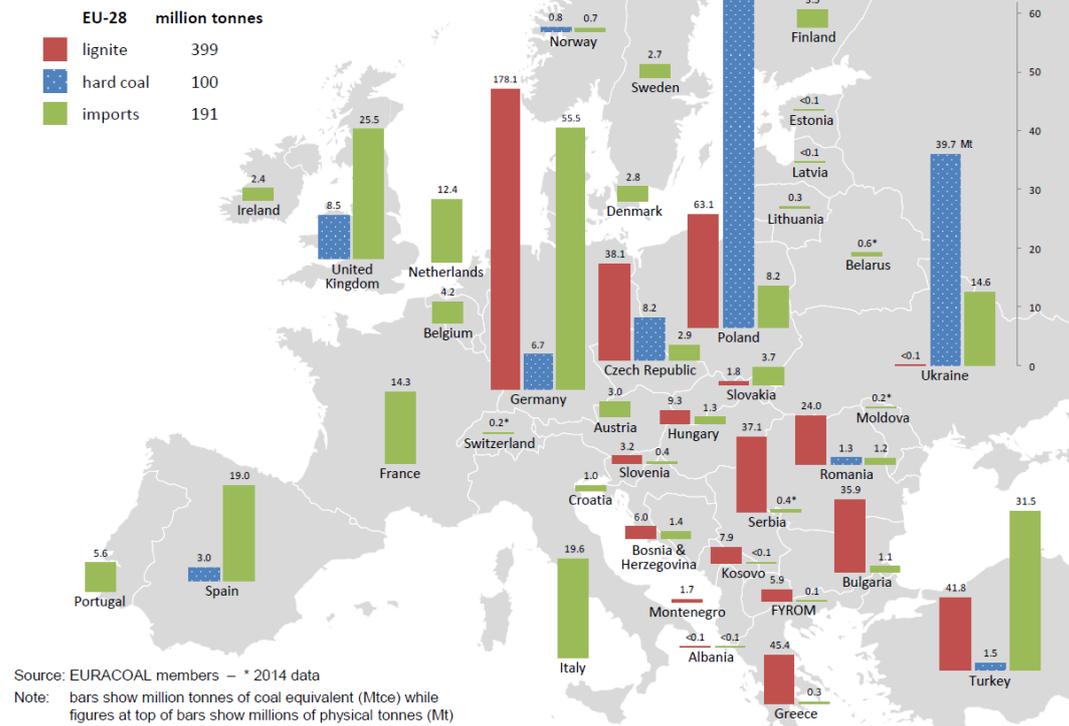


Figura 8: Producción e importación de carbón en Europa[19]

El total de peso de cenizas producidas es aproximadamente el 30% de la masa de carbón consumida [20]. En Europa desde 2012 hasta 2015 se generaron aproximadamente un total de 873,3 millones de toneladas de cenizas de alto horno y en concreto en España 25,7 millones de toneladas [19].

Las cenizas producidas están formadas principalmente por, cenizas volantes (fly ash), cenizas de fondo (bottom ash) y yeso que se produce por la desulfuración en húmedo del carbón.

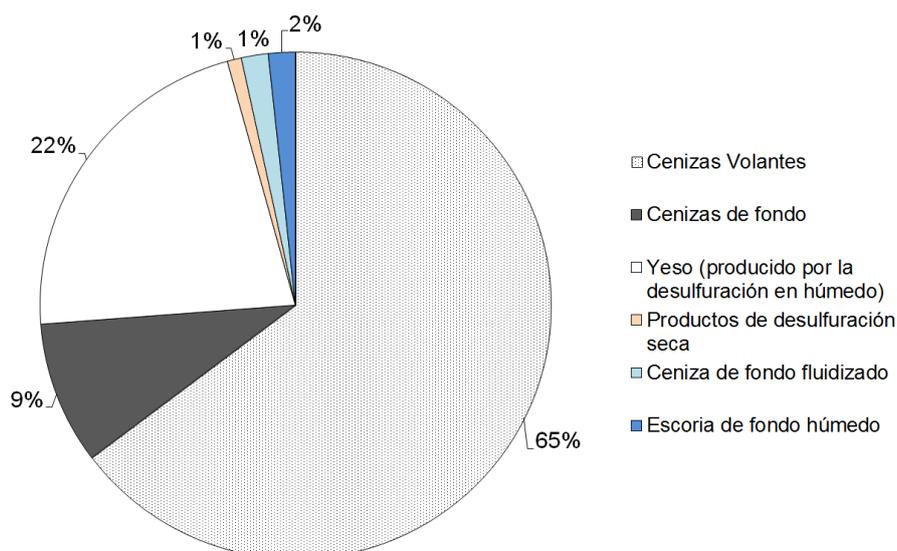


Figura 9: Proporciones de los distintos residuos sólidos producidos de las centrales termoeléctricas de carbón en la UE 15 en el año 2010, elaboración propia, datos [21].

Las cenizas volantes se definen según la norma UNE-EN 450-1 [22] como partículas pulverulentas, principalmente esféricas y cristalinas, que se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas similares al polvo de los gases generados en la combustión de carbón. Están compuestas principalmente por SiO_2 y Al_2O_3 y tienen propiedades puzolánicas. Las cenizas de fondo son las que se acumulan en la parte inferior de la caldera y presentan un tamaño más grueso. La proporción en la producción de ambos tipos de cenizas suele ser del 80% para las volantes frente al 20% para las de fondo. La composición química de ambos tipos de cenizas es semejante.

1.3 Problemática

Las cenizas volantes no son actualmente un problema, son valorizadas en su gran mayoría y apreciadas por sus propiedades para la elaboración de ciertos productos y su uso en algunas aplicaciones como por ejemplo en ingeniería civil para explanadas y terraplenes, adición en cementos, tratamiento de aguas y aguas residuales, frenos de automóviles, agricultura...[23]

El uso más extendido de las cenizas volantes es como adición activa al cemento de hormigones y morteros desde hace unos cincuenta años y existe una gran cantidad de estudios que avalan su buen funcionamiento. De hecho, disponemos de varias normativas nacionales e internacionales que las incluyen. El cemento adicionado con cenizas volantes se designa según la norma UNE-EN 197-1 [24] como CEMII/A-V, CEMII/B-V, CEMII/A-W o CEMII/B-W según su contenido en cenizas volantes (A o B) y si éstas son silíceas (V) o calcáreas (W).

Las cenizas de fondo, sin embargo, no gozan de tanta popularidad y a menudo siguen depositándose en vertedero. La acumulación de las cenizas de fondo en vertederos provoca varios impactos negativos sobre el medio ambiente, pudiendo llegar a afectar a la salud de los seres humanos. Aunque no son consideradas residuos peligrosos, si contienen trazas de metales pesados y otras sustancias como Cr, Ni, Hg y As [25]. Las centrales térmicas por sus necesidades de refrigeración suelen colocarse al lado de masas de agua, como ríos o la costa. Existe un estudio chino que liga las cenizas de fondo acumuladas de una central al aumento de contaminación río abajo por metales pesados como el Cr, Cd y el Pd, superando estos incluso los límites de las normas de calidad locales [26]. Esto sucede porque expuestas a la intemperie las cenizas de fondo son lavadas por la lluvia produciéndose filtraciones al terreno por lixiviación que contaminan las aguas y dañan los ecosistemas.

Existen, no obstante, experiencias de valorización de este residuo como material cementante (previamente molido) [27], o bien sin tratamiento previo para su uso como árido en morteros [28], hormigones y bloques de hormigón [29]. Otros usos de los que existen estudios son la elaboración de productos de vidrio y cerámica, recuperación de suelos y agricultura [23]. Esto demuestra que existe un gran interés por encontrar posibilidades de valorización tanto a las cenizas volantes como a las de fondo.

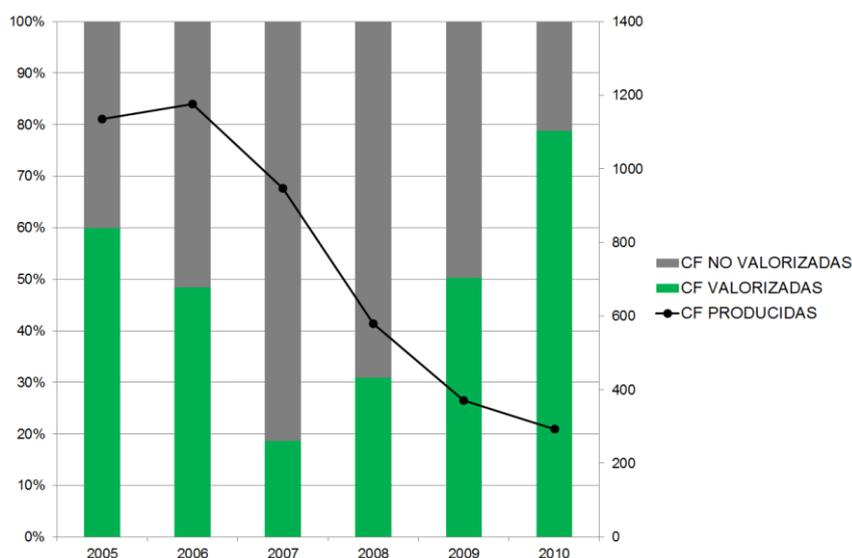


Figura 10: Producción y proporción de valorización de las cenizas de fondo en España, elaboración propia, datos extraídos de [20]

La cantidad de cenizas valorizadas en España es aproximadamente de 200.000 toneladas cada año de 2007 a 2010, pero como su producción es menor, el porcentaje de cenizas valorizadas respecto a las no valorizadas aumenta. En los años 2005 y 2006 con una producción de cenizas de fondo mucho mayor fueron valorizadas en torno a 600.000 toneladas [20] debido a la gran cantidad de obra civil y de edificación ejecutada esos años donde radica su mayor consumo.

Las características físico-químicas de las cenizas de fondo generadas en las centrales termoeléctricas han cambiado a lo largo del tiempo debido a la incorporación de diferentes tipos de carbón, algunos de ellos importados, y a los avances tecnológicos

implementados en las propias centrales. La existencia de estas variaciones exige la correcta caracterización física, química y mecánica de las cenizas antes de su utilización como subproducto.

A nivel mundial los distintos usos y su importancia respecto al total para las cenizas de alto horno pueden resumirse en este gráfico.

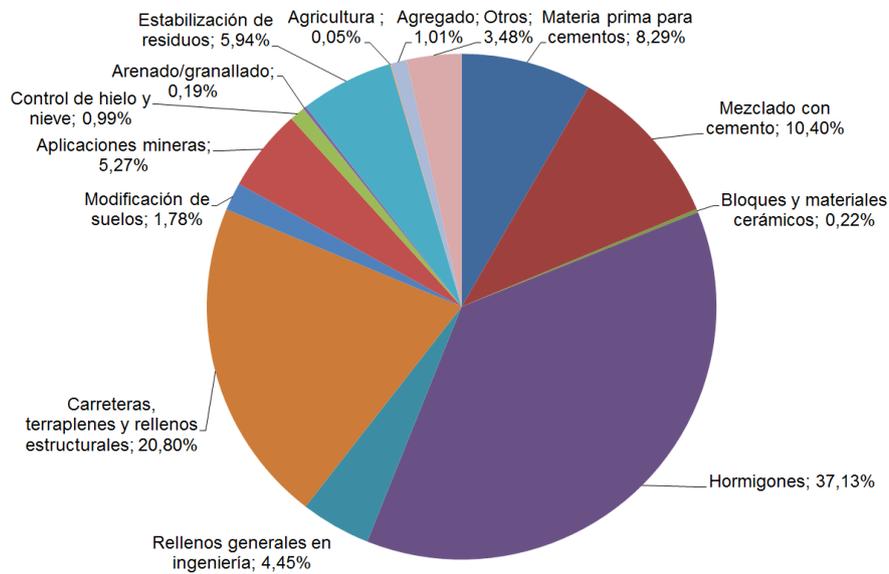


Figura 11: Usos a nivel mundial de las cenizas de alto horno, elaboración propia a partir de [23] Datos extraídos de [21], [30], [31] y [32]

En Europa los usos se limitan a la ingeniería y la construcción. En la siguiente gráfica se muestra su distribución.

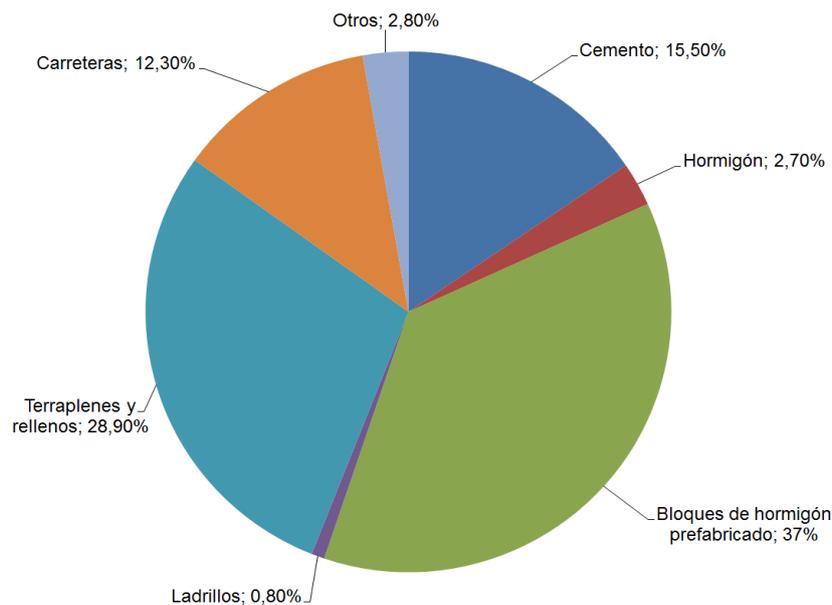
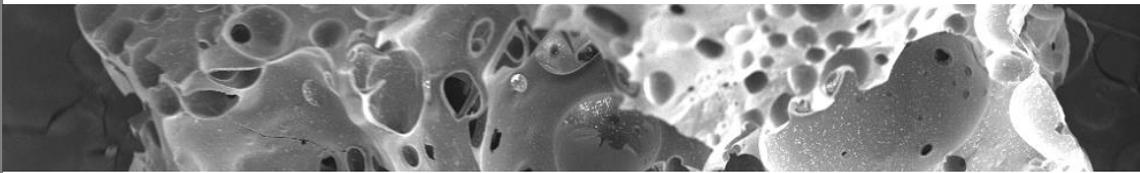


Figura 12: Usos a nivel europeo de las cenizas de alto horno, elaboración propia, datos extraídos de [20]

2 Estado del Arte: las cenizas de fondo



2 Estado del Arte: las cenizas de fondo

Las características de las cenizas de fondo dependen de múltiples factores como el tipo de carbón, el sistema de quemado y el proceso de vaciado del horno. Esto hace difícil establecer una serie de propiedades generales de las cenizas de fondo usadas por otros autores. No hay una referencia universal, algunas cenizas de fondo son tan distintas de otras que deben ser estudiadas como materiales diferentes, pudiendo trabajar de muy distinta forma como árido. A esto hay que sumar que algunas industrias mezclan el carbón con otros residuos mientras se quema, por ejemplo el lodo de papel [28].

Es necesaria una exhaustiva caracterización química, física y mecánica de este material para conocer de qué tipo de ceniza de fondo se trata.

2.1 Caracterización física

2.1.1 Tamaño

Las cenizas de fondo pueden ser de muy diferentes tamaños, van desde los centímetros hasta las micras. Normalmente se presentan como una mezcla con partículas de distinto tamaño aunque según su procedencia pueden ser uniformes. Un ejemplo es un estudio [33] que usa partículas que pasan todas por el tamiz de $56\mu\text{m}$ para fabricar hormigón.



Figura 13: Distintas fracciones de ceniza de fondo [34]



Tamaño > 5mm



Tamaño < 5mm

Figura 14: Distintas fracciones de ceniza [35]



Figura 15: Diferentes fracciones de ceniza de fondo [36]

2.1.2 Forma y textura

La forma es irregular y porosa [37], y cuanto mayor tamaño tengan las partículas que forman las cenizas de fondo mayor porosidad y textura más compleja [34].

Algunos autores describen las cenizas de fondo que utilizan de forma muy distinta [38], [39], [40], indicando que se tratan de partículas esféricas con superficie regular y suave. Estos estudios no son incluidos en este estado del arte por ser cenizas de fondo radicalmente diferentes a las usadas.

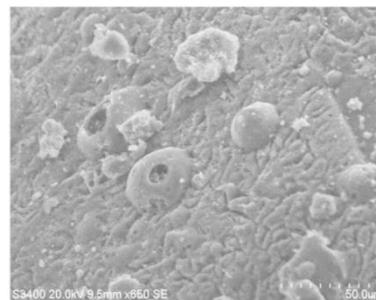
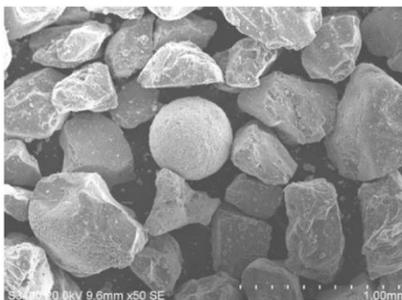


Figura 16: Imágenes de microscopio de barrido electrónico de las cenizas [41]

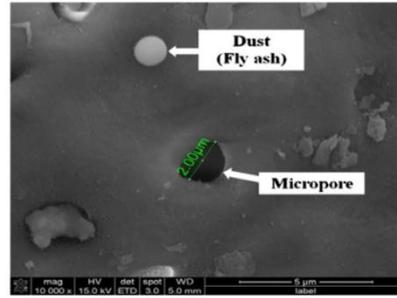
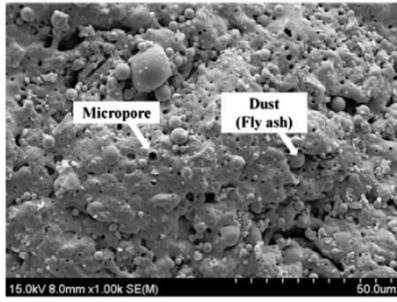


Figura 17: Imágenes de microscopio de barrido electrónico de las cenizas [42]

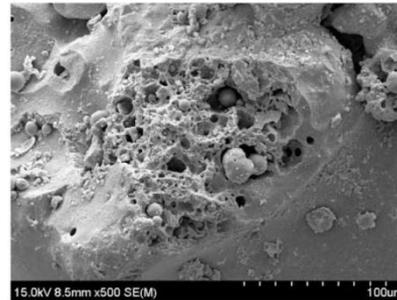
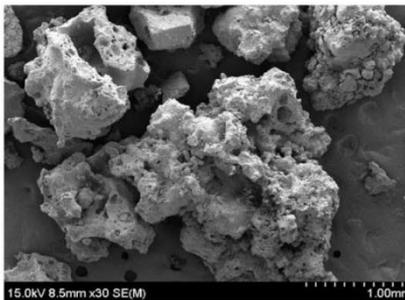
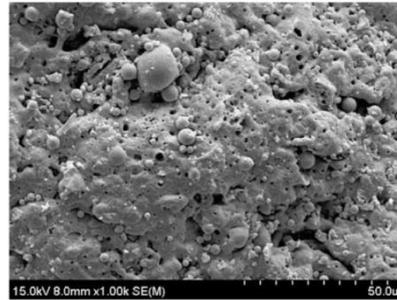
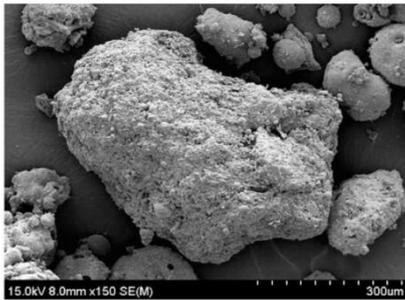


Figura 18: Imágenes de microscopio de barrido electrónico de las cenizas usadas en el artículo [34]

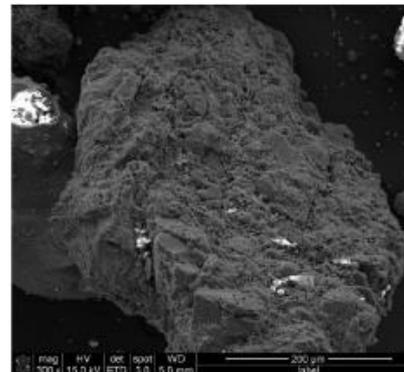
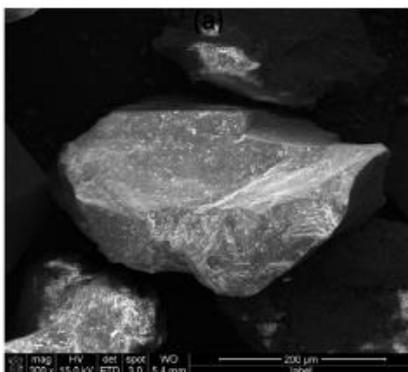


Figura 19: Izquierda árido natural, derecha ceniza de fondo [43]

2.1.3 Estructura del poro

La porosimetría por intrusión de mercurio permite caracterizar el poro [44], incluso después de dos ciclos se puede comprobar que en general la mayoría de los poros en las cenizas tienen forma de cuello de botella.

2.2 Caracterización química

2.2.1 Composición química

A continuación se muestra una tabla con distintas composiciones químicas de varias cenizas caracterizadas en distintas publicaciones científicas.

Tabla 1: Composición química de distintas cenizas

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₃	MnO	SO ₃	BaO	Cl	LOI
[45]	44,2	31,5	8,87	2	2,6		4,04	2,38						0,4
[45]	48	31,3	8,26	1,41	2		4,14	2,29						0,4
[46]	44,2	31,5	8,9	2	2,6			2,4						
[47]	34	36	16,8	2,4			5,9	3,8						
[48]	60,63	30,62		1,09	0,4	0,45					0,58		0,058	6,04
[28]	47,94	22,78	6,85	5,32	1,67	0,4	1,61	0,51		0,05	0,32	0,14	0,025	12,16
[28]	47,94	22,78	6,85	5,32	1,67	0,4	1,61	0,51		0,05	0,32	0,14	0,025	12,16
[41]	82,7	1,89	5,1	2,17	1,1						1,51			1,8
[39]	59,53	20,12	13,08	2,02	3,2		0,06							9,81
[49]	52,1	18,34	11,99	6,61	4,85	2,43	1,57	0,87						4,13
[50]	57,9	22,6	13								0,604			1,67
[38]	61,8	17,8	6,97	3,19	1,34	0,95	2	0,88	0,2		0,79			3,61
[51]	20,85	4,98	3,52	64,32	1,53	0,21	0,59				2,6			1,4
[52]	68	25	2,18	1,66	0,02			1,45						1,69

Como se puede apreciar en su mayoría están formadas por SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, el resto de componentes se presentan de forma minoritaria y pueden ser muy diversos.

2.2.2 Difracción de rayos-X (XRD)

La difracción de rayos-X es una técnica experimental para el estudio y análisis de materiales basado en el fenómeno de difracción de los rayos-X por sólidos en estado cristalino.

Los electrones que rodean los átomos difractan los haces de rayos X, a partir de estos datos puede determinarse la composición del sólido y la cantidad de cada compuesto que lo forma.

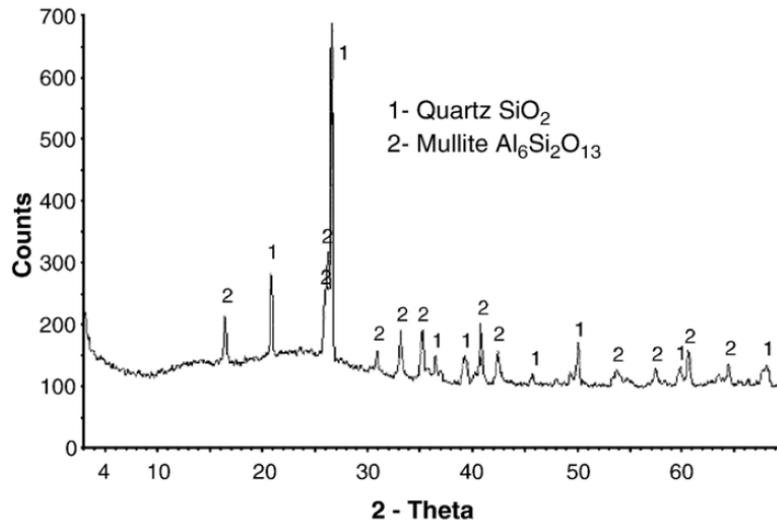


Fig. 2. X-ray diffraction analysis of bottom ash.

Figura 20: Difracción de rayos-X de ceniza [53]

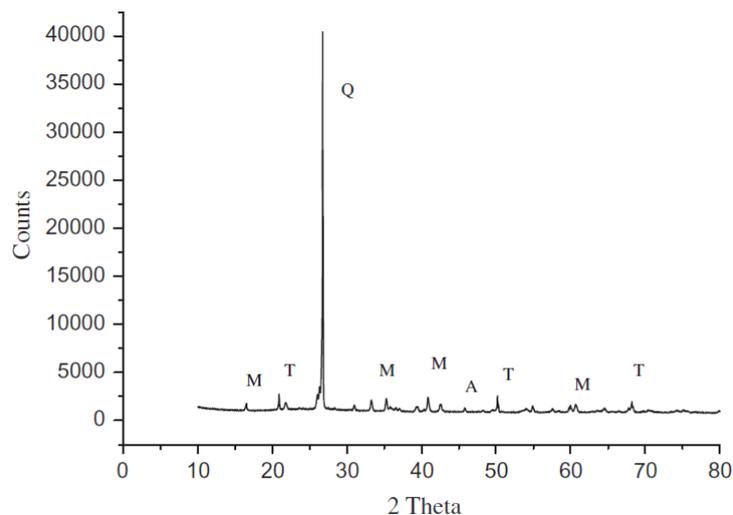


Fig. 2. XRD spectrum of coal bottom ash (M = Mullite; T = Tridymite; Q = quartz; A = Anorthite).

Figura 21: Difracción de rayos-X de ceniza [33]

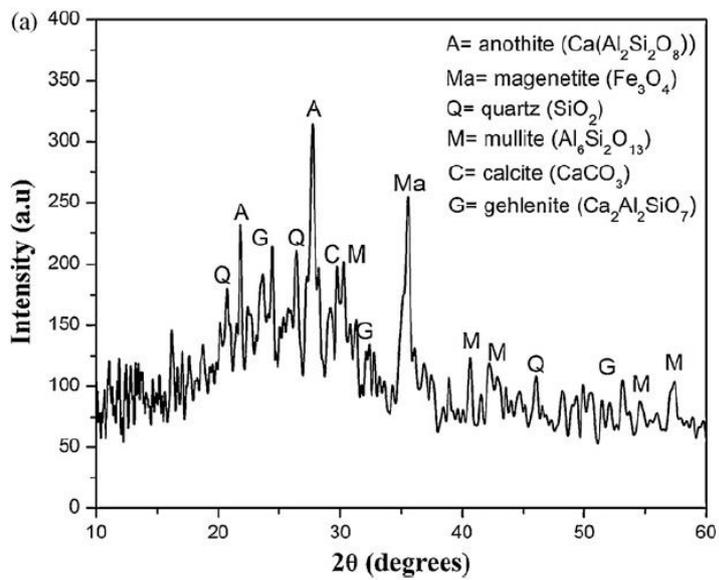


Figura 22: Difracción de rayos-X de ceniza [54]

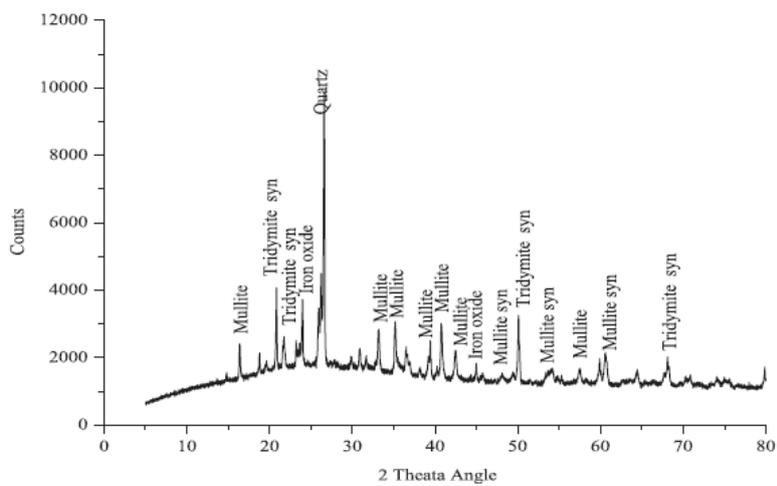


Fig. 2. XRD spectrum of coal bottom ash.

Figura 23: Difracción de rayos-X de ceniza [55]

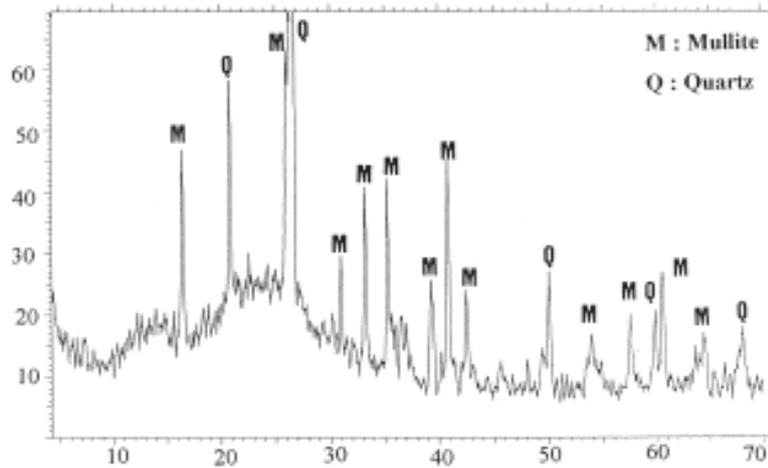


Fig. 1. X-ray diffractogram of the bottom ash.

Figura 24: Difracción de rayos-X de ceniza [56]

2.3 Caracterización mecánica

2.3.1 Absorción de agua

Las cenizas se caracterizan por una alta absorción de agua en casi todos los casos. A continuación se muestran algunos porcentajes de absorción de cenizas caracterizadas en los diferentes artículos.

Tabla 2: Absorción a 24 h de distintas cenizas de fondo usadas en artículos

	[45]	[45]	[46]	[47]	[48]	[28]	[28]	[41]	[39]	[49]	[50]	[38]	[51]	[52]
WA24h (%)	7,9	10,7	10,7	5,45	0,13	4,02	6,1	6,1	11,17	12,1	30,4	14,1	18	31,58

2.3.2 Cinética de la absorción y desorción de agua

La curva que describe la velocidad de absorción de una ceniza de fondo se divide en dos partes. La primera, sustancialmente lineal, caracterizada por una pendiente pronunciada, expresa la alta absorción de agua de los áridos en cinco minutos. La segunda parte curvilínea se estabiliza después de 60 minutos. Esta alta absorción puede explicarse por la estructura porosa de los granos de ceniza de fondo de carbón [35].

En las cenizas, el 60% de la absorción de agua se alcanza después de 10 minutos sumergidos en agua [44]. Un ensayo de desorción muestra que estas cenizas podrían tener un buen comportamiento como partículas de curado interno. Esto también es respaldado por otra prueba en la que se mide la velocidad de desecación del mortero, resultando que las cenizas liberan una gran cantidad de humedad incluso cuando están en un lugar con un ambiente con un 98% de humedad relativa.

La desorción de un agente de curado interno al aire libre puede no reproducir la situación que ocurre en el hormigón. Con el objetivo de estudiar la desorción de agua de las cenizas de fondo cuando está en la pasta de cemento un estudio [46], lleva a cabo su propio experimento. Hacen que las partículas de CBA absorban una tinta fluorescente densa y luego las sumergen en pasta de cemento. De esta manera pueden visualizar la liberación de tinta de las partículas a la pasta. Este experimento indicó que la desorción de tinta era mayor que en otros áridos ligeros tales como la arcilla expandida.

2.3.3 Eficiencia en el curado interno

Dos investigadores de Corea del Sur [46] establecen una relación entre la reducción de la retracción autógena y el agua dentro de las partículas. Aunque algunos artículos indican que este parámetro debe ser el mismo independientemente de la naturaleza del árido [46], concluyen que las partículas de ceniza de fondo presentan una mayor eficiencia de curado interno que otros áridos ligeros como la arcilla expandida.

2.4 Materiales de base cemento con cenizas de central térmica

Los autores buscan desarrollar distintos tipos de hormigón, algunos intentan desarrollar hormigones ligeros [57], otros usan las cenizas para conseguir propiedades de curado interno en hormigones de altas prestaciones (High performance concrete, HPC) [46] [29] y morteros de alta resistencia [58]. Otros desarrollan hormigones autocompactantes [59] y hormigones autocompactantes de altas prestaciones [46]. Finalmente existen algunos estudios que trabajan con morteros [60] [41] [61].

2.4.1 Dosificación. Consideración de las cenizas

Varios estudios tratan el uso de cenizas de fondo como sustituto parcial de áridos finos y gruesos en hormigón y mortero, produciendo materiales innovadores. Algunas investigaciones combinan el uso de cenizas de fondo con cenizas volantes de carbón u otros aditivos minerales tales como humo de sílice [61]. Otros utilizan incluso estas y otros materiales nuevos como los áridos de arcilla ligera expandida (LECA) [62] o las fibras metálicas y sintéticas [34].

La mayoría de trabajos realizan la sustitución en volumen, no tiene sentido la sustitución en masa debido a la gran diferencia de densidad entre un árido natural y la ceniza de fondo.

Las características de las cenizas de fondo varían de una investigación a otra. Pueden presentar forma diferente, tamaño e incluso composición química. Algunos autores tamizan las cenizas antes de usarlas para evitar las partículas más gruesas, o separar el árido en dos fracciones, finas y gruesas[42].

Otro factor fundamental a estudiar para entender el comportamiento de los hormigones y morteros hechos con cenizas de fondo es su contenido de humedad. Las cenizas de fondo suelen contener humedad debido al proceso llevado a cabo en las centrales eléctricas para retirarlas, que con frecuencia implica el uso de agua[63]. Varios autores no consideran la humedad de la ceniza, secándolos antes de su uso. Sin embargo, otros usan partículas de ceniza en una condición saturado superficie seca con el fin de promover su desempeño como agentes de curado interno [46].

Por otra parte, es crítico considerar cómo manejar el contenido de agua en el hormigón con cenizas de fondo. Tradicionalmente, los autores diseñan un hormigón siguiendo cualquiera de los siguientes patrones:

- Mantener constante la relación agua/cemento o modificarla para obtener siempre la misma fluidez. Con respecto a la primera opción, debido a la alta absorción de agua de la ceniza, parte del agua podría no contribuir a mejorar la fluidez del hormigón y morteros, ya que permanece dentro de las partículas porosas.
- Aumentar la cantidad de agua para obtener la misma fluidez, modificando irremediablemente otras propiedades del material.

Como ninguna de estas estrategias parece ser la mejor debido a sus evidentes inconvenientes, una tercera opción debe ser explorada:

- Compensar parcialmente la capacidad de absorción de las cenizas. Este proceso puede ser llevado a cabo por:
 - Aumento de la cantidad de agua en la mezcla.
 - Pre-saturación de los agregados.

Algunos estudios concluyen que cualquiera de estos dos procedimientos tienen los mismos resultados[28].

2.4.2 Estado fresco

2.4.2.1 Consistencia

La consistencia del hormigón aumenta cuando el contenido de ceniza aumenta. Esto se debe a que las cenizas de fondo tiene una mayor absorción de agua [37] y una mayor superficie específica que el árido natural debido a su forma irregular y porosa. Estas características contribuyen a una mayor absorción de agua durante el proceso de amasado, reduciendo el contenido de agua libre en el hormigón fresco y por tanto su fluidez. Además, la forma irregular de las cenizas conduce a una mayor fricción de las partículas, lo que también produce una peor trabajabilidad [42], [36] y [64]. Por otra parte, la fracción fina de las cenizas suele presentar una distribución de tamaños de partícula más fina que la arena natural sustituida. Esto aumenta la demanda de agua y, consecuentemente, la consistencia [57].

La reducción de la trabajabilidad es aún más notable cuando se reemplaza el árido grueso natural. En este caso, además de las razones antes mencionadas, las partículas de ceniza gruesas pueden mantener una cierta cantidad de pasta en sus macroporos durante la mezcla [61].

También se han detectado la reducción en otros parámetros de trabajabilidad en hormigones con cenizas de fondo. Este efecto puede ser compensado con superplastificantes y mayores cantidades de agua [65].

Algunos autores[35] obtienen una consistencia más fluida hasta un ratio de sustitución del 50%. Esto sucedió porque agregaron a cada mortero con ceniza el agua necesaria para compensar la absorción de agua de los áridos. Sin embargo, las cenizas no absorben su capacidad total de absorción de agua durante el amasado, en realidad, absorben alrededor del 25% durante los primeros cinco minutos, permaneciendo una cierta cantidad de agua libre que hace que los morteros sean más fluidos.

2.4.2.2 Segregación

La segregación en el hormigón disminuye con el contenido de ceniza debido a su mayor capacidad de absorción de agua, en comparación con el árido natural [64] [57].

Otros autores detectan un aumento de la segregación, pero solo al utilizar más agua cuando incorporan cenizas en sus mezclas [63][66][60].

2.4.3 Composición y microestructura

2.4.3.1 Microscopio de barrido electrónico

A continuación se muestran imágenes de hormigones con cenizas donde se pueden apreciar como las propiedades de las cenizas influyen en su microestructura.

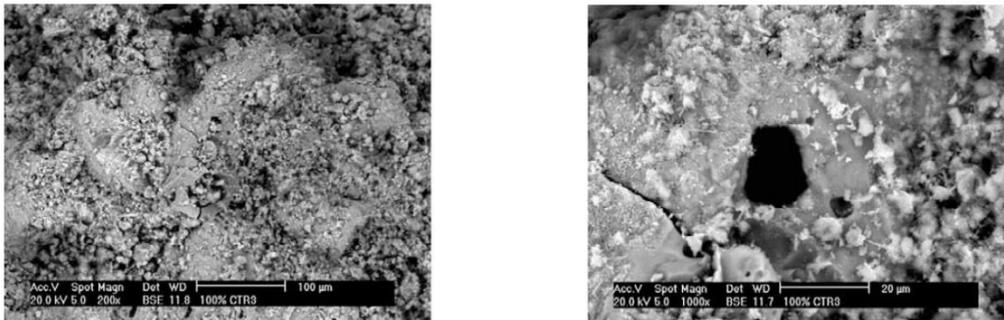


Figura 25: Porosidad de partículas de ceniza de fondo en el hormigón [66]

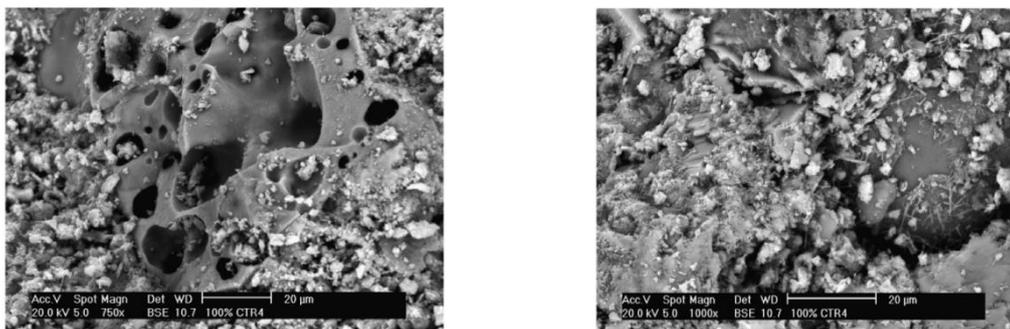


Figura 26: Partículas de ceniza rodeadas parcial y totalmente por pasta de cemento [57]

Las siguientes imágenes muestran la microestructura de varios hormigones con diferentes ratios de sustitución [64]. En ellas puede apreciarse un gel CSH denso, compacto y continuo, con grandes cristales de portlandita en la pasta de cemento del hormigón de control.

En el caso de del hormigón con un ratio de sustitución del 30% de ceniza, la estructura de gel CSH es densa, compacta y consta de hojas arrugadas. El gel CSH se distribuye uniformemente sobre toda la imagen. A mayor resolución, se observaron también los primeros productos de hidratación consistentes en pequeñas láminas y copos.

Cuando se aumentó el ratio de sustitución de arena de 50% a 100%, se observó una estructura CSH compacta de granos iguales de un tamaño inferior a 1,0 µm, la estructura de gel CSH es ligeramente menos monolítica que la del hormigón de control. Los poros y los cristales de portlandita que se observan en hormigones con cenizas de fondo son pequeños comparados con el hormigón control.

En el caso del hormigón con cenizas de fondo con mayores ratios de sustitución de árido natural se observan pequeños huecos de aire formados por el aire liberado durante la absorción de agua de las partículas de ceniza. Esto puede apreciarse en la imagen del hormigón con un ratio de sustitución del 100%. La disminución en la resistencia a la compresión del hormigón con cenizas de fondo a los 28 días puede atribuirse a la variación en la microestructura de las muestras y la lenta actividad puzolánica de las cenizas.

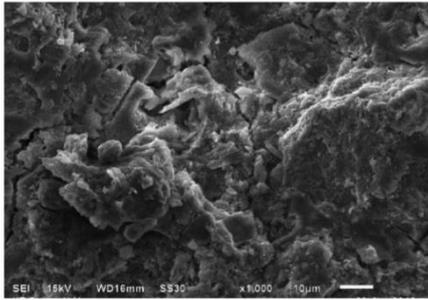


Fig. 11. SEM micrograph of control concrete at 28 days curing age.

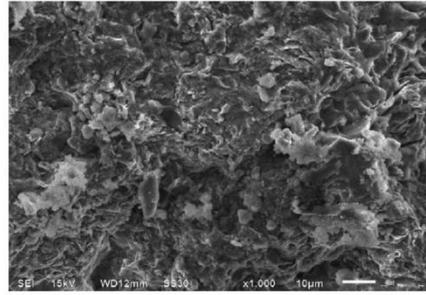


Fig. 12. SEM micrograph of bottom ash concrete containing 30% CBA at 28 days curing age.

Figura 27: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón de control y del hormigón con un ratio de sustitución del 25% [64]

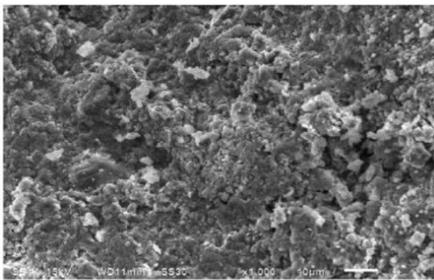


Fig. 13. SEM micrograph of bottom ash concrete containing 50% CBA at 28 days curing age.

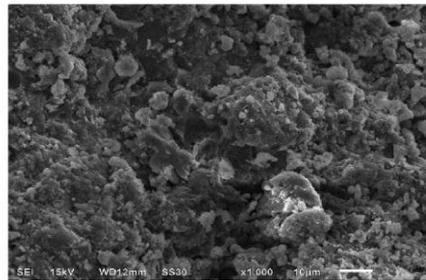


Fig. 14. SEM micrograph of bottom ash concrete containing 75% CBA at 28 days curing age.

Figura 28: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón con un ratio de sustitución del 50% y del hormigón con un ratio de sustitución del 75% [64]

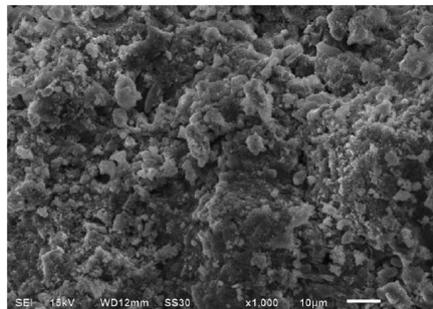


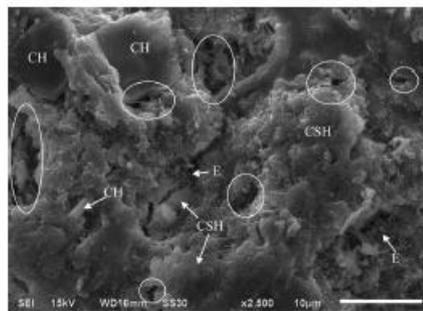
Fig. 15. SEM micrograph of bottom ash concrete containing 100% CBA at 28 days curing age.

Figura 29: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón con un ratio de sustitución del 100% [64]

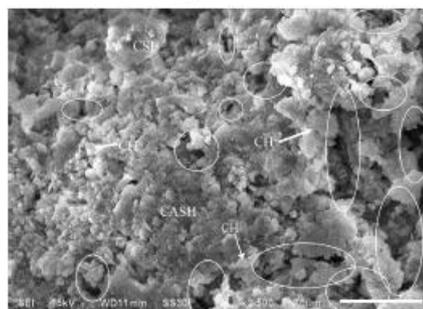
Las siguientes imágenes obtenidas tras 28 días de curado con microscopio de barrido de electrones de las mezclas de hormigón control, del hormigón con un ratio de sustitución del 50% y del hormigón con un ratio de sustitución corroboran el aumento en el número y el tamaño de huecos al usar cenizas de fondo en el hormigón.

Las regiones rodeadas en las imágenes indican los huecos y el resto es el gel de silicato de calcio hidratado (CSH), los cristales de hidróxido de calcio (CH), la ettringita (E) y el árido. Las imágenes también muestran la formación de gel de CSH y como en los hormigones con cenizas de fondo el gel de CSH no es tan monolítico y compacto como en la mezcla de hormigón de control.

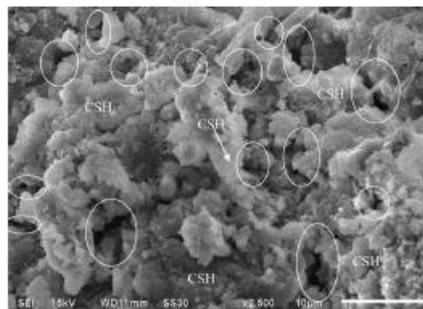
En las imágenes a 90 días, el gel CSH se distribuye más uniformemente sobre las muestras que a la edad anterior. La extensión de gel CSH y la formación de gel extra CSH debido al consumo de portlandita por acción puzolánica de la ceniza de fondo da lugar a una mayor resistencia a la compresión en hormigones con cenizas[55].



(a)

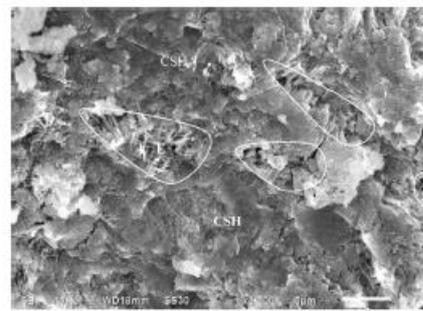


(b)

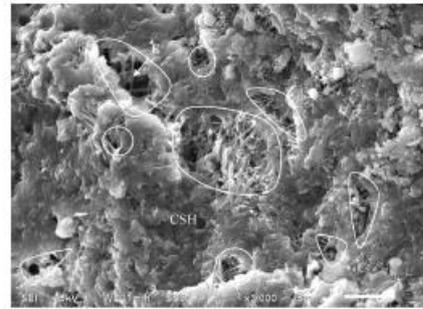


(c)

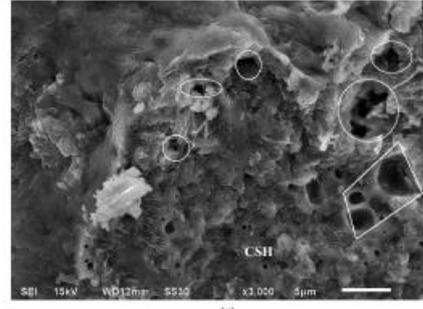
Fig. 4. Scanning Electron micrograph of concrete mixtures (a) C1, (b) C3 and (c) C5 at 28 d of curing period.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Scanning Electron micrograph of concrete mixtures (a) C1, (b) C3 and (c) C5 at 90 d of curing period.

Figura 30: Imágenes de microscopio de barrido electrónico del hormigón de control, del hormigón con un ratio de sustitución del 50% y del hormigón con un ratio de sustitución del 100%, a la izquierda 28 días a la derecha 90 días [64]

2.4.3.2 Densidad

La densidad en fresco, en estado endurecido y la densidad seca entre los distintos ratios de sustitución varían por las mismas razones aunque de distinta forma dependiendo si se mantiene constante el agua o no.

Contenido de agua constante

La densidad del hormigón disminuye cuando el contenido de ceniza aumenta. Se debe, fundamentalmente, a la menor densidad de la ceniza en comparación con la arena natural [42]. En cierta medida, las caídas de densidad pueden explicarse por la generación de burbujas de aire cuando los macroporos de las cenizas se llenan de pasta de cemento [42][55].

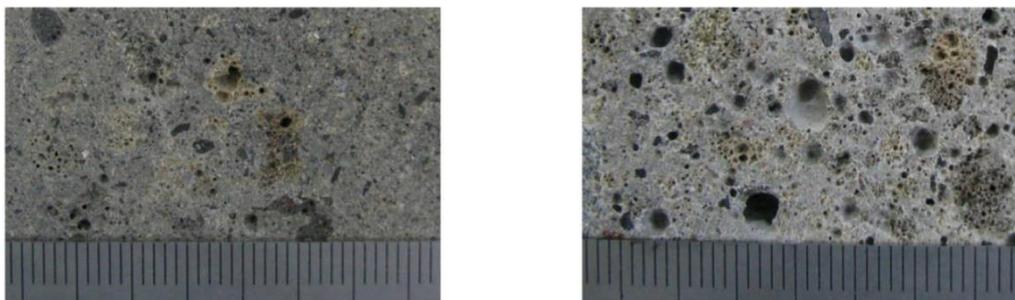


Figura 31: Fotografías de la porosidad del hormigón con distintas fracciones de ceniza, a la izquierda 0-2 y 8-11 y a la derecha 2-8 y 8-11[42]

Compensando la absorción de la ceniza

La densidad de mortero fresco y endurecido disminuye cuando el contenido de ceniza aumenta debido a su menor densidad y estructura porosa. Además, teniendo en cuenta su absorción de agua, añadiendo más agua a la mezcla o utilizando ceniza en condiciones de saturado superficie seca, el contenido de agua del mortero aumenta. Cuando esta agua se evapora durante el endurecimiento del mortero produce una mayor cantidad de poros[35][61].

Compensando la demanda de agua

Cuando se compensa la demanda de agua para seguir consiguiendo la misma consistencia, la densidad baja por dos motivos, la menor densidad de las cenizas [37] y por el aumento de porosidad de la pasta [47].

2.3.4 Propiedades mecánicas

2.3.4.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión depende de la decisión a tomada a la hora de compensar o no la absorción de la ceniza aumentando la cantidad de agua.

Contenido de agua constante

La resistencia a compresión en edades tempranas disminuye a medida que aumenta el contenido de CBA. Las resistencias más bajas se registran a las 24 horas [27], 7 días, 28 días [58] [64] [36] [64] o incluso a los 90 días después del amasado [67]. Esto se debe a la menor resistencia de la ceniza de fondo y a la mayor porosidad del hormigón con cenizas. Algunos autores creen que una de las razones de la caída en la resistencia a la compresión es un peor enlace entre las cenizas y la pasta de cemento [68]. La caída de la resistencia a edades tempranas sería aún mayor si no fuera por la disminución de la consistencia del hormigón fresco (demanda de agua) cuando el contenido de ceniza aumenta y la demanda de agua (debido a la porosidad y absorción) no es compensada [64].

Sin embargo, en muchos estudios después de 28 días, se detecta un aumento gradual de la resistencia a compresión. En casi todos los estudios consultados, se acaban alcanzando valores de resistencia a compresión iguales o ligeramente mejores en hormigones con sustitución de áridos naturales por cenizas en cualquiera de los ratios de sustitución. Esto se debe a la actividad puzolánica de la ceniza de fondo, que podría no comenzar hasta pasadas dos semanas desde el amasado [63] [36] [33] [69] y seguir contribuyendo a la mejora de la resistencia incluso pasados los 90 días, cuando la resistencia a la compresión del hormigón de referencia comienza a mantenerse constante [70]. Sin embargo, en algunos casos, la reacción puzolánica no es lo suficientemente fuerte como para alcanzar valores de control incluso después de 365 días para ratios de sustitución superiores al 20% [67] [64].

Debe observarse que los autores comentados en esta sección no compensan la absorción de agua de las cenizas por lo que una menor cantidad de agua efectiva ayudó a alcanzar una alta resistencia a la compresión. La parte correspondiente de la mejora de la resistencia que se puede asignar a la actividad puzolánica de las cenizas es difícil de cuantificar.

Compensando la absorción de la ceniza

Para algunos autores la resistencia a la compresión permanece casi constante mientras se aumenta el ratio de sustitución de ceniza hasta el 40% [28] o incluso el 50% [58].

Otros autores al sustituir todo el árido natural por ceniza de fondo en condiciones de saturado superficie seca, concluyen que la mayor porosidad en el mortero da como resultado una menor resistencia a la compresión [61]. Este autor argumenta que esta caída de resistencia podría ser compensada en cierta medida debido a la actividad puzolánica de las partículas ceniza de fondo y las cenizas volantes adheridas a ellas, además del efecto de curado interno, que reduce la contracción autógena. Sin embargo, como la porosidad es claramente predominante sobre estos dos fenómenos, es difícil concluir si realmente contribuyen en la resistencia en un grado apreciable.

Finalmente en [47] [46] la resistencia a compresión disminuye cuando el contenido de ceniza aumenta, pero las diferencias son menores a los 28 y 91 días que a los 3 días de edad de curado. Esto puede ocurrir debido al efecto de curado interno de las partículas de ceniza, que transfieren la humedad a la pasta de cemento estimulando la hidratación en edades posteriores.

Compensando la demanda de agua

Como la sustitución de áridos naturales por ceniza de fondo afecta a la trabajabilidad del hormigón o del mortero aumentando su consistencia, es necesario ampliar la cantidad de agua para alcanzar la misma fluidez que en el hormigón o mortero de control. Como consecuencia, la porosidad del hormigón o del mortero aumenta y la resistencia a la compresión disminuye irremediablemente [41] [63] [59] [60].

2.3.4.2 Resistencia a flexión

Contenido de agua constante

La resistencia a flexión del hormigón con ceniza de fondo disminuye cuando el contenido de ceniza aumenta [42] [36]. Las reducciones a edades tempranas pueden ser explicadas en parte por las caídas de resistencia a compresión, además los áridos naturales son lo suficientemente fuertes como para impedir la continuidad de las grietas, obligándolos a cambiar su dirección y retrasar el colapso. Sin embargo, esto no sucede con las cenizas de fondo, más débil, lo que permite que el progreso de la fisura por sí misma, provocando un colapso más fácil [42].

Las disminuciones de la resistencia a flexión en edades tempranas tienden a minimizar su magnitud con el tiempo debido a la actividad puzolánica de la ceniza [28], pero en estas dosificaciones también agregan un 20% de ceniza volante, dificultando la cuantificación de la contribución de cada tipo de ceniza a la mejora de resistencia a largo plazo.

Compensando la demanda de agua

Al compensar la demanda de agua para conseguir la misma consistencia, la pasta se vuelve más porosa y por lo tanto cualquier tipo de resistencia disminuye [60] [41].

2.3.4.3 Resistencia a tracción

Contenido de agua constante

El efecto de la ceniza sobre la resistencia a tracción del hormigón es casi insignificante y existen discrepancias sobre su signo (positivo o negativo).

Algunos estudios [64] obtienen valores de resistencia a tracción más bajos a cada edad y cada ratio de sustitución, debido a la debilidad de la ceniza. Otros [36] también obtienen valores ligeramente inferiores para las bajas tasas de sustitución, pero considerablemente mayores (20 y 10% aproximadamente) para 75 y 100% de sustitución. En esta otra dirección, [33] [57] obtienen mejores resultados al incorporar el nuevo material. La razón de esta mejora es, según los autores, que la menor resistencia de la ceniza y la mayor porosidad se compensan con el aumento de la interconectividad de la red de poros, lo que retrasa el colapso bloqueando el progreso de la fisura.

Compensando la absorción de la ceniza

La resistencia a tracción en estos casos se mantiene constante cuando se incrementa el contenido de ceniza [28].

Compensando la demanda de agua

Al aumentar el contenido de agua y el ratio de sustitución de árido natural por ceniza de fondo la resistencia a tracción disminuye, aunque no es fácil determinar a cual de los dos factores es debido [59].

2.3.4.4 Módulo de Young

Contenido de agua constante

El módulo de Young disminuye cuando el contenido de ceniza aumenta. Esta reducción es especialmente pronunciada en edades tempranas, mientras que menos en edades avanzadas de acuerdo con algunos estudios [42]. Esto se debe a la reacción puzolánica, lo que incluso puede conducir a un mejor módulo de elasticidad a largo plazo en los hormigones con ceniza de fondo [63]. Sin embargo, la progresión de esta propiedad es casi lineal y según otros investigadores nunca alcanzan los valores de referencia [33] [64].

La disminución del módulo de Young se observa más cuando la fracción sustituida es la de los áridos gruesos que cuando es la de arena [42].

Compensando la absorción de la ceniza

El módulo de Young disminuye al aumentar el contenido de ceniza [28].

2.3.5 Conductividad térmica

La conductividad térmica disminuye cuando el contenido de ceniza aumenta, debido a la menor densidad de mortero. La evolución de esta propiedad a medida que pasa el tiempo no es tan pronunciada como otras, siendo valores casi constantes a todas las edades [35].

2.3.6 Durabilidad

2.3.6.1 Contenido de aire

La porosidad de las cenizas en todos los casos y la compensación de agua que con el fraguado evapora y provoca más poros hacen que se incremente el contenido de aire [41].

2.3.6.2 Resistencia a desgaste superficial

La resistencia a desgaste superficial disminuye cuando el contenido de cenizas de fondo aumenta [57] [69]. La tendencia de esta propiedad es muy similar a la de la resistencia a compresión.

2.3.6.3 Pérdida de peso

La pérdida de peso es mayor en hormigones con cenizas que en los hormigones control hasta que la mitad del árido es sustituido por las cenizas, debido a la red de poros mejor conectado. Sin embargo, disminuye después de un ratio de sustitución del 50% [57]. Este cambio de tendencia se debe a la capacidad de retención de agua de las cenizas, que compensa la mejor interconectividad de la red de poros.

Otros estudios detectan una mayor pérdida de peso para cada tasa de sustitución, pero lo atribuyen a la mayor cantidad de agua utilizada al incluir las cenizas, para alcanzar la misma consistencia que el hormigón de referencia [63].

2.3.6.4 Retracción por secado

Contenido de agua constante

La retracción por secado parece ser ligeramente más alta en los ratios bajos de sustitución, pero menor al sobrepasar el contenido en ceniza del 25% [36] [33]. La razón fundamental para que esto suceda es que, durante la mezcla de hormigón, las partículas de ceniza retienen una gran cantidad de agua (debido a su alta absorción de agua), reduciendo el agua eficaz que se sabe que reduce la retracción. Luego, mientras se endurece el hormigón, las partículas de ceniza liberan poco a poco esta agua reduciendo la retracción por secado [71].

Compensando la absorción de la ceniza

Compensando la absorción de la ceniza se detectan grandes reducciones en la retracción por pérdida de peso en morteros [28] y también se reduce en los hormigones, pero menos que cuando se usan arcillas expandidas [45].

Compensando la demanda de agua

El efecto de las cenizas en la retracción es tan predominante que incluso cuando se compensa la demanda de agua, puede detectarse. En realidad, [60] obtienen valores casi insignificantes con tasas de sustitución del 100% en el mortero. Por otra parte, algunos autores han detectado una menor consistencia en los hormigones cuando compensan la demanda de agua, lo que indirectamente reduce la contracción plástica debido a la cantidad de agua que permanece en la superficie del hormigón [66].

2.3.6.5 Retracción autógena

La retracción autógena disminuye cuando el contenido de cenizas aumenta, debido al efecto de curado interno [45]. Sin embargo, el efecto de la ceniza de fondo en la reducción de retracción fue menor que el de los áridos ligeros artificiales. Este resultado puede atribuirse a una serie de factores, entre los que se incluye el aumento de la concentración real de agua debido a la difusión de agua de las cenizas de fondo durante el proceso de mezclado y el consumo de agua por la reactividad puzolánica de las cenizas.

2.3.6.6 Absorción de agua

Contenido de agua constante

La absorción de agua a edades tempranas aumenta cuando el contenido de ceniza aumenta, pero esta tendencia cambia después de 28 días de curado debido a la actividad puzolánica de las cenizas. Por lo tanto, la absorción de agua del hormigón con cenizas de fondo alcanza valores similares al hormigón de referencia a largo plazo [57] [55] [64].

Compensando la demanda de agua

Esta recuperación no se detecta cuando se aumenta la cantidad de agua con el fin de mantener la consistencia tanto en hormigones con cenizas como morteros [59] [41].

2.3.6.7 Capilaridad

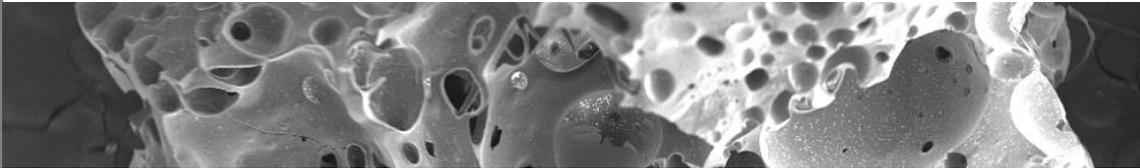
La capilaridad en edades tempranas es ligeramente mayor cuando el contenido de ceniza de fondo aumenta, debido a la naturaleza porosa de esta y el aumento de la

porosidad de la pasta de hormigón. A los 28 días, la tendencia cambia y los valores son similares a los del hormigón de control [64].

2.3.6.8 Ataque por cloruros

Las cenizas de fondo mejoran la resistencia al ataque por cloruros, pero menos que las mezclas minerales. El uso de cenizas de fondo modera la profundidad de penetración del cloruro en el entorno de ensayo (entorno acelerado de penetración de cloruro usando una solución de NaCl al 10% + ambiente de carbonatación acelerada), mientras que el contenido total de cloruro penetrado no mostró diferencias en comparación con el mortero control [58].

3 Caracterización de materiales y dosificaciones



3 Caracterización de materiales y dosificaciones

3.1 Materiales

Para abordar esta fase experimental se optó por el diseño de, un hormigón para prefabricados y morteros de revestimiento.

Para ello, se realizó la selección de los materiales a emplear en la fabricación del hormigón o mortero de control. Sobre estos materiales se llevaron a cabo todos aquellos ensayos que permitieron, según la normativa vigente, determinar si eran o no adecuados para su uso en la fabricación de los hormigones y morteros objetivo.

Estos materiales son áridos naturales, cemento, agua, aditivos y la ceniza que se utilizará sustituyendo parcialmente los áridos. Los resultados de los ensayos realizados sobre los mismos se exponen a continuación.

3.1.1 Agua

En este trabajo se ha utilizado agua potable procedente de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, y del CITEEC.

3.1.2 Cemento

En este proyecto se usan dos tipos de cemento: un cemento tipo II para el hormigón de prefabricados y uno específico de morteros (MC 12.5).

CEM MC 12,5

Es un cemento portland de albañilería para morteros de la empresa EL Molino, servido en sacos de 35 kg con las siguientes características:

Tabla 3: Características del cemento para morteros (elaboración propia a partir de ficha técnica del producto).

CEM MC 12,5			
	Parámetro	Norma	Valor habitual
Composición	Clinker	$\geq 38\%$	45,0±5,0%
Exigencias químicas	Sulfatos (SO ₃)	$\leq 3,5\%$	< 3,5%
	Cloruros	$\leq 0,10\%$	< 0,10%
Exigencias físicas	Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 10 mm
	Tiempo de fraguado		
	Principio	≥ 45 min	> 60 min
	Final		< 300 min
Especificaciones mortero	Contenido de aire	$\geq 6\%$ y $\leq 25\%$	$\geq 8\%$ y $\leq 22\%$
	Retención de agua	$\geq 75\%$	$\geq 80\%$

CEM II A-V 42,5 R

Es un cemento portland de la empresa Cosmos servido a granel con las siguientes características:

Tabla 4: Características del cemento para hormigones de prefabricados (elaboración propia a partir de ficha técnica del producto).

CEM II A-V 42,5 R			
	Párametro	Norma	Valor habitual
Composición	Clinker	80-94%	≥ 80%
	Caliza	6-20%	≤ 20%
	Minoritarios	0-5%	≤ 5%
Exigencias químicas	Sulfatos (SO ₃)	≤ 4,0%	< 4,0%
	Cloruros	≤ 0,10%	< 0,05%
	Cromo IV soluble	≤ 0,0002%	< 0,0002%
Exigencias físicas	Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 2,5 mm
	Tiempo de fraguado		
	Principio	≥ 60 min	> 75 min
	Final	≤ 720 horas	< 340 min

3.1.3 Áridos naturales

Para la elaboración de estos hormigones y morteros se han utilizado y por tanto caracterizado cinco arenas y dos gravillas. Dos de las arenas y una de las gravillas son las usadas por la empresa de prefabricados que colabora en el proyecto de investigación, las otras son arenas y gravillas comerciales que proceden de canteras gallegas.



AF-T-0/1-G



AF-T-0/ -G



AG-T-4/11,2-C



AF-T-0/4-G



AF-T-0/4-C



AF-T-0/5,6-G



AG-T-4/8-G

Figura 32: Áridos utilizados

Los áridos naturales utilizados en la empresa de prefabricados proceden también de cantera. En este proyecto solo se desarrollará un tipo de bloque prefabricado por lo que los áridos usados son los necesarios para este bloque: arena y gravilla granítica, obtenidas por machaqueo con granulometría 0/5,6 y 4/8 respectivamente, y una arena de base cuarzo con una granulometría de 0/4.

Para la elaboración de los dos tipos de morteros se usarán tres arenas, la misma arena 0/1 y 0/4 que para el hormigón autocompactante y otra una arena 0/4 granítica.

Tabla 5: Áridos utilizados en cada hormigón y moertero

	Áridos
Hormigón prefabricados	AF - T - 0/4 - C
	AF - T - 0/5,6 - G
	AG - T - 4/8 - G
Mortero 1 (AP)	AF - T - 0/1 - G
	AF - T - 0/4 - G
Mortero 2 (MEI)	AF - T - 0/1 - G
	AF - T - 0/4 - G

A continuación se muestran las curvas granulométricas según norma UNE-EN 933 [72]

Tabla 6: Granulometrías de los áridos naturales

	AG-T-4/11,2-C	AF-T-0/1-G	AF-T-0/4-G	AF-T-0/4-G	AF-T-0/4-C	AF-T-0/5,6-G	AG-T-4/8-G
d	4	0	0	0	0	0	4
D	11,2	1	4	4	4	5,6	8
MF	7,3	2,5	4,5	3,7	3,8	4,5	6,7
63	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5	98,91	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
11,2	95,52	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
10	85,23	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,82
8	58,16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92
6,3	32,41	100,00	100,00	100,00	99,75	99,96	78,78
5,6	20,59	100,00	100,00	100,00	98,62	99,69	46,22
4	4,52	99,98	96,56	99,92	90,92	88,34	12,45
2,5	1,74	99,42	74,99	97,27	82,20	68,92	8,08
2	1,41	98,16	65,45	88,49	78,24	61,04	7,13
1,25	1,10	93,57	48,33	68,08	68,96	46,97	5,66
1	1,04	91,34	41,55	59,38	63,69	41,39	5,08
0,63	0,94	85,65	30,54	44,92	52,34	31,86	4,15
0,5	0,53	81,61	25,82	38,90	46,09	27,57	3,74
0,4	0,50	76,04	21,79	33,54	39,81	23,70	3,36
0,315	0,47	66,14	17,70	28,20	32,72	19,76	2,98
0,25	0,44	54,76	14,37	23,87	26,60	16,64	2,63
0,125	0,35	22,04	5,50	11,80	9,44	8,63	1,77
0,08	0,29	11,16	2,23	6,01	2,59	5,31	1,31
0,063	0,63	6,96	1,40	3,56	1,02	4,00	1,03

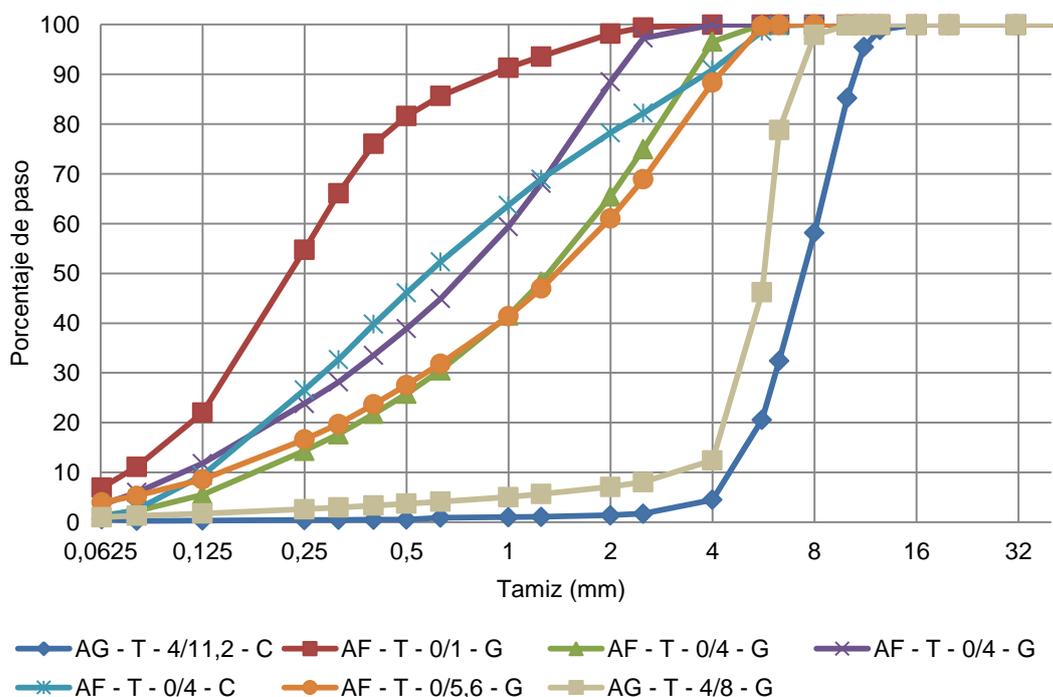


Figura 33: Curvas granulométricas de los áridos naturales.

También se realizó un ensayo para conocer la absorción y la densidad de todos los áridos según la norma UNE-EN 1097-6 [73]. Por otra parte dadas las particularidades de las cenizas se desarrolló otra metodología basada en una norma del estado de New York NY 703-19 E [74] se aplicó el mismo procedimiento también a los áridos.

Las variables que se determinaron fueron las siguientes:

- Densidad aparente de las partículas: ρ_a Relación obtenida por división de la masa secada en estufa de una muestra de árido por el volumen que ocupa en agua, incluyendo el volumen de cualquier hueco interno sellado pero excluyendo el volumen de agua en cualquier hueco accesible al agua. Para áridos ligeros se utiliza el símbolo ρ_{La} .
- Densidad de partículas tras secado en estufa: ρ_{rd} Relación obtenida por división de la masa secada en estufa de una muestra de árido por el volumen que ocupa en agua, incluyendo el volumen de cualquier hueco interno sellado y el volumen de cualquier hueco accesible al agua. Para áridos ligeros se utiliza el símbolo ρ_{Lrd} .
- Densidad de partículas saturadas con superficie seca: ρ_{ssd} Relación obtenida por división de la suma de la masa secada en estufa de una muestra de árido y la masa de agua en cualquier hueco accesible al agua por el volumen que ocupa en agua, incluyendo el volumen de cualquier hueco interno sellado y el volumen de cualquier hueco accesible al agua. Para áridos ligeros se utiliza el símbolo ρ_{Lssd} .
- Absorción de agua máxima tras inmersión durante 24h: $W(máx)$.
- Absorción de agua tras inmersión durante 10 minutos: $W10min$.

Tabla 7: Densidades y absorciones de áridos naturales

		Áridos de cantera				Áridos Prefhorvisa		
		AG-T-4/11,2-C	AF-T-0/4-G	AF-T-0/4-G	AF-T-0/1-G	AG-T-4/8-G	AF-T-0/5,6-G	AF-T-0/4-C
Método propio	ρ_{La}	2,54	2,68	2,70	2,73	2,56	2,75	2,69
	ρ_{Lrd}	2,49	2,45	2,41	2,33	2,47	2,53	2,45
	ρ_{Lssd}	2,51	2,54	2,52	2,47	2,50	2,61	2,54
	$W10min$	0,76	3,71	4,34	6,14	1,27	3,10	3,55
	$W(máx)$	0,86	3,71	4,42	6,15	1,43	3,13	3,65
Método UNE	ρ_{La}	2,57	2,68	2,70	2,73		2,75	2,69
	ρ_{Lrd}	2,52	2,67	2,67	2,72		2,66	2,70
	ρ_{Lssd}	2,54	2,68	2,68	2,72		2,67	2,70
	$W(máx)$	0,76	0,37	0,40	0,07		0,42	0,07

Como puede observarse, las diferencias entre las densidades medidas de acuerdo a la norma UNE y las determinadas con el método propuesto no son muy elevadas. Sin embargo, las diferencias en absorción son muy significativas. Para calcular la absorción es necesario conocer el peso del árido tanto seco como en el estado de saturado con la superficie seca. Siguiendo el método de la UNE-EN 1097-6 [73] el estado de saturado superficie seca se consigue secando el árido lentamente con una corriente de aire, después se realiza un cono con el árido y cuando este se desmorona una vez retirado el molde se considera que se ha alcanzado ese estado. Con el método propio el árido se seca con un papel hasta conseguir que deje de mojar el

papel, en este punto se considera que está saturado con superficie seca, de ahí las diferencias en la absorción.

3.1.4 Cenizas de fondo

Para la realización de este proyecto de investigación se disponía de dos cenizas, de diferentes características, procedentes de dos centrales térmicas. Ambas cenizas fueron caracterizadas a nivel físico y químico con ensayos asimilables a los áridos que van a sustituir.

Las cenizas de la primera central son de color negro y tamaño similar a una gravilla. Están formadas por partículas muy porosas y de forma angulosa.

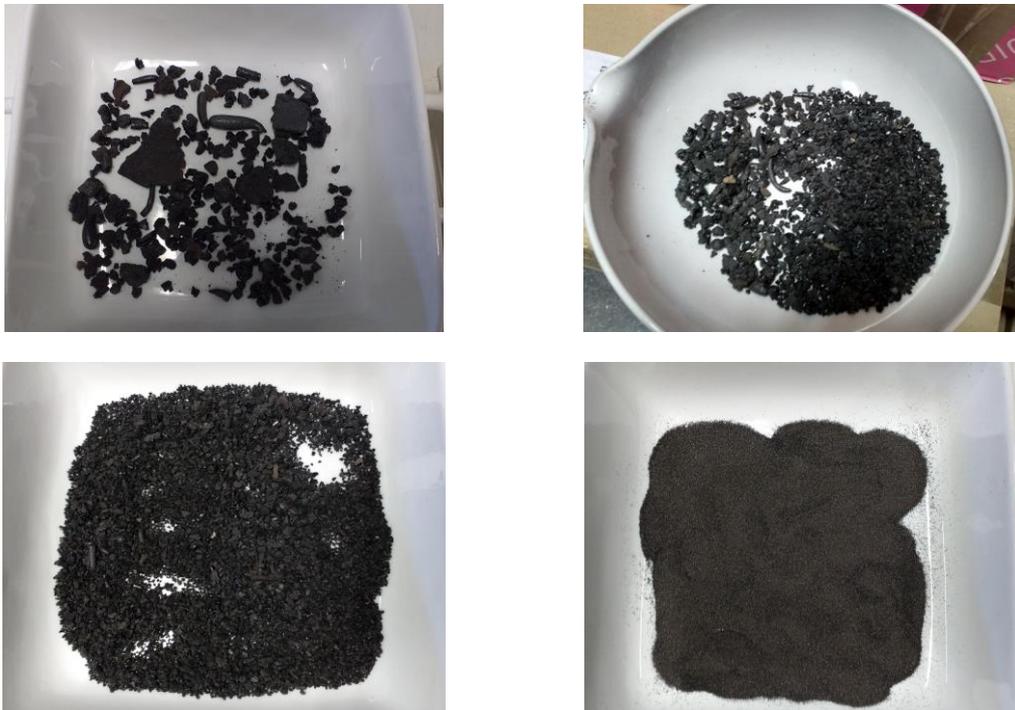


Figura 34: Distintas fracciones de la ceniza de fondo de la central 1 20-4, 4-2, 2-1 y 1-0

Las cenizas de la segunda central son de un color grisáceo pero un aspecto muy similar.

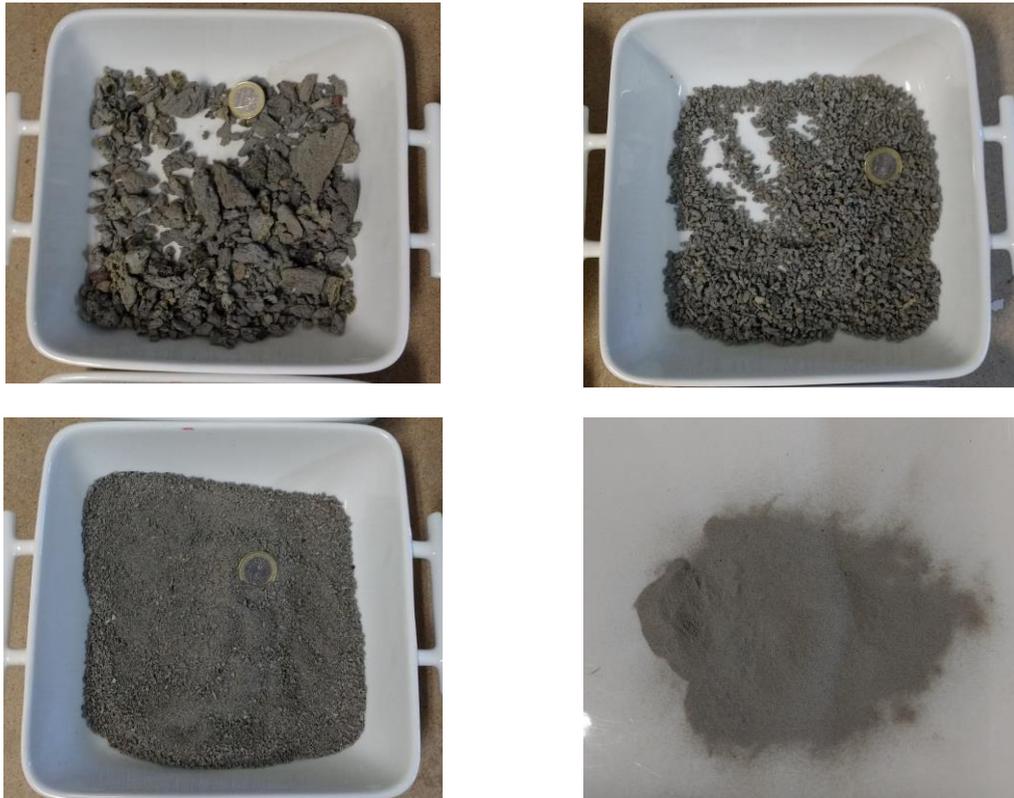


Figura 35: Distintas fracciones de la ceniza de fondo de la central 2 16-4, 2,5-2, 1-0,063 y 0

La primera propiedad que se debe conocer del árido de estudio es la distribución de los tamaños de sus partículas, es decir, su granulometría. La forma y tamaño de partículas influye en la posible actividad puzolánica de las cenizas, en las prestaciones mecánicas y en la trabajabilidad. En general, a medida que aumenta la superficie específica (mayor finura) aumenta el potencial reactivo, aunque también lo hace la demanda de agua.

Tras los ensayos realizados, estas cenizas presentan la siguiente granulometría según UNE-EN 933-1 [72]. Para sus distintas aplicaciones fue necesario cortarlas por distintos tamices y, por tanto, se determinó también la granulometría de cada una de las fracciones obtenidas

Tabla 8: Granulometrías de las cenizas de la central 1

	Central 1	Central 1 cortada por el 4	Central 1 cortada por el 8	Central 1 cortada por el 16
d	0	0	0	0
D	10	2,5	5,6	6,3
MF	4,2	3,2	3,7	3,9
63	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00
20	97,37	100,00	100,00	100,00
16	94,12	100,00	100,00	100,00
12,5	92,35	100,00	100,00	98,12
11,2	91,61	100,00	100,00	97,33
10	90,87	100,00	100,00	96,55
8	88,54	100,00	100,00	94,07
6,3	84,95	100,00	96,94	90,25
5,6	83,10	100,00	94,40	88,29
4	78,10	100,00	88,09	82,98
2,5	72,34	92,63	80,51	76,86
2	69,75	89,30	77,25	74,10
1,25	63,69	81,55	70,24	67,67
1	59,88	76,67	65,94	63,62
0,63	49,19	62,99	53,78	52,27
0,5	42,78	54,77	46,71	45,45
0,4	36,79	47,11	39,86	39,09
0,315	31,00	39,70	33,25	32,94
0,25	26,47	33,89	28,14	28,12
0,125	14,12	18,08	14,65	15,00
0,08	8,65	11,07	8,67	9,19
0,063	6,31	8,07	5,40	6,70

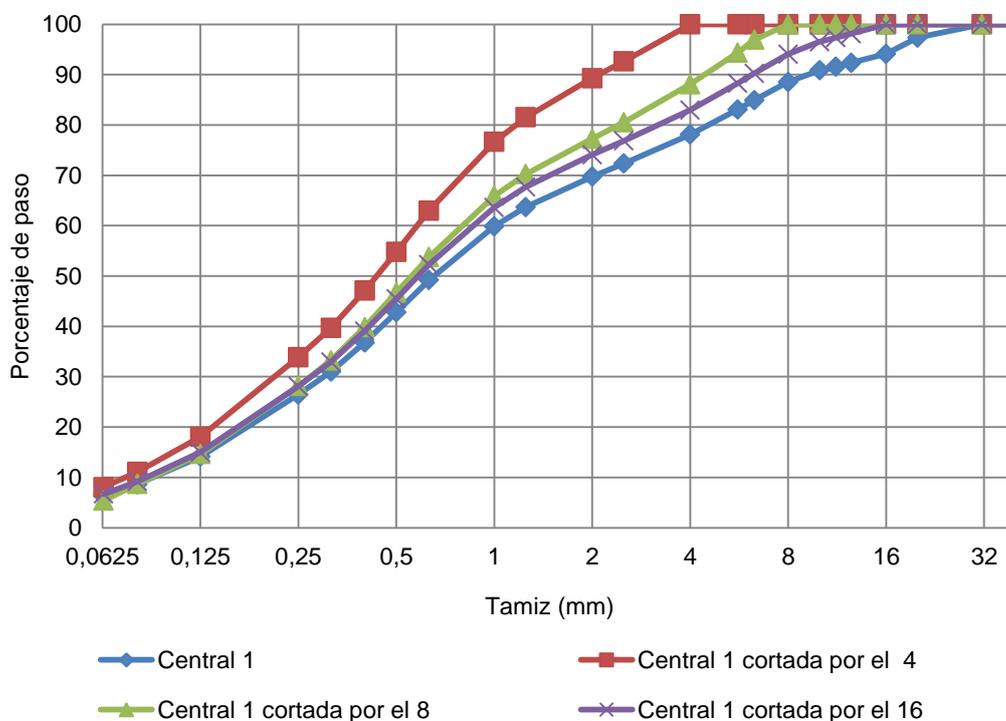


Figura 36: Curvas granulométricas de la ceniza de la central 1

Tabla 9: Granulometrías de las cenizas de central 2

	Central 2	Central 2 cortada por el 4
d	0	0
D	10	2,5
MF	4,2	3,0
63	100	100,00
31,5	100	100,00
16	92,38	100,00
8	85,89	100,00
5,6	81,55	100,00
4	77,01	100,00
2,5	68,74	89,26
2	64,65	83,95
1,25	58,02	75,34
1	56,27	73,07
0,63	51,36	66,70
0,5	49,07	63,72
0,4	46,13	59,90
0,315	41,88	54,39
0,25	37,12	48,20
0,125	16,12	20,93
0,08	7,54	9,79
0,063	4,88	6,33

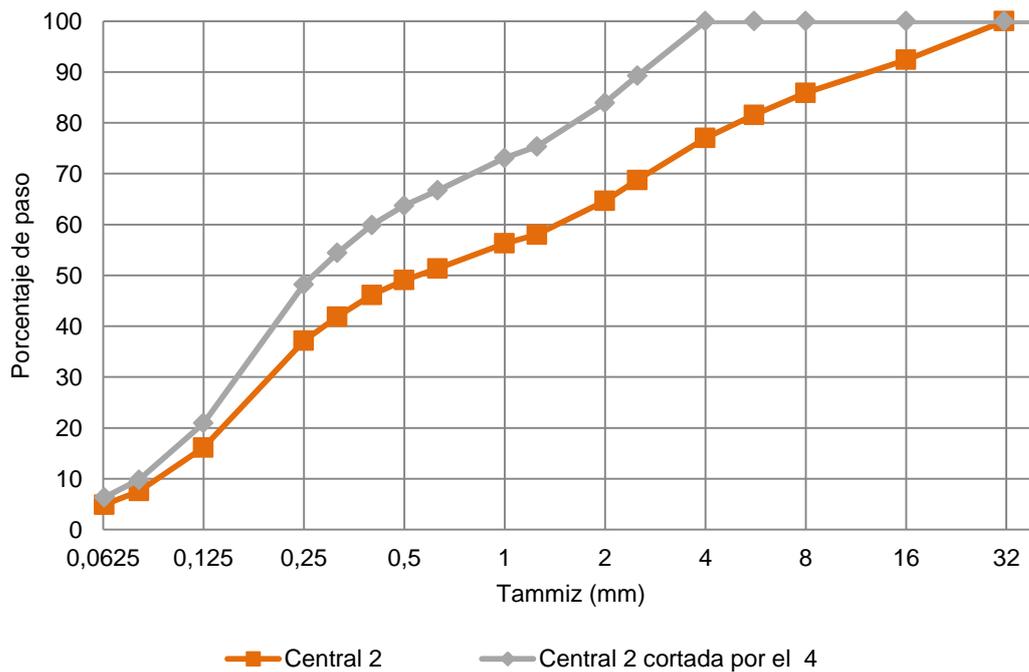


Figura 37: Curvas granulométricas de la ceniza de la central 2

En la tabla se reflejan, además, el módulo de finura y el contenido en finos de las diferentes fracciones granulométricas.

El módulo de finura es un número que se obtiene sumando el porcentaje retenido acumulado en los tamices de la serie básica desde el 63mm al 0,125mm, dividido por 100. Un módulo de finura pequeño indica un tamaño medio de partículas pequeño. Tal como se aprecia en los resultados, las fracciones cortadas por tamices cada vez menores (16, 8, 4 mm en el caso de la ceniza de la central 1 y 4 mm en el caso de la central 2) presentan, sucesivamente, módulos de finura (tamaños medios) menores. Las diferencias son, sin embargo, muy pequeñas, lo que indica que la presencia de partículas grandes (de tamaño superior a 4 mm) es, también, pequeña.

El contenido en finos de un árido se refiere al porcentaje de la masa de árido cuyo tamaño es inferior a 0,063mm. El porcentaje de 6,31% de finos de la fracción inicial se convierte en un 5,40, 6,70 y 8,07 % de las fracciones una vez cortadas en la central 1 mientras que en las cenizas de la central 2 pasa del 4,88% al 6,33%.

En cuanto a la densidad y absorción fue determinada por el método propio desarrollado para este proyecto en el caso de la ceniza de la central 1, tras comprobar con la ceniza de la central 2 que los resultados muy altos con el método de la norma UNE-EN 1097-6 [73] dadas las características físicas de las partículas y la dificultad para realizar el método y conseguir valores acertados.

Tabla 10: Densidad y absorción de la ceniza de la central 1

		Ceniza central térmica 1		
		>4	<4	Media
Método propio	ρLa	2,43	2,19	2,25
	ρLrd	2,01	1,11	1,30
	ρLssd	2,18	1,60	1,73
	W10min	2,79	28,85	23,14
	W(máxima)	8,72	44,89	36,97

Tabla 11: Densidad y absorción de la ceniza de la central 2

		Ceniza central térmica 2		
		>4	<4	Media
Método propio	ρLa	1,16	1,40	1,34
	ρLrd	1,16	1,40	1,34
	ρLssd	1,40	1,66	1,60
	W10min	7,04	14,20	12,55
	W(máxima)	20,58	18,89	19,28
Métodos UNE	ρLa	1,02	NO APLICA	
	ρLrd	1,02		
	ρLssd	1,35		
	W10min	16,46		
	W(máxima)	32,67		

Estos resultados concuerdan con los obtenidos en otros estudios con diferentes tipos de cenizas. En todos estos estudios la densidad se sitúa en un rango de 1,1 a 2,1 y la absorción en el rango de entre el 7% y el 30%.

En la siguiente tabla se analizan otras características importantes a la hora de determinar su validez como sustituto para el árido.

El ensayo de equivalente de arena (EA) y materia orgánica se utilizan habitualmente en áridos o de origen orgánico para establecer la presencia de materiales arcillosos en una muestra de material granular. Para la realización del mismo se utiliza la fracción 0/2 mm de los áridos finos. Los resultados para estas cenizas dan valores que se encuentran en el margen especificado por la normativa.

En lo que se refiere a los resultados de friabilidad, se trata de un ensayo que determina la dureza de los áridos. Analizando los resultados de la tabla se puede observar que la ceniza de estudio es un árido relativamente duro y difícil de fragmentar.

Tabla 12: Características relevantes de la ceniza de la central 1

	Central 1	Especificaciones EHE 08
Equivalente de arena	71	$\geq 70/75$
Materia orgánica	Más claro	Más claro que el patrón
Coefficiente de friabilidad	20	≤ 40

Tabla 13: Características relevantes de la ceniza de la central 2

	Central 2	Especificaciones EHE 08
Equivalente de arena	94	$\geq 70/75$
Materia orgánica	Más claro	Más claro que el patrón
Coefficiente de friabilidad	6	≤ 40

El análisis de superficie específica se realizó con la técnica BET de adsorción de nitrógeno que permite, además, determinar el volumen y tamaño de poros. Los valores obtenidos están en consonancia con el valor de absorción de agua de este tipo de materiales. Se detecta un elevado volumen de poros que produce, consecuentemente, una elevada absorción.

Los valores de pérdida por calcinación indican el contenido de carbón inquemado en las cenizas. Entre otros, este contenido afecta a la demanda de agua, a la compatibilidad con determinados aditivos que se puedan incorporar al hormigón y a la durabilidad de los hormigones (especialmente al comportamiento hielo-deshielo). En el caso de las cenizas de la central 1 este caso, los valores de pérdida por calcinación son extremadamente altos, lo que hace prever dificultades a la hora de utilizarlas. En el caso de las otras cenizas el valor es aceptable.

Tabla 14: Resultados del BET de la ceniza de la central 1

	Muestra 1	Muestra 2	Media
Superficie específica m ² /g	69,787	80,312	75,050
Volumen de poros cm ³ /g	0,0450	0,0509	0,0480
Tamaño de poro Å	25,919	25,494	25,706
Pérdida por calcinación (975°C 1h)	26,40%	28,10%	27,25%

Tabla 15: Resultados del BET de la ceniza de la central 2

	Muestra 1	Muestra 2	Media
Superficie específica m ² /g	0,2088	0,1587	0,1838
Volumen de poros mm ³ /g	0,1220	0,0750	0,0985
Tamaño de poro Å	74,339	101,251	87,795
Pérdida por calcinación (975°C 1h)	0,54%	8,62%	4,58%

La composición mineralógica se ha realizado mediante difracción de rayos-X sobre muestras pulverizadas hasta un tamaño de grano inferior a 50 µm. El equipo a emplear ha sido un difractorómetro de Rayos-X, efectuando un barrido de 2θ entre los 2 y los 60°, en incrementos de 0,050° y tiempo de lectura de 2,5 segundos. La radiación a emplear es de 1,54 Å (Cu-Kα).

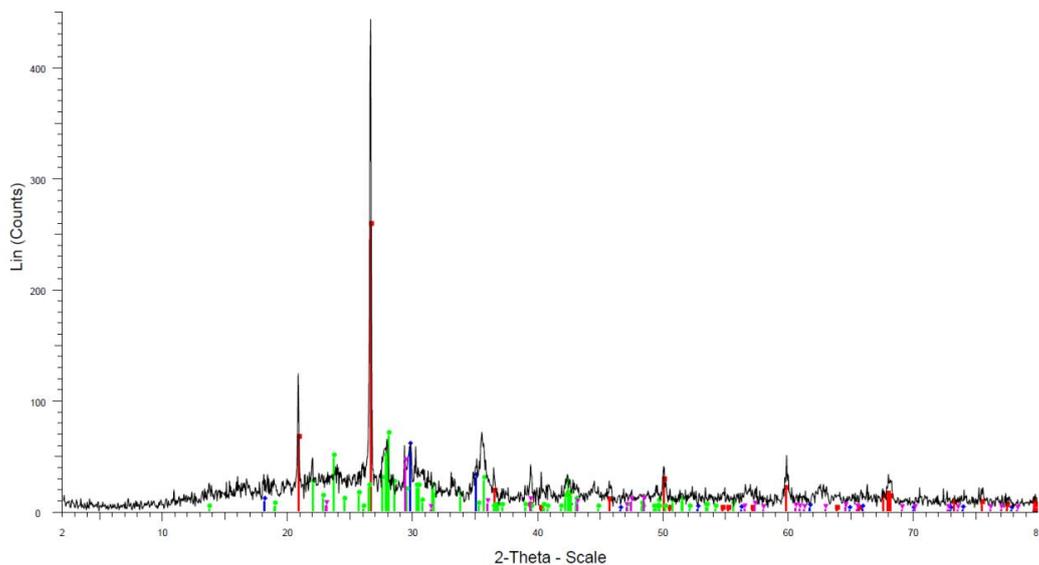
Las cenizas son habitualmente ricas en SiO₂, Al₂O₃, y Fe₂O₃ y otros óxidos minoritarios como CaO, MgO, MnO, TiO₂, Na₂O₃, K₂O₃, SO₃. Además suelen contener humedad y algún carbonato procedente de la carbonatación de la cal libre, así como agua combinada con los minerales arcillosos. También es habitual que presenten un porcentaje de inquemados procedente de carbón utilizado en la combustión. Debido al rápido enfriamiento para su obtención, acostumbra a presentar un elevado porcentaje de partículas vítreas. Cuanto menor sea el grado de cristalinidad (picos menos intensos) mayor será la actividad puzolánica de la ceniza.

Se ha realizado también una determinación de la composición mediante una técnica de fluorescencia de rayos-X. Esta técnica permite establecer las cantidades de óxidos presentes en una muestra independientemente de su estado cristalino. Esta técnica no es normativa pero está avalada por una amplia experiencia de utilización en el campo de la mineralogía.

Del ensayo se desprende que, como es habitual en las cenizas, nuestras cenizas de fondo son ricas en SiO_2 , Al_2O_3 , y Fe_2O_3 y otros óxidos minoritarios como CaO , MgO , MnO , TiO_2 , Na_2O_3 , K_2O_3 , SO_3 . Además, contienen humedad y algún carbonato procedente de la carbonatación de la cal libre, así como agua combinada con los minerales arcillosos. Debido al rápido enfriamiento para su obtención, acostumbran a presentar un elevado porcentaje de partículas vítreas. Cuanto menor sea el grado de cristalinidad (picos menos intensos) mayor será la actividad puzolánica de la ceniza [44] [46].

Tabla 16: Principales componentes químicos de la ceniza de la central 1

Muestra	nº SAI	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	TiO_2	Na_2O	BaO	MnO	SrO	P_2O_5
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2017/12766	34,0	14,6	11,0	8,4	2,0	0,93	0,81	0,69	0,35	0,18	0,15	0,082	0,066
	<i>D. Típica</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001	0,006
2	2017/12767	35,2	13,2	10,6	7,6	2,0	0,73	0,75	0,61	0,39	0,17	0,13	0,069	0,056
	<i>D. Típica</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001



17_12766_1 - File: 17_12766_1.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 2.5 s
 89-1961 (C) - Quartz low, dauphinee-twinned - SiO_2
 89-0951 (C) - Magnetite - Fe_3O_4
 18-1202 (I) - Anorthite, sodian, intermediate - $(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$
 72-1937 (C) - Calcite - CaCO_3

Figura 38: Difracción de rayos X (DRX) de una muestra de ceniza de la central 1.

Tabla 17: Principales componentes químicos de la ceniza de la central 2

Muestra	nº SAI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	MgO	TiO_2	Na_2O	P_2O_5	SrO	SO_3	BaO
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	2017/12766	56,1	21,0	6,3	5,5	2,1	1,3	1,0	0,91	0,40	0,22	0,20	0,21
	<i>D. Típica</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001
2	2017/12767	56,8	22,3	6,5	5,4	2,0	1,4	1,1	0,90	0,43	0,23	0,086	0,24
	<i>D. Típica</i>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001

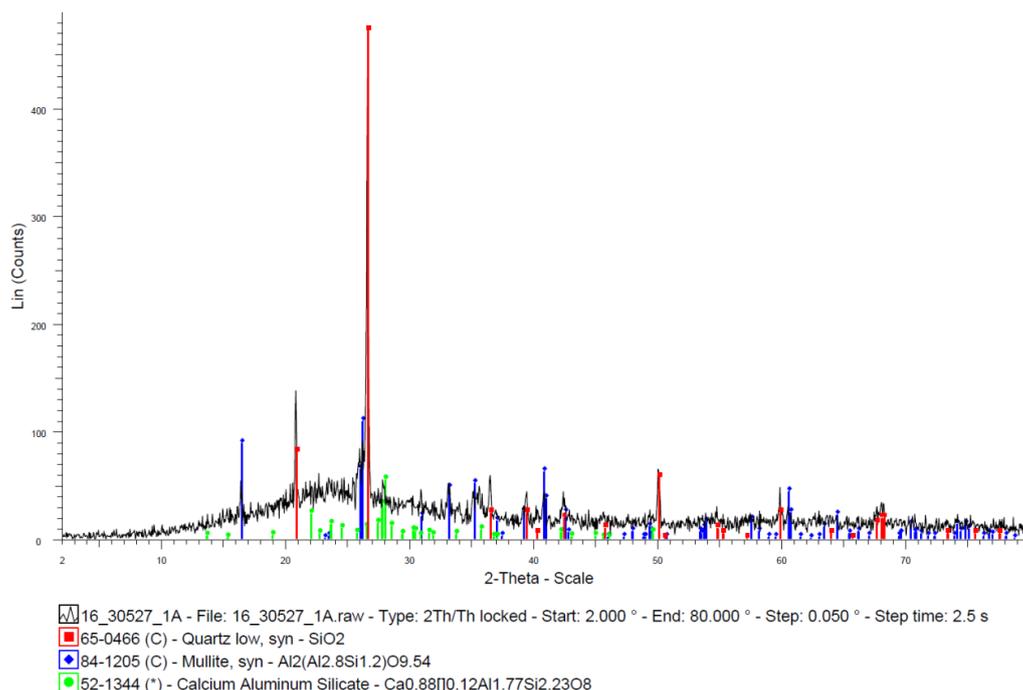
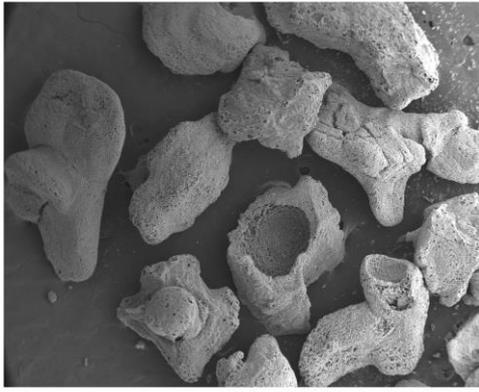


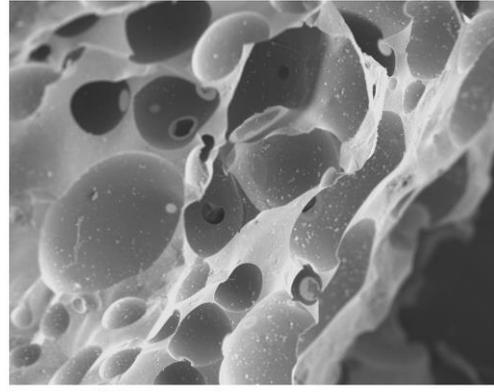
Figura 39: Difracción de rayos X (DRX) de una muestra de ceniza de la central 2.

Para analizar la forma y textura de las cenizas se han realizado una serie de microfotografías SEM mediante microscopio electrónico de barrido de las distintas muestras. Se muestran a continuación imágenes de diferentes fracciones. Se puede ver que predominan las partículas angulosas resultado de la fragmentación de partículas de mayor tamaño, sin embargo, al mismo tiempo se observan cenoesferas típicas de las cenizas volantes que solidifican como gotas en los gases de salida. Es decir, una fracción de la ceniza de fondo presenta una morfología similar a la ceniza volante, por lo que sería de esperar un cierto efecto puzolánico por parte de la fracción fina de la ceniza de cenicero. Lamentablemente, la fracción fina es reducida, por lo que este efecto puzolánico beneficioso será limitado dada la reducida presencia relativa de partículas amorfas esféricas.

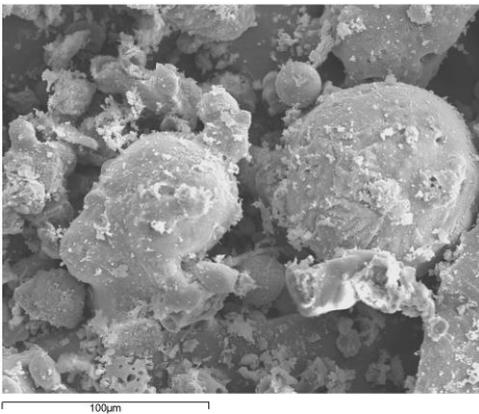
Por otra parte, al analizar la morfología de las partículas más gruesas se observa una elevada porosidad a varias escalas, dando lugar a poros visibles a simple vista 0,2-1,0 mm pero también meso y microporosidad con tamaños de poro tan reducidos como 1 micrómetro. Se observa también que esta porosidad se distribuye homogéneamente en toda la masa de las partículas. Esto permite plantear como hipótesis del origen de estos poros la salida de gases durante su formación (en un proceso similar al de fabricación de áridos artificiales ligeros) lo cual justifica las bajas densidades de la fracción gruesa.



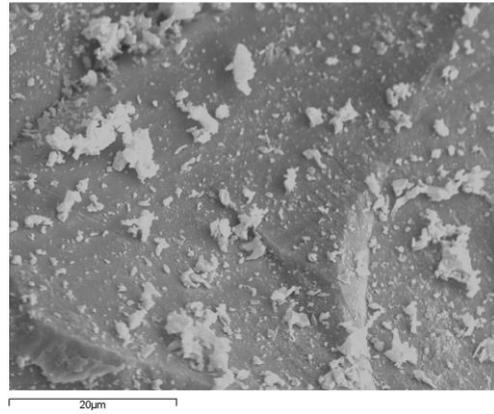
Fracción 2.5-1 20 aumentos



Fracción 25-4 100 aumentos



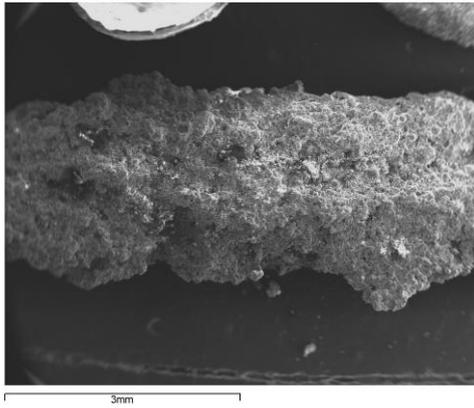
Fracción 0.125-0 500 aumentos



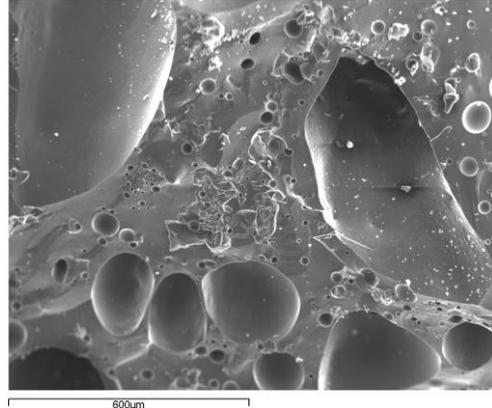
Fracción 0.63-0.25 2000 aumentos

Figura 40: Fotografías SEM (microscopio de barrido electrónico) de la ceniza de la cetral 1

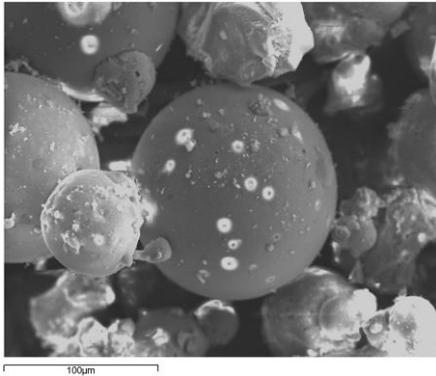
A partir de las imágenes SEM se observa que la ceniza de fondo de carbón tiene forma angular y muchos microporos en la superficie. Esta estructura porosa explica la elevada absorción del ácido de ceniza de fondo.



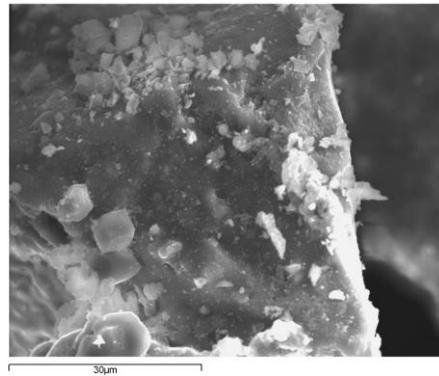
Fracción 2.5-20 20 aumentos



Fracción 25-4 100 aumentos



Fracción 0.125-0,063 430 aumentos



Fracción 0.125-0,063 1800 aumentos

Figura 41: Fotografías SEM (microscopio de barrido electrónico) de la ceniza de la central 2.

3.2 Dosificaciones

3.2.1 Morteros de revestimiento

Tras haber seleccionado y caracterizado todos los materiales con los que se iba a trabajar, se procedió a fijar los parámetros básicos de la dosificación del mortero de control. Se parte de una dosificación ya trabajada otras veces en otros proyectos del grupo de investigación. Para alcanzar porcentajes de sustitución mayores se decide componer una arena con la misma granulometría que cada una de las cenizas y así poder llegar a sustituir por completo los áridos naturales.

Mortero 1

Para el mortero con ceniza de la central 1 se parte de una mezcla de dos arenas con granulometría equivalente a la de la ceniza cortada por el tamiz 4.

Tabla 18: Granulometrías para la dosificación del mortero 1

	Mortero 1	Central 1
d	4	0
D	11,2	2,5
MF	3,2	3,2
63	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00
20	100,00	100,00
16	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00
11,2	100,00	100,00
10	100,00	100,00
8	100,00	100,00
6,3	100,00	100,00
5,6	100,00	100,00
4	99,95	100,00
2,5	98,24	92,63
2	92,84	89,30
1,25	79,55	81,55
1	73,76	76,67
0,63	63,25	62,99
0,5	58,12	54,77
0,4	52,67	47,11
0,315	45,27	39,70
0,25	37,77	33,89
0,125	16,41	18,08
0,08	8,33	11,07
0,063	5,09	8,07

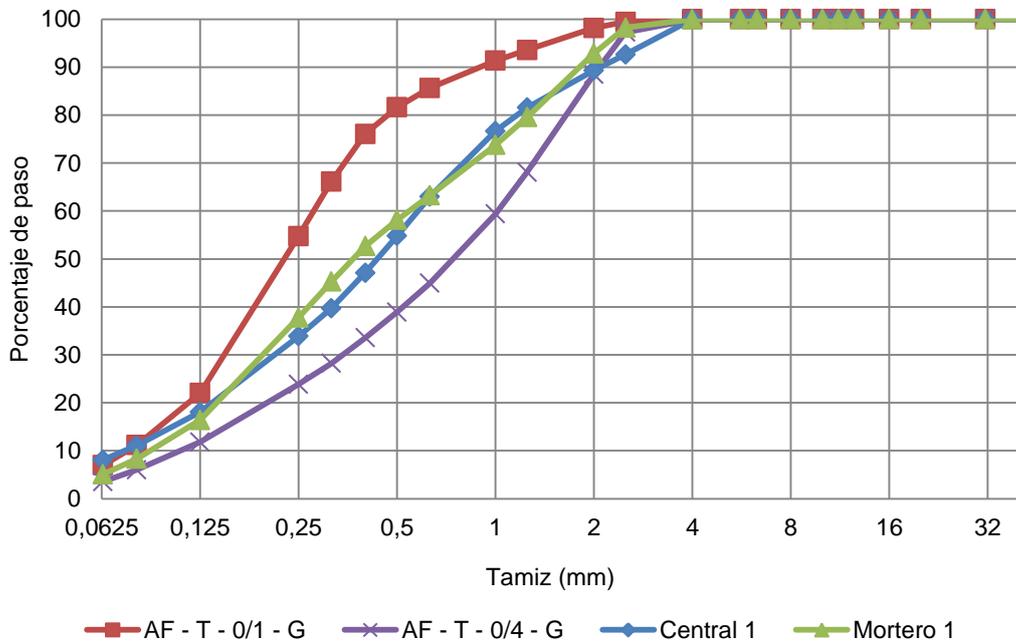


Figura 42: Curvas granulométricas de ceniza y áridos para mortero 1

La principal características de la dosificación es una relación agua cemento de 0,5 y un contenido de cemento de 446 kg/m³.

Tabla 19: Dosificación del mortero con ceniza de central 1

	0%		25%		50%		75%		100%	
	Vol (l)	Peso (kg)								
Agua	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9
Cemento	148,2	445,9	148,2	445,9	148,2	445,9	148,2	445,9	148,2	445,9
AF-T-0/1-G	265,0	617,4	198,8	463,1	132,5	308,7	62,3	154,4	0,0	0,0
AF-T-0/4-G	335,0	807,4	251,3	605,5	167,5	403,7	87,8	201,8	0,0	0,0
Ceniza	0,0	0,0	150,0	166,5	300,0	333,0	450,0	499,5	600,0	666,0
Total	1000,0	2122,6	1000,0	1932,9	1000,0	1743,2	1000,0	1553,5	1000,0	1363,8

Mortero 2

Para el mortero con ceniza de la central 2 se parte de una mezcla de dos arenas con granulometría equivalente a la de la ceniza cortada por el tamiz 4.

Tabla 20: Granulometrías para la dosificación del mortero 2

	Mortero 2	Central 2
d	0	0
D	10	2,5
MF	3,06	3,04
63	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00
16	100,00	100,00
8	100,00	100,00
5,6	100,00	100,00
4	98,96	100,00
2,5	92,09	89,26
2	88,35	83,95
1,25	80,00	75,34
1	76,41	73,07
0,63	69,11	66,70
0,5	64,88	63,72
0,4	59,77	59,90
0,315	51,61	54,39
0,25	42,64	48,20
0,125	17,08	20,93
0,08	8,48	9,79
0,063	5,30	6,33

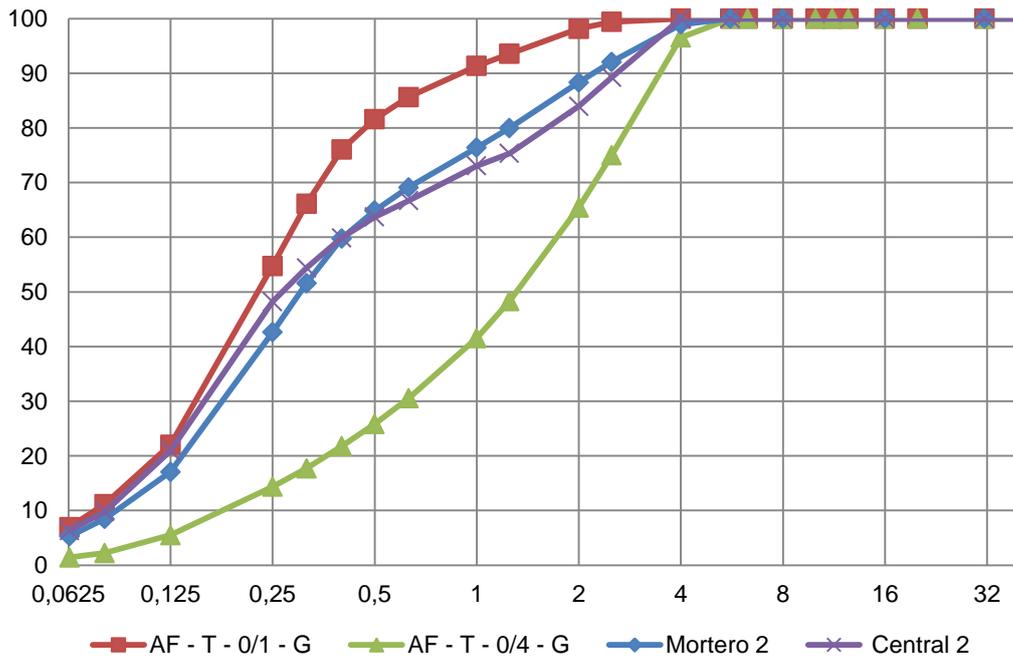


Figura 43: Curvas granulométricas de ceniza y áridos para mortero 2

La dosificación en este caso mantiene los parámetros de la anterior.

Tabla 21: Dosificación del mortero con ceniza de central 1

	0%		25%		50%		75%		100%	
	Vol (l)	Peso (kg)								
Agua	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9	251,9
Cemento	148,2	445,9	148,2	445,9	148,2	445,9	148,2	445,9	148,2	445,9
AF-T-0/1-G	420,0	978,6	315,0	734,0	210,0	489,3	105,0	244,7	0,0	0,0
AF-T-0/4-G	180,0	441,0	135,0	330,8	90,0	220,5	45,0	110,3	0,0	0,0
Ceniza	0,0	0,0	150,0	210,0	300,0	420,0	450,0	630,0	600,0	840,0
Total	1000,0	2117,4	1000,0	1972,5	1000,0	1827,6	1000,0	1682,7	1000,0	1537,8

3.2.2 Hormigón para prefabricados

Para dosificar este hormigón se parte de la dosificación que utilizan en la empresa de prefabricados, para cada tanda de bloques de hormigón preparan una amasada de aproximadamente 1,4 m³ y con una dosificación ajustada a una granulometría concreta según las especificaciones de la máquina que utilizan. Para respetar estas especificaciones se compuso una granulometría formada por ceniza y dos de los áridos de los que se dispone, siendo ésta equivalente a la que utilizan habitualmente. Los porcentajes de sustitución de una mezcla por otra son del 25% 50% 75% y 100%, dando lugar a una sustitución real de árido natural por ceniza de fondo del 10% 20% 30% y 40%.

Tabla 22: Granulometrías para hormigón de prefabricados

	Mezcla Origen	Mezcla sustitución
d	0	0
D	8	8
MF	4,5	4,6
63	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00
20	100,00	100,00
16	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00
11,2	100,00	100,00
10	99,96	99,96
8	99,58	99,58
6,3	95,58	94,51
5,6	88,24	86,88
4	74,97	73,06
2,5	66,05	61,39
2	62,30	56,74
1,25	54,10	48,02
1	49,74	43,95
0,63	40,65	35,09
0,5	35,77	30,46
0,4	30,91	26,09
0,315	25,48	21,80
0,25	20,81	18,44
0,125	7,82	9,67
0,08	2,61	5,85
0,063	1,32	3,97

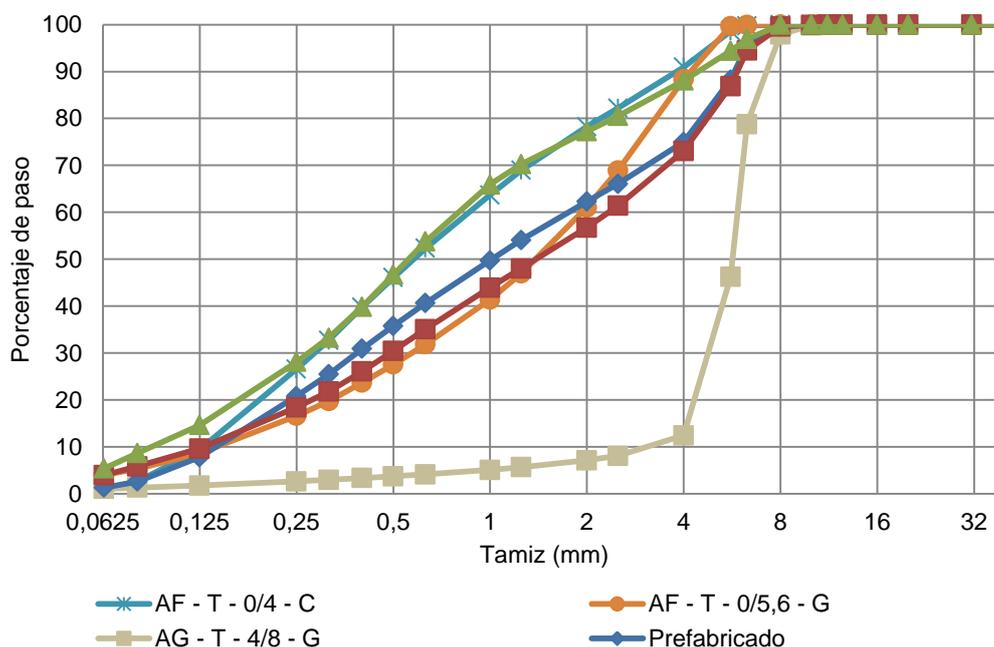


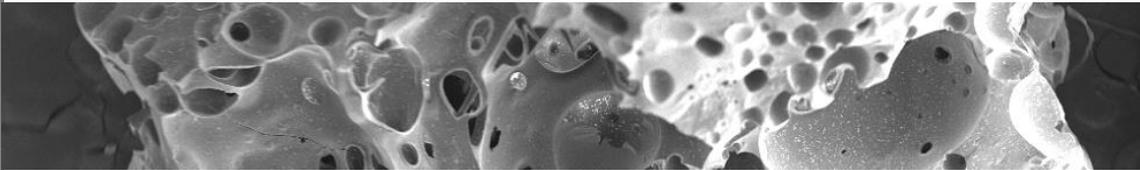
Figura 44: Curvas granulométricas de ceniza y áridos para hormigón de prefabricados

Las principales características de esta dosificación son un bajo contenido en cemento y una baja relación agua cemento, un 0,33. Requiere un amasado muy enérgico para conseguir una mezcla homogénea.

Tabla 23: Dosificación para hormigón de prefabricados

	0%		25%		50%		75%		100%	
	Vol (l)	P (kg)								
Agua	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6	96,6
Cemento	93,7	295,0	93,7	295,0	93,7	295,0	93,7	295,0	93,7	295,0
AF-T-0/4-C	121,5	300,0	86,8	214,4	57,9	142,9	29,0	71,5	0,0	0,0
AF-T-0/5,6-G	830,0	2100,0	752,0	1902,6	660,7	1671,6	569,4	1440,6	478,1	1209,6
AG-T-4/8-G	244,9	600,0	237,3	581,4	239,1	585,7	240,5	589,1	241,0	590,4
Ceniza	0,0	0,0	120,3	150,6	238,8	301,2	357,6	451,8	477,3	602,4
Total	1386,6	3391,6	1386,6	3240,5	1386,6	3093,0	1386,6	2944,5	1386,6	2794,0

4 Programa experimental



4 Programa experimental

Como se indica en el punto anterior se realizan distintos tipos de morteros y hormigones, para caracterizar cada uno de ellos se diseña un plan experimental adecuado a cada tipo.

4.1 Morteros de revestimiento

4.1.1 Estado fresco

Estos ensayos se realizan tras el amasado, en los primeros minutos, cuando el mortero aún no ha fraguado.

Densidad en fresco

La densidad en fresco se obtiene dividiendo el peso del mortero necesario para llenar el molde entre el volumen nominal del mismo. Para ello se determina el peso del molde antes y después del vertido de los morteros en su interior. Se utiliza una báscula con precisión hasta 0,5 g, en este caso el volumen nominal de las tres probetas que ocupan un molde es igual de $3 \times 0,4 \times 0,4 \times 1,6 \text{ dm} = 0,768 \text{ dm}^3$ o litros. La norma de referencia para este ensayo es la UNE-EN 1015-6[75].



Figura 45: Molde de mortero lleno, pesándose en báscula para calcular la densidad fresca

Minislump

Este ensayo sirve para conocer la consistencia del mortero, esta se determina por la medida del escurrimiento en una mesa de sacudidas según norma UNE-EN 1015-3:2000[76]. La consistencia es una medida de la fluidez y humedad del mortero fresco, proporciona una medida de su deformabilidad cuando se somete a un determinado tipo de esfuerzo. Normalmente existe correlación lineal entre el valor del escurrimiento y el valor de penetración del pistón del siguiente punto.



Figura 46: Máquina para ensayo minislump

El molde se rellena en dos capas, compactando con un pisón normalizado diez veces, tras el llenado se enrasa y se retira. Tras esto se esperan quince segundos y se enciende la mesa de sacudidas, golpeando 10 veces la muestra. Para finalizar se mide el tamaño de la torta resultante.



Figura 47: Torta tras ensayo minislump y ser medida

Pistón

Este ensayo sirve para conocer la consistencia del mortero, esta se determina por la medida de penetración de un pistón cilíndrico normalizada en un recipiente lleno de mortero según norma UNE 1015-4:2000[77]. La consistencia es una medida de la fluidez y humedad del mortero fresco, proporciona una medida de su deformabilidad cuando se somete a un determinado tipo de esfuerzo.



Figura 48: Aparato para ensayo de penetración de pistón

Se fija el pistón en su posición inicial y se llena el molde en dos capas golpeando 10 veces con un pisón normalizado cada una, tras esto se enrasa. Pasados dos minutos y medio tras finalizar la amasada se suelta el pistón y se permite su caída libre. Para finalizar se mide lo que ha penetrado en la muestra.



Figura 49: Ensayo de penetración de pistón y detalle del resultado

Exudación

La exudación es el agua de amasado que es susceptible de expulsar una muestra de hormigón o mortero fresco. Para esto se sigue la norma UNE 480-4:2006[78] para hormigones adaptándola a morteros puesto que no existe ninguna norma específica. Se llena un recipiente cilíndrico de un litro y se retira con ayuda de una pipeta el agua que va exudando a determinados tiempos hasta que este proceso finaliza. Al final se obtiene el dato del agua exudada total respecto al volumen de la muestra.



Figura 50: Recipiente lleno de mortero para ensayo de exudación

Contenido en aire

Este ensayo según norma UNE-EN 1015-7:2000[77] se basa en colocar un mortero en un recipiente sobre el cual se vierte agua y se aplica presión sobre ella que obliga a los poros a liberar el aire llenándose de agua. Conociendo ese volumen de agua puede conocerse el volumen de aire extraído del mortero.



Figura 51: Aparato para realizar el ensayo de contenido de aire en morteros

Para este ensayo se llena el molde en cuatro capas compactando cada una con diez golpes de pisón y tras esto se enrasa y se cierra. Con ambas válvulas abiertas se introduce agua por una de ellas hasta que salga de forma constante por la otra,

momento en el que se cierran ambas válvulas. Tras esto se acciona la bomba hasta llegar a la marca roja del reloj (colocada en un tarado previo de la máquina) y se pulsa el botón de test obteniendo ya el resultado de contenido de aire en tanto por ciento.



Figura 52: Resultado del ensayo de contenido en aire

Tiempo abierto de trabajabilidad

Para determinar el periodo abierto de trabajabilidad se determina un método de ensayo en fresco según la norma UNE-EN 1015-9:2000[79]. Este ensayo nos da un valor en minutos a partir del cual se alcanza un límite definido de rigidez o de trabajabilidad.

Para esto se llena un molde en diez capas dando después de cada capa golpes con él en la mesa para compactar. El molde se guarda en una bolsa hermética y se lleva a la cámara climática durante un tiempo, tras esto se coloca una balanza bajo la sonda de penetración y se baja sobre el molde hasta que la arandela descansa sobre la superficie. Este peso se registra y se divide entre tres, este resultado es la resistencia a penetración. Repetir el proceso en intervalos hasta sobrepasar los $0,5 \text{ N/mm}^2$. Con estos datos se elabora una gráfica y se obtiene el tiempo abierto de trabajabilidad.



Figura 53: Proceso del ensayo de tiempo abierto de trabajabilidad

Temperatura de fraguado

Este ensayo se basa en la norma UNE-EN 196-9:2011[80], pero como no se dispone de un calorímetro (aparato necesario para realizar el ensayo), se realiza un ensayo similar en un recipiente aislado.



Figura 54: Recipiente aislado para realizar el ensayo

Se mide la temperatura en el interior de una muestra de mortero a intervalos de 10 min durante dos días, para garantizar que las condiciones exteriores sean constantes este ensayo se realiza dentro de la cámara climática.



Figura 55: Probeta de mortero, con sensor de temperatura y tarjeta de toma de datos, tras finalizar el ensayo

4.1.2 Estado endurecido

Estos ensayos se realizan tras el amasado cuando el mortero ya ha endurecido.

Densidad y absorción

La densidad en seco de una probeta de mortero endurecido se determina dividiendo su masa en estado seco en estufa entre el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua en estado saturado. El proceso seguido se detalla en la norma UNE-EN 1015-10:2000[81].

Para la realización de este ensayo se parte de varias probetas cúbicas de 3 cm de lado aproximadamente. Se secan en la estufa hasta que su peso es constante, para posteriormente saturarlas en agua, primero simplemente sumergiéndolas y después volviéndolas a sumergir en agua hirviendo durante cinco horas para garantizar su saturación. Tras esto se pesan, para poder determinar posteriormente la absorción. Por último se utiliza una balanza hidrostática para calcular su volumen siguiendo el principio de Arquímedes.



Figura 56: Probetas en agua hirviendo durante el ensayo de absorción

Con todos estos datos se determina su densidad y absorción.

Resistencia a compresión

Este ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN 1015-11:2000[82]. Para ello se utilizan las dos mitades de probeta obtenidas tras la rotura a flexión. La prensa ejerce sobre la probeta, a través del dispositivo de ensayo a compresión, una fuerza que aumenta gradualmente y que es medida por una célula de carga hasta su valor máximo. Conociendo esta fuerza máxima aplicada y dividiéndola por la superficie en la que actúa, permite obtener la resistencia a compresión en MPa.

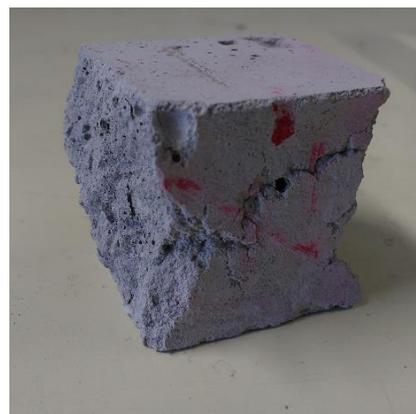
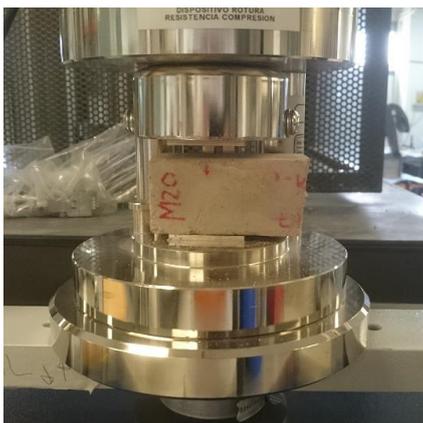


Figura 57: Dispositivo de ensayo a compresión y probeta ensayada

Resistencia a flexión

Este ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN 1015-11[82]. Se coloca una probeta centrada en el dispositivo de rotura a flexión, esta queda apoyada en dos rodillos y recibe una carga puntual en la cara opuesta en el centro de ambos apoyos aplicada por otro rodillo.



Figura 58: Dispositivo de ensayo a flexión y probeta ensayada

La prensa ejerce sobre la probeta, a través de los rodillos del dispositivo, una fuerza que aumenta gradualmente y es registrada por la célula de carga. Esta registra el valor máximo, con este dato, la sección de la probeta y la distancia entre apoyos se calcula la resistencia a flexión en MPa. Tras el ensayo, la probeta queda dividida en dos partes que serán las ensayadas a compresión.

Resistividad eléctrica

Mediante un aparato calibrado para medir la resistencia al paso de la corriente eléctrica se determina la resistividad de las probetas, que a su vez es indicativo de su humedad y contenido de agua.



Figura 59: Aparato para ensayo de resistividad

Retracción

Este ensayo tiene por objeto determinar la retracción durante el secado del mortero según norma UNE 80112:2016[83]. El ensayo consiste en medir, en función del tiempo la variación de longitud de las probetas prismáticas. Para poder medir sobre un punto fijo se deja embebido un tornillo en la cara de la probeta, y para realizar la medida se utiliza un reloj comparador. Las probetas se conservan en la cámara climática sobre una cama de canicas para garantizar que se puedan contraer libremente.



Figura 60: Medición de probeta para ensayo de retracción

Capilaridad

Para conocer este parámetro se realiza el ensayo de capilaridad por absorción según la norma UNE-EN 1015-18[84]. El material impermeabilizante utilizado fue parafina y el soporte sobre el que se apoyaron las probetas durante el ensayo un tamiz de malla rectangular.

Para la realización de este ensayo, tras el secado de la probeta, ésta se sumerge en vertical de forma que una de sus caras menores está en contacto con el agua tras sellar las caras mayores con parafina. La absorción será la pendiente de la recta de las medidas tomadas a 10 min y a 90 min.

4.2 Hormigón para prefabricados

4.2.1 Estado fresco

Estos ensayos se realizan tras el amasado, en los primeros minutos, cuando el hormigón aún no ha fraguado.

Densidad en fresco

La densidad en fresco se obtiene dividiendo el peso del hormigón necesario para llenar el molde entre el volumen nominal del mismo. Para ello se determina el peso del molde antes y después del vertido de los morteros en su interior. Se utiliza una báscula con precisión hasta 0,5 g, en este caso el volumen nominal de la probeta que ocupa un molde es igual de $0,75^2 \times \pi \times 3 \text{ dm} = 5,30 \text{ dm}^3$ o litros en el caso de las cilíndricas y de $3 \times 1 \times 1 \text{ dm} = 3 \text{ dm}^3$ o litros en el caso de las cúbicas. La norma de referencia para este ensayo es la UNE-EN 1015-6[75].



Figura 62: Molde de probetas cúbicas listo para ser pesado

Facilidad de compactado (Trabajabilidad)

Para determinar este parámetro se simula una compactación por vibrado y otra por vibrado y con peso, similar a la que se usa para fabricar los bloques de hormigón para los que se destina esta mezcla.

Se rellenan dos moldes cilíndricos hasta la mitad con hormigón sin compactar uno con un peso de 20 kg y otro sin él. Tras ello se activa la mesa vibrante durante 20 segundos y se mide la variación de altura del hormigón.

Este ensayo permite conocer la capacidad de compactado de la mezcla y su aptitud para la fabricación de bloques.



Figura 63: Moldes antes y después de vibrado

4.2.2 Estado endurecido

Densidad y absorción

La densidad en seco de una probeta de mortero endurecido se determina dividiendo su masa en estado seco en estufa por el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua en estado saturado. El proceso seguido se detalla en la norma UNE-EN 1015-10:2000[81].

Para la realización de este ensayo partimos de varias probetas cúbicas de 8 cm de lado aproximadamente. Se secan en la estufa hasta que su peso es constante, para posteriormente saturarlas en agua, primero simplemente sumergiéndolas y después volviéndolas a sumergir en agua hirviendo durante cinco horas para garantizar su saturación. Tras esto se pesan, para poder determinar posteriormente la absorción. Por último se utiliza una balanza hidrostática para calcular su volumen siguiendo el principio de Arquímedes.

Con todos estos datos se determina su densidad y absorción.

Resistencia a compresión

Este ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN 12390-3[85]. Para ello se utilizan probetas cúbicas de 10 cm de lado. La prensa ejerce sobre la probeta, a través del dispositivo de ensay a compresión, una fuerza que aumenta gradualmente y que es medida por una célula de carga hasta su valor máximo. Conociendo esta fuerza máxima aplicada y dividiéndola por la superficie en la que actúa, se puede obtener la resistencia a compresión en MPa.



Figura 64: Probeta cúbica de hormigón ensayada a compresión

Resistencia a tracción

Para conocer la resistencia a tracción se realiza un ensayo de tracción indirecta o brasileño. Se coloca una probeta cilíndrica en un dispositivo de rotura que la rompe longitudinalmente aplicando una carga lineal. Se sigue la norma UNE-EN 12390-6[86].



Figura 65: Dispositivo para realizar ensayo a tracción de probetas cilíndricas

Módulo de elasticidad

Se somete una probeta con galgas extensiométricas a ciclos de carga y descarga en el rango elástico de deformación, con estos datos puede calcularse el módulo de elasticidad. Se sigue la norma UNE-EN 12390-13[87].

Permeabilidad al agua

Con el fin de caracterizar la durabilidad del hormigón, se llevó a cabo el ensayo de permeabilidad al agua en medias probetas cilíndricas según UNE-EN 12390-8[88]. Una vez sometidas al ensayo se rompen a tracción y se evalúa el grado de penetración de agua en cada una de las probetas resultantes midiendo la huella de agua.

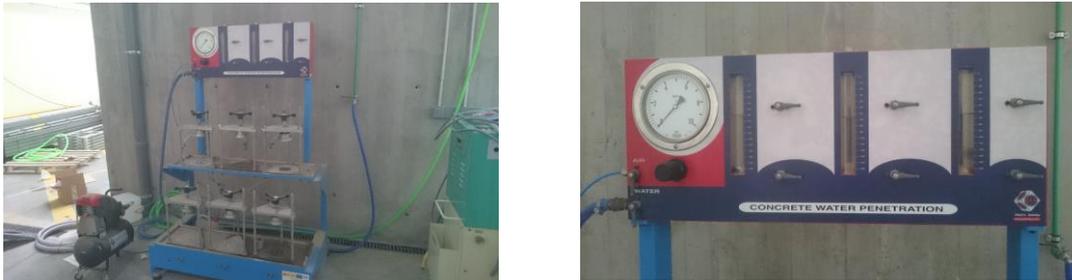


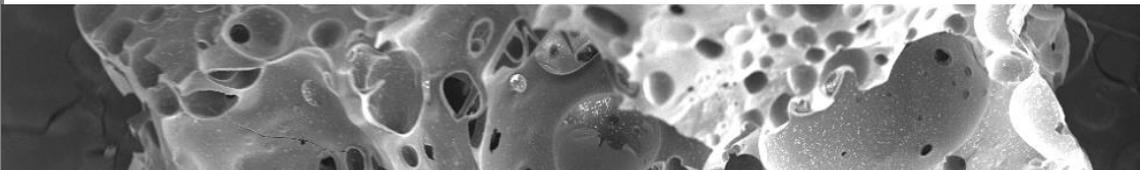
Figura 66: Máquina para ensayo de permeabilidad al agua del hormigón

4.2.3 Tabla resumen

Tabla 25: Programa de ensayos de hormigones prefabricados

	Edad de la probeta								
	En fresco	2	3	5	7	14	28	56	90
Densidad en fresco									
Facilidad de compactado									
Densidad y absorción									
Resistencia a compresión									
Resistencia a tracción									
Módulo de elasticidad									
Permeabilidad al agua									

5 Resultados y conclusiones



5 Análisis de resultados y conclusiones

5.1 Morteros de revestimiento

A continuación se detallan y analizan los resultados obtenidos hasta el momento de los distintos ensayos planteados en el programa de ensayos.

Tras ser fabricadas las probetas se guardan en la cámara climática hasta el momento de su ensayo. En el primer momento, antes de fraguar, se guardan los moldes rellenos en bolsas herméticas durante dos días, tras esto las probetas se desmoldan y se guardan en las bolsas herméticas hasta el séptimo día. Finalmente se sacan de la bolsa y se colocan en bandejas donde están con todas sus caras en contacto con el ambiente de la cámara climática.

Para facilitar su identificación los morteros se nombran como MC seguido de AP o M según sean con cenizas de la central 1 o la central 2 y a continuación el ratio de sustitución, por ejemplo, el MC-AP-50 es un mortero de revestimiento con ceniza de la central uno y un ratio de sustitución del 50%.

5.1.1 Estado fresco

Consistencia: Minislump, pistón y tiempo abierto de trabajabilidad

Estos tres ensayos sirven para medir la consistencia del mortero, dando una idea de su fluidez y su deformabilidad cuando se somete a un determinado esfuerzo y el tiempo durante el cual se mantienen estas propiedades.

A continuación se muestran los resultados del minislump y del pistón para el mortero elaborado con las cenizas de la central 1.

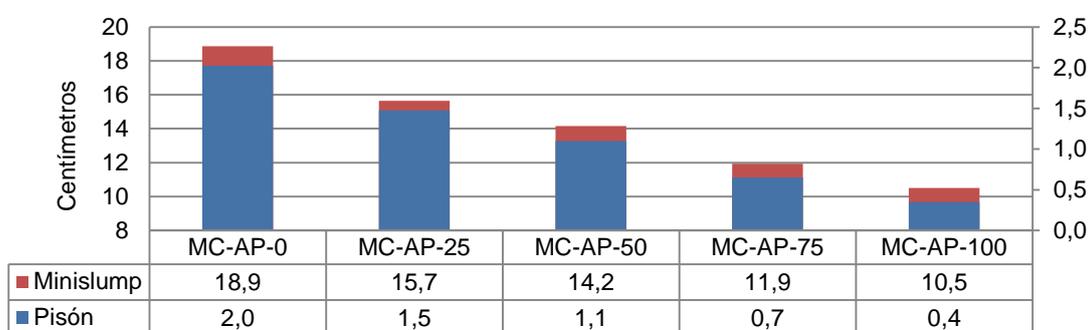


Figura 67: Resultados de los ensayos de consistencia de morteros con ceniza de la central 1

Como puede apreciarse a mayor sustitución la consistencia es más seca que la de la dosificación patrón, bajado el tamaño de la torta y la profundidad que se clava el pistón. También puede apreciarse la relación entre ambos resultados lo que es indicativo de que los valores están correlacionados como indica la norma UNE-EN 1015-3:2000[76].

Esto también es coherente con los datos de tiempo abierto de trabajabilidad que disminuye a medida que aumenta el ratio de sustitución.

Tabla 26: Tiempo abierto de trabajabilidad del mortero con ceniza de la central 1

	MC-AP-0	MC-AP-25	MC-AP-50	MC-AP-75	MC-AP-100
Tiempo abierto de trabajabilidad (min)	115,91	67,98	52,29	55,27	44,07

En el caso de los morteros realizados con las cenizas de la central 2 la tendencia es la misma aunque la consistencia no varía tanto como con las otras cenizas, estos datos se muestran en la siguiente gráfica.

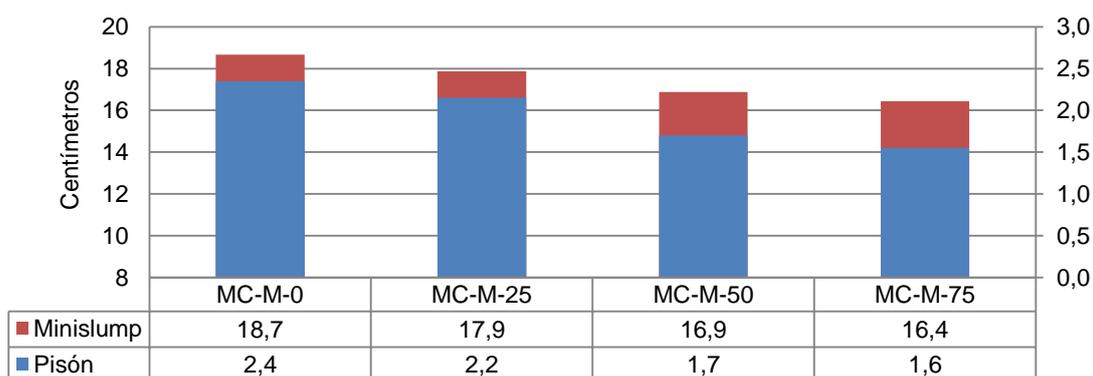


Figura 68: Resultados de los ensayos de consistencia de morteros con ceniza de la central 2

Aunque en el caso de los morteros con ceniza de central 2 la consistencia es similar entre los distintos ratios el mortero era más difícil de amasar. No se pudo llegar al 100% de sustitución puesto que la amasadora de morteros no era capaz de homogeneizar la mezcla.

Contenido en aire y densidad en fresco

El contenido en aire y densidad en fresco muestra valores muy similares en los dos morteros patrón así como en los ratios de sustitución más bajos, a medida que este sube los valores varían. La menor densidad en fresco y mayor porosidad e las cenizas de la central 1 explican que a sustituciones mayores la densidad baje y aumente el contenido en aire del mortero.

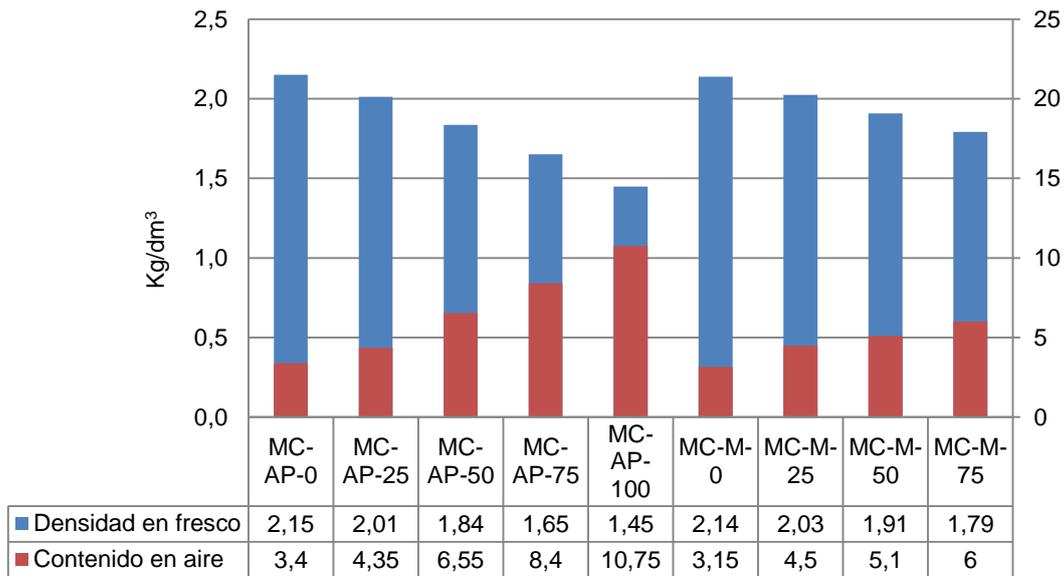


Figura 69: Densidad en fresco y contenido en aire de morteros con ceniza de la central 1 y 2

Exudación

En la siguiente tabla se indican los valores de exudación y el tiempo tras el amasado que esta tarda en detenerse. Puede apreciarse como un mayor contenido en ceniza de la central 1 reduce la exudación, en cambio la ceniza de la central 2 prácticamente no hace variar la exudación.

Tabla 27: Exudación de los morteros con ceniza de la central 1 y 2

	MC-AP					MC-M			
	0	25	50	75	100	0	25	50	75
Tiempo hasta fin (h)	4:35	4:25	3:15	1:40	0:55	4:22	4:07	4:05	2:35
Máxima exudación %	12,62%	8,30%	3,12%	0,46%	0,00%	11,35%	12,37%	13,79%	12,96%

Temperatura de fraguado

En la siguiente gráfica se muestran las curvas de evolución de temperatura en el mortero durante el fraguado, como puede apreciarse a mayor contenido en cenizas mayor temperatura, aunque la diferencia no es significativa siendo un máximo de 2°C entre el mortero patrón y el con un 100% de sustitución de ceniza de la central 1.

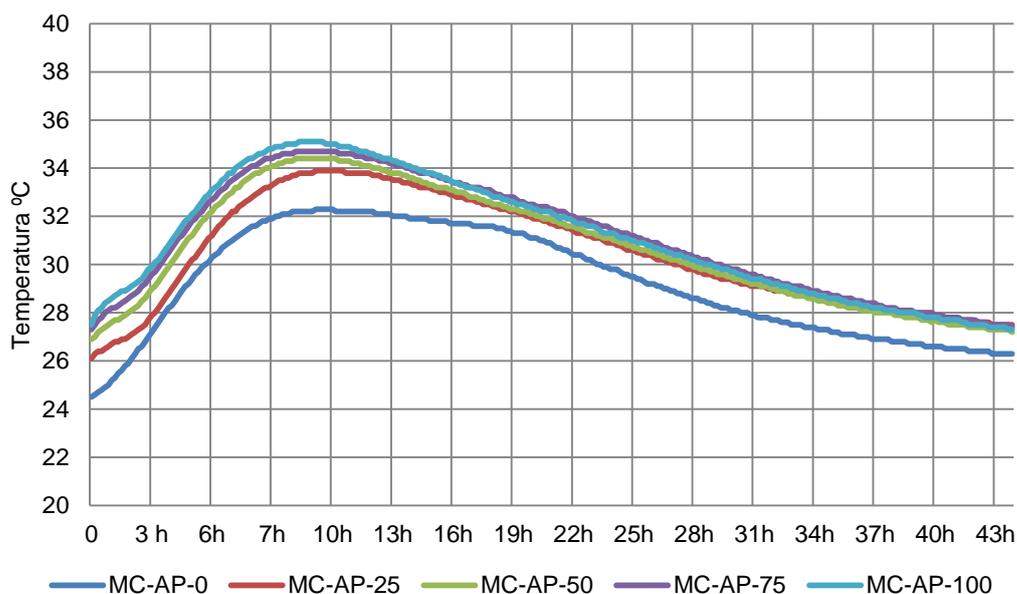


Figura 70: Temperatura de fraguado de morteros con cenizas de la central 1

5.1.2 Estado endurecido

Densidad y absorción

La siguiente tabla muestra los datos de densidad aparente, que es aquella calculada por el principio de Arquímedes y en la que se tiene en cuenta el volumen de la muestra descontando el de todos los poros accesibles. La densidad seca es la densidad de la probeta seca. Como puede verse la densidad baja al subir el ratio de sustitución. Este resultado es coherente con la menor densidad de la ceniza respecto a los áridos. La densidad seca disminuye más puesto que no tiene en cuenta la porosidad de la probeta, la cual aumenta cuando aumenta el ratio de sustitución.

Tabla 28: Densidad aparente y densidad seca de los morteros con ceniza de la central 1 y la central 2

	MC-AP					MC-M			
	0	25	50	75	100	0	25	50	75
Densidad aparente kg/dm ³	2,58	2,53	2,50	2,43	2,40	2,60	2,49	2,34	2,22
Densidad seca kg/dm ³	1,91	1,73	1,47	1,30	1,22	1,88	1,78	1,65	1,48

Con los datos obtenidos de peso seco, peso saturado y peso saturado tras 5 horas en agua hirviendo se obtienen los datos de absorción y de porosidad accesible al agua. Como se puede apreciar el comportamiento es muy similar en ambas cenizas. Los morteros con ceniza de la central 1 tienen mayor absorción y porosidad accesible puesto que esas cenizas también tienen mayor absorción y porosidad que las otras.

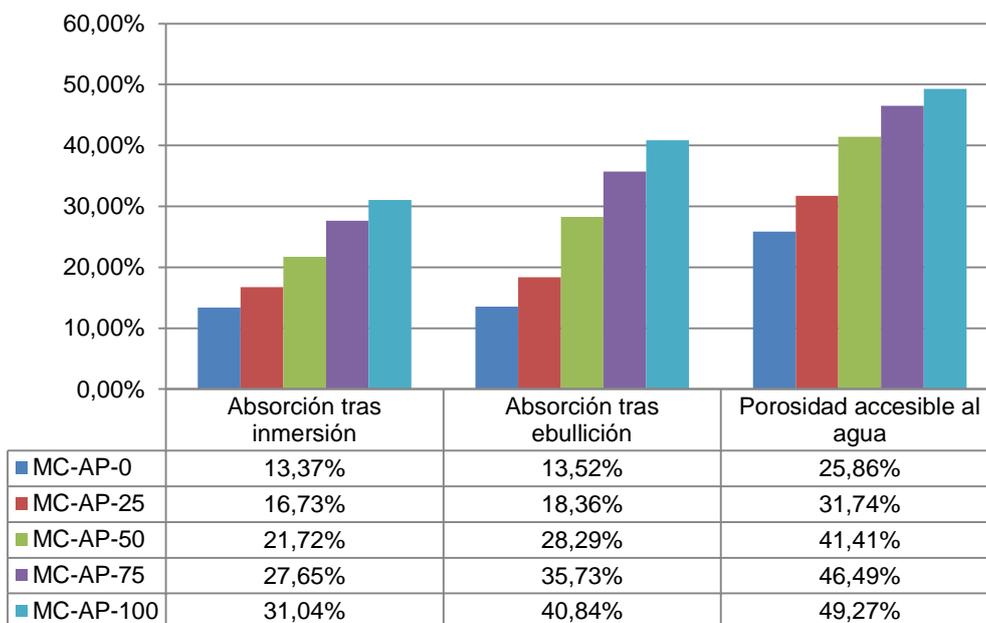


Figura 71: Absorción y porosidad de morteros con ceniza de la central 1

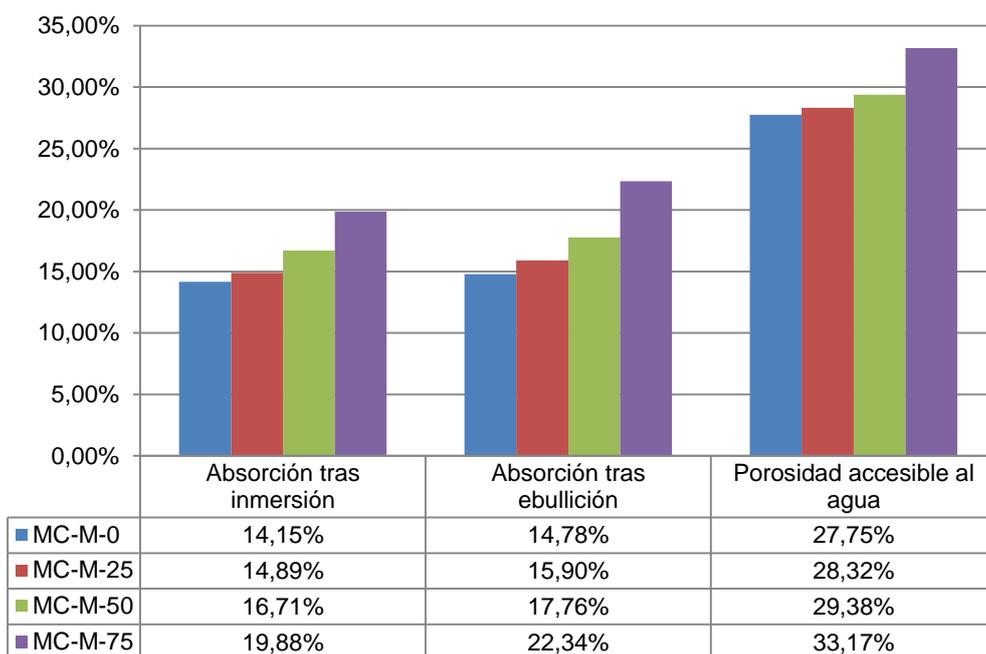


Figura 72: Absorción y porosidad de morteros con ceniza de la central 2

Propiedades mecánicas: resistencia a compresión y resistencia a flexión

El comportamiento de los morteros en cuanto a su resistencia a compresión y flexión es muy diferente en las cenizas de la central 1 y la central 2. Mientras con la primera las resistencias bajan de forma considerable cuando aumenta el ratio de sustitución con la segunda las resistencias se van igualando a partir de los 7 días hasta que la diferencia entre el patrón y la de los diferentes ratios de sustitución es pequeña.

En primer lugar se muestran las gráficas de las resistencias a compresión de los morteros con ceniza de la central 1 y central 2

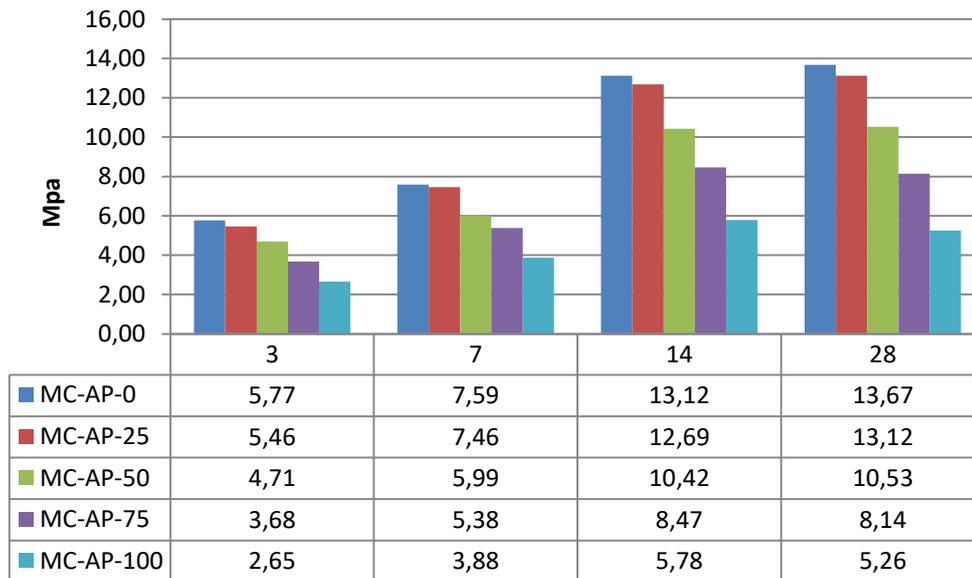


Figura 73: Resistencias a compresión de morteros con cenizas de la central 1

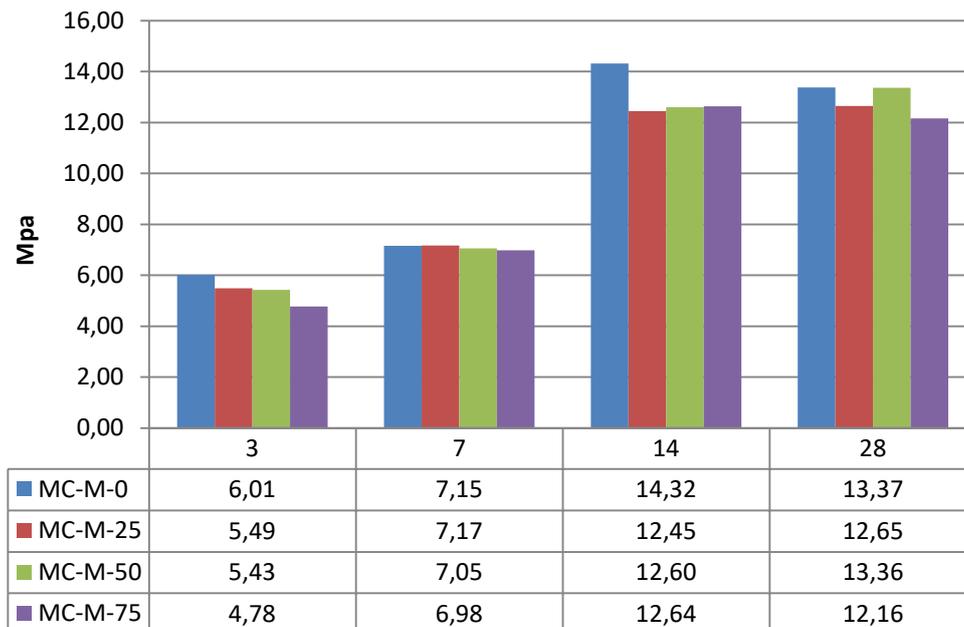


Figura 74: Resistencias a compresión de morteros con cenizas de la central 2

La siguiente tabla muestra las variaciones porcentuales de resistencia entre el mortero patrón y los distintos ratios de sustitución.

Tabla 29: Variaciones de la resistencia a compresión entre morteros de control y morteros con ceniza de la central 1 y la central 2

	MC-AP					MC-M			
	0	25	50	75	100	0	25	50	75
3 días	0,00%	-5,31%	-18,39%	-36,25%	-54,01%	0,00%	-8,71%	-9,69%	-20,52%
7 días	0,00%	-1,68%	-21,00%	-29,13%	-48,92%	0,00%	0,25%	-1,42%	-2,48%
14 días	0,00%	-3,31%	-20,60%	-35,47%	-55,95%	0,00%	-13,04%	-12,01%	-11,76%
28 días	0,00%	-4,04%	-22,99%	-40,46%	-61,55%	0,00%	-5,37%	-0,07%	-9,08%

En cuanto a la resistencia a flexión el comportamiento es análogo al de la resistencia a compresión aunque en los morteros con cenizas de la central 2 las resistencias si bajan un poco al aumentar el ratio de sustitución.

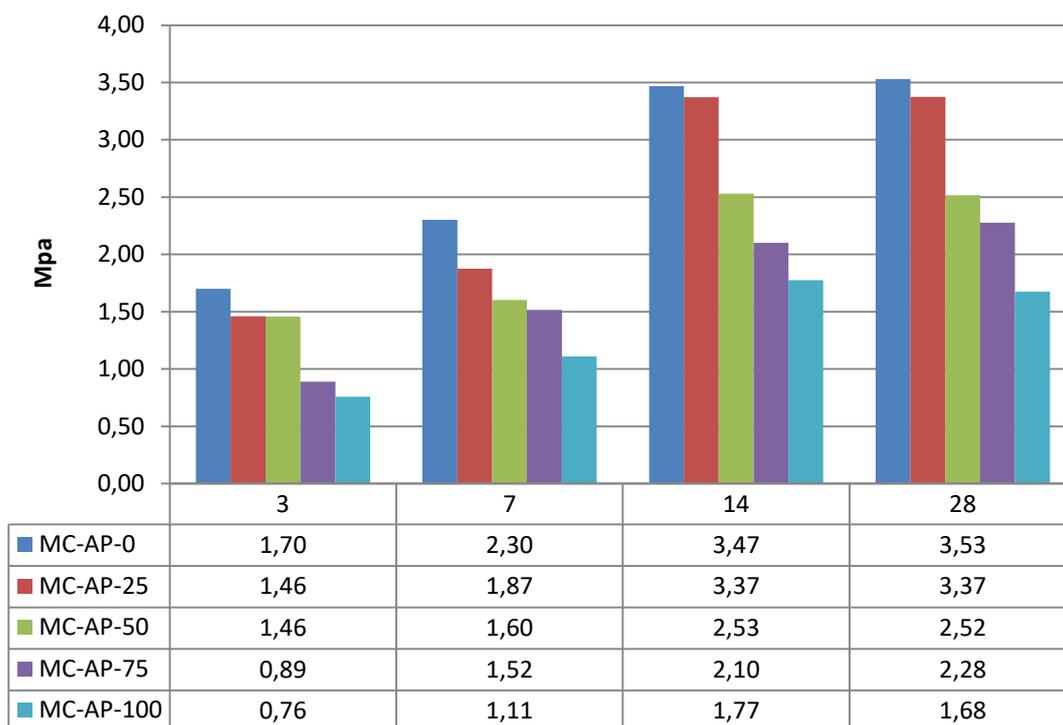


Figura 75: Resistencias a flexión de morteros con cenizas de la central 1

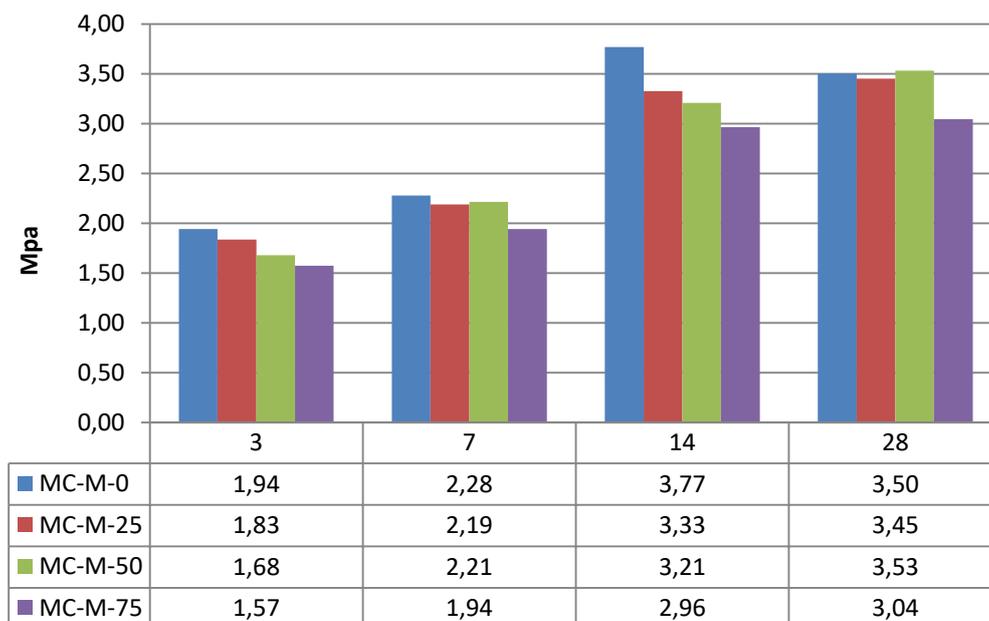


Figura 76: Resistencias a flexión de morteros con cenizas de la central 2

La siguiente tabla muestra las variaciones porcentuales de resistencia entre el mortero patrón y los distintos ratios de sustitución.

Tabla 30: Variaciones de resistencia a flexión entre morteros de control y morteros con ceniza de la central 1 y la central 2

	MC-AP					MC-M			
	0	25	50	75	100	0	25	50	75
3 días	0,00%	-14,04%	-14,27%	-47,73%	-55,33%	0,00%	-5,56%	-13,51%	-19,07%
7 días	0,00%	-18,59%	-30,38%	-34,20%	-51,81%	0,00%	-3,93%	-2,81%	-14,78%
14 días	0,00%	-2,80%	-27,12%	-39,42%	-48,86%	0,00%	-11,71%	-14,89%	-21,31%
28 días	0,00%	-4,43%	-28,74%	-35,48%	-52,53%	0,00%	-1,44%	0,84%	-13,11%

Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica mide la resistencia al paso de corriente a través del mortero, a continuación se muestran las gráficas de la evolución de esta. En el caso de los morteros con ceniza de la central 1 esta resistividad es menor cuanto mayor es el ratio de sustitución lo que indica que estos morteros pierden mas lentamente la humedad.

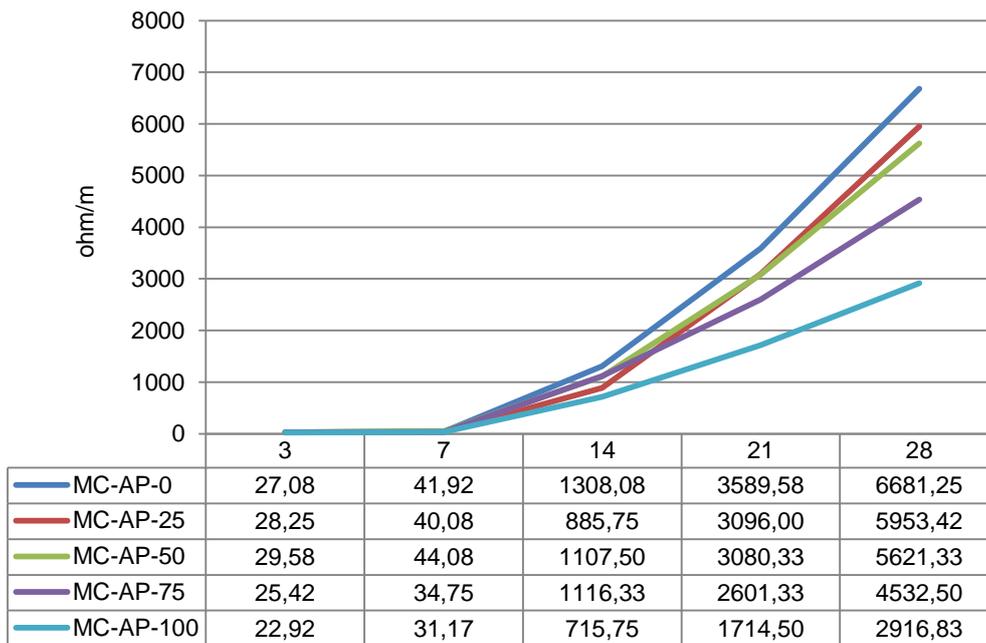


Figura 77: Evolución de resistividad en morteros con ceniza de la central 1

Por el contrario los morteros con cenizas de la central 2 aumentan su resistividad al aumentar el ratio de sustitución, lo que indica que pierden más rápidamente la humedad interna cuanto mayor es el contenido de ceniza.

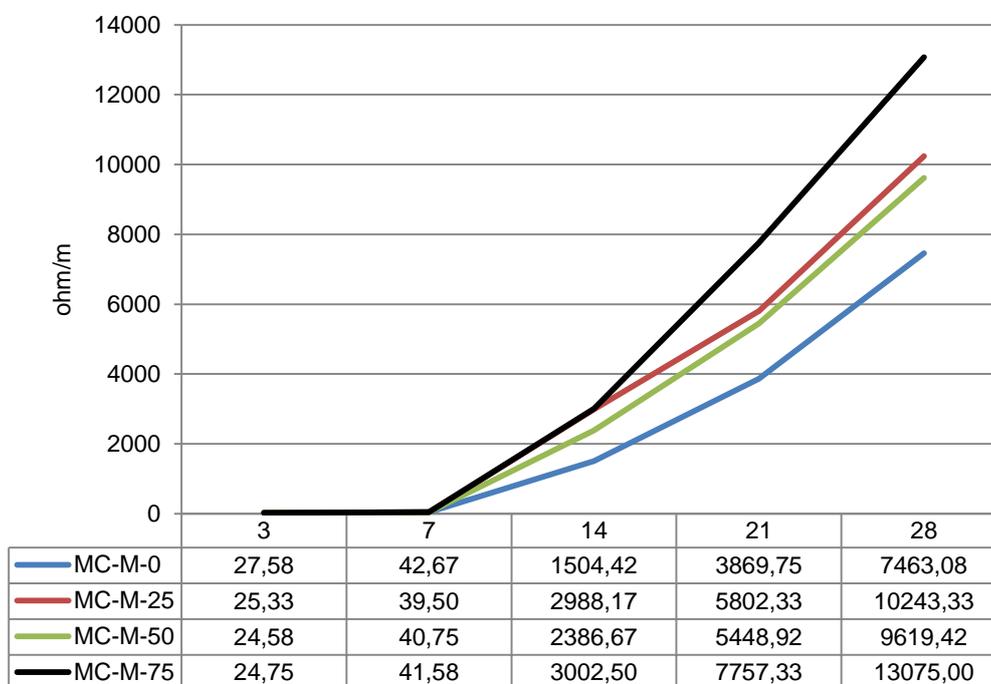


Figura 78: Evolución de resistividad en morteros con ceniza de la central 2

Retracción y pérdida de peso

La retracción y la pérdida de peso están íntimamente relacionadas, por lo que se tomó como punto inicial para medir la retracción el momento en el que las probetas se sacaron de la bolsa hermética. Dado que la variación de peso hasta ese momento es muy pequeña y su retracción por tanto también los datos de medida dimensionales son poco precisos debido a su pequeña escala.

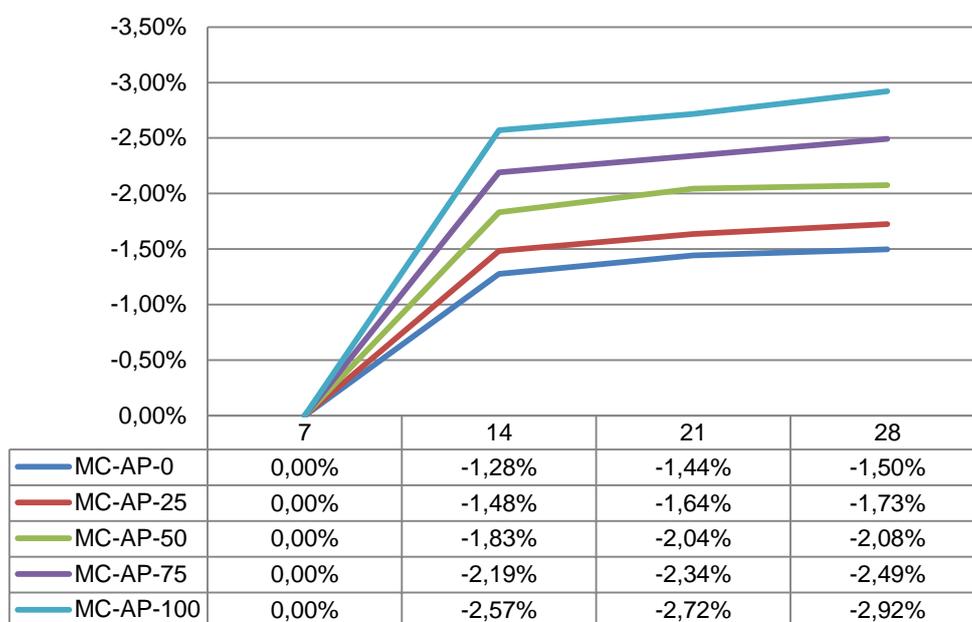


Figura 79: Evolución de la retracción en los morteros de con ceniza de la central 1

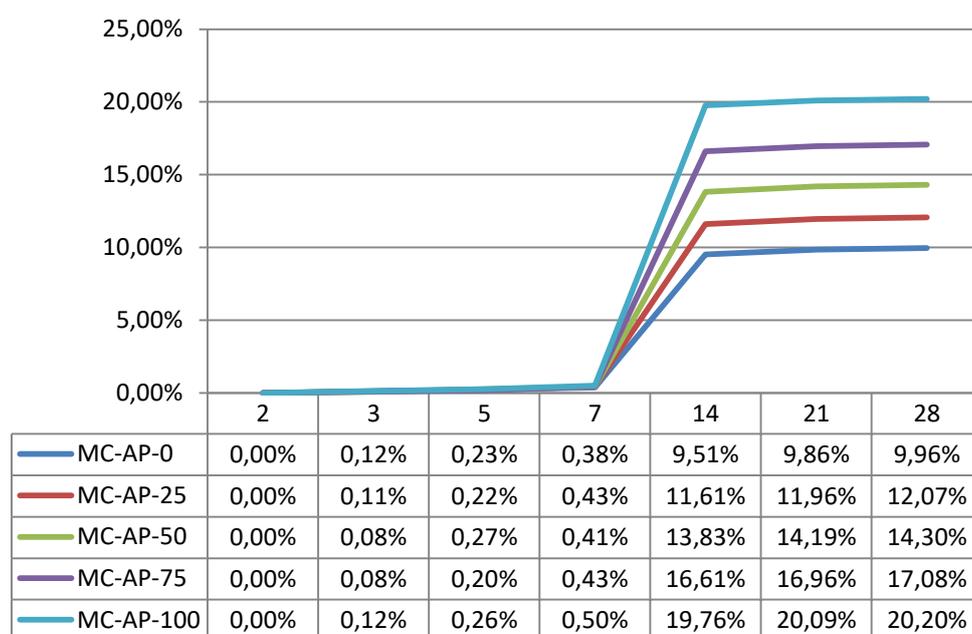


Figura 80: Evolución de la pérdida de peso en los morteros de con ceniza de la central 1

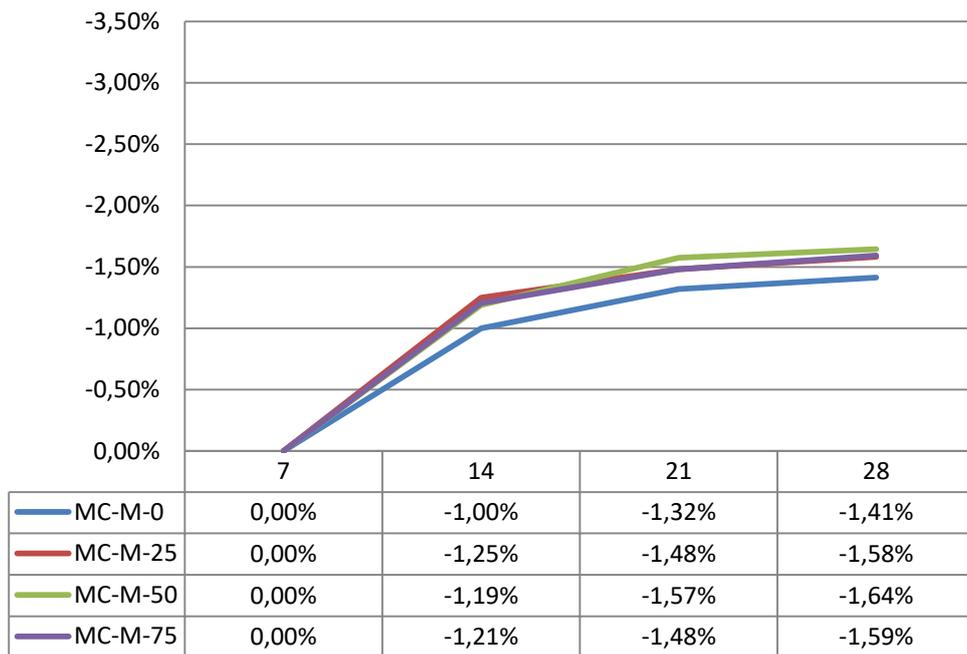


Figura 81: Evolución de la retracción en los morteros de con ceniza de la central 2

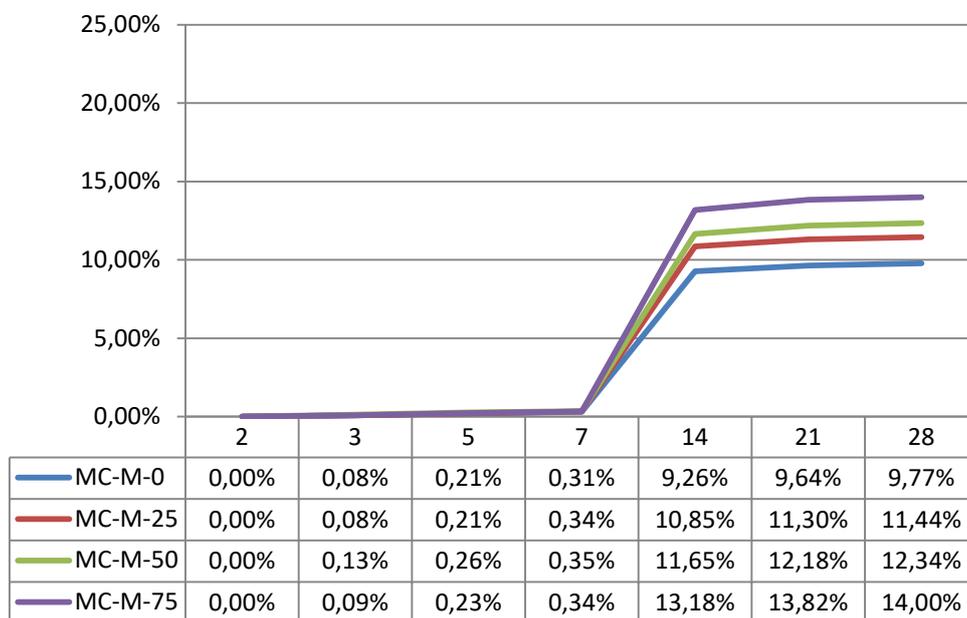


Figura 82: Evolución de la pérdida de peso en los morteros de con ceniza de la central 2

Como puede apreciarse en las siguientes gráficas la retracción es mayor de los 7 a los 14 días que es cuando se produce la mayor pérdida de peso y después se ralentiza igual que la pérdida de peso.

La retracción es mayor en los morteros de con ceniza de la central 1 siendo casi el doble en el caso del ratio de sustitución del 100% respecto al mortero patrón. La retracción en el caso de los morteros con ceniza de la central 2 varía muy poco con el ratio de sustitución.

Capilaridad

Los resultados de capilaridad muestran que es mayor cuando aumenta el contenido de ceniza, aunque cuando se supera el ratio de sustitución del 50% comienza a bajar, quedándose por encima de los resultados en el mortero de control. Este aumento en el ascenso capilar se debe a la mayor porosidad en el mortero.

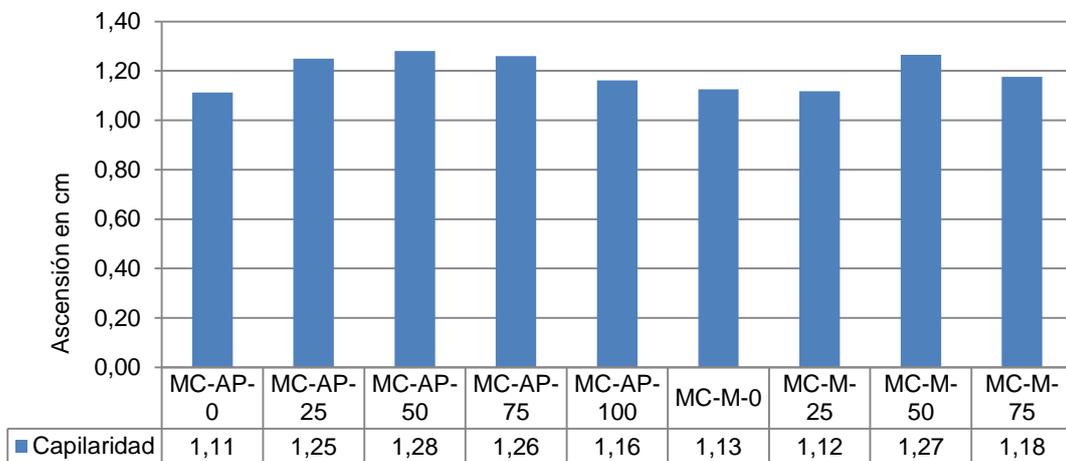


Figura 83: Resultados de ascensión capilar

5.2 Hormigón para prefabricados

A continuación se detallan y analizan los resultados obtenidos hasta el momento de los distintos ensayos planteados en el programa de ensayos.

Tras ser fabricadas las probetas se guardan en la cámara climática hasta el momento de su ensayo. En el primer momento, antes de fraguar, se guardan los moldes tapados con film para conservar su humedad durante dos días, tras esto las probetas se desmoldan, finalmente se guardan en la cámara climática.

Para facilitar su identificación los hormigones se nombran como HP seguido de AP o para indicar que son con cenizas de la central 1 y a continuación el ratio de sustitución, por ejemplo, el HP-AP-50 es un hormigón de prefabricados con ceniza de la central 1 y un ratio de sustitución del 50%.

5.2.1 Estado fresco

Densidad en fresco

La siguiente tabla de datos muestra las densidades en fresco, estas disminuyen al aumentar el ratio de sustitución como era de esperar debido a la baja densidad de la ceniza.

Tabla 31: Densidades en fresco del hormigón para prefabricados con cenizas de la central 1

	HP0	HP25	HP50	HP75	HP100
Densidad en fresco(kg/dm ³)	1,97	1,88	1,81	1,69	1,60

Facilidad de compactado (Trabajabilidad)

En el siguiente gráfico se muestra el porcentaje de compactación del hormigón tras vibrado y tras un vibrado con un peso encima. Los resultados son todos próximos al 20%, un poco más altos cuando se trata de vibración con peso como es de esperar. El aumento del ratio de sustitución también hace disminuir el grado de compactación excepto en el 100% de sustitución que es similar al del hormigón patrón

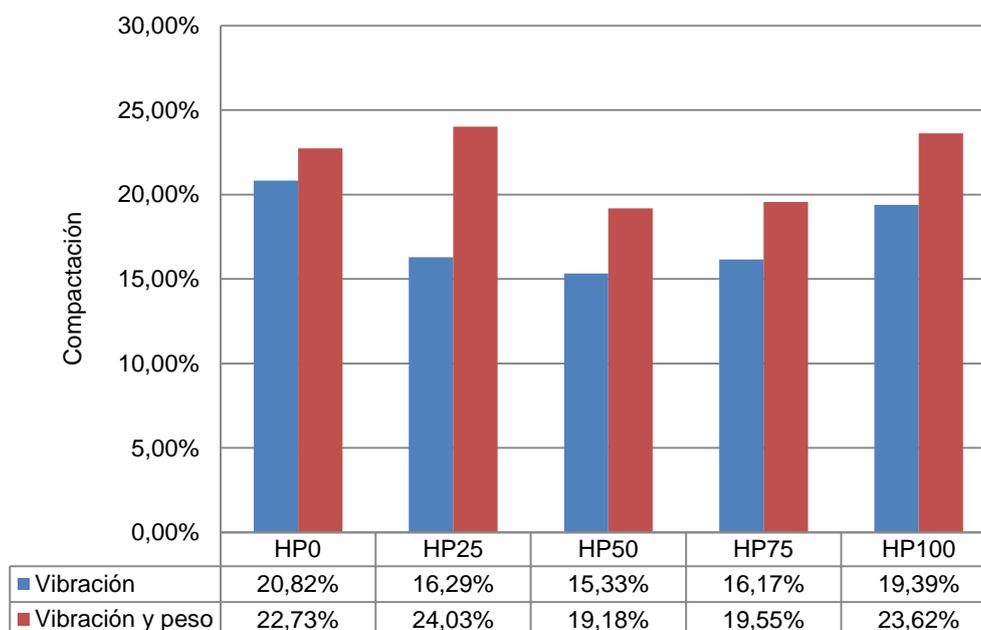


Figura 84: Compactación con peso y sin peso tras vibrado del hormigón de prefabricados con ceniza de la central 1

5.2.2 Estado endurecido

Densidad

Esta densidad se calcula midiendo las probetas y dividiendo su volumen entre su peso igual que para la densidad en fresco. El valor es el de 16 días tras el amasado y se puede apreciar como las densidades casi no varían respecto a las densidades en fresco, esto es debido a que es una mezcla con un contenido de agua muy bajo.

Tabla 32: Densidad de los hormigones de prefabricados con cenizas de la central 1

	HP0	HP25	HP50	HP75	HP100
Densidad (kg/dm ³)	1,97	1,93	1,81	1,68	1,59

Resistencia a compresión

La siguiente gráfica muestra la resistencia a compresión a distintas edades de cada ratio de sustitución. Se puede apreciar como la resistencia a edades muy tempranas baja mucho en los ratios de sustitución más altos y un poco en los ratios más bajos. La resistencia en estos ratios más bajos va subiendo e igualándose con la del hormigón patrón con el aumento de las edades.

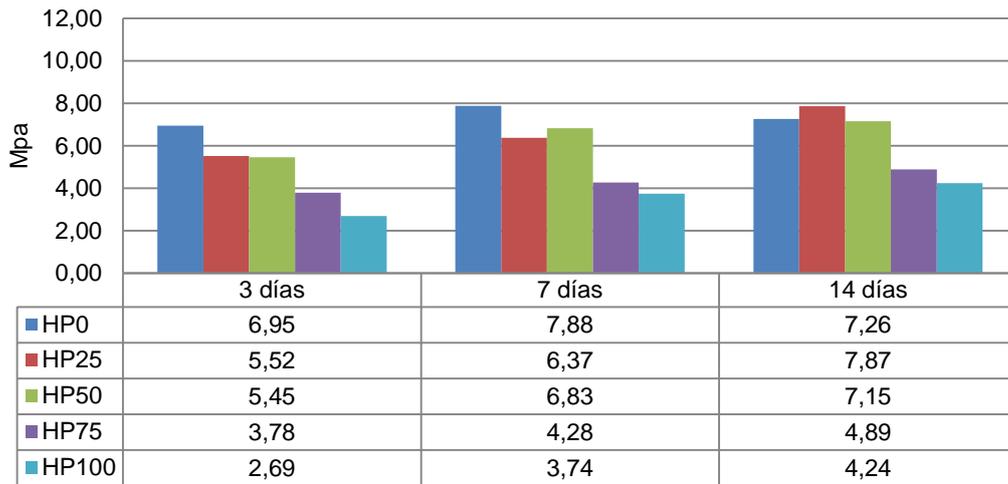


Figura 85: Gráfica de resistencias a compresión de hormigones de prefabricados con cenizas de la central 1

5.3 Conclusiones

La primera de las conclusiones es que el sector de la construcción tiene un gran impacto medioambiental y reducirlo es primordial de cara a un futuro sostenible, por lo que la reutilización de materiales será clave en estos años así como investigar es sus posibles usos.

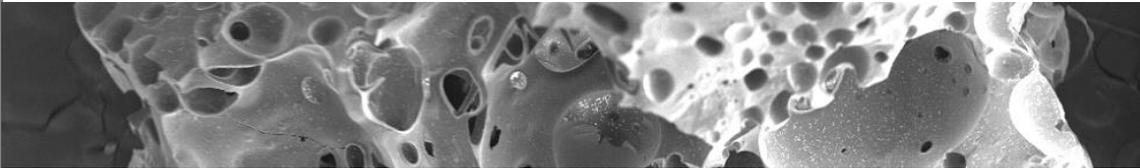
La segunda, y quizás la más importante dentro de este TFM es que todas las cenizas de central térmica son diferentes, esto es debido a que cada central tiene un proceso de quemado y usa un tipo de carbón distinto. Esto hace primordial una buena caracterización antes de usarlas para poder prever los efectos que su incorporación en un mortero o en un hormigón van a tener.

Con el desarrollo de la parte experimental, se han podido ver los efectos que la sustitución de los áridos naturales por cenizas de fondo tiene en las propiedades de los morteros e iniciar ese mismo análisis en un hormigón para prefabricados.

En general esta sustitución disminuye las propiedades mecánicas de las mezclas, bajando sus resistencias a esfuerzos de compresión o flexión, así como aumenta la retracción y la pérdida de peso. A mayores edades esta tendencia es cada vez menor.

Por otra parte otras características que a priori son negativas como el aumento de porosidad, que disminuye las prestaciones mecánicas, pueden ser positivas en otros usos porque aumenta el aislamiento tanto térmico como acústico. Estas propiedades son muy interesantes desde el punto de vista de la fabricación de los bloques de hormigón que están previstos.

6 Futuras líneas de investigación



6 Futuras líneas de investigación

En siguientes fases del proyecto se fabricará un hormigón autocompactante de alta resistencia con sustitución parcial de áridos naturales por ceniza de la central 1. Para ello ya se ha desarrollado una dosificación y un plan de ensayos adecuado a las características a estudiar.

También está previsto diseñar un hormigón autosellante que “cure” sus fisuras añadiendo agentes de tipo bacteriano que reaccionan con el ambiente y precipitan compuestos que cierran las fisuras.

6.1 Hormigón autocompactante

6.1.1 Materiales

Se usará un cemento portland, de la empresa Cosmos y fabricado en su planta de Toral de los Vados, servido en sacos de 25 kg con las siguientes características.

Tabla 33: Características del cemento para hormigones autocompactante (elaboración propia a partir de ficha técnica del producto).

CEM I 52,5 SR				
	Parámetro	Norma	Valor habitual	
Composición	Clinker	95-100%	> 97%	
	Minoritarios	0-5%	< 3%	
	Regulador de fraguado		Yeso	
Exigencias químicas	Pérdida por calcinación	≤ 5,0%	< 2,8 %	
	Residuo insoluble	≤ 5,0%	< 1,5%	
	Sulfatos (SO ₃)	≤ 3,5%	< 3,5%	
	Cloruros	≤ 0,10%	< 0,03%	
	Cromo IV soluble	≤ 0,0002%	< 0,0002%	
Exigencias físicas	Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm	< 2,0 mm	
	Tiempo de fraguado			
		Principio	≥ 45 min	> 150 min
		Final	≤ 12 horas	< 250 min

La pasta del hormigón estará formada por cemento y filler.

Se utilizarán también dos de las arenas caracterizadas y la gravilla cuarcítica en una proporción con la que se consigue una granulometría adaptada para un hormigón autocompactante.

Tabla 34: Áridos utilizados para fabricar el hormigón autocompactante

	Áridos
Hormigón autocompactante	AF - T - 0/1 - G
	AF - T - 0/2 - G
	AG - T - 4/11,2 - C

Para conseguir las propiedades necesarias para el hormigón autocompactante se utilizará el aditivo superplastificante MasterEase 3850 de la marca BASF.

Tabla 35: Características aditivo

MasterEase 3825	
Función principal	Superplastificante / Reductor de agua
Efecto secundario por sobredosificación	Riesgo de disgregación
Aspecto físico	Líquido turbio amarillento
Densidad (20°C)	1,050±0,02 g/cm ³
PH (20°C)	5±1
Viscosidad Brookfield (20°C) Sp00/100rpm:	< 35 cps
Cloruros	< 0,1%

6.1.2 Dosificación

Tras haber seleccionado y caracterizado todos los materiales con los que se va a trabajar, se procedió a fijar los parámetros básicos de la dosificación del hormigón de control. Según los objetivos, se pretende fabricar un hormigón de consistencia autocompactante apto, desde el punto de vista resistente, para elementos estructurales de gran responsabilidad y para el campo de la prefabricación. La fabricación de este hormigón se realizará en una amasadora de 135l de capacidad, en amasadas de 40l.

Para ajustar la granulometría de la sustitución a la del hormigón patrón se realizó una mezcla con ceniza cortada por el tamiz 16 y la gravilla cuarcítica equivalente a la mezcla de áridos del hormigón patrón.

Tabla 36: Granulometrías áridos para hormigón autocompactante y mezcla equivalente con ceniza de la central 1

	Autocompactante	Mezcla
d	4	0
D	11,2	1
MF	5,0	4,9
63	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00
20	100,00	100,00
16	100,00	100,00
12,5	99,52	98,36
11,2	98,03	96,78
10	93,50	93,15
8	81,59	83,30
6,3	70,26	72,90
5,6	65,06	67,98
4	57,96	59,44
2,5	55,76	54,33
2	52,54	52,30
1,25	44,85	47,70
1	41,54	44,84
0,63	35,55	36,87
0,5	32,48	31,97
0,4	29,42	27,51
0,315	25,29	23,20
0,25	21,13	19,82
0,125	9,27	10,60
0,08	4,76	6,52
0,063	3,11	4,88

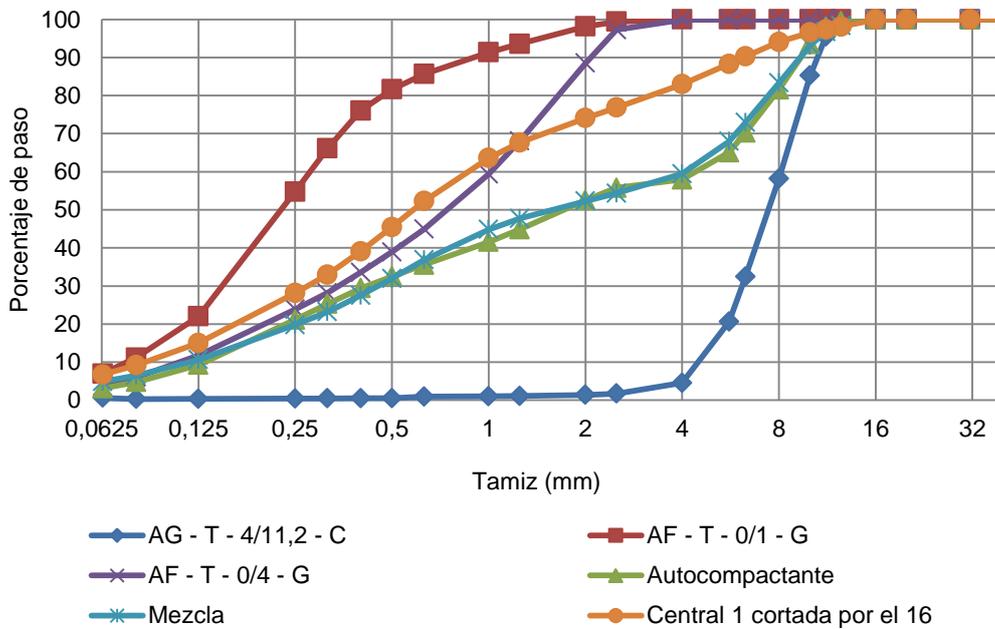


Figura 86: Curvas granulométricas de la mezcla de los áridos del hormigón autocompactante y de la mezcla con ceniza

A continuación se detalla la dosificación prevista tanto para el patrón como para los distintos ratios de sustitución.

Tabla 37: Dosificación para hormigones autocompactantes y los distintos ratios de sustitución

	0%		9%		18%		27%		36%	
	Vol (l)	Peso (kg)								
Agua	167,0	167,0	167,0	167,0	167,0	167,0	167,0	167,0	167,0	167,0
Super	12,2	13,4	12,2	13,4	12,2	13,4	12,2	13,4	12,2	13,4
Cemento	93,7	295,0	93,7	295,0	93,7	295,0	93,7	295,0	93,7	295,0
Filler	66,3	132,5	66,3	132,5	66,3	132,5	66,3	132,5	66,3	132,5
AF-T-0/1-G	153,0	356,6	137,7	320,9	107,1	249,6	76,5	178,3	45,9	107,0
AF-T-0/4-G	190,2	458,4	137,7	412,6	107,1	320,9	76,5	229,2	79,9	137,5
AG-T-4/11,2-C	257,2	640,4	243,2	605,6	215,3	536,2	187,5	466,8	159,6	397,4
Ceniza	0,0	0,0	52,6	68,4	157,9	205,3	263,2	342,1	368,4	478,9
Total	1000,0	2063,2	1000,0	2015,4	1000,0	1919,8	1000,0	1824,2	1000,0	1728,7

6.1.3 Plan de ensayos

6.1.3.1 Estado fresco

Densidad en fresco

La densidad en fresco se obtiene dividiendo el peso del hormigón necesario para llenar el molde entre el volumen nominal del mismo. Para ello se determina el peso del molde antes y después del vertido de los morteros en su interior. Se utiliza una báscula con precisión hasta 0,5 g, en este caso el volumen nominal de la probeta que ocupa un molde es igual de $0,75^2 \times \pi \times 3 \text{ dm} = 5,30 \text{ dm}^3$ o litros en el caso de las cilíndricas y de $3 \times 1 \times 1 \times 1 \text{ dm} = 3 \text{ dm}^3$ o litros en el caso de las cúbicas.

Escurrecimiento

El escurrecimiento o slump se usa para evaluar la fluidez y la velocidad de flujo del hormigón autocompactante en ausencia de obstrucciones. Se basa en el ensayo de asentamiento descrito en la Norma UNE-EN 12350-2[89]. El resultado es un indicador de la capacidad de relleno del hormigón autocompactante.

El tiempo t500 es una medida de la velocidad de flujo y un indicador de la viscosidad relativa del hormigón autocompactante. El hormigón fresco se vierte en un cono igual al usado para el cono de Abrams. Al retirar el cono ascendentemente se calcula el tiempo desde que se inicia la extracción hasta que el flujo de hormigón alcanza un

diámetro de 500 mm; éste es el tiempo t_{500} . A continuación se miden el mayor diámetro del hormigón autocompactante extendido y el diámetro perpendicular a éste y la media es el escurrimiento.

Reología con reómetro

Un reómetro es un dispositivo que es capaz de medir la resistencia que ofrece el fluido en movimiento. El dispositivo consiste en una pala que se introduce en un contenedor con la mezcla de hormigón y se hace girar a una velocidad. Habitualmente para caracterizar un hormigón autocompactante se realiza un ensayo de tensión creciente (stress growth) y una curva de flujo (flow curve).



Figura 87: Reómetro

Exudación

La exudación es el agua de amasado que es susceptible de expulsar una muestra de hormigón fresco. Para esto se sigue la norma UNE-EN 480-4[78], de aplicación a hormigones que contengan áridos cuyo tamaño máximo sea menor de 50 mm. Se llena un recipiente cilíndrico rígido de un material no absorbente cuyo diámetro sea de 250 mm y su altura interior 280 mm. Con ayuda de una pipeta se recoge el agua que va exudando a determinados tiempos hasta que este proceso finaliza. Al final se obtiene el dato del agua exudada total respecto al volumen de la muestra.

Segregación

Para este ensayo se sigue la norma UNE-EN 12350-11[90]. Se vierte una cantidad aproximada de 5 kg de cemento sobre un tamiz con aperturas cuadradas de 5 mm, tras dos minutos se anota el peso del material que ha pasado a través del tamiz. El nivel de segregación se calcula como el porcentaje de la muestra que ha pasado a través del tamiz.

Temperatura de fraguado

Este ensayo se basa en la norma UNE-EN 196-3[91], pero como no se dispone de un calorímetro (aparato necesario para realizar el ensayo), se realiza un ensayo similar en un recipiente aislado.

Se mide la temperatura en el interior de una muestra de hormigón a intervalos de 10 min durante dos días, para garantizar que las condiciones exteriores de temperatura sean constantes este ensayo se realiza dentro de la cámara climática.

Tiempo abierto de fraguado

Para determinar el inicio y final de fraguado del hormigón se siguió el procedimiento de la norma UNE 83311-86[92], pero desarrollando un método numérico y gráfico que permite determinar los tiempos inicial y final de fraguado.

El procedimiento consiste en tomar una muestra representativa del hormigón y tamizarla a través de un tamiz de 5mm, tras esto se mezcla bien el mortero resultante, se coloca en un recipiente en capas y se conserva en la cámara climática.

Transcurridas 1-2 horas se retira el agua de exudación y se comienza a penetrar la muestra con distintas agujas de penetración unidas a un penetrómetro conforme la pasta va endureciendo. Este ciclo se repite hasta que la aguja de menor diámetro no penetre más de 25 mm.

Con los datos de fuerza aplicada y tiempo se hace un análisis de regresión y se determina la ecuación correspondiente para poder calcular los tiempos correspondientes a las resistencias de 3,5 MPa y 27,6 MPa que son el de inicio y final de fraguado respectivamente.

6.1.3.2 Estado endurecido

Densidad y absorción

La densidad en seco de una probeta de mortero endurecido se determina dividiendo su masa en estado seco en estufa por el volumen que ocupa cuando se sumerge en agua en estado saturado.

Para la realización de este ensayo partimos de varias probetas cúbicas de 8 cm de lado aproximadamente. Se secan en la estufa hasta que su peso es constante, para posteriormente saturarlas en agua, primero simplemente sumergiéndolas y después volviéndolas a sumergir en agua hirviendo durante cinco horas para garantizar su saturación. Tras esto se pesan, para poder determinar posteriormente la absorción.

Por último se utiliza una balanza hidrostática para calcular su volumen siguiendo el principio de Arquímedes.

Con todos estos datos se determina su densidad y absorción.

Resistencia a compresión

Este ensayo se realiza siguiendo la norma UNE-EN 12390-3[85]. Para ello se utilizan probetas cúbicas de 10 cm de lado. La prensa ejerce sobre la probeta, a través del dispositivo de ensay a compresión, una fuerza que aumenta gradualmente y que es medida por una célula de carga hasta su valor máximo. Conociendo esta fuerza máxima aplicada y dividiéndola por la superficie en la que actúa, permite obtener la resistencia a compresión en MPa.

Resistencia a tracción

Para conocer la resistencia a tracción se realiza un ensayo de tracción indirecta o brasileño. Se coloca una probeta cilíndrica en un dispositivo de rotura que la rompe longitudinalmente aplicando una carga lineal. Se sigue la norma UNE-EN 12390-6[86].

Módulo de elasticidad

Se somete una probeta con galgas extensiométricas a ciclos de carga y descarga en el rango elástico de deformación, con estos datos puede calcularse el módulo de elasticidad. Se sigue la norma UNE-EN 12390-13[87].

Resistividad eléctrica

Mediante un aparato calibrado para medir la resistencia al paso de la corriente eléctrica se determina la resistividad de las probetas, que a su vez es indicativo de su humedad y contenido de agua.

Permeabilidad al agua

Con el fin de caracterizar la durabilidad del hormigón, se llevó a cabo el ensayo de permeabilidad al agua en medias probetas cilíndricas según UNE-EN 12390-8[88]. Una vez sometidas al ensayo se rompen a tracción y se evalúa el grado de penetración de agua en cada una de las probetas resultantes midiendo la huella de agua.

6.1.3.3 Tabla resumen

Tabla 38: Plan de ensayos y edades para el hormigón autocompactante

	Edad de la probeta									
	Fresco	2	3	5	7	14	21	28	56	90
Densidad en fresco										
Slump										
Icar										
Exudación										
Segregación										
Temperatura de fraguado										
Tiempo abierto de fraguado										
Densidad y absorción										
Resistencia a compresión										
Resistencia a tracción										
Módulo de elasticidad										
Resistividad eléctrica										
Permeabilidad al agua										

6.2 Hormigón autosellante

Los hormigones autosellantes son los que, a través de diversas técnicas o agentes introducidos durante la fabricación, tiene la capacidad de cerrar sus grietas. Esta propiedad permite aumentar la vida útil y durabilidad de la estructura.

El autosellado puede ser de tres tipos, que se diferencian por el mecanismo utilizado. Estos son intrínseca o autógeno en el que el hormigón es reparado por los procesos químicos de la hidratación del cemento, sellado encapsulado utilizando partículas químicas o bacterias que actúan como agentes de reparación y sellado vascular (variante del anterior), donde un tubo insertado en los agentes de liberación de hormigón sellador.

El sellado autógeno producido por la hidratación de las partículas de cemento deshidratadas, disolución y posterior carbonatación de Ca(OH)_2 . Estas reacciones pueden ser promovidas por la incorporación de materiales puzolánicos al, tales como ceniza de fondo o cenizas volantes. Estos materiales son de reacción muy lenta y esta puede actuar en edades muy avanzadas. La limitación principal de este sistema es que el agente de sellado se agota durante el proceso de sellado en sí.

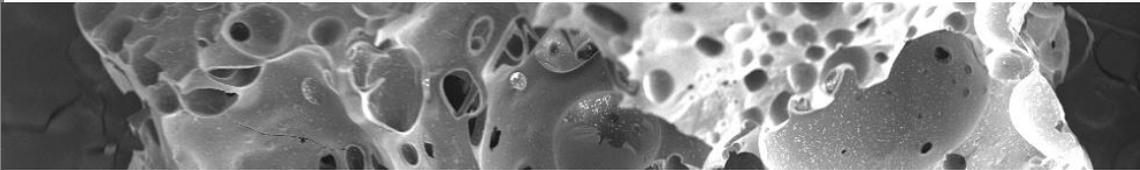
El autosellado encapsulado utiliza partículas químicas o bacterias que se activan por contacto con el medio externo al abrir la fisura e iniciándose procesos metabólicos o químicos que sellan la grieta.

En el caso de partículas químicas son generalmente resinas de uno o dos componentes que se filtran por la fisura y cristalizan en ella. El principal problema de esta tecnología es que el material sellante no fluya o no llegue a mezclar bien. El autosellado vascular también trabaja con este proceso.

En el caso de sellado bacteriano, cuando aparece una grieta en la matriz el agua que pasa a través de ella activa las esporas de las bacterias y nutrientes que las acompañan. Entonces el proceso metabólico de la bacteria libera CO_2 que reacciona con el Ca(OH)_2 formando cristales de CaCO_3 sellando así la brecha.

Un método de encapsulación es introducir las bacterias en los poros de áridos con alta porosidad y absorción como la arcilla expandida. En este sentido, el uso de la ceniza de fondo objeto de este proyecto, con una porosidad mayor que estos agregados podría ser una solución eficaz para la encapsulación de las bacterias. Y se estudiará en un futuro.

7 Bibliografía



7 Bibliografía

- [1] MADS, E.M. Osorio Zapata, (Organización de las Naciones Unidas) ONU, C. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Convención Marco sobre el Cambio Climático - PARIS, J. Chem. Inf. Model. 21930 (2015) 40. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [2] Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital, Emisión de gases de efecto invernadero por actividad, 2016.
- [3] R.E. de E. (REE), El Sistema Eléctrico Español, Red Eléctrica España. (2016) 119. doi:10.1076/epri.10.9.29.6488.
- [4] P. Asokan, M. Saxena, S.R. Asolekar, Coal combustion residues - Environmental implications and recycling potentials, Resour. Conserv. Recycl. 43 (2005) 239–262. doi:10.1016/j.resconrec.2004.06.003.
- [5] J. Levandowski, W. Kalkreuth, Chemical and petrographical characterization of feed coal, fly ash and bottom ash from the Figueira Power Plant, Paran??, Brazil, Int. J. Coal Geol. 77 (2009) 269–281. doi:10.1016/j.coal.2008.05.005.
- [6] S. Kizgut, D. Cuhadaroglu, S. Samanli, Stirred Grinding of Coal Bottom Ash to Be Evaluated as a Cement Additive, Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff. 32 (2010) 1529–1539. doi:10.1080/15567030902780378.
- [7] Antonio Baño Nieva., Guia de construcción sostenible, (2005) 1–63.
- [8] H. F. W. Taylor, Cement Chemistry, Academic Press, London, 1992.
- [9] Malhotra V. M., Global warming and sustainability issues as related to concrete technology, in: Int. Symp. Sustain. Cem. Concr. Ind., Lillehammer, 2007: pp. 17–26.
- [10] J. S. Damtoft, The sustainable cement production of the future, in: Int. Symp. Sustain. Cem. Concr. Ind., Lillehammer, 2007: pp. 75–84.
- [11] SMA, Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas, (2014) 25.
- [12] D. Inmaculada, R. Ramón, Unidad didáctica 4:, Open Course Ware, Univ. Cantab. (2013) 116. <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/centrales-de-generacion-de-energia-electrica/materiales/bloque-energia-III.pdf>.
- [13] UNESA, Central de ciclo combinado, (2017). <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>.
- [14] UNESA, Central térmica convencional, (2017). <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1351-central-termica>.
- [15] M. de agricultura y pesca alimentación y Medioambiente, Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera, 2012.
- [16] M. Sanjuán, Los cementos de adición en España del año 2000 al 2005, Cem. Y Hormigón. 909 (2007) 4–55.
- [17] N. Corona-Esquivel, Rodolfo; Tritlla, Jordi; Benavides-Muñoz, María Elena; Piedad-

Sánchez, Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México Boletín, Redalyc. LVIII (2006) 141–160.

- [18] Tipos de Carbón, (2011). <http://unidades.climantica.org/en/unidades/02/consecuencias-dos-combustibles-fosiles/o-carbon-orixe-e-formacion/3>.
- [19] EURACOAL, Coal in Europe 2015, (2015). <https://euracoal.eu/info/euracoal-eu-statistics/>.
- [20] CEDEX, Ficha Técnica: Cenizas Volantes De Carbón Y Cenizas De Hogar O Escorias, (2011) 1–41. <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=305&idmenu=304>.
- [21] ECOBA, Production and Utilisation of CCPs in 2010 in Europe (EU 15), (2010) 103932.
- [22] AENOR, UNE-EN 450-1 (2013) CV para hormigón, definiciones y especificaciones, (2009).
- [23] M.L.D. Jayaranjan, E.D. van Hullebusch, A.P. Annachhatre, Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash, Rev. Environ. Sci. Bio/Technology. (2014) 467–486. doi:10.1007/s11157-014-9336-4.
- [24] AENOR, UNE-EN 197-1 Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, (2009) 40.
- [25] F.E. Goodarzi, F. and Huggins, Monitoring the species of arsenic, chromium and nickel in milled coal, bottom ash and fly ash from a pulverized coal-fired power plant in western Canada, J. Environ. Monit. 3 (2001) 1–6. doi:10.1039/B006733O.
- [26] M. Gong, X., Wu, T., Qiao, Y., and Xu, In situ leaching of trace elements in a coal ash dump and time dependence laboratory evaluation, Energy Fuels. 24 (2010) 84–90. doi:10.1021/ef9005115.
- [27] M. Orna Carmona, J. González Paules, J.C. Sánchez Catalán, L. Fernández Pousa, R. Ade Beltrán, F. Quero Sanz, Reciclado de escorias de fondo de central térmica para su uso como áridos en la elaboración de componentes prefabricados de hormigón, Recycl. Power Plant Slag Use as Aggreg. Precast Concr. Components. 60 (2010) 99–113. doi:10.3989/mc.2010.52109.
- [28] M. Wyrzykowski, S. Ghourchian, S. Sinthupinyo, N. Chitvoranund, T. Chintana, P. Lura, Internal curing of high performance mortars with bottom ash, 2016. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.04.009.
- [29] H.K. Kim, J.G. Jang, Y.C. Choi, H.K. Lee, Improved chloride resistance of high-strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing, Comput. Chem. Eng. 71 (2014) 334–343. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.069.
- [30] E.G. Ave, F. Ash, B. Ash, 2010 Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report, Energy. (2010).
- [31] D. Cao, E. Selic, J.-D. Herbell, Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China, J. Zhejiang Univ. A. 9 (2008) 681–687. doi:10.1631/jzus.A072163.
- [32] K.N. Dewangan P, Pradhan M, Utilisation of fly ash as a structural fill material for safe

- and sustainable development: need of the hour., *Indian Min. Engg. J.* 49 (2010) 134–139.
- [33] M. Singh, R. Siddique, Compressive strength, drying shrinkage and chemical resistance of concrete incorporating coal bottom ash as partial or total replacement of sand, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 39–48. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.034.
- [34] H.K. Lee, H.K. Kim, E.A. Hwang, Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete, *Waste Manag.* 30 (2010) 274–284. doi:10.1016/j.wasman.2009.09.043.
- [35] E. Baite, A. Messan, K. Hannawi, F. Tsobnang, W. Prince, Physical and transfer properties of mortar containing coal bottom ash aggregates from Tefereyre (Niger), *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 919–926. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.117.
- [36] M. Rafieizonooz, J. Mirza, M.R. Salim, M.W. Hussin, E. Khankhaje, Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, *Constr. Build. Mater.* 116 (2016) 15–24. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.080.
- [37] P. Onprom, K. Chaimoon, R. Cheerarot, Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam Contents, 2015 (2015).
- [38] Y. Bai, F. Darcy, P.A.M. Basheer, Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 19 (2005) 691–697. doi:10.1016/j.conbuildmat.2005.02.021.
- [39] Ö. Özkan, I. Yüksel, Ö. Muratoğlu, Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag, *Waste Manag.* 27 (2007) 161–167. doi:10.1016/j.wasman.2006.01.006.
- [40] P. Aggarwal, Y. Aggarwal, S.M. Gupta, *Ar ch Ar ch ive*, 8 (2007) 49–62.
- [41] P. Ramadoss, T. Sundararajan, Utilization of Lignite-Based Bottom Ash as Partial Replacement of Fine Aggregate in Masonry Mortar, *Arab. J. Sci. Eng.* 39 (2014) 737–745. doi:10.1007/s13369-013-0703-1.
- [42] H.K. Kim, H.K. Lee, Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1115–1122. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.065.
- [43] H.K. Kim, J.H. Jeon, H.K. Lee, Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal- and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 249–256. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.019.
- [44] M. Wyrzykowski, S. Ghourchian, S. Sinthupinyo, N. Chitvoranund, T. Chintana, P. Lura, Internal curing of high performance mortars with bottom ash, 2016. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.04.009.
- [45] G. Kim, J.Y. Kim, K.E. Kurtis, L.J. Jacobs, Drying shrinkage in concrete assessed by nonlinear ultrasound, *Cem. Concr. Res.* 92 (2017) 16–20. doi:10.1016/j.cemconres.2016.11.010.
- [46] H.K. Kim, K.A. Ha, H.K. Lee, Internal-curing efficiency of cold-bonded coal bottom ash aggregate for high-strength mortar, *Constr. Build. Mater.* 126 (2016) 1–8.

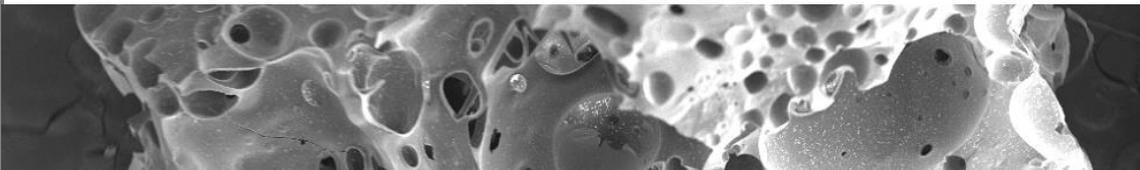
doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.125.

- [47] Y.B. Ahn, J.G. Jang, H.K. Lee, Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures, *Cem. Concr. Compos.* 72 (2016) 27–38. doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.05.028.
- [48] K. Van Tittelboom, N. De Belie, D. Van Loo, P. Jacobs, Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 497–505. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004.
- [49] J. Hu, H.Q. Chen, Z. Zhang, Mechanical properties of melamine formaldehyde microcapsules for self-healing materials, *Mater. Chem. Phys.* 118 (2009) 63–70. doi:10.1016/j.matchemphys.2009.07.004.
- [50] T. Bilir, Effects of non-ground slag and bottom ash as fine aggregate on concrete permeability properties, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 730–734. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.080.
- [51] T. Nochaiya, W. Wongkeo, K. Pimraksa, A. Chaipanich, Microstructural, physical, and thermal analyses of Portland cement-fly ash-calcium hydroxide blended pastes, *J. Therm. Anal. Calorim.* 100 (2010) 101–108. doi:10.1007/s10973-009-0491-8.
- [52] D. Kumar, A. Gupta, S. Ram, Uses of Bottom ash in the Replacement of fine aggregate for Making Concrete, *Int. J. Curr. Eng. Technol.* 4 (2014) 3891–3895.
- [53] L.B. Andrade, J.C. Rocha, M. Cheriaf, Aspects of moisture kinetics of coal bottom ash in concrete, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 231–241. doi:10.1016/j.cemconres.2006.11.001.
- [54] W. Wongkeo, A. Chaipanich, Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume, *Mater. Sci. Eng. A.* 527 (2010) 3676–3684. doi:10.1016/j.msea.2010.01.089.
- [55] M. Singh, R. Siddique, Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate, *J. Clean. Prod.* 91 (2015) 269–278. doi:10.1016/j.jclepro.2014.12.026.
- [56] M. Cheriaf, J.C. Rocha, J. Péra, Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1387–1391. doi:10.1016/S0008-8846(99)00098-8.
- [57] M. Singh, R. Siddique, Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 246–256. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.026.
- [58] J.G. Jang, H.J. Kim, H.K. Kim, H.K. Lee, Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration, *Mater. Des.* 93 (2016) 160–167. doi:10.1016/j.matdes.2015.12.074.
- [59] R. Siddique, Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 1444–1450. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.081.
- [60] S. Naganathan, S. Jamali, S. Silvadanam, T.Y. Chung, M.F. Nicolasselvam, Use of Bottom Ash and Fly Ash in Masonry Mortar, (2016) 1–6.

- [61] H.K. Kim, J.H. Jeon, H.K. Lee, Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal- and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates, *Constr. Build. Mater.* 26 (2012) 249–256. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.019.
- [62] S. Sivakumar, B. Kameshwari, Influence of fly ash, bottom ash, and light expanded clay aggregate on concrete, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2015 (2015). doi:10.1155/2015/849274.
- [63] L.B. Andrade, J.C. Rocha, M. Cheriaf, Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement, *Waste Manag.* 27 (2007) 1190–1199. doi:10.1016/j.wasman.2006.07.020.
- [64] M. Singh, R. Siddique, Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 620–630. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.001.
- [65] M. Singh, R. Siddique, Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 72 (2013) 20–32. doi:10.1016/j.resconrec.2012.12.006.
- [66] L.B. Andrade, J.C. Rocha, M. Cheriaf, Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 609–614. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.05.003.
- [67] B. Zhang, C.S. Poon, Use of Furnace Bottom Ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties, *J. Clean. Prod.* 99 (2015) 94–100. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.007.
- [68] S.C. Kou, C.S. Poon, Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 622–627. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005.
- [69] M. Singh, Effect of coal bottom ash on strength and durability properties of concrete, 4 (2015) 2013–2015.
- [70] R. Siddique, P. Aggarwal, Y. Aggarwal, Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash, *Constr. Build. Mater.* 29 (2012) 73–81. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.035.
- [71] S.C. Kou, C.S. Poon, Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2877–2886. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.009.
- [72] AENOR, UNE-EN 933-1:2012 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos, (2010) 20.
- [73] AENOR, UNE-EN 1097-6:2014 Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua, (2014).
- [74] N.Y.S.D. of T.M. Bureau, NY 703-19 E: Moisture content of lightweight fine aggregate, (2008) 4.
- [75] AENOR, UNE-EN 1015-6:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (1999) 12.

- [76] AENOR, UNE-EN 1015-7:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (1999) 14.
- [77] AENOR, UNE-EN 1015-3:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (2000) 12.
- [78] AENOR, UNE-EN 480:2006 Aditivos para hormigones, morteros y pastas., (2006).
- [79] AENOR, UNE-EN 1015-9:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (2000) 14.
- [80] AENOR, UNE-EN 196-9:2011 Métodos de ensayo de cementos, (2011) 24.
- [81] AENOR, UNE-EN 1015-10:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (2000) 10.
- [82] AENOR, UNE-EN 1015-11:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (2000) 16.
- [83] AENOR, UNE 80112:2016 Métodos de ensayos de cementos, (2016).
- [84] AENOR, UNE-EN 1015-18:2000 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería, (2002) 12.
- [85] AENOR, UNE-EN 12390-3:2009 Ensayos de hormigón endurecido., (2011) 22.
- [86] AENOR, UNE-EN 12390-6:2009 Ensayos de hormigón endurecido., (2011) 14.
- [87] AENOR, UNE-EN 12390-13:2009 Ensayos de hormigón endurecido., (2014) 18.
- [88] AENOR, UNE-EN 12390-8:2009 Ensayos de hormigón endurecido, (2011) 10.
- [89] AENOR, UNE-EN 12350-2 Ensayos de hormigón fresco, (2011) 12.
- [90] AENOR, UNE-EN 12350-11 Ensayos en hormigón fresco, (2010).
- [91] AENOR, UNE-EN 196-3:2017 Métodos de ensayos de cementos, (2017) 20.
- [92] AENOR, UNE 83311:1986 Ensayos de hormigón, (1986) 1–4.

8 Anejos



8.1 Anejo 1: Método propio para determinar la absorción y la densidad en cenizas de fondo de central térmica.

Las cenizas de fondo, por sus características físicas de alta porosidad y rugosidad son un material muy absorbente. Esta capacidad de absorción, más similar a la de un árido ligero (tipo arcilla expandida) que a la de un árido natural, hace que no se puedan caracterizar usando la norma UNE-EN 1097-6 [73] y sea necesario aplicar métodos alternativos como el descrito en la norma NY 703-19 E [74].

Una vez caracterizadas las cenizas y viendo el buen resultado del método, también se caracterizaron los áridos naturales siguiendo este procedimiento.

8.1.1 Procedimiento de la UNE-EN 1097-6

En esta norma se especifican los métodos de referencia utilizados para los ensayos para la determinación de la densidad de partículas y la absorción de áridos normales y ligeros. En ella se distinguen distintos procedimientos para la fracción por encima de 31,5 mm, otro para la fracción entre 4 mm y 31,5 mm y otro para la fracción por debajo de 4 mm.

Las cenizas de fondo utilizadas en este proyecto tienen tamaño máximo 10 por lo que solo son de interés los dos últimos apartados.

8.1.1.1 Método del picnómetro para para las partículas que pasan por el tamiz 31,5 mm y quedan retenidas en el tamiz 4 mm

Se parte de una muestra de árido de una masa de entre 5 kg y 1 kg dependiendo del tamaño máximo de este. Esta se sumerge en agua dentro de un picnómetro, que se mantiene en un baño de agua a temperatura constante durante 24h. Tras estas 24 h se elimina el aire atrapado mediante giros y sacudidas cuidados del recipiente.

En este proceso es donde nos encontramos con los primeros problemas, teniendo que eliminar el contenido en aire mediante la aplicación de vacío, posibilidad que indica la norma.

Tras esto se enrasa el picnómetro y se pesa. También es necesario tarar el picnómetro lleno solamente de agua y registrar su peso.

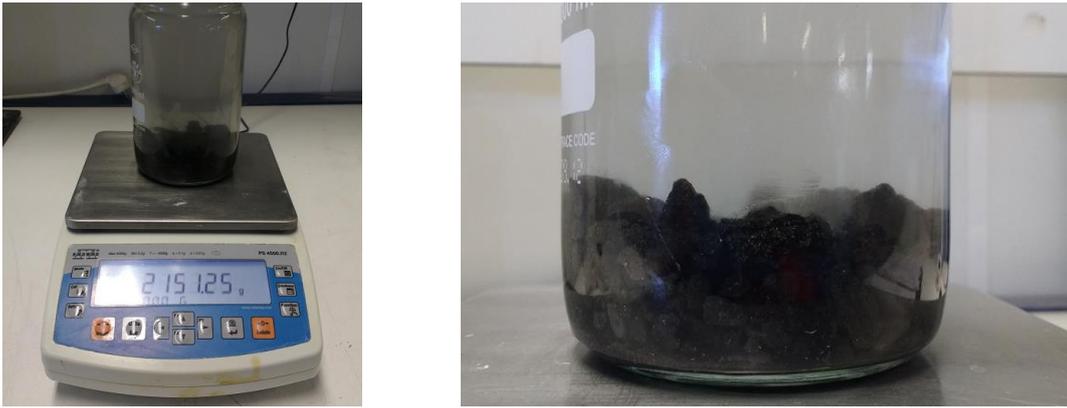


Figura 88: pesado de picnómetro una vez eliminado todo el aire

La porción de árido ensayada se transfiere a unos paños secos, donde se seca cuidadosamente hasta que las partículas de agua desaparezcan pero el árido se mantenga con apariencia húmeda. Se registra su peso y después se seca en estufa, registrando con también su peso una vez seco.

En este punto es donde nos encontramos mayores problemas con el método, no consiguiendo llegar fácilmente hasta el punto en el que las partículas estén superficialmente secas pero con apariencia húmeda.

Con todos estos datos de masas se calculan la densidad aparente de partículas (ρ_{La}), la densidad e las partículas secadas en estufa (ρ_{Lrd}), la densidad de partícula saturada y secada superficialmente (ρ_{Lssd}) y la absorción a 24h (WA_{24}).

En el caso de áridos ligeros el procedimiento es el mismo, variando solamente el método de cálculo de la masa tras sumergir la muestra en el picnómetro en el caso de ser necesarias mas de 24h y el secado de las partículas con el paño no debe durar mas de 15 segundos.

8.1.1.2 Método del picnómetro para para las partículas que pasan por el tamiz 4 mm y quedan retenidas en el tamiz 0,063 mm

Se parte de una muestra de árido de una masa de mas de 300 g dependiendo del tamaño del picnómetro utilizado. Esta se sumerge en agua dentro de un picnómetro, que se mantiene en un baño de agua a temperatura constante durante 24h. Tras estas 24 h se elimina el aire atrapado mediante giros y sacudidas cuidados del recipiente.

En este proceso es donde nos encontramos con los primeros problemas, teniendo que eliminar el contenido en aire mediante la aplicación de vacío, posibilidad que indica la norma.

Tras esto se enrasa el picnómetro y se pesa. También es necesario tarar el picnómetro lleno solamente de agua y registrar su peso.

La porción de árido ensayado se esparce sobre una bandeja y se expone a una corriente de aire templada para eliminar la humedad superficial mezclándola a intervalos frecuentes para asegurar un secado uniforme. Para evaluar si se ha alcanzado el secado superficial se llena un molde cónico y una vez retirado este el árido debe desmoronarse, tras esto se pesa. Esta misma muestra se introduce en la estufa para secarla por completo y se vuelve a pesar.



Figura 89: realización de cono con ceniza de la central 1

En este punto es donde más problemas encontramos y nos dimos cuenta que el método no servía para caracterizar las cenizas. Su forma porosa y rugosa hacen que tengan que estar secas (humedades inferiores al 1% para que se desmorone una vez llenado el cono) por lo que el dato de peso en estado saturado con superficie seca no es correcto. Algo similar pasa con los áridos naturales aunque la diferencia es mucho menor en que este caso.

Con todos estos datos de masas se calculan la densidad aparente de partículas (ρ_{La}), la densidad e las partículas secadas en estufa (ρ_{Lrd}), la densidad de partícula saturada y secada superficialmente (ρ_{Lssd}) y la absorción a 24h (WA_{24}).

En el caso de áridos ligeros no existe un procedimiento regulado para esta fracción.

8.1.2 Procedimiento de la NY 703-19 E

Esta norma del estado de Nueva York es específica para la determinación de la absorción y el estado de saturado con superficie seca en áridos ligeros finos.

Se parte de una muestra de 1500 gramos y se satura en agua durante 72 h. Una vez transcurridas 72 horas se elimina el agua y se divide en 4 muestras iguales.

La primera muestra se pesa. Tras esto se introduce en el horno a 110°C y se vuelve a pesar una vez se seque por completo. Con esto se calcula la humedad de la muestra y la absorción máxima.

Una segunda muestra se coloca sobre una “toalla de papel” (papel grueso) para secarla, y se repite el proceso hasta que el papel no se moja y deja de absorber humedad. Con el peso tras este proceso y el inicial se calcula la humedad absorbida o la humedad en estado saturado superficie seca.

Con la diferencia entre estas humedades se calcula por último la humedad superficial. Esta norma solo sirve para calcular humedades y absorciones, no indica el procedimiento para calcular densidades.

8.1.3 Procedimiento propio

El procedimiento propio desarrollado sigue el método de la norma UNE-EN 1097-6 [73] pero el estado se saturado superficie seca se consigue con el procedimiento de la norma NY 703-19 E [74].

El procedimiento, al igual que en el anteriormente descrito se divide para dos fracciones, por encima de 4 mm y por debajo.

Las partículas se sumergen en el picnómetro y se saturan mediante una inmersión de 24h y vacío durante 30 min a una presión de 40 Bares.



Figura 90: Recipiente y equipo para realizar vacío

El vacío se genera por succión con un motor y se regula con un aparato de control de presión que la mantiene constante durante todo el ensayo.



Figura 91: Motor y controlador de equipo de vacío

Una vez garantizado que se ha eliminado todo el aire de las partículas se vacía el picnómetro y la muestra se extiende sobre un papel grueso para secarla superficialmente. En este caso se ha usado un papel de filtro de alto gramaje que absorbía bien la humedad sin deshacerse y sin que la muestra se quedase pegada. Este procedimiento detallado en la norma del estado de Nueva York permite obtener el estado de saturado superficie seca de una forma mas exacta.

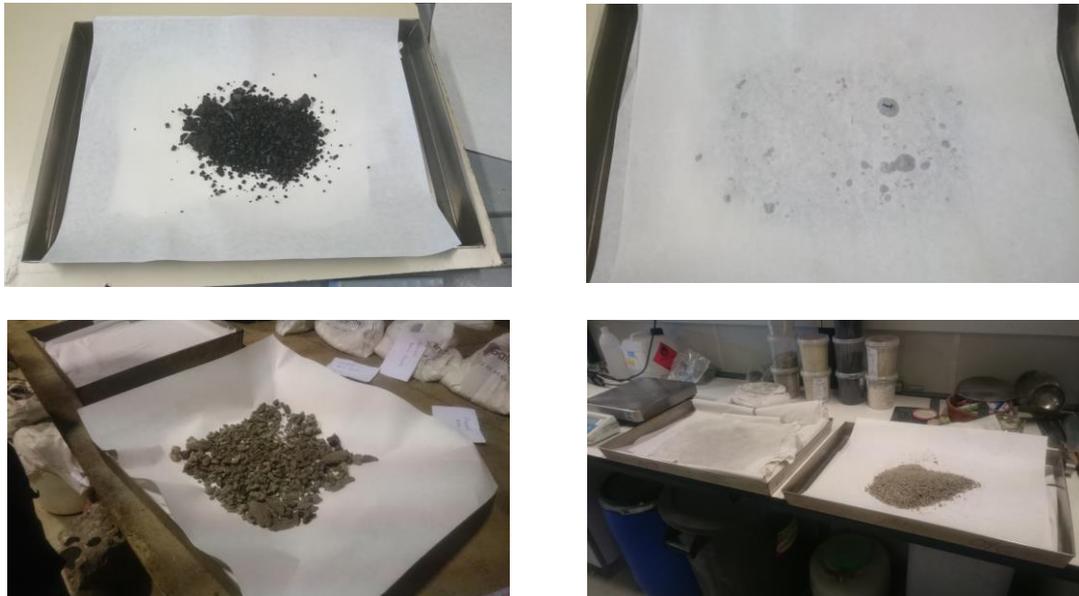


Figura 92: Proceso de secado superficial de cenizas con papel

Una vez obtenido el dato de peso en estado de superficie seca y con el resto de datos de volumen y peso saturado obtenidos en el picnómetro, así como peso seco tras secar la muestra en la estufa se calculan las densidades y absorciones según la norma UNE-EN anteriormente descrita.

8.2 Anejo 2: fotografías

8.2.1 Recepción, acopio de materiales y caracterización



Figura 93: Recepción de cenizas de fondo de la central 1



Figura 94: Acopio de áridos en el CITEEC



Figura 95: Acopio de cenizas y cementos en el CITEEC



Figura 96: Tamizado de arenas para granulometrías



Figura 97: Tamizadora de gran tamaño para cortar en fracciones la ceniza



Figura 98: Secado de árido para ensayo norma UNE-EN 1097-6



Figura 99: Realización de cono para ensayo de la norma UNE-EN 1097-6



Figura 100: Eliminación de aire en la muestra dentro del picnómetro

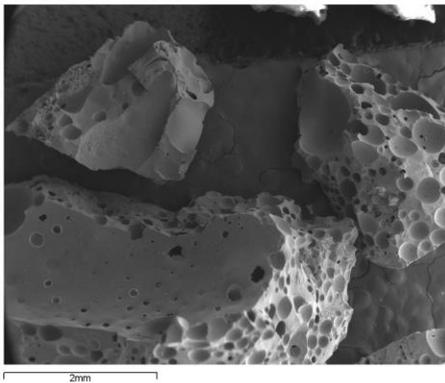


Figura 101: Distintos momentos en los ensayos para la caracterización de cenizas

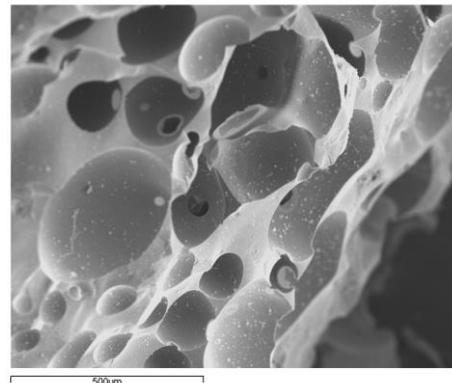
8.2.2 Fotos SEM (Microscopio de barrido electrónico)



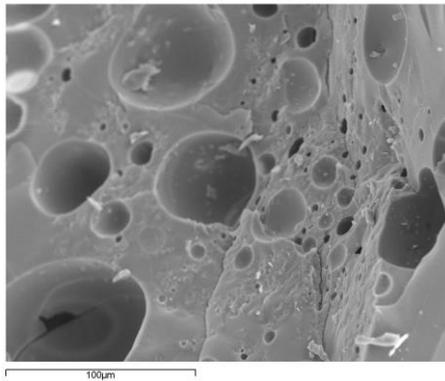
Figura 102: Microscopio de barrido electrónico



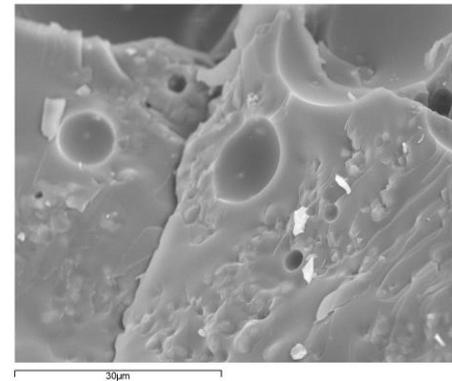
50 aumentos



100 aumentos

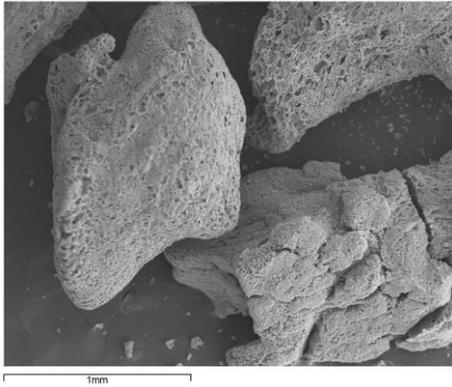


500 aumentos

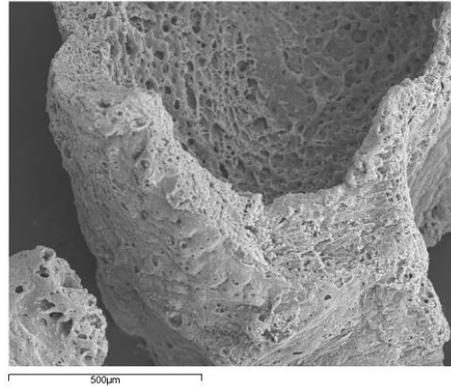


1800 aumentos

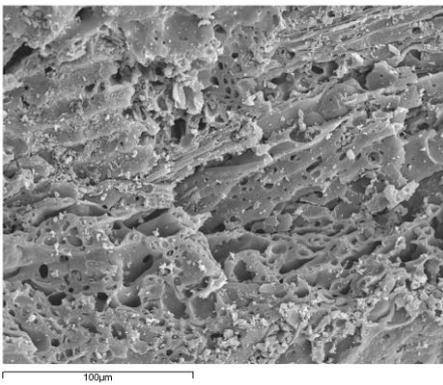
Figura 103: SEM Ceniza de central 1 fracción 4-25 mm



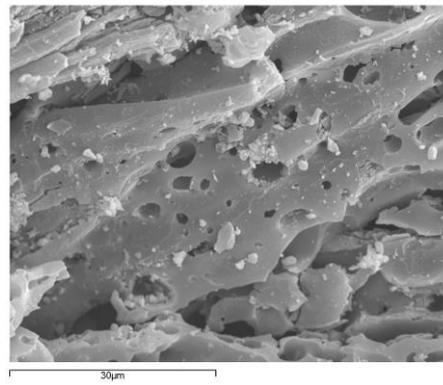
50 aumentos



100 aumentos

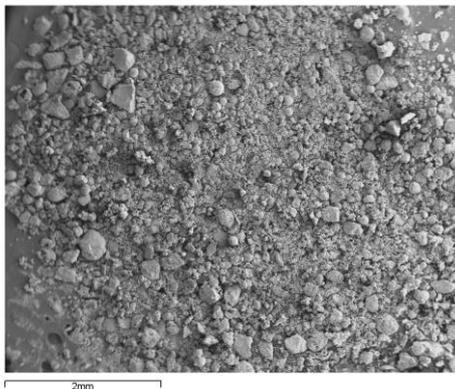


500 aumentos

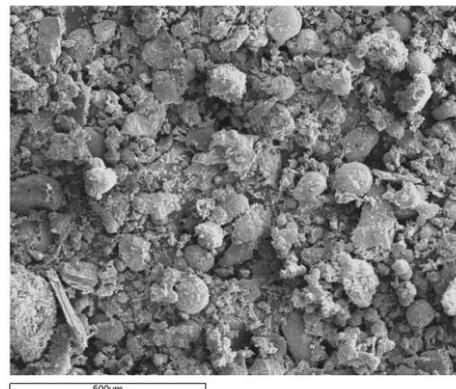


1800 aumentos

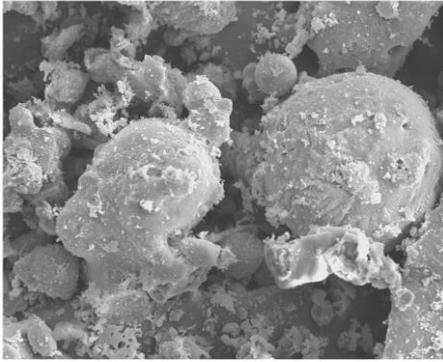
Figura 104: SEM Ceniza de central 1 fracción 1-2,5 mm



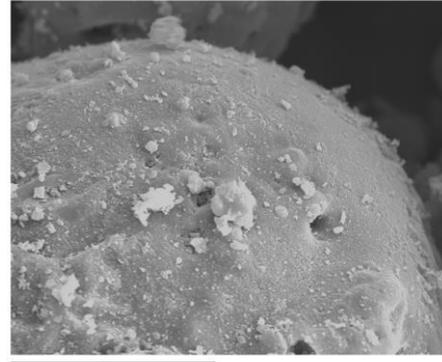
20 aumentos



100 aumentos

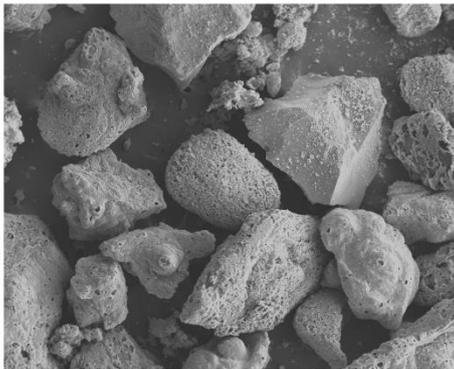


500 aumentos

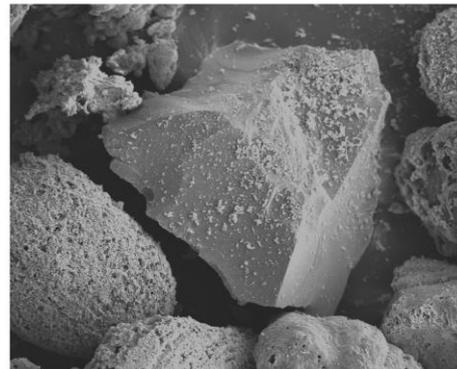


1800 aumentos

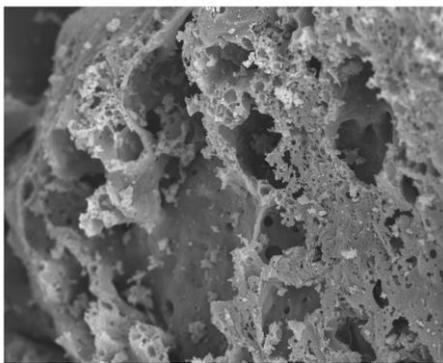
Figura 105: SEM Ceniza de central 1 fracción 0,125-1 mm



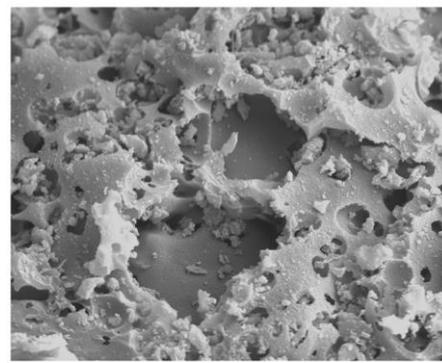
50 aumentos



100 aumentos

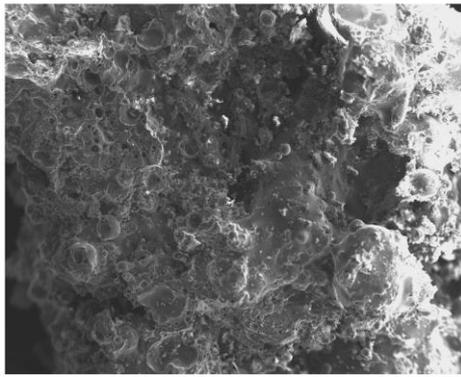


500 aumentos

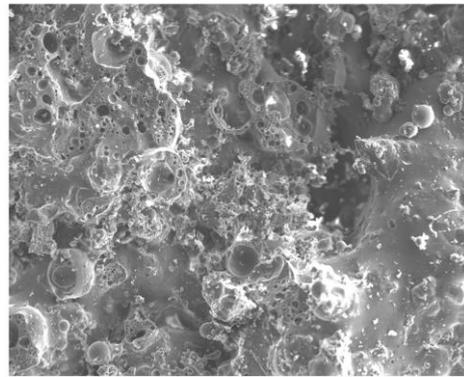


1800 aumentos

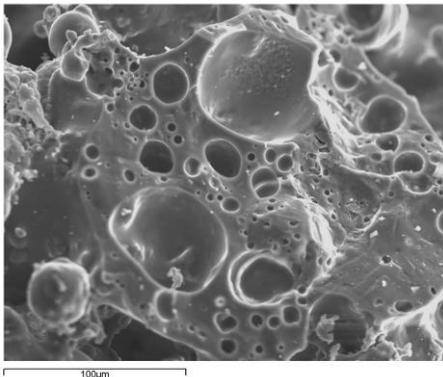
Figura 106: SEM Ceniza de central 1 fracción 0,063-0,25 mm



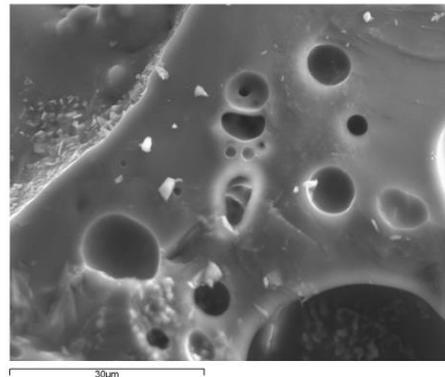
50 aumentos



100 aumentos

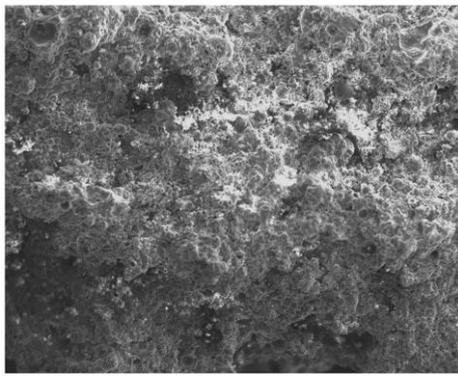


430 aumentos

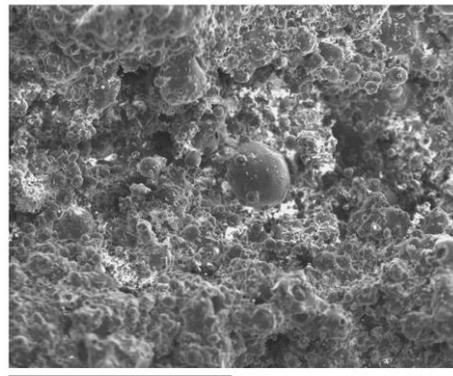


1800 aumentos

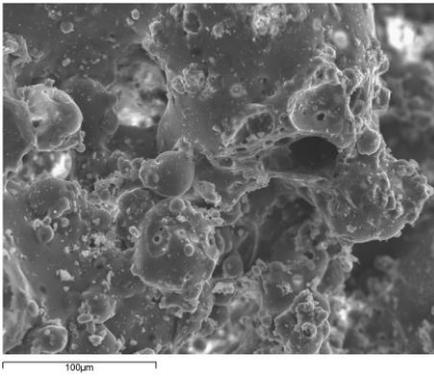
Figura 107: SEM Ceniza de central 2 fracción 4-25 mm



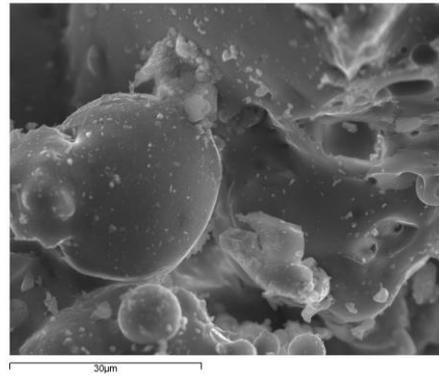
50 aumentos



100 aumentos

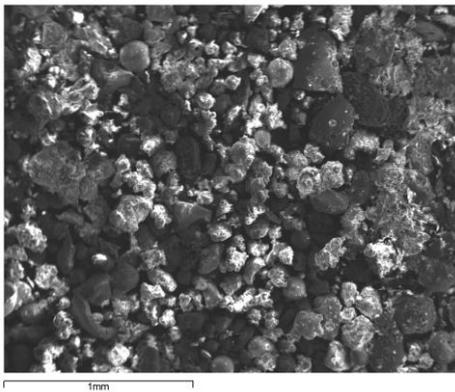


430 aumentos

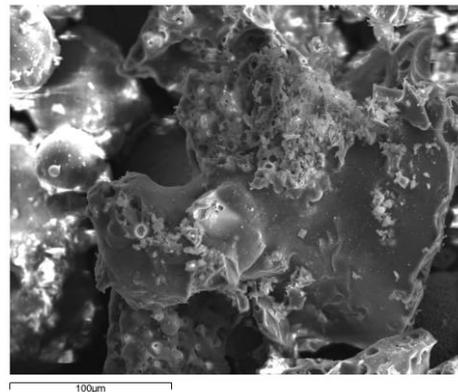


1800 aumentos

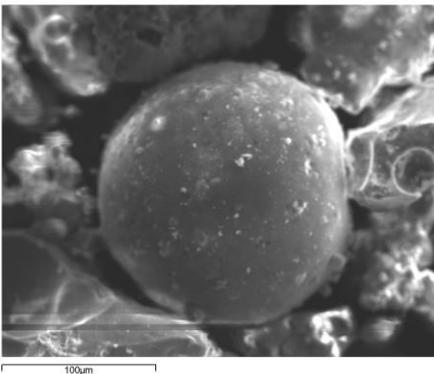
Figura 108: SEM Ceniza de central 2 fracción 2-2,5 mm



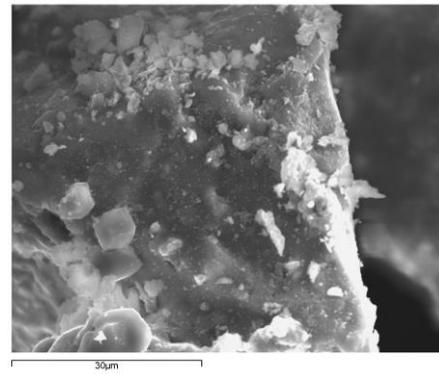
50 aumentos



430 aumentos



430 aumentos



1800 aumentos

Figura 109: SEM Ceniza de central 1 fracción 0,063-1,25 mm

8.2.3 Amasadas y curado de probetas



Figura 110: Amasado de los morteros



Figura 111: Amasado de los hormigones para prefabricados



Figura 112: Desmoldado de probetas



Figura 113: Curado de las probetas de hormigón para prefabricados en la cámara climática



Figura 114: Curado de probetas de mortero en la cámara climática



Figura 115: Probetas de mortero con ceniza de la central 1 ordenadas de mayor a menor cantidad de cenizas



Figura 116: Probetas de mortero con ceniza de la central 2 ordenadas de menor a mayor contenido de ceniza



Figura 117: Probetas de hormigón para prefabricados ordenadas de menor a mayor contenido de ceniza

8.2.4 Ensayos en fresco y ensayos en endurecido



Figura 118: Tarado y llenado de moldes de mortero



Figura 119: Ensayos de trabajabilidad en morteros



Figura 120: Llenad de moldes con hormigón de prefabricados



Figura 121: Probetas de mortero para ensayo de capilaridad



Figura 122: Ensayo a compresión de probetas cúbicas de hormigón para prefabricados