



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



MORTEROS PARA REVESTIMIENTO CON ÁRIDO PROCEDENTE DE CONCHA DE MEJILLÓN



TRABAJO FIN DE GRADO

JUNIO 2014

GRADO EN ARQUITECTURA TÉCNICA

AUTOR:

RODRÍGUEZ ÁLVARO, ROBERTO

DIRECTORES:

**SEARA PAZ, GUMERSINDA
PÉREZ ORDÓÑEZ, JUAN LUIS**

DEPARTAMENTO:

TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación:

“Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción (BIOVALVO)”

Financiado por el Programa FEDER ININTERCONECTA (Julio 2013) y desarrollado por el consorcio de empresas Extraco Construccions e Proxectos S.A. , Galaicontrol S.L. y Serumano S.L., en colaboración con el grupo de construcción GCons de la Universidade da Coruña.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a varias personas y entidades la ayuda que me han prestado en la realización de este Trabajo Final de Grado:

A mis directores Sindy y Juan Luis, por guiarme sabiamente en un mundo tan nuevo para mí como es la investigación; a Belén, Diego y Fernando, por estar siempre dispuestos a aclarar mis dudas; a María, por enseñarme cómo se trabaja en un laboratorio de construcción; a Manuel, Iris, Alberto, Natalia... y a todos aquellos que me habéis echado una mano siempre que lo necesité; y por supuesto a Carolina, porque de no ser por ella nada de esto hubiese sucedido.

Por otra parte, a mi familia y a mis amigos, por interesarse siempre no sólo por cómo me iba con el trabajo, sino aún más importante, por cuál era su contenido. Gracias a todos por darme la oportunidad de explicaros qué he hecho en el laboratorio y por escuchar atentamente algunas de mis peripecias con las conchas de mejillón. Con este trabajo espero haber contribuido y seguir contribuyendo a que cada día más gente encuentre respuesta a la pregunta que todos me hicieron cuando dije que iba a colaborar en un proyecto de investigación:

Ya pero... ¿Qué hace un aparejador en un laboratorio?

Por último, quiero agradecer el apoyo prestado por las empresas Extraco, Galaicontrol, Serumano y Grupo Rodiñas, así como a Abonamar, Comcal y Epifanio Campo por suministrarnos los materiales necesarios para la realización de este trabajo.

Resumen

El sector de la construcción genera un considerable volumen de residuos y contaminación a nivel global. En los últimos años se ha tomado conciencia de la necesidad de cambio, surgiendo el término bioconstrucción, definido como una forma de construir respetuosa con la salud de las personas, del entorno y del planeta.

Este proyecto propone la valorización de un residuo, la concha de mejillón, que se produce en grandes cantidades en Galicia y cuyo único destino posible en la actualidad es el depósito en vertedero. Concretamente, se investiga el comportamiento de la arena producida a partir de este residuo en morteros convencionales de cemento, y en morteros de cal aérea y barro, cuyo impacto ambiental es menor que el de los primeros.

Tras recopilar información general acerca de la bioconstrucción, sus materiales y otros estudios similares al presente desarrollados en distintos lugares del mundo, se establece un plan de ensayos, conforme a la norma *UNE-EN 998-1: Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido* que incluye una fase introductoria de caracterización del material procedente de concha de mejillón como árido. Este programa experimental se lleva a cabo en el Laboratorio de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de A Coruña.

La caracterización del material arroja resultados similares entre la arena de concha de mejillón y la convencional en cuanto a la densidad de partícula y la composición química. La principal diferencia entre una y otra es la forma de sus partículas. Éstas son predominantemente lajas en el árido procedente de mejillón, hecho que repercute directamente sobre las características de cualquier material que se produzca con él, ya que la disposición entre las lajas genera una red de poros mayor que la que pueden provocar las partículas redondeadas de un árido convencional.

En cuanto a los morteros, se constata un descenso de la densidad, un aumento de la consistencia y una disminución de las resistencias mecánicas cuando se aumenta el contenido en concha de mejillón en los mismos. Por otra parte, la caracterización de morteros con diferentes ligantes muestra una menor influencia del contenido de concha en los morteros de cal y barro, donde se registran disminuciones de densidad y de resistencia mecánica menores que en los de cemento.

En el caso de los morteros de cemento, se obtuvieron además los coeficientes de capilaridad y la pérdida de peso, que reflejan un mejor comportamiento de los morteros fabricados con concha de mejillón.

Por último, se expone un análisis de la metodología de certificación BREEAM detectando los requisitos cuya valoración se vería afectada por la presencia de morteros con concha de mejillón en un edificio.

Palabras clave:

Mortero	Bioconstrucción	Mejillón	Cal	Barro
----------------	------------------------	-----------------	------------	--------------

Abstract

The construction sector generates considerable waste and pollution globally. In recent years, the increasing awareness of the need for a change has facilitated the emergence of the term *bio-construction*, defined as a way to build structures that are harmless to the health of people, the environment and the whole planet.

This project suggests the revaluation of mussel shells, a residue which is produced in large quantities in Galicia and whose main destination nowadays would be a landfill. Specifically, we will analyse the behavior of the sand produced from this waste after being used not only in common cement mortars, but also in lime or clay mortars whose environmental impact is smaller.

After gathering general information about bio-construction, its materials and other studies developed elsewhere in the world, we designed a test in accordance with the UNE-EN 998-1: Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar, which includes an introductory characterization phase of the mussel shell as an aggregate. This test plan is carried out at the Construction Laboratory of the Escuela Superior de Caminos, Canales y Puertos in A Coruña.

The characterization of the material shows similar results about chemical composition and particle density between the mussel shell sand and the conventional one. The main difference between the two is the shape of their particles. These are predominantly slab-shaped in the mussel shell aggregate. This directly affects the characteristics of any material produced with them since the arrangement of its slabs generate a larger network of pores than the one caused by the rounded particles of any other conventional aggregate.

As to the mortar we could observe that, the higher the presence of mussel shell, the higher its consistency and the lower its density and mechanical strength. Moreover, the characterization of mortars with different binders shows less influence of mussel shell content in lime or clay mortar, where the reduction in density or strength is smaller than with cement.

In the case of cement mortars, capillarity coefficients and mass loss have been tested, reflecting a better performance of the mortars made with mussel shell.

Finally, in order to detect the requirements which assessment would be affected by the presence of mussel shell mortars, an analysis of the methodology of certification system BREEAM has been carried out.

Key words:

Mortar	Bio-construction	Mussel	Lime	Clay
--------	------------------	--------	------	------

Índice de contenido

Índice de contenido	11
Índice de imágenes	15
Índice de tablas	21
Índice de gráficos	25
Índice de esquemas	29
1 Introducción y objetivos generales	31
2 Estado de la cuestión	35
2.1 Bioconstrucción.....	37
2.2 Materiales para bioconstrucción:.....	42
2.2.1 Ausencia de toxicidad	42
2.2.2 Bajo coste social	43
2.2.3 Bajo impacto ambiental.....	43
2.2.4 Ejemplos de materiales para bioconstrucción	45
2.3 Morteros de revestimiento en bioconstrucción	45
2.3.1 Introducción	45
2.3.2 Morteros de revestimiento.....	46
2.3.3 El ligante convencional: el cemento.	48
2.3.4 La cal	50
2.3.5 La tierra.....	53
2.3.6 Los áridos convencionales y su problemática	58
2.3.7 La alternativa de bioconstrucción: Áridos secundarios	60
2.4 Producción y gestión de residuo de concha de molusco	61
2.4.1 Producción a nivel internacional.....	61
2.4.2 Producción en Galicia	61
2.4.3 Gestión tradicional	65
2.4.4 Nuevos usos	66
2.5 Materiales ligados con concha de molusco	67
2.5.1 Introducción	67
2.5.2 Caracterización común del residuo de concha de molusco	72
2.5.3 Hormigones con sustitución de grava	73
2.5.4 Hormigones y morteros con sustitución de arena.....	77
2.5.5 Morteros y pastas con sustitución de filler y/o conglomerante.....	82
3 Caracterización del material	89
3.1 Introducción	91
3.2 Ligantes	91

3.2.1	Cemento	91
3.2.2	Cal aérea en pasta	92
3.2.3	Barro: Minerales arcillosos.....	94
3.3	Agua.....	96
3.4	Áridos	96
3.4.1	Arena de mejillón (AM)	97
3.4.2	Arena natural modificada (ANMod).....	99
3.5	Caracterización del material procedente de concha de mejillón.....	101
3.5.1	Características físicas.....	106
3.5.2	Características químicas.....	112
3.5.3	Características mecánicas.....	117
4	Morteros de estudio	119
4.1	Introducción	121
4.2	Morteros de cemento.....	122
4.2.1	Ajuste de la dosificación	122
4.2.2	Diseño final.....	124
4.3	Morteros de cal.....	126
4.3.1	Ajuste de la dosificación	126
4.3.2	Diseño final.....	128
4.4	Morteros de barro	130
4.4.1	Ajuste de la dosificación	130
4.4.2	Diseño final.....	130
4.5	Fabricación de los morteros.....	133
4.5.1	Amasado	133
4.5.2	Preparación de moldes, vertido y compactación.....	134
4.5.3	Marcado, desmoldado y curado.....	135
5	Plan de ensayos	137
5.1	Estado fresco.....	139
5.1.1	Consistencia	139
5.1.2	Densidad	139
5.1.3	Contenido en aire	139
5.2	Estado endurecido.....	140
5.2.1	Densidad	140
5.2.2	Resistencia mecánica.....	141
5.2.3	Pérdida de peso.....	142
5.2.4	Densidad en seco	143
5.2.5	Coeficiente de capilaridad.....	143

5.3	Otras propiedades.....	143
5.3.1	Reacción al fuego	143
5.3.1	Conductividad térmica.....	144
5.3.2	Permeabilidad al vapor de agua.....	144
6	Resultados	145
6.1	En fresco.....	147
6.1.1	Consistencia	147
6.1.2	Densidad.....	148
6.1.3	Contenido en aire.....	149
6.2	En endurecido.....	151
6.2.1	Densidad.....	151
6.2.2	Resistencia mecánica	152
6.2.3	Reacción al fuego	155
6.3	Otras propiedades de los morteros de cemento.....	156
6.3.1	Pérdida de peso.....	156
6.3.2	Densidad en seco	157
6.3.3	Coeficiente de capilaridad.....	158
6.3.4	Conductividad térmica.....	159
6.3.5	Permeabilidad al vapor de agua.....	160
7	Relación BREEAM - TFG.....	161
7.1	¿Qué es BREEAM?	163
7.2	Efecto de utilizar los morteros propuestos en el presente trabajo sobre la clasificación BREEAM de un edificio.....	164
7.2.1	GST 3: Impactos en la Zona de Obras.....	164
7.2.2	MAT 1: Materiales de Bajo Impacto Ambiental.....	164
7.2.3	MAT 5: Aprovechamiento Responsable de Materiales	165
7.2.4	RSD 2: Áridos reciclados	165
7.3	Conclusión	165
8	Conclusiones y futuras líneas.....	167
8.1	Conclusiones	169
8.1.1	Sobre el material procedente de concha de mejillón	169
8.1.2	Sobre los morteros.....	169
8.1.3	Sobre la relación con el certificado BREEAM.....	170
8.2	Futuras líneas	170
9	Bibliografía	171
10	Anejos	181
10.1	. Anejo 1: Tablas correspondientes a los gráficos del apartado 2.5.....	183
10.2	Anejo 2: Dosificación de partida del mortero de cemento.....	187

10.2.1	Nivel de impermeabilidad exigido al cerramiento según DB-HS1	187
10.2.2	Nivel exigido de cumplimiento de propiedades al revestimiento exterior	189
10.2.3	Clase de resistencia mecánica del mortero.....	190
10.2.4	Resistencia a compresión a 28 días	191
10.2.5	Dosificación de partida.....	192
10.3	Anejo 3: Resultados individuales de los ensayos.....	193
10.3.1	En fresco	193
10.3.2	En endurecido.....	194

Índice de imágenes

Imagen 2-1: Portada del blog http://abioclimatica.blogspot.com.es/ (4)	40
Imagen 2-2: La mayoría de pinturas convencionales contienen COVs.	42
Imagen 2-3: Fotografías del módulo bioclimático experimental para aplicaciones docentes del CIFP Someso (A Coruña). A la izquierda se observa la estructura de madera y el cerramiento de balas de paja, a la derecha se observa el revestimiento interior con revoco de barro (20).	45
Imagen 2-4: Fábrica de cemento en Toral de los Vados, León. (http://www.economiadigital.es).....	50
Imagen 2-5: Revestimiento de mortero de cemento sobre fábrica de mampostería (https://idearqiberica.wordpress.com/tag/arquitectura-tradicional/).....	51
Imagen 2-6: Revestimientos de cal esgrafiados (http://pinturaspalomo.blogspot.com.es)	51
Imagen 2-7: Cal aérea cálcica apagada en polvo (http://www.barmexinc.com/cal_hidratada.html)	53
Imagen 2-8: Cal aérea cálcica apagada en pasta (http://ecocorum.com/index.php/Cales)	53
Imagen 2-9: Ciudad de Shibán en Yemen, construcción con tierra (http://www.viajes.es/asia/yemen/yemen-ciudades-fortaleza-del-altiplano-l3.jpg)	53
Imagen 2-10: Ejemplos de minerales arcillosos con diferentes colores función de su diferente composición química. (http://www.mx.all.biz/arcillas-en-polvo-uso-cosmetico-g42571).....	56
Imagen 2-11: Mortero de barro con paja listo para su aplicación como revoco (http://igludecanyes.blogspot.com.es/2011/06/16-pruebas-y-detalles-interior.html)	56
Imagen 2-12: Ejemplos de construcciones de tapial y/adobe revestidas con revocos de barro en Santa María del Monte de Cea, León. (http://www.templete.org/2013/11/santamar-del-monte-un-pueblo-mas-grande.html)....	57
Imagen 2-13: Cantera de Santa Cristina, situada en Ponteceso (A Coruña), con una extensión de 13Ha. Extracción a cielo abierto gneis gris oscuro, áridos para carreteras. (http://www.lopezcao.com/canteras/).....	58
Imagen 2-14: Cantera de Olveiro, situada entre Carballo y Malpica (A Coruña), ocupando una extensión de 17Ha. Extracción a cielo abierto de granito gnéisico blanco, áridos para hormigón. (http://www.lopezcao.com/canteras/)	58
Imagen 2-15: Dragalina depositando arena del fondo marino en un barco de transporte (http://www.marmaray.com)	59
Imagen 2-16: Barco transportando arena dragada del fondo del mar (http://coastalcare.org)	59
Imagen 2-17: Mujeres recogiendo arena en una playa de Cabo Verde para su venta a empresas del sector de la construcción. (http://coastalcare.org)	59
Imagen 2-18: Playa afectada por el dragado de los fondos marinos en las Islas Maldivas (océano Índico) (www.coastalcare.org)	59
Imagen 2-19: Playa afectada por el dragado de los fondos marinos en Carolina del norte (EEUU) (http://pruned.blogspot.com.es).....	59

Imagen 2-20: Cultivo en bateas de <i>Mytilus galloprovincialis</i> (56)	64
Imagen 2-21: Planta de depuración (56)	64
Imagen 2-22: Maquinaria usada para seleccionar y envolver las semillas en las cuerdas (56)	64
Imagen 2-23: Mejillones mediterráneos empacados (56)	64
Imagen 2-24: Conchas de mejillón depositadas en vertedero (www.impacuicultura.com)	65
Imagen 2-25: Escombros de hormigón con bígaro como árido grueso.....	65
Imagen 2-26: Solera de hormigón con bígaro como árido grueso	65
Imagen 2-27: Imágenes por microscopía electrónica de barrido de conchas de ostra (izquierda), mejillón (centro) y CaCO_3 comercial (derecha) (69).....	72
Imagen 2-28: Ejemplo de difractograma de concha de ostra con el pico de calcita destacado (79).....	72
Imagen 3-1: Cemento utilizado: CEM II/A-M(V-L) 42.5R	91
Imagen 3-2: Cal en pasta escurrida sobre cápsula	93
Imagen 3-3: Cal en pasta almacenada en cubo sumergida en agua	93
Imagen 3-4: Arcilla caolínica	94
Imagen 3-5: Caolín	94
Imagen 3-6: Agua utilizada	96
Imagen 3-7: Uso de pipeta con succionador	96
Imagen 3-8: Pipeta con succionador	96
Imagen 3-9: Estufa.....	97
Imagen 3-10: Termostato de estufa	97
Imagen 3-11: Báscula precisión centésima de gramo	97
Imagen 3-12: Tamizadora	97
Imagen 3-13: Arena sin mezclar: a la izquierda AMF, en el centro AN0-0.063 y a la derecha AN0.063-0.25	97
Imagen 3-14: AMF	98
Imagen 3-15: AMG.....	98
Imagen 3-16: Granulometría adecuada para un mortero de revestimiento de cal o tierra (27).	99
Imagen 3-17: 0-0.063 mm	100
Imagen 3-18: 0.063-0.25 mm	100
Imagen 3-19: 0.25-1 mm.....	101
Imagen 3-20: 1-4 mm.....	101
Imagen 3-21: Material clase CE	102
Imagen 3-22: Material clase GM	102
Imagen 3-23: Material clase AMG	103
Imagen 3-24: Material clase AMF.....	103

Imagen 3-25: Medición de ancho y largo de partículas del material CE con calibre electrónico.....	104
Imagen 3-26: Subclase CBE	107
Imagen 3-27: Subclase CBR	107
Imagen 3-28: Subclase CIE.....	107
Imagen 3-29: Subclase CIR	107
Imagen 3-30: Subclase X	107
Imagen 3-31: Subclases de CE separadas tras clasificación macroscópica de aproximadamente 1000 partículas.	107
Imagen 3-32: Concha de mejillón	108
Imagen 3-33: Concha blanca	108
Imagen 3-34: Lapas	108
Imagen 3-35: Pelos y otros restos orgánicos.....	108
Imagen 3-36: Proporciones de las subclases de la fracción GM.....	108
Imagen 3-37: Partículas retenidas en el tamiz de lajas 4mm.....	109
Imagen 3-38: Apelmazamiento de partículas en molde troncocónico con pisón	110
Imagen 3-39: Decantado de picnómetro.....	110
Imagen 3-40: Secado de la superficie de los áridos	110
Imagen 3-41: Final del ensayo	110
Imagen 3-42: MEB zona externa de CE	111
Imagen 3-43: MEB zona interna de CE	111
Imagen 3-44: Microscopía electrónica de barrido de concha fracturada (zona externa, superior).....	111
Imagen 3-45: Probetas cilíndricas graduadas con árido sedimentándose	112
Imagen 3-46: Medida del pisón a la parte superior de la probeta	112
Imagen 3-47: Probeta colocada en máquina de agitación	112
Imagen 3-48: Ensayo para obtención de materia orgánica.....	117
Imagen 3-49: Ensayo para obtención de sulfatos solubles	117
Imagen 3-50: Fracción modificada de GM (10/14).....	118
Imagen 3-51: Material en el tambor junto con las bolas de acero	118
Imagen 3-52: Material lavado tras 500 vueltas en el tambor.....	118
Imagen 3-53: Material que pasa por tamiz 1.6mm mientras se lava	118
Imagen 4-1: MC100% 1:6	124
Imagen 4-2: MC100% 1:5	124
Imagen 4-3: MC100% 1:5 desencofrado fallido	124
Imagen 4-4: MC100% probeta de prueba.....	124
Imagen 4-5: MC100% 1:4	124
Imagen 4-6: MC0% 1:4	124

Imagen 4-7: Mortero de cal con relación cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y relación agua/cal en masa = 1.3	127
Imagen 4-8: Mortero de cal con relación cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y relación agua/cal en masa =1.5	127
Imagen 4-9: MK75 (cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y agua/cal en masa 1.7)	127
Imagen 4-10: MK100 (cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y agua/cal en masa 1.7)	127
Imagen 4-11: Probetas de mortero de cal con distintas ratios de sustitución	129
Imagen 4-12: Probetas de mortero de barro con distintas ratios de sustitución.....	132
Imagen 4-13: Recipiente de amasadora	134
Imagen 4-14: Amasadora planetaria para mortero	134
Imagen 4-15: Pala mezcladora	134
Imagen 4-16: Molde	134
Imagen 4-17: Compactadora.....	134
Imagen 4-18: Topes	134
Imagen 4-19: Marcado de las probetas x, y, z.....	135
Imagen 4-20: Desmoldado de MC100 a las 24h.	135
Imagen 4-21: Probetas almacenadas a temperatura y humedad del laboratorio	135
Imagen 5-1: Vertido de mortero en molde	139
Imagen 5-2: Molde con medias probetas llenas y la otra parte ocupada por el tope ...	139
Imagen 5-3: Mortero avanzando por el efecto de las sacudidas de la compactadora..	139
Imagen 5-4: Compactación del mortero con pisón.	140
Imagen 5-5: Recipiente lleno de mortero enrasado.....	140
Imagen 5-6: Medidor de contenido en aire con pipeta llena de agua conectada a una de sus válvulas.	140
Imagen 5-7: Picnómetro lleno	140
Imagen 5-8: Inversión del picnómetro. Este movimiento se repite 20 veces para conseguir la dispersión del mortero en la mezcla agua-alcohol.....	140
Imagen 5-9: Báscula con precisión de gramo	141
Imagen 5-10: Báscula con precisión de centésima de gramo.....	141
Imagen 5-11: Máquina para ensayo de morteros a resistencia mecánica	141
Imagen 5-12: Dispositivo de flexión.....	142
Imagen 5-13: Probeta tras rotura a flexión	142
Imagen 5-14: Semiprismas resultantes del ensayo a flexión	142
Imagen 5-15: Dispositivo de compresión.....	142
Imagen 5-16: Probeta colocada en dispositivo de compresión.....	142
Imagen 5-17: Probeta tras rotura a compresión	142
Imagen 5-18: Marcado de probetas por la mitad (sección de corte) y a 1cm a cada lado de la mitad (profundidad de sumergido)	143

Imagen 5-19: Parafina y cazuela utilizada para fundirla.	143
Imagen 5-20: Probetas con la sección de corte sumergida, apoyadas en un tamiz de barras. El agua está contenida en una bandeja.....	143
Imagen 5-21: Probetas tras ensayo de capilaridad (las de la izquierda MC0, las de la derecha MC100)	143
Imagen 7-1: Logotipo de BREEAM España.....	163
Imagen 7-2: Logos de cada categoría del manual BREEAM ES Comercial	163
Imagen 10-1: Mapa de zonas eólicas.....	188
Imagen 10-2: Mapa de zonas pluviométricas	189

Índice de tablas

Tabla 2-1: Algunos ejemplos de materiales para bioconstrucción	45
Tabla 2-2: Clasificación de los morteros de revestimiento según norma UNE-EN 998-1 en función de sus propiedades y/o su utilización (22).....	46
Tabla 2-3: Resumen de requisitos para los morteros endurecidos (UNE-EN 998-1) (22).	47
Tabla 2-4: Clasificación de las propiedades del mortero endurecido (UNE-EN 998-1) (22)	47
Tabla 2-5: Resumen de requisitos para los morteros frescos (UNE-EN 998-1) (22).....	47
Tabla 2-6: Composición del crudo para clínker de cemento Portland (% en masa)	49
Tabla 2-7: Composición del clínker de cemento Portland (% en masa).....	49
Tabla 2-8: Reacciones de hidratación de silicatos y aluminatos en el proceso de fraguado del cemento Portland	49
Tabla 2-9: Correspondencia entre las clases resistentes de la NBE FL-90 (26) y dosificaciones en volumen de morteros de cemento.	49
Tabla 2-10: Composición de las cales aéreas cálcicas (% en masa) (UNE-EN 459-1) (29)	52
Tabla 2-11: Partículas componentes de la tierra según su tamaño de partícula.....	54
Tabla 2-12: Ejemplos de minerales arcillosos con su correspondiente formulación química (http://es.wikipedia.org/wiki/Minerales_de_la_arcilla)	55
Tabla 2-13: Estudios relacionados con la utilización de áridos secundarios	60
Tabla 2-14: Datos de producción de concha de diferentes moluscos en Reino Unido (53)	61
Tabla 2-15: Datos de producción acuícola en Galicia durante el año 2012 (54)	62
Tabla 2-16: Datos de producción de mejillón en función del destino en 2012 (54)	62
Tabla 2-17: Estudios sobre las posibilidades de uso de la concha de diferentes moluscos.....	66
Tabla 2-18: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. H = Hormigón, HL = Hormigón ligero, M = Mortero, P = Pasta, Subs. = Parte del material que se sustituye, A/C = Relación agua/conglomerante, En dosificación: m = dosificación en masa, v = dosificación en volumen.....	68
Tabla 2-19: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. H = Hormigón, HL = Hormigón ligero, M = Mortero, P = Pasta, Subs. = Parte del material que se sustituye, A/C = Relación agua/conglomerante, En dosificación: m = dosificación en masa, v = dosificación en volumen.....	69
Tabla 2-20: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. R.Compresión = Resistencia a compresión, R.Flexión = Resistencia a flexión, R.T. = Resistencia a tracción, M.E. = Módulo elástico, C.Térmica = Conductividad Térmica, P.A = Permeabilidad al agua líquida, CL = Contenido en cloruros, R.Q. = Resistencia química.	70
Tabla 2-21: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. R.Compresión = Resistencia a compresión, R.Flexión = Resistencia a flexión, R.T. = Resistencia a tracción, M.E. = Módulo elástico, C.Térmica = Conductividad Térmica, P.A	

= Permeabilidad al agua líquida, CL ⁻ = Contenido en cloruros, R.Q. = Resistencia química.....	71
Tabla 2-22: Relación de hormigones con ratio de sustitución 100% de la grava por concha entera de bígara, donde apreciamos la dificultad de observar que para mayores relaciones árido/cemento disminuyen las resistencias al encontrarnos con relaciones A/C diferentes para cada caso.....	76
Tabla 2-23: Resistencia a compresión del hormigón con aditivo para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de ostra a las edades de 28 días y 1 año (78).....	81
Tabla 2-24: Consistencia de los morteros con sustitución de filler por polvo de mejillón (82).....	83
Tabla 2-25: Fuerza de adhesión de los morteros para las distintas ratios de sustitución de filler por polvo de concha de mejillón (82).....	87
Tabla 3-1: Propiedades del cemento.....	92
Tabla 3-2: Propiedades de la cal.....	93
Tabla 3-3: Propiedades de la arcilla caolínica.....	95
Tabla 3-4: Propiedades del caolín.....	95
Tabla 3-5: Granulometría AMF.....	98
Tabla 3-6: Granulometría AMG.....	98
Tabla 3-7: Granulometría de AM.....	99
Tabla 3-8: Granulometría AN.....	100
Tabla 3-9: Granulometría ANMod.....	100
Tabla 3-10: Porcentajes en masa de cada una de las fracciones separadas de arena natural para formar combinadas la arena natural modificada.....	101
Tabla 3-11: Caracterización básica de las cuatro fracciones de concha de mejillón....	101
Tabla 3-12: Medias obtenidas estudio geométrico CE.....	105
Tabla 3-13: Subclases de la fracción CE.....	106
Tabla 3-14: Subclases de la fracción GM.....	108
Tabla 3-15: Densidades aparentes de partícula para las fracciones AMG y AMF (kg/l).....	110
Tabla 3-16: Absorción de agua para las fracciones AMG y AMF (%).....	110
Tabla 3-17: Densidad aparente de conjunto del material procedente de concha (kg/l)	111
Tabla 3-18: Aire ocluido % en volumen aparente del material procedente de concha.	111
Tabla 3-19: Valores de equivalente de arena para las fracciones AMF y AMG.....	112
Tabla 3-20: Proporción de cada componente químico en AMG y AMF (%). *Calculado estequiométricamente.....	113
Tabla 3-21: Resultados de lixiviación para las distintas fracciones (mg/kg) y comparación con las exigencias de la directiva europea 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 para residuos inertes. En rojo, los valores que no cumplen.....	116
Tabla 3-22: Contenido en compuestos químicos potencialmente perjudiciales para el mortero (%).....	117
Tabla 3-23: Coeficientes de friabilidad (%).....	118

Tabla 4-1: Nomenclatura de morteros según la ratio de sustitución de arena natural por arena de mejillón.....	121
Tabla 4-2: Ficha de dosificación del mortero de cemento finalmente escogido, con relación cemento: arena en volumen de conjunto 1:4 y relación agua/cemento en masa 1.....	125
Tabla 4-3: Ficha de dosificación del mortero de cal finalmente escogido, con relación cal:arena en volumen de conjunto 1:2 y agua/cal en masa 1.7.	128
Tabla 4-4: Ficha de dosificación del mortero de barro finalmente escogido, con relación agua:sólido en masa 0,2 y un 2% de arcilla en masa.....	131
Tabla 4-5: Condiciones higrotérmicas ambientales desde el 13-2 al 14-5.	135
Tabla 5-1: Tabla A.12 de la norma UNE-EN 1745.....	144
Tabla 10-1: Densidad de los hormigones con sustitución de grava (kg/m ³).....	183
Tabla 10-2: Variaciones de densidad de los hormigones con sustitución de grava (%).	183
Tabla 10-3: Valores representativos de la consistencia de los hormigones con sustitución de grava.	183
Tabla 10-4: Variaciones de consistencia de los hormigones con sustitución de grava (%)	184
Tabla 10-5: Resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de grava (MPa)	184
Tabla 10-6: Variaciones de la resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de grava (%).	184
Tabla 10-7: Resistencia a flexión de hormigones con sustitución de grava (MPa).....	184
Tabla 10-8: Resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de arena (MPa)	185
Tabla 10-9: Variaciones de la resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de arena (%).	185
Tabla 10-10: Resistencia a compresión de hormigones con sustitución del 100% de su arena, en función de la cantidad de adición de cenizas volantes que se les añade.....	185
Tabla 10-11: Variaciones en la resistencia a compresión de hormigones con sustitución del 100% de su arena, en función de la cantidad de adición de cenizas volantes que se les añade.	185
Tabla 10-12: Resistencia a compresión de los morteros con sustitución de cemento (MPa)	186
Tabla 10-13: Variaciones en la resistencia a compresión de los morteros con sustitución de cemento (%).....	186
Tabla 10-14: Resistencia a flexión de los morteros con sustitución de cemento (MPa).....	186
Tabla 10-15: Variaciones en la resistencia a flexión de los morteros con sustitución de cemento (%).....	186
Tabla 10-16: Clase del entorno del edificio en función al tipo de terreno en el que se encuentra.	188
Tabla 10-17: Clase de exposición al viento en función a la altura del edificio, la zona eólica y la clase de entorno.	189

Tabla 10-18: Nivel mínimo exigido de impermeabilidad según el grado de exposición y la zona puvimétrica.....	189
Tabla 10-19: Combinaciones de grados de cumplimiento de propiedades de las distintas partes del cerramiento del edificio (R=revestimiento exterior, B=barrera contra la penetración de agua,	190
Tabla 10-20: Correspondencia entre los grados de cumplimiento de propiedades exigidos por el CTE y las clases de resistencia mecánica y resistencia a la absorción de agua por capilaridad. (111)	191
Tabla 10-21: Correspondencia entre las clases resistentes de la NBE FL-90 (26) y dosificaciones en volumen de morteros de cemento.....	192
Tabla 10-22: Correspondencia entre ciertas dosificaciones de morteros de cemento y sus resistencias a compresión a los 28 días (112)	192
Tabla 10-23: Consistencia (número de golpes) y variación de la consistencia (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	193
Tabla 10-24: Densidad en fresco (kg/l) y variación de la densidad en fresco (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	193
Tabla 10-25: Contenido en aire (%) y variación de la densidad en fresco (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	193
Tabla 10-26: Densidad en estado endurecido (kg/l) y variación de la densidad en estado endurecido (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.....	194
Tabla 10-27: Resistencia a flexión (MPa) y variación de la resistencia a flexión (%) de los morteros de cemento, cal y barro, para las distintas ratios de sustitución y a las distintas edades ensayadas.....	194
Tabla 10-28: Resistencia a compresión (MPa) y variación de la resistencia a compresión (%) de los morteros de cemento, cal y barro, para las distintas ratios de sustitución y a las distintas edades ensayadas	194
Tabla 10-29: Pérdida de masa de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución para distintas edades respecto de la masa inicial (%)	195
Tabla 10-30: Densidad en seco (kg/l) y variación de la densidad en seco (%) del mortero de cemento para las distintas ratios de sustitución (kg/l).....	195
Tabla 10-31: Coeficiente de capilaridad (kg/(m ² *min ^{0.5})) y variación del coeficiente de capilaridad (%) del mortero de cemento para las distintas ratios de sustitución	196
Tabla 10-32: Contenido en materia orgánica de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución (% de masa fresca)	196
Tabla 10-33: Conductividad térmica (W/(m*K)) y variación de la conductividad térmica (%) del mortero de cemento para las distintas ratios de sustitución	196

Índice de gráficos

Gráfico 2-1: Representación gráfica de los distintos tipos de tierra según su contenido en arcilla, limo y arena expresado en % en masa (http://laregaderaverde.blogspot.com.es/2012_06_01_archive.html)	54
Gráfico 2-2: Densidad en kg/m ³ de los hormigones con sustitución de grava por concha entera de bígara para cada ratio de sustitución (Tabla 10-1).....	73
Gráfico 2-3: Variación de la densidad de los hormigones con sustitución de grava por concha entera de bígara para las distintas ratios de sustitución (Tabla 10-2).....	74
Gráfico 2-4: Variación de la trabajabilidad de los hormigones en función de la ratio de sustitución de grava por concha entera (Tabla 10-3, Tabla 10-4).....	75
Gráfico 2-5: Variación de la resistencia a compresión a los 28 días de los hormigones con sustitución de grava por concha entera (Tabla 10-5, Tabla 10-6).	76
Gráfico 2-6: Resistencia a flexión (MPa) de los hormigones según dosificación y ratio de sustitución de grava por concha entera de bígara (Tabla 10-7).....	77
Gráfico 2-7: Fluidez del mortero (%) para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de concha y cenizas volantes a partes iguales (81).....	78
Gráfico 2-8: Asentamiento del hormigón (cm) para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de ostra de dos módulos de finura distintos (A:2.7 y B:2.1), y con o sin aditivo aireante. (77).....	79
Gráfico 2-9: Variación de la resistencia a compresión a 28 días de morteros con distintas ratios de sustitución de arena de ostra (LOS: fracción 2/4.75mm y SOS: 0.074/2mm) (Tabla 10-8, Tabla 10-9).....	79
Gráfico 2-10: Variación de la resistencia a compresión a 28 días de los morteros con arena 100% sustituida por arena de ostra en función de la ratio de adición de cenizas volantes (Tabla 10-10, Tabla 10-11).....	80
Gráfico 2-11: Resistencia a compresión del hormigón con sustitución de arena por arena de ostra para el hormigón de referencia (NNO) y para las distintas ratios de sustitución por arena tipo A (módulo de finura 2.7) y tipo B (módulo de finura 2.1) sin aditivo (O) y con aditivo (R) (77).....	80
Gráfico 2-12: Tiempos de fraguado inicial y final para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de ostra + cenizas volantes (81).....	81
Gráfico 2-13: Nivel de absorción de agua de los morteros con sustitución de arena por arena de concha + cenizas volantes en distintas edades. Una mayor absorción de agua denota una mayor porosidad (81).....	82
Gráfico 2-14: Retracción de los morteros para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de concha + cenizas volantes en distintas edades (81).....	82
Gráfico 2-15: Pérdidas de peso de los morteros para distintas ratios de sustitución de arena por arena + cenizas volantes, tras ciclos de exposición al ataque de sulfatos (81).	82
Gráfico 2-16: Resistencia a compresión del mortero (MPa), a distintas edades y ratios de sustitución de filler por polvo de concha de mejillón: A(0%), B(33%), C(66%) y D(100%). (82)	83
Gráfico 2-17: Variación de la resistencia a compresión a los 28 días de los morteros para cada ratio de sustitución de cemento por polvo de concha (Tabla 10-12, Tabla 10-13)	84

Gráfico 2-18: Resistencia a compresión a 28 días (MPa) del mortero de referencia (OPS) y los morteros con % de sustitución (5/10/15/20) de cemento por polvo de concha de almeja (SCS), mejillón (GMS), ostra (OS) y berberecho (CS) (83)	84
Gráfico 2-19: Resistencia a compresión (N/cm ²) de la pasta de cal para las distintas ratios de sustitución de la misma por polvo de concha de ostra (85).....	85
Gráfico 2-20: Resistencia a flexión de los morteros con sustitución de filler por polvo de concha de mejillón para distintas edades (82)	85
Gráfico 2-21: Variación de la resistencia a flexión en los morteros para las distintas ratios de sustitución de cemento por polvo de concha (Tabla 10-14, Tabla 10-15).	86
Gráfico 2-22: Tiempos de fraguado inicial y final para el mortero de referencia (OPC) y para las distintas ratios de sustitución de cemento por polvo de concha de almeja (SCS), mejillón (GMS), ostra (OS) y berberecho (CS) (83)	86
Gráfico 2-23: Conductividad térmica en W/m*K del mortero de referencia (OPS) y de los morteros con ratio de sustitución (5/10/15/20) de cemento por polvo de concha de almeja (SCS), mejillón (GMS), ostra (OS) y berberecho (CS). (83)	86
Gráfico 3-1: Granulometría AMF	98
Gráfico 3-2: Granulometría AMG	98
Gráfico 3-3: Granulometría de AM	99
Gráfico 3-4: Granulometría AN.....	100
Gráfico 3-5: Granulometría ANMod.....	100
Gráfico 3-6: Curva granulométrica de la GM	102
Gráfico 3-7: Curva granulométrica AMG (%Pasa acumulado).....	103
Gráfico 3-8: Curva granulométrica AMF (%Pasa acumulado)	104
Gráfico 3-9: Conjunto de medidas de ancho y largo de la concha bivalva entera (CBE) en mm.....	105
Gráfico 3-10: Conjunto de medidas de ancho y largo de valva entera (VE) en mm.....	105
Gráfico 3-11: Granulometría Coulter del filler de AMF	105
Gráfico 3-12: Proporciones de las subclases de la fracción CE	106
Gráfico 3-13: Índice de lajas para cada fracción granulométrica de GM.....	109
Gráfico 3-14: Difractograma de una muestra de AMF.	114
Gráfico 3-15: Resultado del análisis termogravimétrico de la AMF. En verde, curva de pérdida de masa; en rojo, balance energético, se trata de una reacción endotérmica con picos a diferentes temperaturas.	115
Gráfico 3-16: Resultado del análisis termogravimétrico del filler de AMF. En verde, curva de pérdida de masa; en rojo, balance energético, se trata de una reacción endotérmica con picos a diferentes temperaturas.	115
Gráfico 3-17: Coeficientes de Los Ángeles (%)	117
Gráfico 4-1: Representación gráfica de las proporciones de los distintos componentes de los morteros de cemento.....	126
Gráfico 4-2: Relación agua/cemento en masa	126
Gráfico 4-3: Relación pasta (cemento + agua)/arena en volumen aparente de partícula	126

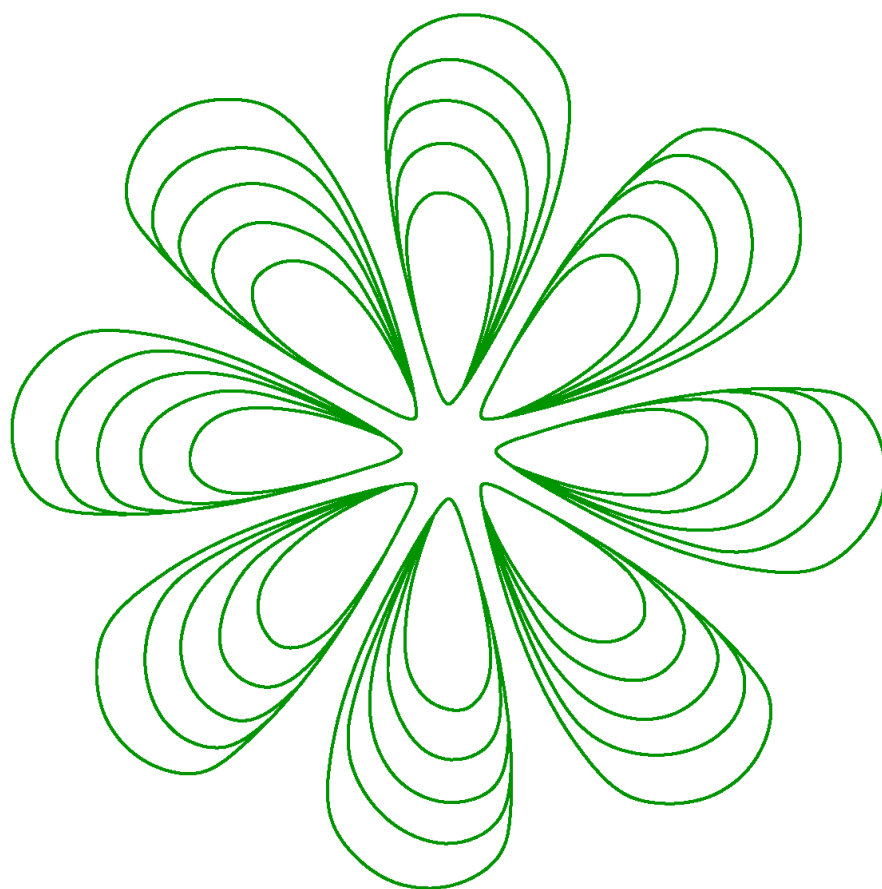
Gráfico 4-4: Representación gráfica de las proporciones de los distintos componentes de los morteros de cal.....	129
Gráfico 4-5: Representación gráfica de la relación agua/cal en masa	129
Gráfico 4-6: Representación gráfica de la relación pasta (cal + agua)/arena en volumen aparente de partícula	129
Gráfico 4-7: Granulometría de las partículas sólidas componentes del mortero MB100.	130
Gráfico 4-8: Representación gráfica de las proporciones de los distintos componentes de los morteros de barro	132
Gráfico 4-9: Representación gráfica de la relación agua/sólido(arcilla caolínica + caolín + arena) en masa	132
Gráfico 4-10: Condiciones higrotérmicas ambientales desde el 13-2 al 14-5.....	135
Gráfico 6-1: Consistencia de los morteros de cemento para los distintos ratios de sustitución.....	147
Gráfico 6-2: Consistencia de los morteros de cal para las distintas ratios de sustitución	147
Gráfico 6-3: Consistencia de los morteros de barro para las distintas ratios de sustitución	147
Gráfico 6-4: Variación de la consistencia de los morteros de cemento, cal y barro, para las distintas ratios de sustitución	148
Gráfico 6-5: Densidad en estado fresco de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.....	149
Gráfico 6-6: Variación de la densidad en fresco de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	149
Gráfico 6-7: Contenido en aire de los morteros de cemento, para las distintas ratios de sustitución.....	150
Gráfico 6-8: Contenido en aire de los morteros de cal y barro para las distintos ratios de sustitución.....	150
Gráfico 6-9: Variación del contenido en aire de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	150
Gráfico 6-10: Densidad en estado endurecido de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución	151
Gráfico 6-11: Variación de la densidad en estado endurecido de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	151
Gráfico 6-12: Resistencia a flexión de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución a 2, 7 y 28 días.	152
Gráfico 6-13: Variación de la resistencia a flexión de los morteros de cemento para cada ratio de sustitución en cada una de las edades ensayadas	152
Gráfico 6-14: Resistencia a flexión a los 28 días de los morteros de cal y barro para las distintas ratios de sustitución.....	153
Gráfico 6-15: Variación de la resistencia a flexión a los 28 días de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.	153
Gráfico 6-16: Resistencia a compresión de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución a 2, 7 y 28 días.	154

Gráfico 6-17: Variación de la resistencia a compresión de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución a 2, 7 y 28 días.....	154
Gráfico 6-18: Resistencia a compresión de los morteros de cal y barro para las distintas ratios de sustitución	155
Gráfico 6-19: Variación de la resistencia a compresión de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.....	155
Gráfico 6-20: Contenido en materia orgánica de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.....	156
Gráfico 6-21: Pérdida de peso de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución.....	157
Gráfico 6-22: Variación de la pérdida de peso máxima de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución.....	157
Gráfico 6-23: Densidad en seco de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución.....	158
Gráfico 6-24: Variación de la densidad en seco de los morteros de cemento	158
Gráfico 6-25: Coeficiente de capilaridad de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución	159
Gráfico 6-26: Variación del coeficiente de capilaridad de los morteros de cemento	159
Gráfico 6-27: Conductividad térmica de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución.....	160
Gráfico 6-28: Variación de la conductividad térmica de los morteros de cemento	160

Índice de esquemas

Esquema 2-1: Normas relacionadas con la sostenibilidad de los edificios (UNE-EN 15643-1).....	39
Esquema 2-2: Concepto de evaluación de la sostenibilidad de los edificios (UNE-EN 15643-1).....	39
Esquema 2-3: Principios de la Bioconstrucción (13).....	41
Esquema 2-4: Contraposición entre la interacción con el entorno de una casa sana y otra enferma (12)	41
Esquema 2-5: Algunos de los parámetros cuantificables en algunas de las etapas del ciclo de vida de un producto de construcción (UNE-EN 15804)	43
Esquema 2-6: Agrupación de las etapas del ciclo de vida de un edificio (UNE-EN 15804)	44
Esquema 2-7: Ejemplo de clasificación de los revestimientos continuos convencionales (21).	46
Esquema 2-8: Proceso de producción del cemento.....	48
Esquema 2-9: Clasificaciones de las cales de construcción (UNE-EN 459-1)	51
Esquema 2-10: Ciclo de la cal aérea, desde la obtención de la cal viva hasta su endurecimiento por carbonatación	52
Esquema 2-11: Distribución geográfica de las bateas para cultivo de mejillón en España y en Galicia (55).	63
Esquema 2-12: Esquema de acuicultura en las rías gallegas del <i>Mytilus Galloprovincialis</i> (56)	64
Esquema 3-1: Proceso de obtención de las distintas clases de material. *El tratamiento térmico aplicado es el exigido según normativa sanitaria para poder ser destinado a pienso avícola.	103
Esquema 4-1: Proceso de obtención del volumen de partícula de cada material para la amasada de α litros de volumen de partícula, partiendo de la dosificación en volumen aparente de conjunto.....	122
Esquema 4-2: Proceso seguido para obtener la dosificación de partida.....	123
Esquema 4-3: Proceso seguido para obtener la dosificación final.....	123
Esquema 4-4: Proceso de amasado de los morteros de cemento, cal y barro	133
Esquema 10-1: Proceso de obtención del grado de impermeabilidad mínimo exigido al cerramiento.	188

1 Introducción y objetivos generales



1 Introducción y objetivos generales

El sector de la construcción contribuye en gran medida al deterioro del medio ambiente y genera importantes problemas y desequilibrios socioeconómicos a escala mundial. En el año 2005 la construcción absorbía en la Unión Europea el 40% de los materiales, generaba el 40% de los residuos y consumía el 40% de la energía primaria (1). Tras la etapa de crecimiento económico y el inicio de la recesión en el sector de la construcción se toma conciencia del notable impacto ambiental que generan los residuos de construcción y demolición, así como la importancia de la eficiencia energética y la administración responsable de los recursos, líneas de actuación fomentadas desde la Unión Europea dentro del programa Horizonte 2020.

Sin embargo, otros aspectos relacionados directamente con los materiales de construcción, como los efectos adversos que pueden provocar sobre la salud de las personas o los impactos que generan a lo largo de todo su ciclo de vida, no se han potenciado en la misma medida. Los edificios de hoy en día deben cumplir normativas que persiguen objetivos parciales sobre sostenibilidad, como puede ser la eficiencia energética, pero que no regulan la utilización de materiales que, por ejemplo, hayan sido transportados desde lugares lejanos o fabricados en condiciones de explotación laboral de los trabajadores en industrias altamente contaminantes.

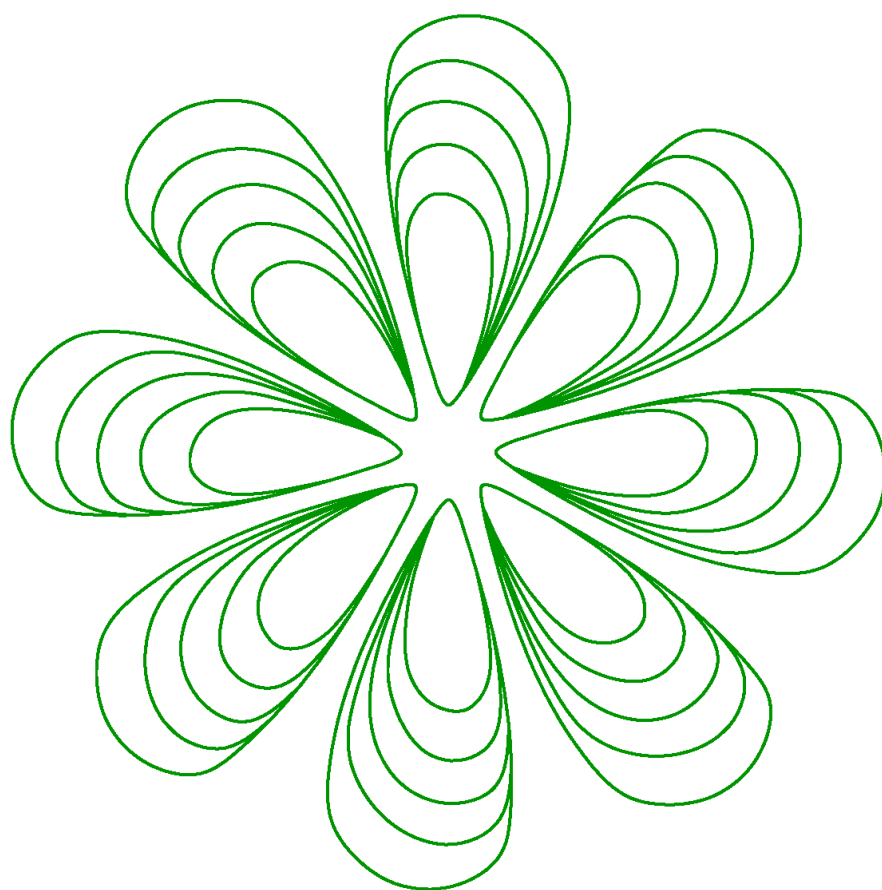
Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación “Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción (BIOVALVO)” financiado por el Programa FEDER ININTERCONECTA y desarrollado por la Universidade da Coruña en colaboración con distintas empresas del sector de la construcción. Dicho proyecto nace con la finalidad de estudiar los usos y aplicaciones de áridos procedentes de residuo de concha de mejillón en el sector de la construcción y la edificación. Entre las líneas de estudio se plantea el uso de la concha de mejillón en morteros y hormigones para cimentaciones, revocos y elementos prefabricados entre otros; materiales granulares para capas de firme ligado y no ligado, rellenos de muros, aislamientos acústicos y térmicos, zanjas drenantes e incluso posibles aplicaciones para cubiertas.

El Trabajo Final de Grado (TFG) que se presenta en este documento, se centra en el estudio de morteros de revestimiento fabricados con arena procedente de concha de mejillón combinada con tres ligantes diferentes: cemento, cal y barro.

El principal interés de este estudio radica en la posibilidad de valorizar un residuo generado en uno de los sectores industriales estratégicos de la comunidad gallega, de forma que se reduzca, a su vez, el impacto ambiental y socioeconómico que provoca la explotación de la arena natural.



2 Estado de la cuestión



2 Estado de la cuestión

2.1 Bioconstrucción

Bioconstrucción, construcción sostenible, construcción ecológica, arquitectura bioclimática, casa pasiva, construcción tradicional, eficiencia energética... son múltiples los términos utilizados hoy en día para hacer referencia a conceptos ciertamente relacionados, pero cuyo significado a veces se adapta de manera interesada a la necesidad de justificación de quien los utiliza. A continuación se recogen algunas de las definiciones sobre estos conceptos:

Eficiencia energética:

La Eficiencia Energética consiste en la reducción de consumo de energía, manteniendo los mismos servicios energéticos, sin disminuir el servicio, el confort ni la calidad de vida, asegurando el abastecimiento, protegiendo el medio ambiente y fomentando la sostenibilidad. (2)

Casa pasiva:

Es un estándar de construcción que combina un elevado confort interior, en invierno y en verano, con un consumo de energía muy bajo, a un precio asequible. Se logra cuidando al máximo su envolvente mediante grandes aislamientos, carpinterías y vidrios de altas prestaciones, y un sistema de ventilación controlada. (3)

Arquitectura bioclimática:

Arquitectura diseñada sabiamente para lograr un máximo confort dentro del edificio con el mínimo gasto energético. Para ello aprovecha las condiciones climáticas de su entorno, transformando los elementos climáticos externos en confort interno gracias a un diseño inteligente. Si en algunas épocas del año fuese necesario un aporte energético extra, se recurriría si fuese posible a las fuentes de energía renovables. (4)

Construcción Sostenible:

Se puede definir como aquella que teniendo especial respeto y compromiso con el medio ambiente, implica el uso eficiente de la energía y del agua, los recursos y materiales no perjudiciales para el medioambiente, resulta más saludable y se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales. (5)

Cabe destacar la importancia del estudio de la aplicación de las energías renovables en la construcción de los edificios, así como una especial atención al impacto ambiental que ocasiona la aplicación de determinados materiales de construcción y la minimización del consumo de energía que implica la utilización de los edificios [Casado, 1996] (6)

Se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales causados por los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios y por el ambiente urbanizado [Lanting, 1996] (6)

Abarca, no sólo a los edificios propiamente dichos, sino que también debe tener en cuenta su entorno y la manera como se comportan para formar las ciudades. El desarrollo urbano sostenible será el encargado de crear un entorno urbano que no atente contra el medio ambiente, con recursos, no sólo en cuanto a las formas y la eficiencia energética, sino también en su función, como un lugar para vivir [WWF, 1993] (6).

Deberá entenderse como el desarrollo de la construcción tradicional, pero con una responsabilidad considerable con el medio ambiente por todas las partes y participantes. Ello implica un interés creciente en todas las etapas de la

construcción, considerando las diferentes alternativas en el proceso, en favor de la minimización del agotamiento de los recursos, previniendo la degradación ambiental y proporcionando un ambiente saludable, tanto en el interior de los edificios como en su entorno [Kibert, 1994]. (6).

Tiene como prioridad el uso de materiales de bajo impacto ambiental y de bajo consumo energético en cualquier fase de su fabricación, uso o reciclaje. (7)

Construcción que se adapta al entorno y lo respeta, que ahorra recursos y energía y cuenta con los usuarios. (1).

Bioconstrucción:

Trata de relacionar de un modo armónico las aplicaciones tecnológicas, los aspectos funcionales y estéticos, y la vinculación con el entorno natural o urbano de la vivienda con el objetivo de lograr hábitats que respondan a las necesidades humanas en condiciones saludables, sostenibles e integradoras. (8)

Diseña y construye con respeto a la Naturaleza y al factor salud de las personas que van a desarrollar su vida en esas construcciones. Se trata, también, de algo más que instalaciones solares o renovables o de una gestión natural del agua, pues engloba toda una serie de enseñanzas que permite al hombre ocupar y habitar un espacio dentro de una construcción y estar en consonancia con el propio entorno y con los seres que la van a ocupar: Bio(Vida)-Construcción no es más que Construcción para la Vida. (9)

Es construir con materiales naturales, con materiales del lugar, con los conocimientos de la gente y muy importante con el clima y la topografía, con la situación local. Hay que pensar primero, analizar, antes que diseñar. [Gernot Minke] (10)

Parte de una arquitectura concebida desde la salud, tanto para los usuarios como para el medio ambiente, buscando el equilibrio de las energías naturales, aplicando tan solo materiales biocompatibles y controlando las emisiones energéticas que actualmente generan los equipos y electrodomésticos de la vivienda. (7).

Forma de construir respetuosa con la salud: la salud de las personas, la salud del entorno y la salud del planeta. (11)

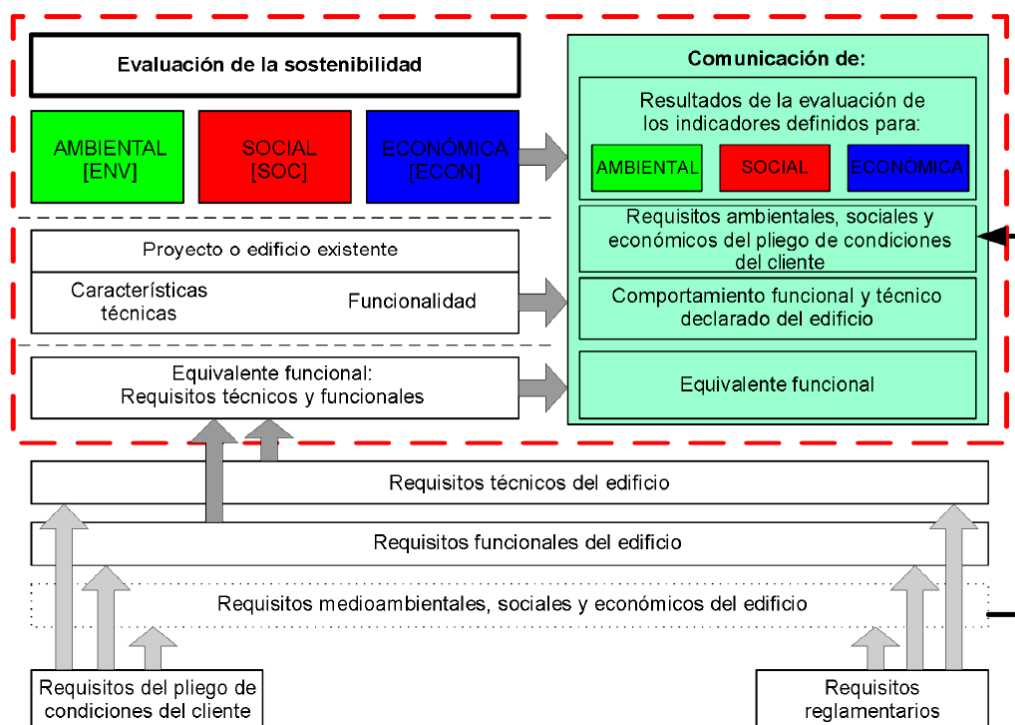
El término bioconstrucción no aparece en las normativas vigentes sobre edificación, pero sí el de construcción sostenible. Existen distintas normas referentes al estudio de la sostenibilidad en los edificios, desde los puntos de vista económico, social y medioambiental. En el Esquema 2-1 se recogen algunas de estas normas y se representa su interrelación. En el Esquema 2-2 se muestra la relación existente entre el proceso de diseño del edificio y su evaluación en términos de sostenibilidad.



Nivel conceptual	Requisitos del usuario y reglamentarios				
	Comportamiento integrado del edificio				
	Comportamiento ambiental	Comportamiento social	Comportamiento económico	Comportamiento técnico	Comportamiento funcional
Nivel marco	EN 15643-1 Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Marco general			Características técnicas	Funcionalidad
	prEN 15643-2 Marco para el comportamiento ambiental	prEN 15643-3 Marco para el comportamiento social	prEN 15643-4 Marco para el comportamiento económico		
Nivel de edificio	prEN 15978 Evaluación del comportamiento ambiental WI 00350003 Uso de las DAP	WI 00350015 Evaluación del comportamiento social	WI 00350017 Evaluación del comportamiento económico		
Nivel de producto	prEN 15804 Declaraciones ambientales de producto (DAP) prEN 15942 Formato de comunicación negocio a negocio CEN/TR 15941	(véase la nota siguiente)	(véase la nota siguiente)		

NOTA Actualmente, la información técnica relacionada con algunos aspectos del comportamiento social y económico se incluyen en las disposiciones del proyecto de Norma prEN 15804 para formar parte de las DAP.

Esquema 2-1: Normas relacionadas con la sostenibilidad de los edificios (UNE-EN 15643-1)



Esquema 2-2: Concepto de evaluación de la sostenibilidad de los edificios (UNE-EN 15643-1)

Estado de la cuestión

Con las definiciones expuestas anteriormente y otras muchas que se pueden encontrar en diversas publicaciones, resulta difícil determinar cuál de ellas vale más o cuál es la buena, la que mejor se ajusta al concepto de bioconstrucción. En cualquier caso, este término responde a la forma de construir integral, por lo que no debe confundirse nunca con conceptos parciales como eficiencia energética o casa pasiva. En el presente trabajo se referirá a esta realidad con el término bioconstrucción, adaptación del término alemán “baubiologie”, que según el Institut für Baubiologie (fundado en 1976 en Baviera, Alemania) se aplica a toda actividad constructiva que cumple las siguientes reglas (12):

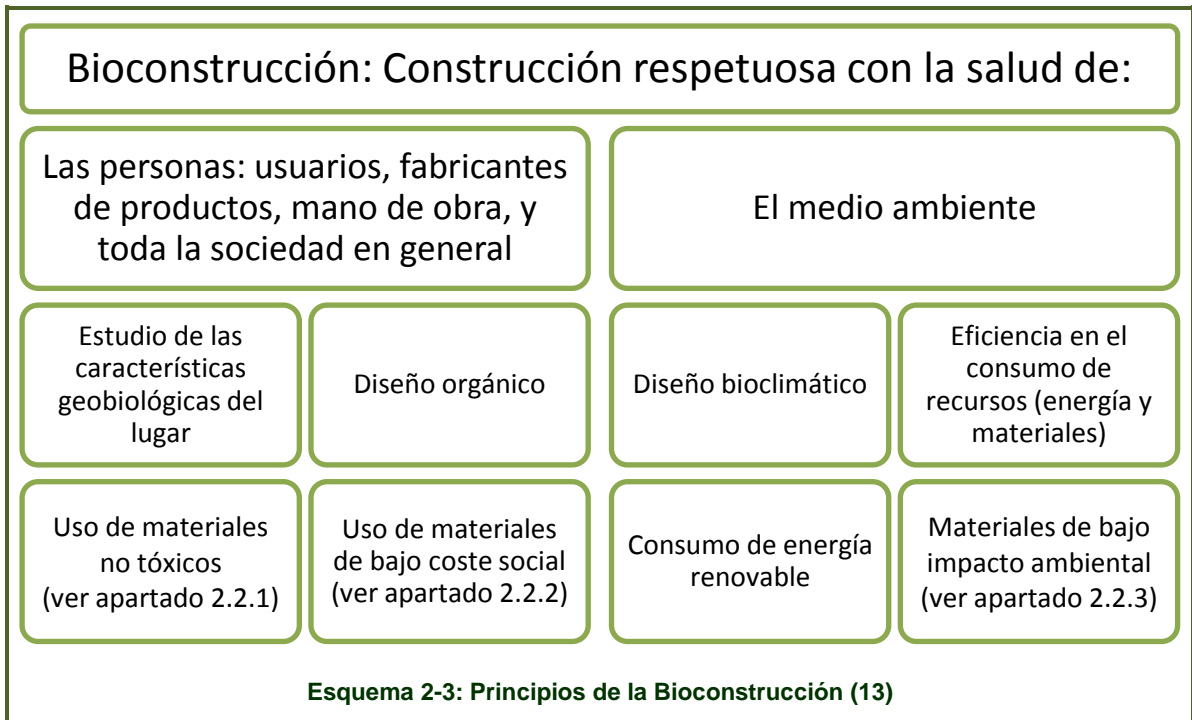
- Materiales naturales, no adulterados, inodoros o de olor agradable que no emitan sustancias tóxicas y de baja radioactividad.
- Protección acústica y antivibratoria orientada a las personas.
- Regulación natural de la humedad atmosférica interior mediante el uso de materiales higroscópicos.
- Minimización y disipación rápida de la humedad de la obra nueva.
- Proporción equilibrada de aislamiento térmico y acumulación de calor.
- Temperaturas óptimas de las superficies y del aire ambiente.
- Buena calidad del aire ambiente gracias a una renovación natural.
- Calor radiante para la calefacción.
- Alteración mínima del entorno de radiación natural.
- Ausencia de campos electromagnéticos y ondas de radio en expansión.
- Reducción de la presencia de hongos, bacterias, polvo y alérgenos.
- Minimización del consumo de energía aprovechando al máximo fuentes de energía renovables
- Materiales de construcción procedentes, preferiblemente, de la región y que no favorezcan la explotación abusiva de materias primas escasas o peligrosas.
- Prevención de problemas para el medio ambiente.
- Calidad óptima posible del agua potable.
- Respeto de dimensiones, proporciones y formas armoniosas.
- Condiciones naturales de luz, alumbrado y colorido.
- Aprovechamiento de los conocimientos de fisiología y ergonomía en la decoración y el equipamiento del espacio interior.
- Ausencia de perturbaciones naturales y artificiales en la obra.
- Viviendas alejadas de fuentes de emisiones contaminantes y ruidos.
- Método de construcción descentralizado y flexible en urbanizaciones ajardinadas.
- Vivienda y entorno residencial individual, muy relacionados con la naturaleza, digno y compatible con la vida.



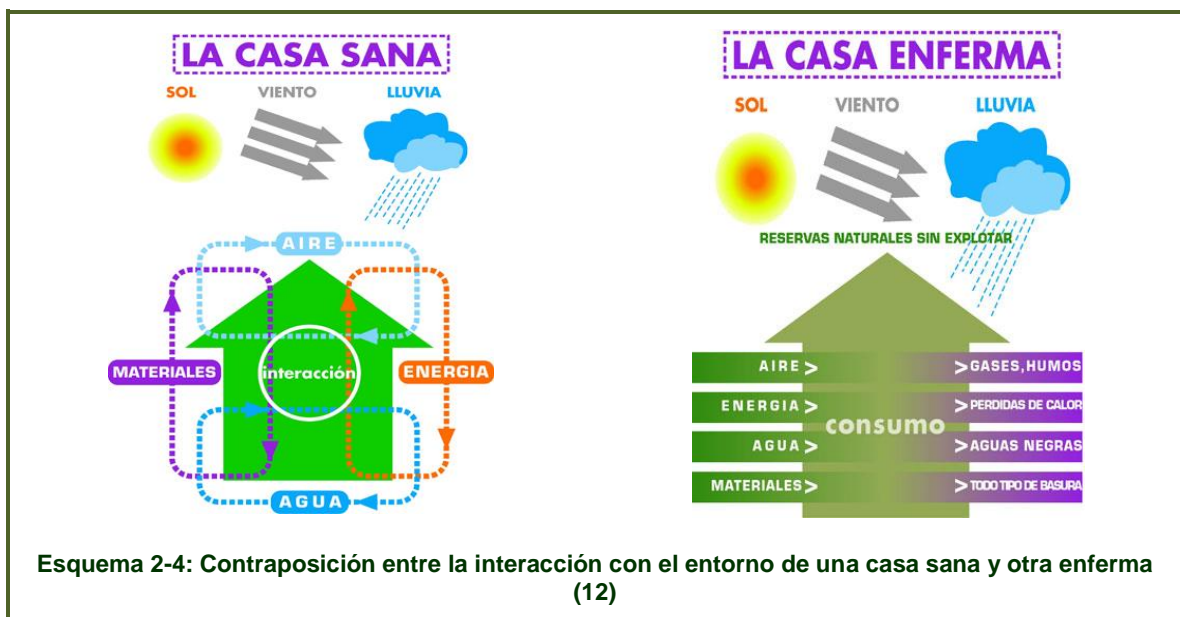
Imagen 2-1: Portada del blog <http://abioclimatica.blogspot.com.es/> (4)



Estas reglas pueden agruparse según el Esquema 2-3:



La contraposición entre una casa producto de un proceso de bioconstrucción (casa sana) y aquella que no sigue ninguno de sus parámetros (casa enferma) puede visualizarse en el Esquema 2-4:



Evidentemente, existirán infinitos estados intermedios entre la casa sana y la enferma, y en la mayoría de los casos resultará imposible llegar a cumplir el total de los requisitos de manera absoluta. Sin embargo, no hay que minusvalorar todo esfuerzo tendente a mejorar cualquier proyecto en términos de bioconstrucción, ya que cualquier paso que pueda darse estará contribuyendo en cierta medida a la salud de las personas y el medio ambiente. Con el objetivo de poner en valor el esfuerzo de aquéllos que apuestan por la construcción sostenible, existen diversos sistemas de certificación como LEED,

Verde, Minergie o BREEAM. En el apartado 7 de este documento se establece la relación entre el presente trabajo y el sistema de certificación BREEAM.

2.2 Materiales para bioconstrucción:

Los materiales para bioconstrucción deben, en consonancia con los principios expuestos, cumplir una serie de condiciones que se exponen a continuación.

2.2.1 Ausencia de toxicidad

Una sustancia tóxica es aquella que, por inhalación, ingestión o penetración cutánea en pequeñas cantidades puede provocar efectos agudos o crónicos e incluso la muerte. Algunos materiales de construcción convencionales contienen sustancias tóxicas como compuestos orgánicos volátiles (COVs), compuestos orgánicos persistentes (COPs), metales como el manganeso, el plomo o el mercurio, y otros materiales particulados como el amianto. La bioconstrucción defiende la erradicación del uso de estos materiales y propone alternativas carentes de sustancias tóxicas (14).

El Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales publicó en 1999 una lista que recoge las sustancias nocivas presentes en algunos materiales de construcción y advierte que “en general, los efectos sobre la salud por exposición a COVs emitidos por los materiales presentes en un edificio no son bien conocidos pero se sabe o se sospecha que muchos son irritantes y carcinógenos” (15). La presencia en un edificio de una cierta concentración de COVs puede derivar en el conocido como síndrome del edificio enfermo (SEE). El mismo ministerio explica que un edificio enfermo es aquel en cuyos “ocupantes presentan quejas referentes a su salud en una proporción mayor a la que sería razonable esperar (>20%)”, y que el “síndrome del edificio enfermo es el nombre que se da al conjunto de síntomas diversos que presentan, predominantemente, los individuos en estos edificios y que no van en general acompañados de ninguna lesión orgánica o signo físico, diagnosticándose, a menudo, por exclusión” (16).

Un ejemplo de material convencional con alto contenido en COVs son las pinturas (Imagen 2-2). Muchas contienen formaldehído o benceno, sustancias tóxicas que pueden causar múltiples problemas sobre la salud de las personas como alergias, lesiones en el sistema nervioso, problemas de riñón...



Imagen 2-2: La mayoría de pinturas convencionales contienen COVs.

2.2.2 Bajo coste social

El coste social de un material se refiere a los perjuicios que pueden sufrir los trabajadores que los fabrican o los pobladores de los lugares de los cuales se extraen, al no aplicarse en muchos territorios políticas efectivas contra las condiciones laborales abusivas o contra la destrucción de los medios de vida tradicionales. Un material de bajo coste social será aquel que se produzca en condiciones de trabajo dignas, siempre respetando los derechos humanos, y cuando el beneficio obtenido de la explotación de los recursos repercuta significativamente sobre la economía de la comunidad social productora y no solamente sobre las empresas gestoras. La norma que sienta las bases para para la evaluación del impacto social de los edificios y por lo tanto de sus materiales es la UNE-EN 15643-3 (17).

2.2.3 Bajo impacto ambiental

El impacto ambiental de un material puede medirse a partir de un análisis de ciclo de vida (ACV), conocido como el conjunto de “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final”. El análisis de este ciclo supone la “recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un producto durante su vida útil”. El Esquema 2-6 recoge las etapas del ciclo de vida susceptibles de ser analizadas en el ACV de un producto de construcción (pueden no analizarse todas, en función del tipo de declaración ambiental de producto que se pretenda realizar). Para cada una de las etapas evaluadas se cuantifican varios parámetros, entre los cuales figuran los recogidos en el Esquema 2-5, a modo de ejemplo. La norma que sienta las bases para la evaluación ambiental de los edificios es la UNE-EN 15643-2 (18), y la que explica las etapas de ciclo de vida y sus impactos a analizar para los materiales de construcción es la UNE-EN 15804 (19).





Esquema 2-6: Agrupación de las etapas del ciclo de vida de un edificio (UNE-EN 15804)

2.2.4 Ejemplos de materiales para bioconstrucción

En la Tabla 2-1 se expone una relación de ejemplos, en absoluto exhaustiva, de materiales de bioconstrucción agrupados según el elemento constructivo del que podrían formar parte. Son en definitiva materiales no tóxicos, de bajo impacto social y ambiental.

Elemento constructivo	Material de bioconstrucción
Estructura	Madera
Muro	Balas de paja, tapial, bloque de tierra comprimido
Aislamiento	Corcho, cáñamo, algodón, lana
Instalaciones	Polipropileno
Revestimiento	Morteros de cal o barro (ver apartado 2.3)

Tabla 2-1: Algunos ejemplos de materiales para bioconstrucción



2.3 Morteros de revestimiento en bioconstrucción

2.3.1 Introducción

Un mortero de revestimiento apto para bioconstrucción debe cumplir con una serie de características detalladas en apartados anteriores, tener un bajo impacto ambiental y social, así como estar exento de sustancias tóxicas. Para ello se evalúan las propiedades de los diferentes ligantes a emplear, cemento por su uso en morteros

convencionales y cal y barro como alternativas para bioconstrucción. Se tiene en cuenta además, la problemática de los áridos naturales y la alternativa de áridos secundarios.

2.3.2 Morteros de revestimiento

Los revestimientos se aplican sobre paramentos verticales u horizontales, interiores o exteriores, realizados sobre un soporte adecuado con morteros o productos pastosos adherentes extendidos en fresco, que fraguan y se solidifican para formar una capa sólida de espesor homogéneo (21).

Los revestimientos continuos convencionales pueden clasificarse según el Esquema 2-7, aunque existen otras formas de clasificación alternativas y diferentes nomenclaturas. Es destacable que no suelen incluirse en este tipo de clasificaciones los revestimientos de barro, muy acordes con los principios de la bioconstrucción.



La norma UNE-EN 998-1 (22) dice cuáles deben ser las propiedades que definan un mortero para revestimiento y establece una clasificación de los mismos según sus propiedades y/o utilización como se recoge en la Tabla 2-2. Esta norma solamente es de aplicación para los morteros cuyo ligante sea cemento y/o cal.

GP	LW	CR	OC	R	T
Uso corriente	Ligero	Coloreado	Monocapa	Para renovación	Para aislamiento térmico

Tabla 2-2: Clasificación de los morteros de revestimiento según norma UNE-EN 998-1 en función de sus propiedades y/o su utilización (22).

Las propiedades exigibles a un mortero de revestimiento endurecido se recogen en la Tabla 2-3. Algunas de estas propiedades sirven para clasificar los morteros según se indica en la **Tabla 2-4**. Se detallan además, las propiedades que la misma norma UNE-EN 998-1 establece que deben declararse para los morteros de revestimiento en estado fresco (Tabla 2-5).

No.	Parámetro para ensayo	Método de ensayo	GP	LW	CR	OC	R	T
L1	Densidad en seco aparente (kg/m ³)	EN 1015-10	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados ≤ 1 300 kg/m ³	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados	Intervalo de valores declarados
L2	Resistencia a compresión (categorías)	EN 1015-11 ^a	CS I a CS IV	CS I a CS III	CS I a CS IV	CS I a CS IV	CS II	CS I a CS II
L3	Adhesión (N/mm ² y forma de rotura (FP) A, B o C)	EN 1015-12	≥ que el valor declarado y forma de rotura (FP)	≥ que el valor declarado y forma de rotura (FP)	≥ que el valor declarado y forma de rotura (FP)	–	≥ que el valor declarado y forma de rotura (FP)	≥ que el valor declarado y forma de rotura (FP)
L4	Adhesión después de ciclos climáticos de acondicionamiento (N/mm ² y forma de rotura (FP) A, B o C)	EN 1015-21	–	–	–	valor declarado y forma de rotura (FP)	–	–
L5	Absorción de agua por capilaridad (categorías) (para los morteros destinados a ser utilizados en elementos exteriores)	EN 1015-18	W 0 a W 2	W 0 a W 2	W 0 a W 2	W 1 a W 2	≥ 0,3 kg/m ² después de 24 h	W 1
L6	Penetración de agua después del ensayo de absorción de agua por capilaridad (en mm)	EN 1015-18	–	–	–	–	≤ 5 mm	–
L7	Permeabilidad al agua sobre soportes relevantes después de ciclos climáticos de acondicionamiento (ml/cm ² después de 48 h)	EN 1015-21	–	–	–	≤ 1 ml/cm ² después de 48 h	–	–
L8	Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua (μ) (para los morteros destinados a ser utilizadas en el exterior)	EN 1015-19 ^{a, b}	≤ que el valor declarado	≤ que el valor declarado	≤ que el valor declarado	≤ que el valor declarado	≤ 15	≤ 15
L9	Conductividad térmica $\lambda_{10, seco, mat}$ (W/m·K) ^c (para los morteros destinados a estar sometidos a requisitos térmicos)	EN 1745:2002 Tabla A.12	Valor medio tabulado (P = 50 %)	Valor medio tabulado (P = 50 %)	Valor medio tabulado (P = 50 %)	Valor medio tabulado (P = 50 %)	Valor medio tabulado (P = 50 %)	–
L10		EN 1745:2002 4.2.2	–	–	–	–	–	T 1: ≤ 0,10 T 2: ≤ 0,20
L11	Reacción al fuego (clase)	EN 13501-1	Declaración de 5.2.2					
L12	Durabilidad	–	Declaración de 5.2.3					

Tabla 2-3: Resumen de requisitos para los morteros endurecidos (UNE-EN 998-1) (22). GP=Uso corriente, LW=Ligero, CR=Coloreado, OC=Monocapa, R=Para renovación, T=Para aislamiento térmico.

Propiedades	Categorías	Valores
Intervalo de resistencia a compresión a 28 días	CS I CS II CS III CS IV	0,4 N/mm ² a 2,5 N/mm ² 1,5 N/mm ² a 5,0 N/mm ² 3,5 N/mm ² a 7,5 N/mm ² ≥ 6 N/mm ²
Absorción de agua por capilaridad	W 0 W 1 W 2	no especificado $c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ $c \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Conductividad térmica	T 1 T 2	≤ 0,1 W/m·K ≤ 0,2 W/m·K

Tabla 2-4: Clasificación de las propiedades del mortero endurecido (UNE-EN 998-1) (22)

Parámetro de ensayo	Método de ensayo	Cualquier tipo de mortero de revestimiento
Tiempo de utilización	UNE-EN 1015-9	≥ que el valor declarado
Contenido en aire	UNE-EN 1015-7	≥ que el valor declarado

Tabla 2-5: Resumen de requisitos para los morteros frescos (UNE-EN 998-1) (22)

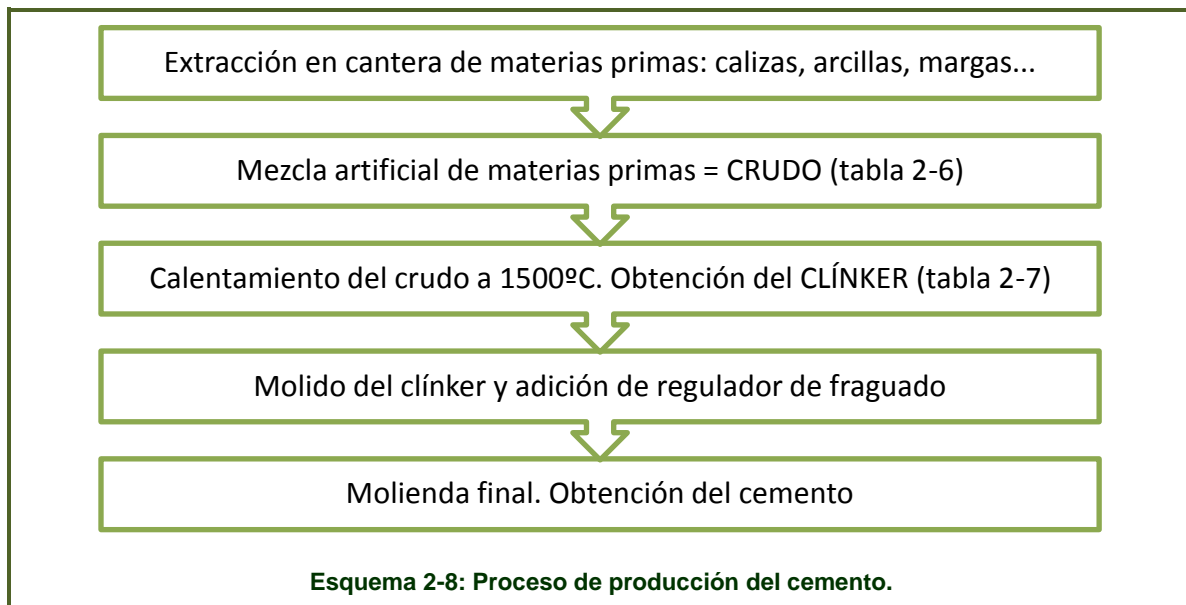
Existen otras propiedades muy importantes para un mortero de revestimiento que esta norma no recoge expresamente. Dos de ellas están directamente relacionadas con su trabajabilidad: la consistencia y la adhesión en fresco. La primera puede ensayarse conforme a la norma UNE-EN 1015-3 (23), mientras que para la segunda, a pesar de su importancia, no existe un procedimiento de ensayo normalizado.

En bioconstrucción se valora especialmente la higroscopicidad de los elementos de acabado, que tampoco aparece recogida en ninguna norma. Esta propiedad se define como la capacidad de los materiales para absorber, almacenar y ceder humedad al ambiente en el que se encuentran. Tiene especial importancia para materiales en contacto con el aire interior del edificio, puesto que contribuyen notablemente a la regulación del nivel de humedad, evitando ambientes demasiado húmedos y posibles condensaciones. Por último, hay que señalar que un mortero de revestimiento contribuye a la mejora del aislamiento acústico del paramento que reviste, puede mejorar las condiciones de acondicionamiento acústico (por ejemplo reduciendo el tiempo de reverberación), y en caso de ejercer la función de acabado, su aspecto estético será una propiedad más a evaluar.

2.3.3 El ligante convencional: el cemento.

El cemento es uno de los materiales de construcción más utilizados en la actualidad, ya que forma parte del hormigón, material con el que se han realizado la amplia mayoría de las estructuras de los edificios del último siglo.

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. Existen tres grandes grupos de cementos: naturales, aluminosos y Portland. De ellos, el que a continuación se trata es el último, por ser el más empleado en construcción. Su invención se produjo en el siglo XIX, por lo que su aplicación en el sector de la construcción, aunque masiva, es relativamente reciente. El proceso de fabricación del cemento se sintetiza en el Esquema 2-8.



Como regulador de fraguado suele utilizarse el sulfato de calcio en forma de yeso (sulfato de calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Conjuntamente pueden añadirse al clinker otras adiciones como escoria de alto horno (S), puzolana natural (P), cenizas volantes

Rodríguez Álvaro, Roberto

silíceas o calcáreas (V,W), humo de sílice (D) etc., y otros componentes minoritarios adicionales.

El proceso de fraguado consiste en la hidratación de los compuestos del cemento, es decir, en la reacción de estos con el agua. Las transformaciones típicas de los silicatos y aluminatos presentes en los cementos se recogen en la Tabla 2-8 (24).

Óxido de cal reactivo (C)	CaO	65%
Dióxido de silicio (S)	SiO ₂	21%
Alúmina (A)	Al ₂ O ₃	6%
Óxido férrico (F)	Fe ₂ O ₃	3%
Otros compuestos no deseables	Ej.: MgO, cloruros.	

Tabla 2-6: Composición del crudo para clínker de cemento Portland (% en masa)

Silicato tricálcico (C ₃ S)	3CaO-SiO ₂	45-70%
Silicato bicálcico (C ₂ S ₂)	2CaO-SiO ₂	20-30%
Aluminato tricálcico (C ₂ A)	3CaO-Al ₂ O ₃	10-15%
Ferrito aluminato tetracálcico (C ₄ AF)	4CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	5-10%

Tabla 2-7: Composición del clínker de cemento Portland (% en masa)

Silicatos	$m\text{SiO}_2 - n\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow c\text{SiO}_2 - d\text{CaO} - y\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2 - x\text{H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2$
Aluminatos	$p\text{Al}_2\text{O}_3 - q\text{CaO} + h\text{H}_2\text{O} \rightarrow n\text{-Al}_2\text{O}_3 - y\text{CaO} - x\text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 - x\text{H}_2\text{O} + \text{Ca(OH)}_2$

Tabla 2-8: Reacciones de hidratación de silicatos y aluminatos en el proceso de fraguado del cemento Portland

En función de las proporciones y componentes que los forman, los cementos Portland se clasifican en cinco tipos: CEM I, II, III, IV y V. El otro parámetro que se utiliza para clasificar y nombrar a los cementos es su resistencia a compresión a 28 días, según la que se agrupan los cementos en tres resistencias: 32.5, 42.5 y 52.5 MPa. También existen otras especificaciones propias de los cementos que de darse deben indicarse en su designación, tales como la capacidad de alcanzar elevadas resistencias iniciales o ser resistentes al ataque de sulfatos (25).

Nomenclatura	Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)	Dosificación en volumen
M-20	2	1:8
M-40	4	1:6
M-80	8	1:4
M160	16	1:3

Tabla 2-9: Correspondencia entre las clases resistentes de la NBE FL-90 (26) y dosificaciones en volumen de morteros de cemento.

Los morteros de cemento se caracterizan por admitir una amplia gama de dosificaciones en comparación con otros ligantes (Tabla 2-9). La relación agua/cemento habitual es 1. Aunque es posible obtener morteros de resistencias muy altas (por ejemplo 15MPa), se debe tener presente que los morteros de revestimiento no suelen requerir resistencias tan elevadas, por lo que esta característica no supone una ventaja frente a otros ligantes para este uso concreto.

El cemento provoca un fuerte impacto ambiental debido a las emisiones de CO₂ que se producen durante su fabricación. De hecho, se estima que es el causante del 5% de las emisiones a nivel mundial (27). Además, sus materias primas (piedra caliza y materiales arcillosos) provienen de recursos no renovables extraídos en cantera. Por otro lado, el cemento es nocivo para los pulmones, es irritante y causa quemaduras en la piel, tanto en polvo como en pasta.



Imagen 2-4: Fábrica de cemento en Toral de los Vados, León. (<http://www.economiadigital.es>)

2.3.4 La cal

La cal ha sido uno de los conglomerantes que el hombre ha utilizado desde la más remota antigüedad por obtenerla a partir de rocas carbonatadas, fundamentalmente calizas y dolomías, muy extendidas en la corteza terrestre (representan un 20% de la misma).

La fabricación y utilización de los morteros de cal fue la práctica común hasta la primera guerra mundial. A partir de entonces, la evolución de los cementos Pórtland con una mayor rapidez de endurecimiento y desarrollo de resistencias mecánicas, llevó a que los morteros a base de cemento desplazaran a los tradicionalmente usados con cal.

Sin embargo, en los últimos años se ha recuperado su uso, sobretodo en procesos constructivos de rehabilitación y restauración de obras monumentales antiguas, debido a las innumerables experiencias en las que se ha aplicado cemento sobre soportes originariamente revestidos con cal y cuyos resultados han sido desastrosos. La cal posee una mayor permeabilidad al vapor de agua que permite la difusión de la humedad contenida en los muros de fábrica tradicionales, al contrario que el cemento, que sella éstos provocando el ascenso de los niveles de humedad hasta dañar las piezas de la fábrica, abombar el propio revestimiento y desconcharlo e incluso perjudicar a otros elementos constructivos, como pueden ser elementos de madera empotrados en el muro (28).



Imagen 2-5: Revestimiento de mortero de cemento sobre fábrica de mampostería
(<https://idearqiberica.wordpress.com/tag/arquitectura-tradicional/>)

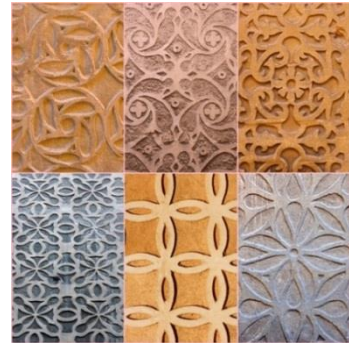
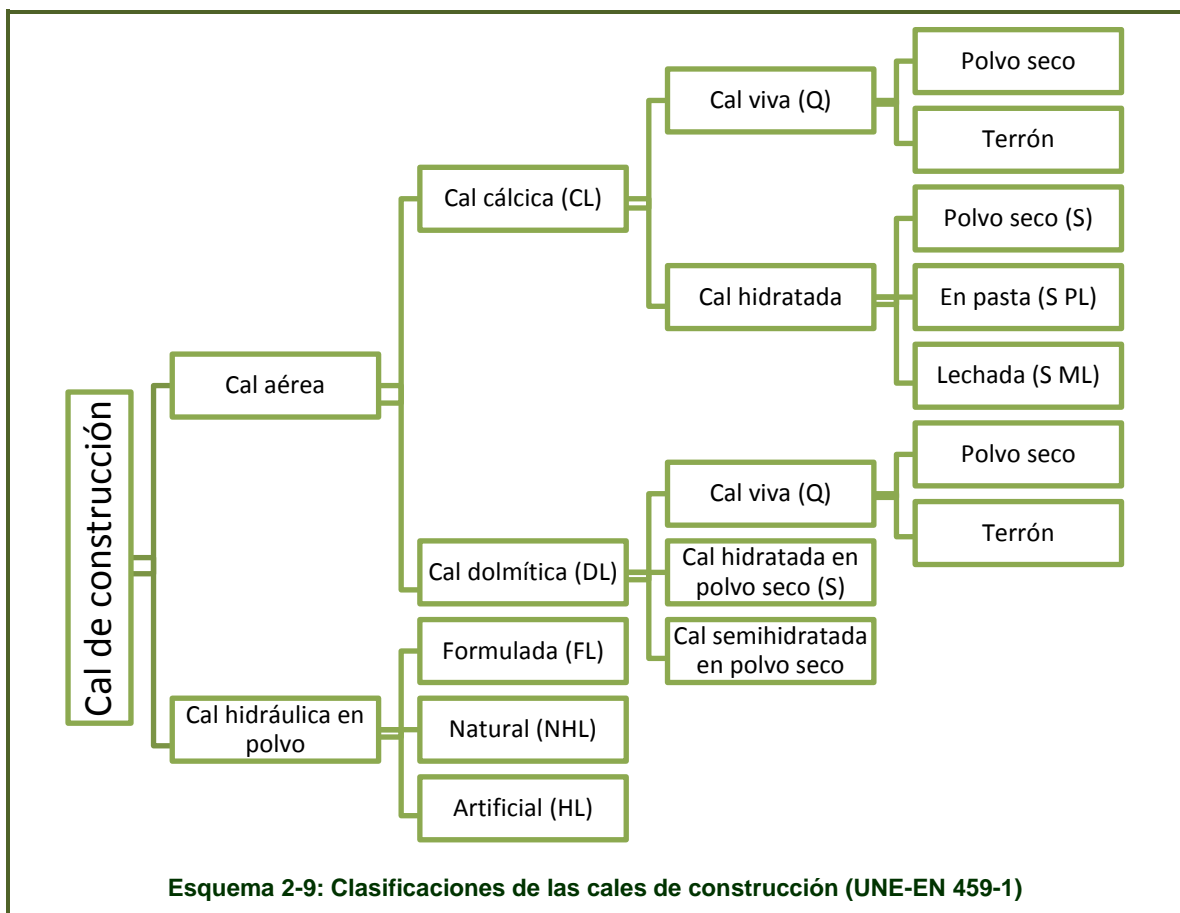


Imagen 2-6: Revestimientos de cal esgrafiados
(<http://pinturaspalomo.blogspot.com.es>)

La cal es un material compuesto por óxido de calcio y/o hidróxido de calcio, y óxido de calcio y magnesio y/o hidróxido de calcio y magnesio, producidos por la descomposición térmica (calcinación) del carbonato de calcio natural (por ejemplo: caliza, creta, conchas) o del carbonato de calcio y magnesio natural (por ejemplo: caliza dolomítica, dolomita). La cal de construcción es un grupo de productos de la cal, consistente exclusivamente en dos familias: cal aérea y cal con propiedades hidráulicas, utilizadas en aplicaciones o materiales de construcción (29). Estas dos familias contienen diversos subtipos de cales, como se recoge en el Esquema 2-9.

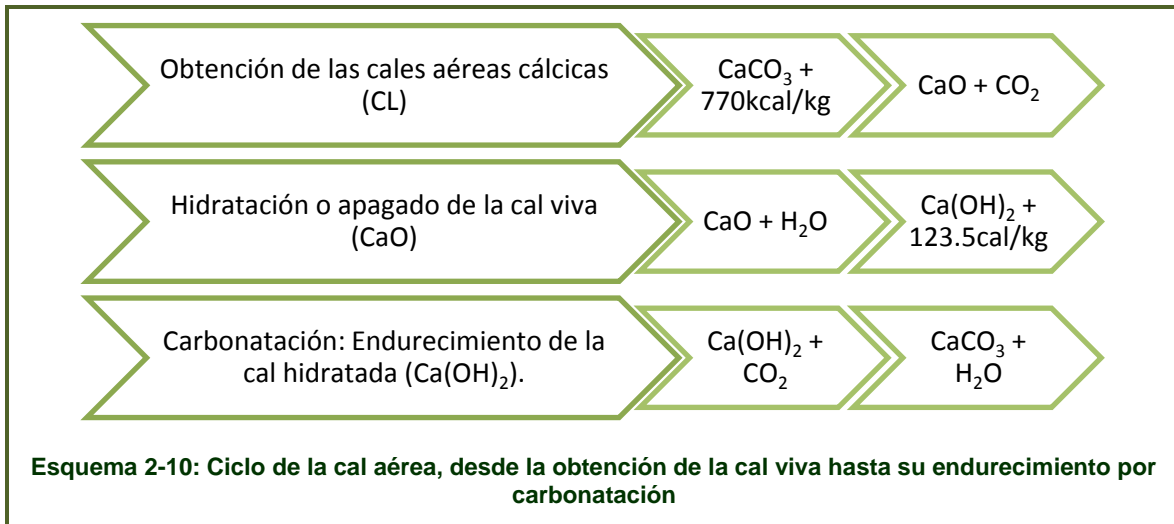


Las más utilizadas en la fabricación de morteros son las cales aéreas cálcicas hidratadas/apagadas que se obtienen de la calcinación a 900°C de rocas calizas puras (con más de un 95% de riqueza en calcio). Este tipo concreto de cales puede clasificarse además de por su forma de presentación (ver Esquema 2-9), por la proporción que representa en su composición química la suma del óxido de calcio (CaO) y el óxido de magnesio (MgO), como se muestra en la Tabla 2-10.

Tipo de cal	CaO+MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal libre
CL 90	≥90	≤5	≤4	≤2	≥80
CL 80	≥80	≤5	≤7	≤2	≥65
CL 70	≥70	≤5	≤12	≤2	≥55

Tabla 2-10: Composición de las cales aéreas cálcicas (% en masa) (UNE-EN 459-1) (29)

Los procesos químicos que tienen lugar desde la obtención de la cal hasta su endurecimiento en el mortero ya aplicado se resumen en el Esquema 2-10.



Como puede observarse, el proceso puede dividirse en tres fases. En la primera entra la energía aportada por la calcinación a 900°C y se libera CO₂ a la atmósfera. En la segunda se añade agua líquida (apagado de la cal), y se libera calor. En la tercera se produce la reacción entre la cal apagada presente en el mortero fresco ya aplicado y el CO₂ de la atmósfera, liberándose a la misma el agua que no ha quedado encerrado en los poros del mortero. Este proceso de carbonatación no puede tener lugar bajo el agua.

Hay que señalar sobre el proceso de apagado que puede realizarse añadiendo únicamente la cantidad de agua necesaria, obteniendo un producto en forma de polvo (Imagen 2-7) o añadiendo agua en abundancia (sumergiendo la cal), obteniendo el producto en forma de pasta (Imagen 2-8). En cualquier caso, el proceso de apagado no es inmediato, por lo que es recomendable que la cal permanezca bajo el agua el mayor tiempo posible (incluso años) para apagar toda la cal viva.

La dosificación recomendada por todas las fuentes bibliográficas consultadas para los morteros elaborados con cal en pasta está entre 1:2 y 1:3 en volumen de conjunto. En relación al agua de amasado apuntan que en principio basta con la que contiene la propia pasta, y sólo excepcionalmente puede añadirse una pequeña cantidad si se considera que el mortero no resulta lo suficientemente fluido. Preferentemente, la

Rodríguez Álvaro, Roberto

consistencia excesiva se compensará con adición de cal o cambiando de arena (30) (31) (32). Cuanto mayor es la proporción de árido frente a la de cal, mayor es la resistencia mecánica y menores la retracción y la consistencia. Además, todas las fuentes coinciden en que el mortero debe aplicarse en capas de distintos espesores, dejando pasar varias semanas entre la aplicación de capas sucesivas para permitir su adecuada carbonatación.



Imagen 2-7: Cal aérea cálcica apagada en polvo
(http://www.barmexinc.com/cal_hidratada.html)



Imagen 2-8: Cal aérea cálcica apagada en pasta
(<http://ecocorum.com/index.php/Cales>)

La calcinación de la piedra para la obtención de cal genera CO_2 , al igual que ocurre con la calcinación del crudo para producir el clínker de cemento Pórtland. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, para el proceso relacionado con el cemento se necesitan temperaturas del entorno de los 1500°C , mientras que para la obtención de la cal es suficiente con 900°C . Además, en el proceso de carbonatación de la cal, ésta absorbe CO_2 de la atmósfera, por lo que compensa en parte las emisiones causadas en su fabricación. Por esta razón puede decirse que la cal es un material medioambientalmente más sostenible que el cemento.

2.3.5 La tierra

La tierra es el primer material que la humanidad utilizó como ligante y, lejos de haber desaparecido, un tercio de la población mundial vive en casas hechas de tierra en la actualidad. Desde las sociedades más prósperas, donde otros materiales se han convertido en los habituales, siempre se ha relacionado el uso de la tierra como material de construcción con países en vías de desarrollo y la escasez de otros recursos.

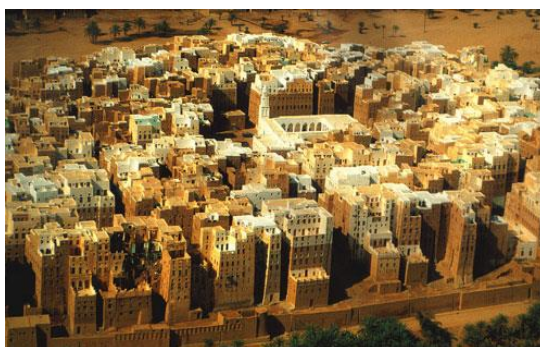


Imagen 2-9: Ciudad de Shibam en Yemen, construcción con tierra
<http://www.viajes.es/asia/yemen/yemen-ciudades-fortaleza-del-altiplano-l3.jpg>



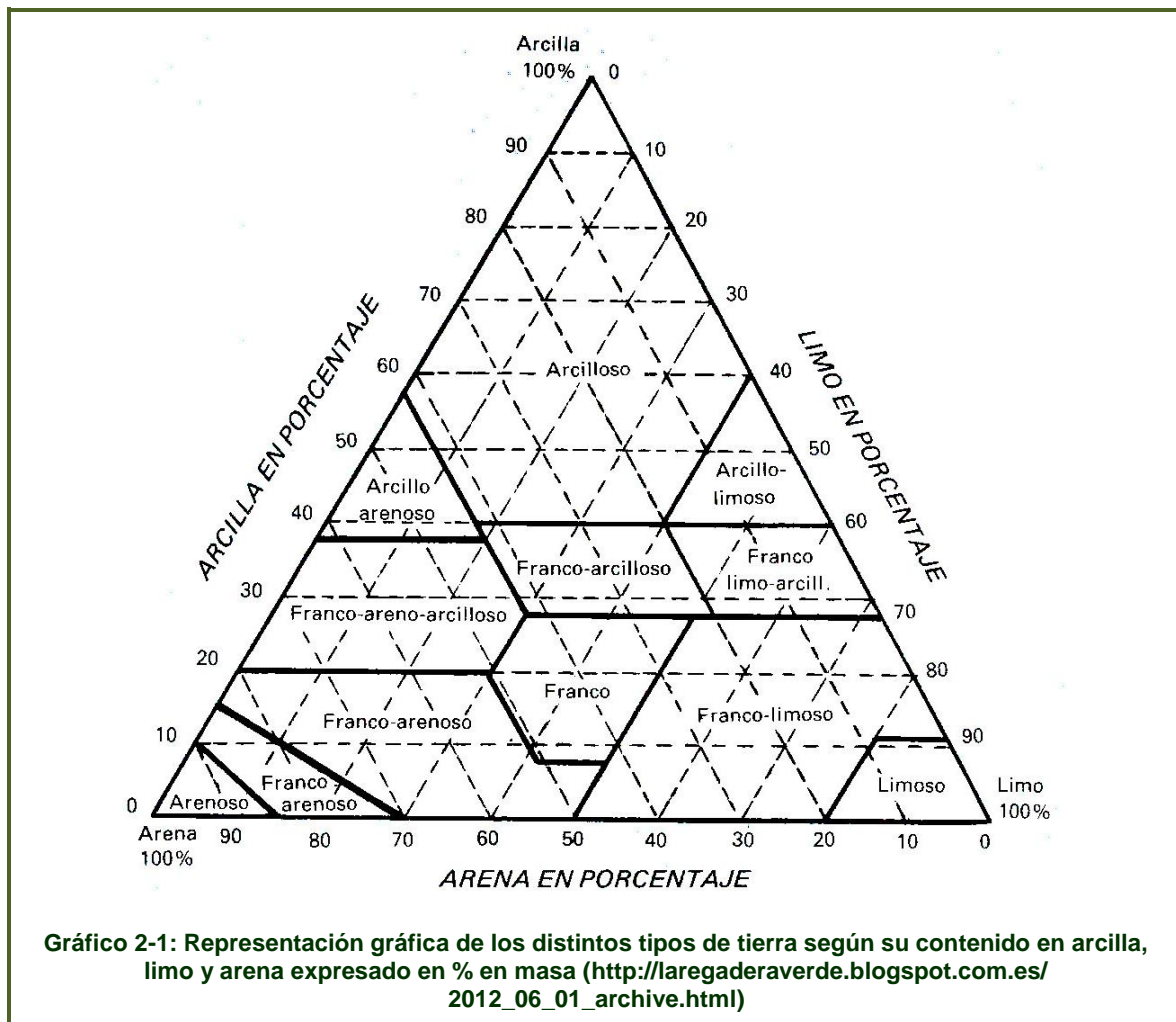
Estado de la cuestión

La tierra puede definirse de manera general como el material desmenuzable que proviene de la erosión de las rocas de la corteza terrestre. Como material de construcción, se atribuye a una mezcla de partículas minerales de distinto tamaño (Tabla 2-11).

	Tamaño de partícula
Arcillas	<2µm
Limos	2µm-60µm
Arenas	60µm-4mm
Gravas y piedras	>4mm

Tabla 2-11: Partículas componentes de la tierra según su tamaño de partícula

Dependiendo de la proporción de cada tamaño de partícula, las tierras utilizadas en construcción pueden clasificarse según el Gráfico 2-1 en arcillosas, limosas o arenosas.



El barro es la masa moldeable que resulta de mezclar tierra con agua. Puesto que es habitual mezclar la tierra con agua para construir, a veces se habla de construcción con barro en lugar de construcción con tierra.

El único material componente de la tierra (o del barro) que posee capacidad aglomerante es la arcilla, es decir, las partículas de tierra con un tamaño de partícula menor a los 2µm. Mineralógicamente, el término arcilla se define como el mineral procedente de la erosión de feldespatos, piroxenos y/o micas, en el que predominan los silicatos de aluminio hidratados. Para evitar la confusión entre ambos conceptos de arcilla, el segundo suele denominarse también como mineral arcilloso. Frecuentemente las tierras contienen minerales arcillosos, pero únicamente sus arcillas, es decir, las partículas con tamaño menor a 2µm, tienen capacidad aglomerante. Los limos y las arenas, independientemente de su composición química, no poseen capacidad aglomerante. No obstante, el poder ligante de las arcillas difiere mucho en función de su composición química, siendo las de mayor poder aglomerante las de minerales arcillosos, y existiendo aún importantes diferencias entre ellos. Algunos de los minerales más comunes y su formulación química se recogen en la Tabla 2-12.

Caolinita	Talco
$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
Dickita	Vermiculita
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	$Mg_{0,7}(Mg, Fe, Al)_6(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4 \cdot 8H_2O$
Nacrita	Sauconita
$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	$Na_{0,3}Zn_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Pirofilita	Nontronita
$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$	$Na_{0,3}(Fe^{3+})_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Saponita	Montmorillonita
$(Ca, Na)_{0,3}(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	$(Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
Illita	
$(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$	

Tabla 2-12: Ejemplos de minerales arcillosos con su correspondiente formulación química (http://es.wikipedia.org/wiki/Minerales_de_la_arcilla)

Puesto que la tierra es un material natural, su composición es infinitamente variable, y de este modo podemos encontrar en ella infinidad de combinaciones de minerales arcillosos y no arcillosos, a los que se añaden varias impurezas que hacen cambiar su aspecto de manera considerable (Imagen 2-10).

En cualquier caso, el poder aglomerante de las arcillas de los minerales arcillosos puede explicarse del modo expuesto a continuación. Las moléculas de aluminato y silicato presentes en los minerales arcillosos tienen forma plana, y se agrupan unas encima de las otras. Esta disposición hace que las moléculas de ambos compuestos friccionen entre ellas generando una carga electrostática. Esta carga atrae al agua, que ocupa el espacio entre ellas. La evaporación continuada del agua, desde la superficie exterior de la masa, hace que los planos sucesivos de partículas de arcilla se vayan aproximando y ocupando el espacio desalojado por las capas de agua. Esto equivale a la formación de

un vacío interior que origina una tensión de contracción. La aproximación de las partículas, su acoplamiento y la orientación de sus planos laminares, aumenta los puntos de contacto con atracciones eléctricas, enlaces por valencias residuales, fuerzas de Van der Waals... que dan lugar a fuerzas aglomerantes débiles y reversibles (24). Consecuencia directa de este efecto es la escasa durabilidad que presentan los materiales cuyo aglomerante es la arcilla, siendo uno de sus principales problemas frente a otros materiales de construcción. Esta escasa durabilidad puede solucionarse en cierta medida con la inclusión en la masa de diferentes aditivos estabilizadores o el recubrimiento con materiales impermeables al agua líquida, pero aun así sólo es recomendable utilizar elementos de tierra en interiores o en posiciones exteriores bien protegidas de la intemperie por otros elementos constructivos. En relación a los revocos (también conocidos como embarrados o trullados), por tanto, se recomienda su uso en interiores, y solamente en exteriores cuando existan zócalos y aleros de cubierta que los protejan adecuadamente de la lluvia. Así mismo pueden recubrirse con enlucidos de otros morteros de mayor durabilidad, como por ejemplo morteros de cal.

A esta escasa durabilidad debe añadirse otro defecto inherente a cualquier tierra, que es la excesiva retracción. La solución tradicional a esto ha sido siempre la adición a la masa de fibras vegetales como paja (Imagen 2-11), aunque se han desarrollado nuevos aditivos artificiales que reducen la retracción al tiempo que aumentan la durabilidad.



Imagen 2-10: Ejemplos de minerales arcillosos con diferentes colores función de su diferente composición química.
(<http://www.mx.all.biz/arcillas-en-polvo-uso-cosmetico-g42571>)



Imagen 2-11: Mortero de barro con paja listo para su aplicación como revoco
(<http://igludecanyes.blogspot.com.es/2011/06/16-pruebas-y-detalles-interior.html>)

El barro que finalmente se coloca ya sea en forma de tapial, bloque comprimido, revoco, o cualquier otro elemento, tiene, por lo tanto, una enorme variabilidad. A la diversidad de tierras, que tanto granulométrica como químicamente pueden ser muy diferentes, hay que sumar los aditivos naturales o artificiales que casi siempre incluirán, y a esto la proporción de agua. En cuanto a este último elemento imprescindible, la proporción utilizada se halla tradicionalmente de manera empírica sumergiendo la tierra en un recipiente con agua y dejándola reposar durante aproximadamente un día. Al pasar este tiempo se decanta el agua del recipiente y se considera que la masa ha absorbido el agua necesaria para alcanzar la consistencia apropiada. Sin embargo algunas fuentes indican que esta masa debe dejarse reposar unos días y añadir de nuevo cierta cantidad de agua en el momento de la aplicación (33).

La manera habitual de dosificar los revocos de barro no es en absoluto comparable con los métodos utilizados para otros ligantes como el cemento o la cal. Antiguamente la tierra utilizada para la construcción provenía del propio lugar, y su uso continuado a lo largo de los años hacía que el conocimiento acerca del comportamiento de aquella tierra fuese generalizado y todos supiesen si era necesario aditarla, rebajarla añadiendo



Rodríguez Álvaro, Roberto

arena o enriquecerla añadiendo arcilla. En la actualidad, debido a la sustitución de los morteros de barro por otros como los de cemento y al abandono de la necesaria labor de mantenimiento que requieren, no existe tal conocimiento ni siquiera en aquellos lugares donde aún puede percibirse un número importante de edificaciones realizadas con tierra. La única manera de recobrar este conocimiento de manera inmediata es estudiando las tierras química y granulométricamente. En este sentido se han realizado estudios en diferentes áreas geográficas como por ejemplo en Galicia (34). Por otro lado, estudiosos de la construcción con tierra han llegado a determinar la proporción de arcilla idónea para algunos elementos constructivos. Así, puede establecerse que para un revoco la proporción de arcilla en masa debe situarse entre un 5 y un 12% y el de paja (de tamaño menor a 4cm) en torno al 10% respecto del total de tierra. Sin embargo estas proporciones son meramente orientativas ya que, como se ha dicho anteriormente, son multitud los factores que pueden variar de una tierra a otra.

Debido a todas estas particularidades de los morteros de barro, que no tienen otros como los de cemento o cal, su estudio mediante ensayos podría diferir del que se les aplica a éstos. La norma UNE-EN 998-1 (22), que recoge los ensayos preceptivos para morteros de revestimiento, no es de aplicación a morteros de barro. Por otro lado existe una norma alemana de reciente publicación, la DIN 18947 (35), en la que se recogen ensayos especialmente diseñados para determinar prestaciones especialmente importantes en estos morteros.

Los revocos de barro pueden tener importantes beneficios para las condiciones de temperatura y humedad interiores de los edificios. El barro es un material con gran inercia térmica, por lo que favorece la acumulación de calor en los paramentos revestidos disminuyendo las variaciones de temperatura a lo largo del día. Además, es un material muy higroscópico, es decir, intercambia con facilidad humedad con el medio en el que se encuentra, de manera que también reduce las variaciones en el contenido de humedad, generalmente absorbiendo los excesos que pueden provocar ambientes insalubres o condensaciones en otros materiales.



Imagen 2-12: Ejemplos de construcciones de tapial y/adobe revestidas con revocos de barro en Santa María del Monte de Cea, León. (<http://www.templete.org/2013/11/santamar-del-monte-un-pueblo-mas-grande.html>)

En cuanto a su impacto ambiental, éste es prácticamente nulo. La extracción de la tierra puede acometerse en el mismo lugar en el que se vaya a construir el edificio, incluso puede aprovecharse la misma tierra excavada para realizar la cimentación, eliminando los impactos de su transporte. Además, no necesita someterse a ningún proceso térmico o de cualquier otro tipo que tenga algún impacto sobre el medio ambiente. Por último, hay que destacar que es un material reutilizable, pues como se ha expuesto anteriormente, sus partículas no sufren ninguna transformación química durante el secado, es decir, que un revoco de barro, por ejemplo, puede retirarse de un paramento, humedecerse y volver a utilizarse. Estas características hacen del barro un material muy

consecuente con los principios de la bioconstrucción, por lo que se abren las puertas a su utilización en nuevos edificios de aquellas zonas del mundo más prósperas, donde el barro ha sido sustituido por otros materiales de mayor impacto ambiental. (36)

2.3.6 Los áridos convencionales y su problemática

Tradicionalmente, los áridos para fabricar morteros y hormigones se han obtenido a partir de rocas extraídas en canteras que provocan un evidente impacto ambiental (Imagen 2-13, Imagen 2-14), destruyendo hábitats naturales y transformando radicalmente el paisaje. Además, la extracción por voladura de los minerales y su posterior tratamiento en plantas de machaqueo para obtener los áridos, suponen un gran consumo energético y consiguiente emisión de CO₂. Concretamente, el Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos de la UDC (GRIDP) estima que en España la producción de áridos consume unos 0.034GJ/t (37).



Imagen 2-13: Canteras de Santa Cristina, situada en Ponteceso (A Coruña), con una extensión de 13Ha. Extracción a cielo abierto gneis gris oscuro, áridos para carreteras.
(<http://www.lopezcao.com/canteras/>)



Imagen 2-14: Canteras de Oliveiro, situada entre Carballo y Malpica (A Coruña), ocupando una extensión de 17Ha. Extracción a cielo abierto granito gnéisico blanco, áridos para hormigón.
(<http://www.lopezcao.com/canteras/>)

La arena es el tercer recurso natural más utilizado en el mundo tras el aire y el agua, y el sector que más la consume es la construcción. La producción mundial de arena supera los 15.000 millones de toneladas cada año, de los que una buena parte proviene de ríos, del fondo de los mares o de las playas. El dragado de los ríos se produce también para evitar la acumulación de sedimentos que pueden dar lugar a inundaciones, sobre todo en las zonas del curso fluvial anteriores a las presas. El dragado de los fondos marinos es una actividad extremadamente lucrativa, pues aunque la maquinaria necesaria para efectuarlo (Imagen 2-15, Imagen 2-16) supone una gran inversión, la arena recogida es totalmente gratuita. Las playas son vaciadas de arena en numerosos países en vías de desarrollo por los propios pobladores de las zonas costeras (Imagen 2-17), ante la falta de oportunidades en otros sectores productivos y el buen precio que empresas constructoras pagan por ella.

El comercio de la arena está totalmente globalizado y la ausencia de políticas internacionales que regulen su extracción y su comercio ha derivado en conflictos diplomáticos (por ejemplo entre Singapur e Indonesia), gravísimos impactos sobre el medio ambiente e incluso problemas sociales como mafias (la mafia más poderosa de la India es la Mafia de la Arena). Entre los impactos ambientales provocados por la indiscriminada extracción de arena se encuentra la desaparición paulatina de islas enteras, como ha ocurrido ya en Indonesia y como se alerta que podría suceder en las Islas Maldivas (Imagen 2-18). Además, la retirada de la arena de las playas produce cambios radicales en el paisaje (entre el 75% y el 90% de las playas del mundo están

Rodríguez Álvaro, Roberto

sufriendo daños por culpa de la extracción de arena de los fondos marinos) (Imagen 2-19) y favorece la infiltración del agua salada del mar en los terrenos próximos a la costa, ocasionando problemas sobre el medio ambiente terrestre y los cultivos (38).



Imagen 2-15: Dragalina depositando arena del fondo marino en un barco de transporte
(<http://www.marmaray.com>)



Imagen 2-16: Barco transportando arena dragada del fondo del mar
(<http://coastalcare.org>)



Imagen 2-17: Mujeres recogiendo arena en una playa de Cabo Verde para su venta a empresas del sector de la construcción. (<http://coastalcare.org>)



Imagen 2-18: Playa afectada por el dragado de los fondos marinos en las Islas Maldivas (océano Índico) (www.coastalcare.org)



Imagen 2-19: Playa afectada por el dragado de los fondos marinos en Carolina del norte (EEUU) (<http://pruned.blogspot.com.es>)

2.3.7 La alternativa de bioconstrucción: Áridos secundarios

Son numerosas las investigaciones que se han llevado a cabo en todo el mundo para encontrar alternativas al uso de áridos naturales para la fabricación de hormigones y morteros. En la Tabla 2-13 se recogen algunas de ellas.

Referencia	Residuo	País
Thomas, B.S. et al. (39) y Mutsuddy, R. et al. (40)	Neumáticos de caucho	Reino Unido y Canadá
Aliabdo, A.A. et al. (41)	Ladrillo cerámico	Egipto
Saikia, N. et al. (42) y Frigione, M. (43)	Botellas de PET	Portugal & India, e Italia
Iucolano, F. et al. (44) y Marzouk, O.Y. et al. (45)	Plásticos	Italia y Francia
Thomas, B.S. et al. (46)	Escorias de cobre	India
Tavakoli, D. et al. (47)	Baldosas cerámicas	Irán
Serpa, D. et al. (48)	Vidrio	Portugal
Raman, S.S. et al. (49)	Ceniza de cáscara de arroz	Malasia
Shafigh, P. et al. (50)	Cáscara de palma	Malasia
Siquira, J.S. et al. (51)	Cenizas de carbón	Brasil
Al-Akhras, N.M. et al. (52)	Huesos de aceituna	Emiratos Árabes Unidos
(ver capítulo 2.5)	Conchas de moluscos	(ver capítulo 2.5)

Tabla 2-13: Estudios relacionados con la utilización de áridos secundarios

La mayoría de estos estudios se centran en la utilización de áridos reciclados procedentes de demoliciones de otras construcciones, pero en los últimos años han ido apareciendo nuevas investigaciones centradas en estudiar la posibilidad de utilización de residuos de diferentes actividades industriales. Pese a que la mayoría de estas investigaciones concluyen en que la sustitución de los áridos convencionales por otros áridos secundarios es perfectamente viable (al menos en ciertas proporciones), la inercia habitual del sector y sobre todo su alto precio frente a un recurso muy barato hacen que su implantación sea aún complicada en España.



2.4 Producción y gestión de residuo de concha de molusco

2.4.1 Producción a nivel internacional

Los moluscos forman parte de la dieta habitual en muchos países del mundo, y su producción y consumo no ha dejado de aumentar en los últimos años. La cantidad de concha generada es evidentemente proporcional, siendo su peso aproximadamente un tercio del total del molusco. En Corea del Sur se generaban a principios de la década de los noventa unas 300.000T de concha de ostra al año. Para la misma especie, Japón ha llegado a producir anualmente alrededor de 200.000T y Taiwán unas 35.000T. Galicia, con una producción de 80.000T al año de concha de mejillón, es el segundo territorio del mundo que produce más cantidad de este molusco, precedido solamente por China. En Nueva Zelanda se generan unas 50.000T de residuo de la misma concha. La importancia de este residuo, debido al gran volumen que ocupa y la dificultad para gestionarlo, ha llevado a algunos países a cuantificarlo de manera exhaustiva, como es el caso de Reino Unido (Tabla 2-14).

Tipo de concha	Berberecho	Cangrejo	Mejillón	Ostra	Vieira	Bígaro
T/año	20.224	4.345	3.616	51	6.602	3.358

Tabla 2-14: Datos de producción de concha de diferentes moluscos en Reino Unido (53)

Además de los territorios mencionados, existen otros muchos lugares donde la producción de concha-residuo supone un problema y se han puesto en marcha investigaciones con el objetivo de solucionarlo. Son ejemplos Nigeria, Tailandia, Malasia, Brasil, Chile...

2.4.2 Producción en Galicia

En Galicia, la acuicultura y la industria conservera son sectores de gran relevancia que generan cada año importantes beneficios económicos y mantienen miles de puestos de trabajo. Sin embargo, como toda industria, tiene sus impactos negativos, entre los que se encuentra la producción de residuos. La industria conservera genera importantes volúmenes de concha cuyo único destino posible hasta hace pocos años era el depósito en vertedero. En la actualidad existen empresas de procesamiento de conchas como Abonamar S.L. que han conseguido generar productos válidos para el sector avícola a partir de residuo de concha blanca (de almeja, vieira, berberecho...). Pero la concha de mejillón, que es de la que más cantidad se produce en Galicia, no resulta apta para tal uso (sus bordes afilados hieren a las aves) por lo que sigue siendo depositada en vertedero sin que exista ninguna alternativa. A continuación se muestran los datos ofrecidos por la administración gallega en relación a la producción acuícola para conocer finalmente cuál es el volumen aproximado de residuo de concha de mejillón. Según los datos de la Consellería do Medio Rural e do Mar (Tabla 2-15), en el año 2012 la producción de mejillón representó el 85% de la producción total acuícola de bivalvos, seguido de la almeja, el berberecho y la ostra, aunque en cantidades mucho menores.

La Tabla 2-16 muestra una producción en el año 2012 de 227.229T de mejillón (brutas: carne y concha), de las cuales aproximadamente un 65% se comercializó en fresco y el

restante 35% se procesó por la industria conservera. La parte del peso bruto que se corresponde con la concha de mejillón se establece de manera aproximada en un 33%, de tal manera que se puede afirmar que la industria conservera genera 25.000T de residuo de concha cada año.

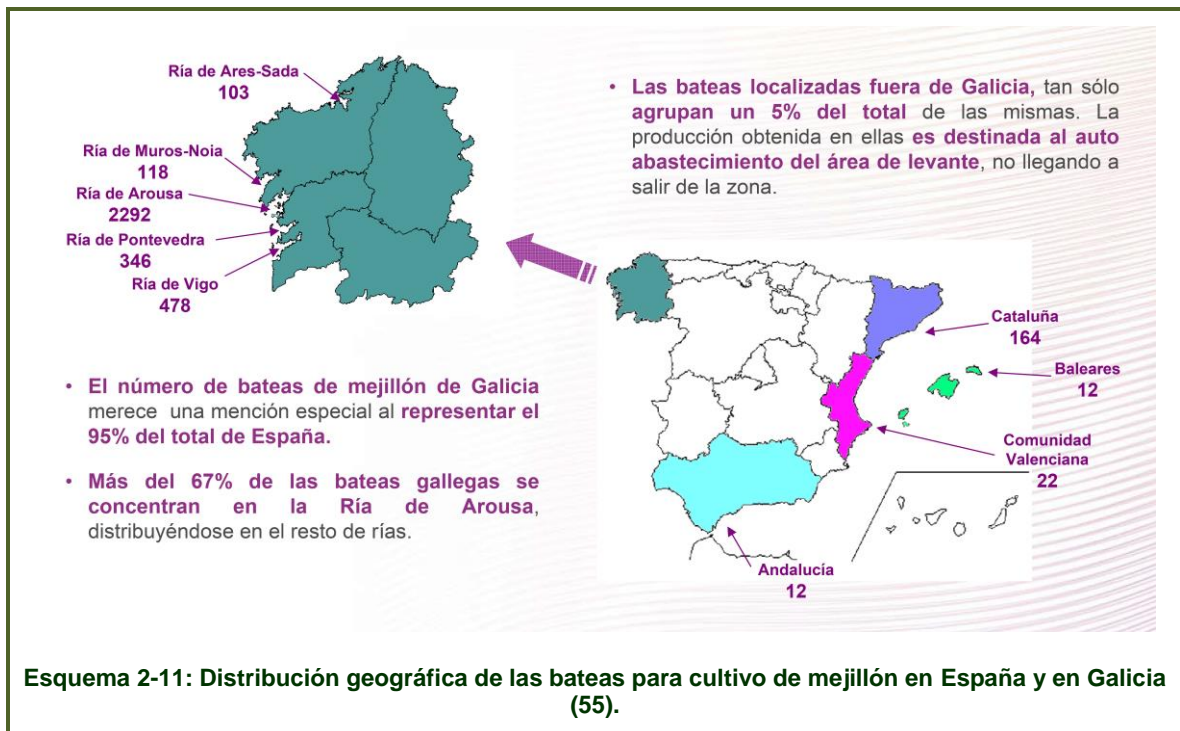
■ Datos xerais de acuicultura mariña no 2012 ■					
	kg	%	Euros	%	Euros/kg
Algas	580	0,00%	580	0,00%	1,00
Argazo real	580	0,00%	580	0,00%	1,00
Bivalvos	230.180.166	96,62%	109.711.003	64,53%	0,48
Ameixa babosa	208.528	0,09%	1.440.012	0,85%	6,91
Ameixa fina	182.074	0,08%	2.683.669	1,58%	14,74
Ameixa xaponesa	1.100.676	0,46%	5.493.729	3,23%	4,99
Berberecho	558.630	0,23%	2.476.778	1,46%	4,43
Mexillón	227.229.467	95,38%	94.050.833	55,32%	0,41
Mexillón (parques de cultivo)	3.251	0,00%	4.875	0,00%	1,50
Ostra plana	603.025	0,25%	2.859.565	1,68%	4,74
Ostra rizada	292.576	0,12%	695.436	0,41%	2,38
Volandeira	1.940	0,00%	6.105	0,00%	3,15
Cefalópodos	2.861	0,00%	19.358	0,01%	6,77
Polbo	2.861	0,00%	19.358	0,01%	6,77
Peixes	8.043.753	3,38%	60.281.954	35,46%	7,49
Linguado	75.923	0,03%	836.363	0,49%	11,02
Ollomol	186.539	0,08%	1.550.362	0,91%	8,31
Rodaballo	7.777.312	3,26%	57.880.371	34,04%	7,44
Salmón	3.980	0,00%	14.859	0,01%	3,73
TOTAL	238.227.361	100,00%	170.012.895	100,00%	0,71

Tabla 2-15: Datos de producción acuícola en Galicia durante el año 2012 (54)

■ Datos xerais da acuicultura do mexillón por destino no 2012 ■					
	kg	%	Euros	%	Euros/kg
Fresco	147.808.832	65,05%	62.921.917	66,90%	0,43
Grande	15.384.396	6,77%	8.582.623	9,13%	0,56
Mediano	37.688.172	16,59%	19.508.164	20,74%	0,52
Pequeno	94.736.264	41,69%	34.831.130	37,03%	0,37
Industria	79.420.635	34,95%	31.128.917	33,10%	0,39
TOTAL	227.229.467	100,00%	94.050.833	100,00%	0,41

Tabla 2-16: Datos de producción de mejillón en función del destino en 2012 (54)

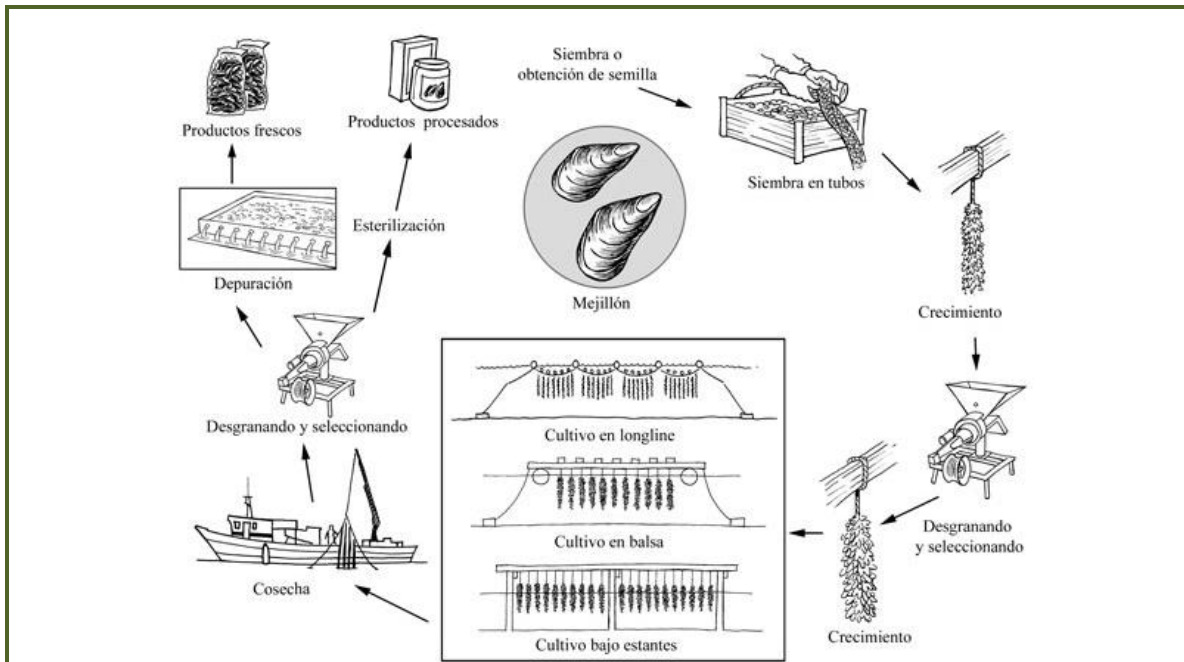
En cuanto a la distribución geográfica de la producción de mejillón, se observa en el Esquema 2-11 como la instalación de bateas se concentra en la Ría de Arousa, seguida de otras rías gallegas y existiendo muy pocas en otros lugares del estado (55).



El mejillón cultivado en las costas gallegas pertenece a la especie *Mytilus Galloprovincialis*, aunque hasta los años 1970 se consideraba que el mejillón de Galicia coincidía con el mejillón atlántico o mejillón azul *Mytilus Edulis*. Ambas especies tienen una morfología muy similar y eso ha producido confusiones importantes a lo largo de los años. Para evitar esta problemática, se ha creado una denominación de origen protegiendo el mejillón de Galicia que está siempre identificado con el *Mytilus Galloprovincialis* y diferenciándolo del mejillón francés, inglés o irlandés que se corresponde con el *Mytilus Edulis*.

La evidencia más temprana de consumo de mejillones en Galicia ha sido fechada en el siglo cuarto A.C., cuando los nativos dejaron grandes depósitos de conchas. Sin embargo, este consumo tenía como fuente el mejillón extraído directamente de las rocas. Su cultivo no comenzó hasta principios del siglo XX en Cataluña, siguiendo técnicas populares en Francia (postes), aunque en pocos años este método fue sustituido por estructuras flotantes (bateas). En Galicia no fue hasta mediados de siglo cuando se intensificó el cultivo del mejillón y se instalaron la mayoría de las bateas (Imagen 2-20).

El método de cultivo es sencillo (Esquema 2-12). De la batea cuelgan cuerdas que se recubren de semillas de mejillón con ayuda de una máquina (Imagen 2-22). Tras pasar aproximadamente un año, se recogen los mejillones que han crecido sobre las cuerdas y se someten a un proceso de depurado ya en tierra (Imagen 2-21), previo a su comercialización (56).



Esquema 2-12: Esquema de acuicultura en las rías gallegas del *Mytilus Galloprovincialis* (56)



Imagen 2-20: Cultivo en bateas de *Mytilus galloprovincialis* (56)



Imagen 2-21: Planta de depuración (56)



Imagen 2-22: Maquinaria usada para seleccionar y envolver las semillas en las cuerdas (56)



Imagen 2-23: Mejillones mediterráneos empacados (56)

2.4.3 Gestión tradicional

Tradicionalmente, las conchas de molusco han sido tratadas como residuo por la mayoría de los países productores y se han depositado o bien en tierra (Imagen 2-24) o bien bajo las aguas próximas a la costa de los mares. Ambas opciones generan un fuerte impacto ambiental. Las conchas-residuo contienen restos de materia orgánica que se descompone (tanto en el depósito en tierra como en el subacuático), provocando malos olores y la proliferación de microorganismos e insectos. En el caso terrestre, además, se producen lixiviaciones que contaminan las aguas y un impacto visual que puede tener incluso consecuencias económicas al darse sobre todo en poblaciones costeras para las que el turismo supone una importante fuente de ingresos. En el caso del vertido en el mar la situación es peor, pues se sepulta irremediamente toda forma de vida que pudiese existir en la zona. En muchas ocasiones estos vertidos se producen de manera ilegal, ya que el depósito en vertedero controlado puede resultar muy costoso y los volúmenes de residuo generado son enormes.



Imagen 2-24: Conchas de mejillón depositadas en vertedero (www.impacuicultura.com)

Excepcionalmente, encontramos algún caso de reutilización de la concha de molusco como subproducto. En Corea, ante el crecimiento exponencial de la cantidad de residuo generado y la imposibilidad de encontrar espacio para su adecuado vertido, se ha venido fomentando desde la administración la utilización de la concha de ostra como fertilizante aun sin resultar económicamente rentable (se ha llegado a reutilizar hasta un 30% de la concha generada). Por otro lado, en Nigeria, las conchas de bígaro se utilizan ya de manera tradicional para la fabricación de hormigón (Imagen 2-25, Imagen 2-26). Sin embargo, este uso carecía hasta hace pocos años de estudios técnicos que lo avalasen, por lo que siempre fue considerado como una práctica poco profesional motivada en exclusiva por la escasez de áridos gruesos en la zona costera de dicho país (57).



Imagen 2-25: Escombros de hormigón con bígaro como árido grueso



Imagen 2-26: Solera de hormigón con bígaro como árido grueso

Otros países también han utilizado las conchas para algún fin, pero de manera minoritaria, como puede ser el caso de Nueva Zelanda, donde se ha empleado en la construcción de cortafuegos (58), o Dinamarca, donde se ha utilizado como material granular aislante en cubiertas y soleras de viviendas (59) .

2.4.4 Nuevos usos

En los últimos años, con el objetivo de dar una salida eficaz y rentable a las conchas de molusco, se han producido numerosos estudios que han concluido en la posibilidad de uso de la concha como subproducto en multitud de ámbitos. La Tabla 2-17 recoge algunas de las investigaciones realizadas.

AUTOR	ESPECIE	USO
Chang Hoon Lee et al. (60)	OSTRA	Fertilización de suelo
Paz-Ferreiro, J. et al. (61)	MEJILLÓN	Fertilización de suelo
Jayaganesh, K. et al. (62)	--	Mejora de suelos tipo vertisol (con alto contenido en arcillas expansivas)
Ramírez-Pérez, A.M. et al. (63)	MEJILLÓN	Retención de minerales pesados en mina de cobre
Jong-Hyeon, Jung et al. (64)	OSTRA	Eliminación de SO ₂ y NO _x en gases contaminantes
Yan Yu et al. (65) y Hyok-Bo Kwon et al. (66)	OSTRA	Depuración de aguas
Malu, S.P. (67)	ALMEJA & BÍGARO	Obtención de calcio
Mark I Jones et al. (68)	MEJILLÓN	Obtención de hidroxiapatita para fabricación de implantes de hueso
Hamester, M.R.R. et al. (69)	MEJILLÓN Y OSTRA	Fabricación de polipropileno
Omubo-Pepple, V.B. et al. (70)	BÍGARO	Fabricación de bloques de adobe-cemento
Repil, Christian I. (71)	MEJILLÓN & OSTRA	Fabricación de baldosas
(ver capítulo 2.5)	MEJILLÓN	Fabricación de materiales ligados para construcción

Tabla 2-17: Estudios sobre las posibilidades de uso de la concha de diferentes moluscos.

Las posibilidades de uso de la concha como árido secundario en productos de construcción se exponen y comparan de manera más detallada en el apartado 2.5. Esta aplicación resulta de especial interés en zonas del planeta donde no existen canteras de las que se puedan extraer áridos convencionales, como puede ser el sur de Nigeria, o en otras donde se prevé la necesidad de gran cantidad de árido en los próximos años ante el gran auge del sector de la construcción, caso por ejemplo de Corea del Sur.

2.5 Materiales ligados con concha de molusco

2.5.1 Introducción

Diferentes estudios muestran las posibilidades de utilización de la concha de ciertos moluscos como el bígaro, el berberecho, la ostra, el mejillón o la almeja, en la fabricación de materiales ligados para construcción, como son hormigones y morteros.

En el ámbito de los hormigones, se han realizado trabajos sobre las posibilidades de sustitución de la grava por concha entera de bígaro (72), (73), (74) y (75) y berberecho (76), así como concha machacada o grava producida a partir de concha de mejillón (58). En lo referente al uso de este material como fracción fina, un autor estudia la sustitución de arena en el hormigón por arena producida a partir de concha de ostra (77) y (78).

En el caso de los morteros, se encuentra de nuevo un estudio (79) en el que se propone la sustitución de arena por concha triturada de ostra. Investigaciones posteriores añadieron a la arena de ostra cenizas volantes esperando mejorar su comportamiento a compresión a largo plazo (80) y (81). Por otra parte, algunos autores estudian la sustitución de la fracción de filler (82) o una parte del propio cemento (82), (83) y (84). Existe, además, un estudio en el que se investiga la posible reacción entre el polvo de concha de ostra y las cenizas volantes en una pasta de cal (85).

En cada uno de estos trabajos, se utilizan una o varias dosificaciones y relaciones agua/conglomerante, así como diferentes porcentajes de sustitución del componente convencional por el procedente de concha. Además, se analizan distintas propiedades físicas y mecánicas del material ligado tanto en estado fresco como endurecido. En hormigones con sustitución de grava, los distintos estudios aplican ratios de sustitución crecientes hasta alcanzar valores de fluidez casi nulos. En cambio, en el caso de los hormigones y morteros con sustitución de arena, el criterio para elegir la ratio de sustitución límite es el contenido en cloruros, dejando de introducir concha cuando este supera los 0.3kg/m^3 .

Con el fin de resumir los resultados obtenidos por los diferentes autores hasta la actualidad se recogen en la Tabla 2-19 las variables que definen cada uno de los estudios referenciados en este trabajo y en la Tabla 2-21 las propiedades ensayadas sobre el material ligado con un signo que representa para cada propiedad si ésta disminuye, aumenta, o se mantiene constante al incrementar la proporción del componente procedente de concha. Previamente a la explicación detallada de dichas propiedades de los materiales ligados, se exponen brevemente las propiedades físico-químicas del residuo de concha recogidas de la bibliografía consultada, poniendo de manifiesto la coincidencia entre los resultados de todos ellos.

Estado de la cuestión

Referencia	Material	Subs.	Por	De cocha de	Dosificación	A/C	%Substitución (en masa)						
(72)	H.L.	GRAVA	CONCHA ENTERA	BÍGARO	1:1.5:3 m	0.55	0	10	20				
					1:2:4 m		0	10	20	30			
					1:3:6 m	0.5	0	10	20	30	40	50	
					1:3.5:1 m		100						
					1:4.5:1.5 m								
(73)	H.L.	GRAVA	CONCHA ENTERA	BÍGARO	1:1:2 v	0.4	100						
					1:2:3 v	0.5							
					1:4:6 v	0.9							
					1:2:4 v	0.6							
					1:3:5 v	0.75							
(74)	H.L.	GRAVA CANtera	CONCHA ENTERA	BÍGARO	1:2:4 v	0.6	0	25	50	75	100		
					1:3:6 v	0.55							
(75)	H.L.	GRAVA RÍO	CONCHA ENTERA	BÍGARO	1:1.5:3 m	0.5	0	25	50	75	100		
(76)	H	GRAVA	CONCHA ENTERA	BERBERECHO	--	0.5	0	5	10	15	20	25	30
(58)	H	GRAVA	GRAVA (2subtipos)	MEJILLÓN	3:8:4 m	0.5	100						
					1:4:5+Air m	1	4						
(77) (78)	H	ARENA	ARENA (2subtipos)	OSTRA	4:7:10 m	0.45	0	5	10	20			
				4:7:10 +Air(0.3% C) m									

Tabla 2-18: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. H = Hormigón, HL = Hormigón ligero, M = Mortero, P = Pasta, Subs. = Parte del material que se sustituye, A/C = Relación agua/conglomerante, En dosificación: m = dosificación en masa, v = dosificación en volumen.



Referencia	Material	Subs.	Por	De cocha de	Dosificación		A/C	%Substitución (en masa)					
					1:5 m	1:10 m		0	20	40	60	80	
(79)	M	ARENA	ARENA (2subtipos)	OSTRA	1:5 m	1:10 m	1	0	20	40	60	80	
(80)	M	ARENA	ARENA (2subtipos)	OSTRA	1:1 m	1	100	+Adición de CV sobre el peso de cemento:	0	5	10	15	
					1:1.5 m								
					1:2 m								
(81)	M	ARENA	ARENA Y C.V. (1:1)	OSTRA	1:2.75 m		0.485	0	5	10	20	30	
(82)	M	FILLER	FILLER	MEJILLÓN	1:9	1.6	0	33	66	100			
		FILLER (100%) Y CEMENTO					5	10					
(83)	M	CEMENTO	FILLER Trituración en húmedo	OSTRA	1:4 m	1.1	0	5	10	15	20		
				ALMEJA									
				BÍGARO									
				MEJILLÓN									
(84)	M	CEMENTO	FILLER (2subtipos: trituración en húmedo y trituración en seco)	OSTRA	1:3 m	0.5	0	5	10	15	20		
(85)	P	CAL	FILLER+CV	OSTRA	m	0.45	20+40	40+20	30+30	0+0	50+50		

Tabla 2-19: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. H = Hormigón, HL = Hormigón ligero, M = Mortero, P = Pasta, Subs. = Parte del material que se sustituye, A/C = Relación agua/conglomerante, En dosificación: m = dosificación en masa, v = dosificación en volumen.

Estado de la cuestión

Referencia	Densidad	Trabajabilidad	R.Compresión	Otras prop. Mecánicas		Retracción	Tiempo de fraguado	Otras prop. Físicas	
(72)				R.Flexión 					
(73)									
(74)									
(75)									
(76)									
(58)								C.Térmica 	
(77) (78)			 	R.T. 	M.E. 		 	P.A. 	Cl ⁻

Tabla 2-20: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. R.Compresión = Resistencia a compresión, R.Flexión = Resistencia a flexión, R.T. = Resistencia a tracción, M.E. = Módulo elástico, C.Térmica = Conductividad Térmica, P.A = Permeabilidad al agua líquida, Cl⁻ = Contenido en cloruros, R.Q. = Resistencia química.

























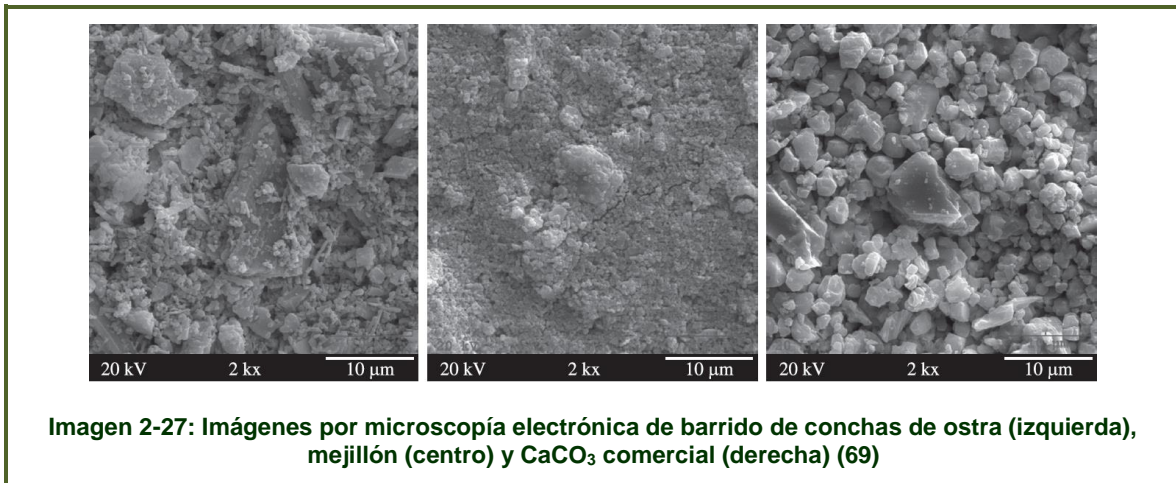
(79)								
(80)								
(81)							R.Q.  	Cl ⁻ 
(82)				R.Flexión 				
(83)					 		C.Térmica 	
(84)			 	R.Flexión  				
(85)								

Tabla 2-21: Tabla resumen de los distintos estudios recogidos en el trabajo. R.Compresión = Resistencia a compresión, R.Flexión = Resistencia a flexión, R.T. = Resistencia a tracción, M.E. = Módulo elástico, C.Térmica = Conductividad Térmica, P.A = Permeabilidad al agua líquida, CL⁻ = Contenido en cloruros, R.Q. = Resistencia química.

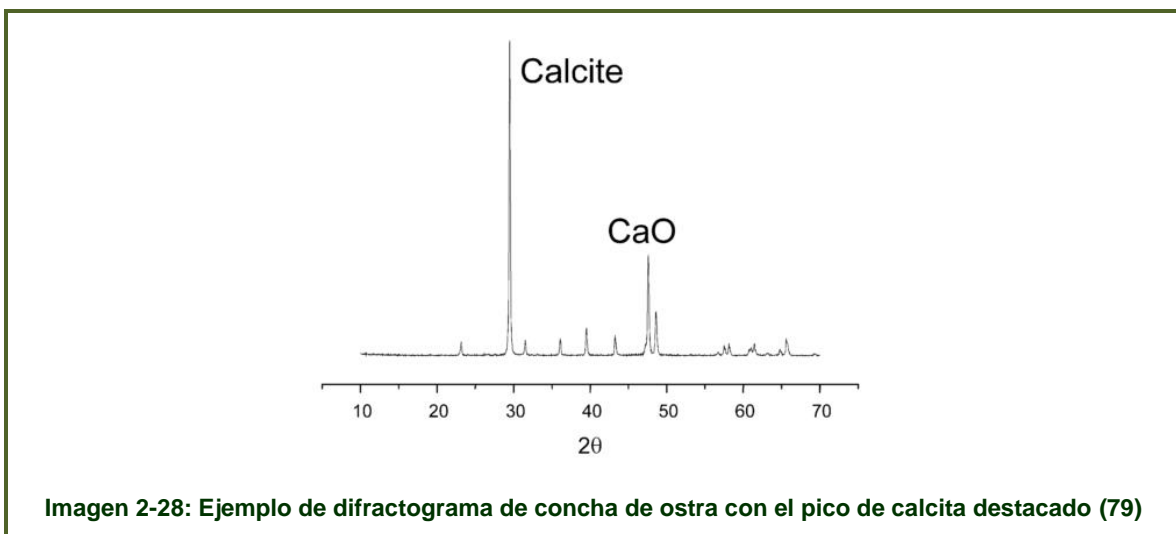
2.5.2 Caracterización común del residuo de concha de molusco

Los datos publicados sobre la composición microscópica y mineralógica de diferentes tipos de conchas de moluscos coinciden en gran medida. Todas las conchas se componen principalmente por carbonato cálcico (CaCO_3) en un 95-99% en peso y otros óxidos en pequeña proporción (de potasio, de silicio, de hierro, etc...). La concha de ostra es la que más carbonato cálcico incorpora (hasta un 98%). Las formas cristalográficas en las que se presenta este mineral son aragonito y calcita, con estructuras planas o reticulares (Imagen 2-27) (83).



Los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X también son muy parecidos para todos los tipos de concha (83). La proporción de masa calcinada se encuentra para las especies de mejillón verde, almeja de cuello corto, ostra y berberecho entre el 42,2 y el 42,8%. El hecho de que la diferencia entre especies de moluscos sea pequeña parece indicar que la estructura composicional básica de las conchas es similar independientemente de la especie.

Los resultados de difractogramas de conchas de moluscos permiten discernir que en todos ellos los minerales presentes son calcita y aragonito (77) (79) dos variedades polimórficas de carbonato cálcico.

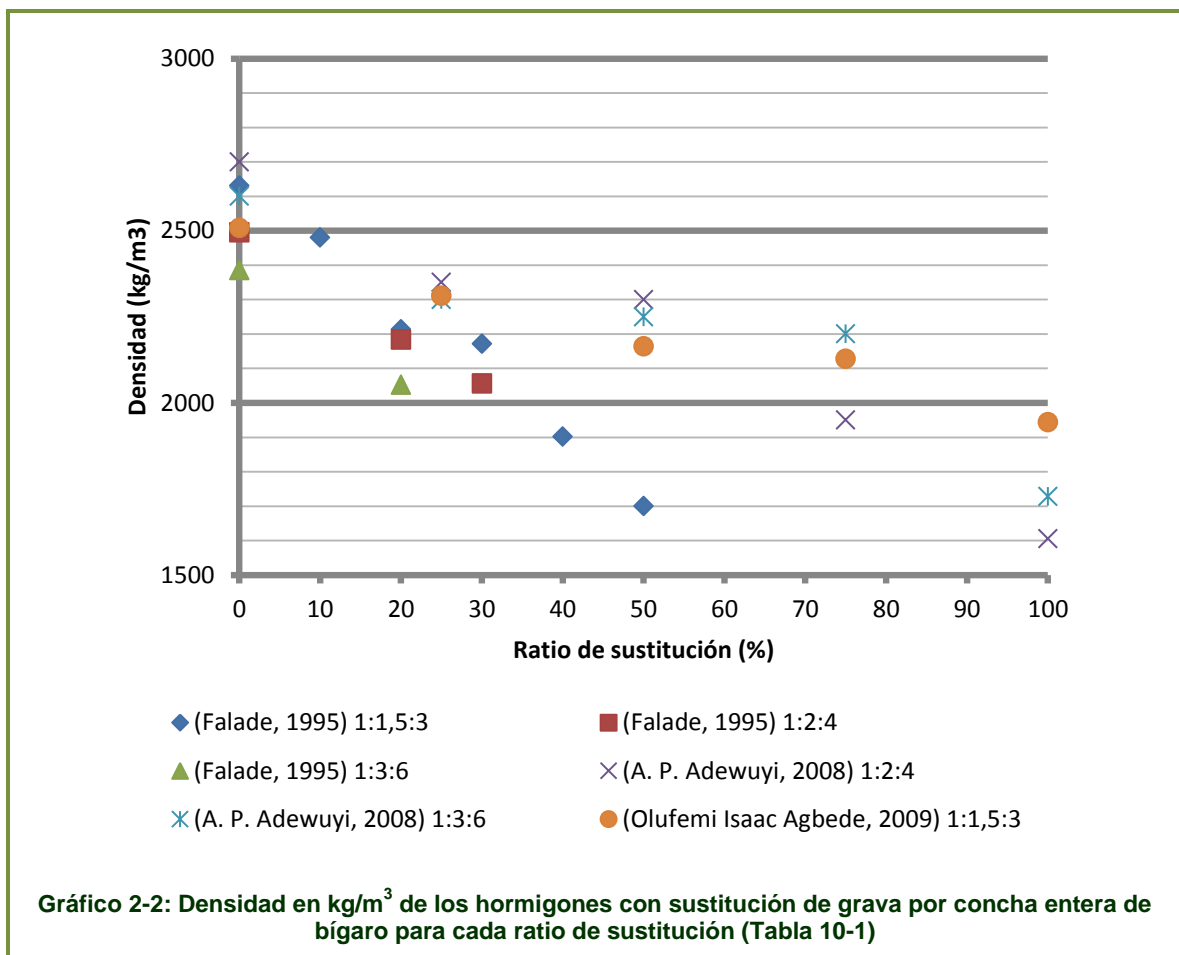


2.5.3 Hormigones con sustitución de grava

2.5.3.1 Densidad

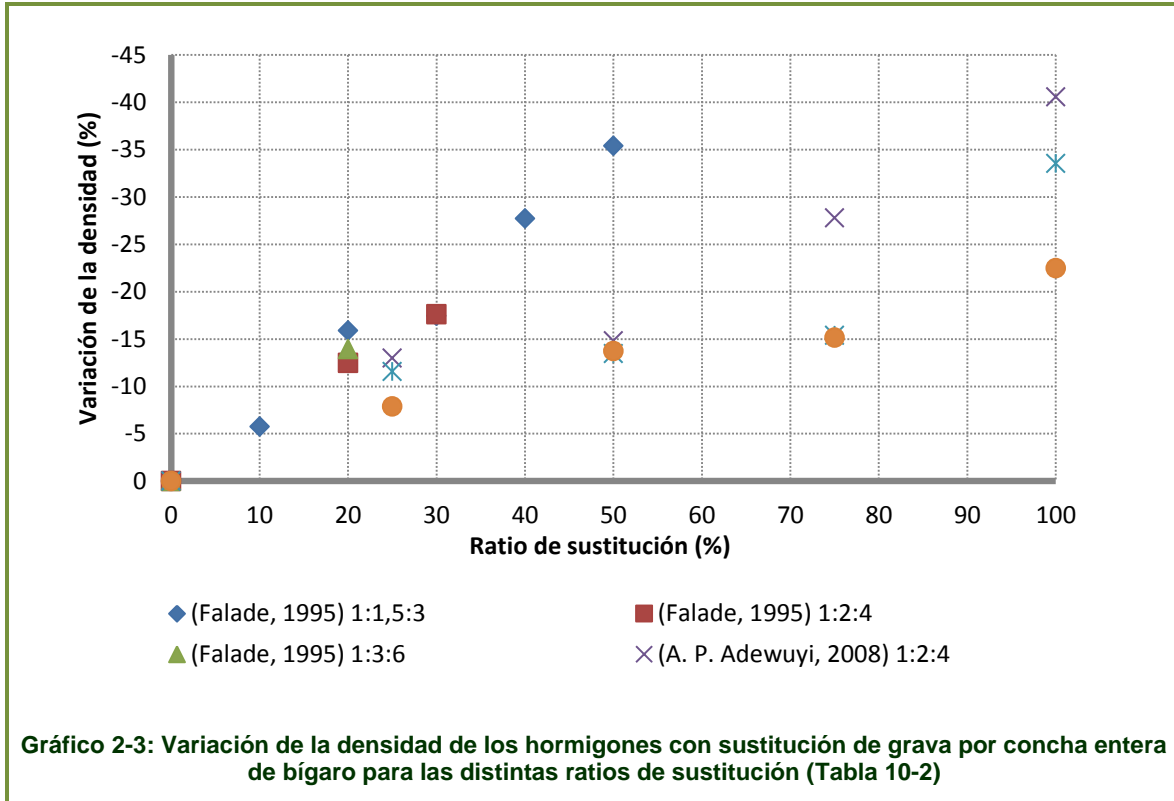
Todos los autores que fabrican hormigón sustituyendo la grava por concha entera de bígaro consiguen densidades menores que las de un hormigón convencional (2300kg/m^3 valor estimado por la EHE). La densidad disminuye a medida que aumenta el contenido de grava en el hormigón o cuanto mayor es la fracción de la misma sustituida (Gráfico 2-2 y Gráfico 2-3). Esta disminución de la densidad es debida a que la concha entera de bígaro es un árido ligero que se comporta dentro de la masa del hormigón como un poro cerrado (72), (73), (74) y (75).

Para cada estudio, la consideración de los distintos valores obtenidos como propios de un hormigón ligero o normal en cuanto a su densidad, y apto o no apto para uso estructural en función a esta propiedad, dependen de la normativa vigente en el lugar en el que se realiza. La normativa española, EHE-08, en el apartado “alcance” de su anejo 16 define el hormigón ligero estructural como aquel cuya densidad se encuentra entre los 1200 y 2000kg/m^3 y contiene una cierta proporción de árido ligero (86).



Además de los valores visibles en los gráficos, para porcentajes de sustitución del 100%, Awaro, J.O. et al. (73) obtuvo valores entre los 1979 y 2160kg/m^3 para cinco dosificaciones diferentes, mientras Falade, F. (72) alcanza densidades de 2970kg/m^3 y 2104kg/m^3 para hormigones 1:4.5:1.5 y 1:3.5:1, respectivamente.

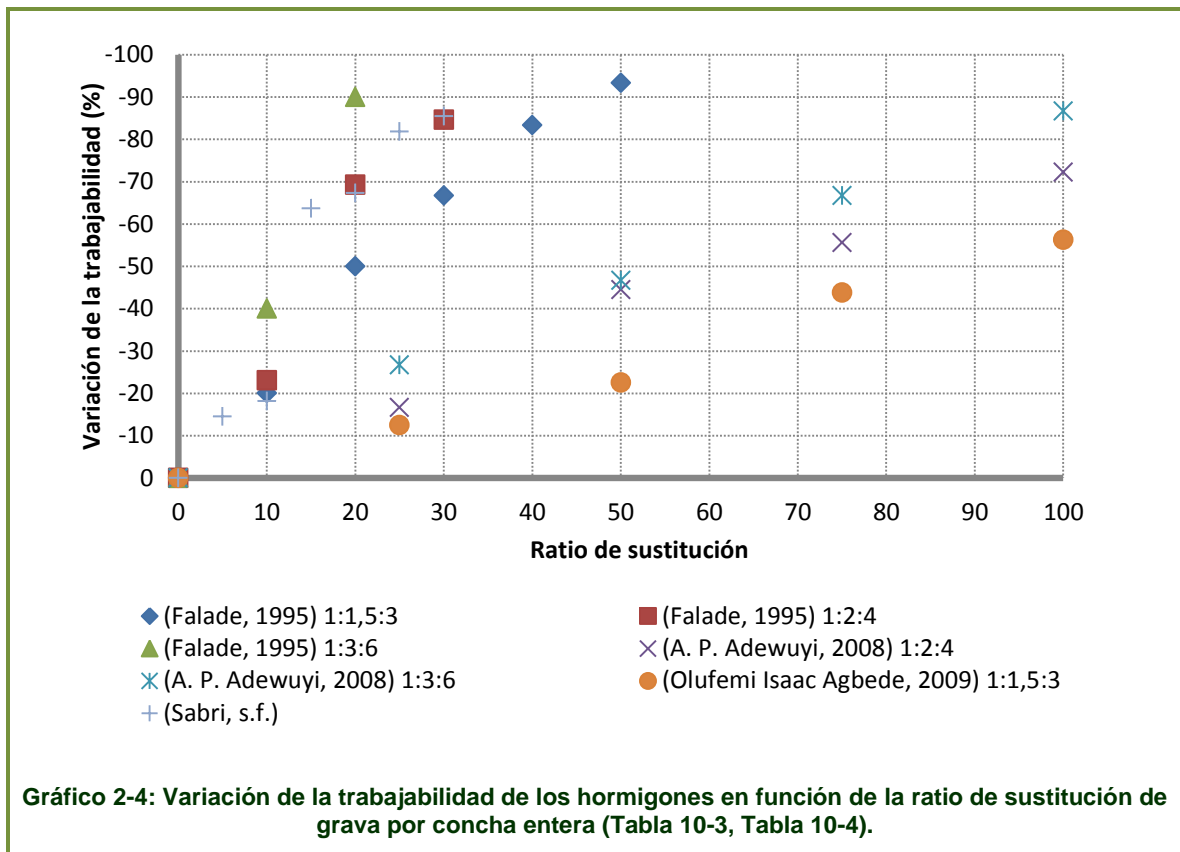
Para hormigón con grava sustituida por concha de mejillón, se constatan valores de densidad considerablemente bajos debido a la existencia de grandes coqueras, ocasionadas por la desproporción entre el tamaño de los trozos de concha utilizados y el tamaño de las probetas y a que algunas partes de concha proceden de la zona próxima a la bisagra y se comportan en el hormigón como un poro cerrado al tener una forma cóncava de “capuchón” (58).



2.5.3.2 Trabajabilidad

Todos los estudios obtienen índices de fluidez menores (que denotan una menor trabajabilidad) para hormigones con más proporción de grava y mayor ratio de sustitución (Gráfico 2-4). La trabajabilidad es la propiedad que limita las ratios de sustitución, de manera que algunos estudios dejan de añadir más concha al hormigón cuando alcanzan valores de fluidez casi nulos (72) (76).

Las disminuciones de fluidez en los hormigones con partículas de concha se deben a que éstas tienen una superficie específica mayor que las gravas convencionales. Al aplicar las ratios de sustitución en masa y no aumentar la cantidad de agua, existe una mayor relación superficie específica/agua, que tiene como consecuencia un aumento de la consistencia (72) (74) (76). Por otra parte, el descenso de la trabajabilidad en hormigones con sustitución de concha entera de bígaro se atribuye a la posibilidad de que parte del agua de amasado se introduzca en el interior de las mismas, quedando dentro de ellas sin combinarse en la amasadora y por tanto sin contribuir al aumento de la fluidez (72). La forma de las conchas (cónica para el bígaro y cóncavo-convexa en los demás casos) y la rugosidad de sus superficies exteriores es también una posible causa de su influencia negativa sobre la trabajabilidad (75) (76).

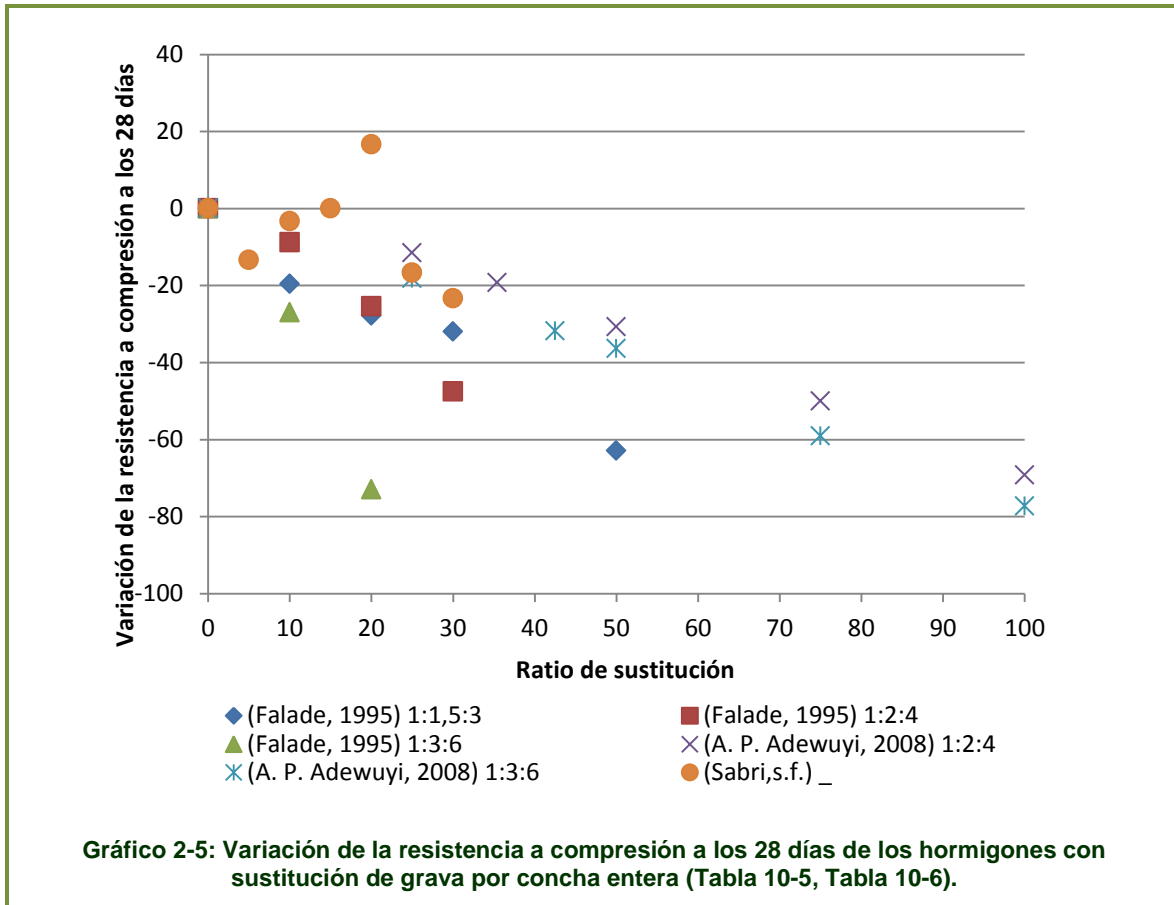


Además de los resultados utilizados para realizar la gráfica, otros autores (72) obtuvieron asentamientos de 5 y 10mm para una sustitución del 100% sobre dosificaciones con una proporción menor de grava (1:3.5:1 y 1:4.5:1.5 respectivamente) y asentamientos mucho mayores para sustituciones del 4% (~100mm) frente al 100% (~10mm) (58).

2.5.3.3 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es la propiedad más representativa de la aptitud estructural de un hormigón, por lo que aparece reflejada en todos los estudios de este ámbito. En general, se obtienen valores inferiores a los de un hormigón fabricado con árido convencional (Gráfico 2-5), pero estas disminuciones son poco significativas o se consiguen valores absolutos que cumplen suficientemente los requerimientos normativos para uso estructural. La EHE-08, en su anejo 16 artículo 31.4 establece como resistencia mínima para el hormigón ligero estructural en masa los 15 MPa y para el armado 25 MPa (86).

Las disminuciones de resistencia a compresión en los hormigones con partículas de concha se deben entre otras causas a que éstas tienen una superficie específica mayor que las gravas convencionales. Al aumentar las ratios de sustitución en masa y no incrementar la cantidad de cemento, existe una mayor relación superficie específica/cemento, que tiene como consecuencia una disminución de las resistencias (72) (74) (76). Este mismo fenómeno se da cuando el hormigón tiene una mayor proporción de grava según su dosificación (72) (73), aunque no pueda observarse directamente en la Tabla 2-22 porque la relación a/c no es la misma para todas las dosificaciones.



Autor	a/c	Dosificación	Resistencia a compresión (28 días) (MPa)
(73)	0.4	1:1:2	25.67
(72)	0.5	1:3.5:1	15.65
(73)	0.5	1:2:3	19.50
(72)	0.5	1:3:6	11.77
(73)	0.6	1:2:4	19.83
(73)	0.75	1:3:5	16.50
(73)	0.9	1:4:6	14.00

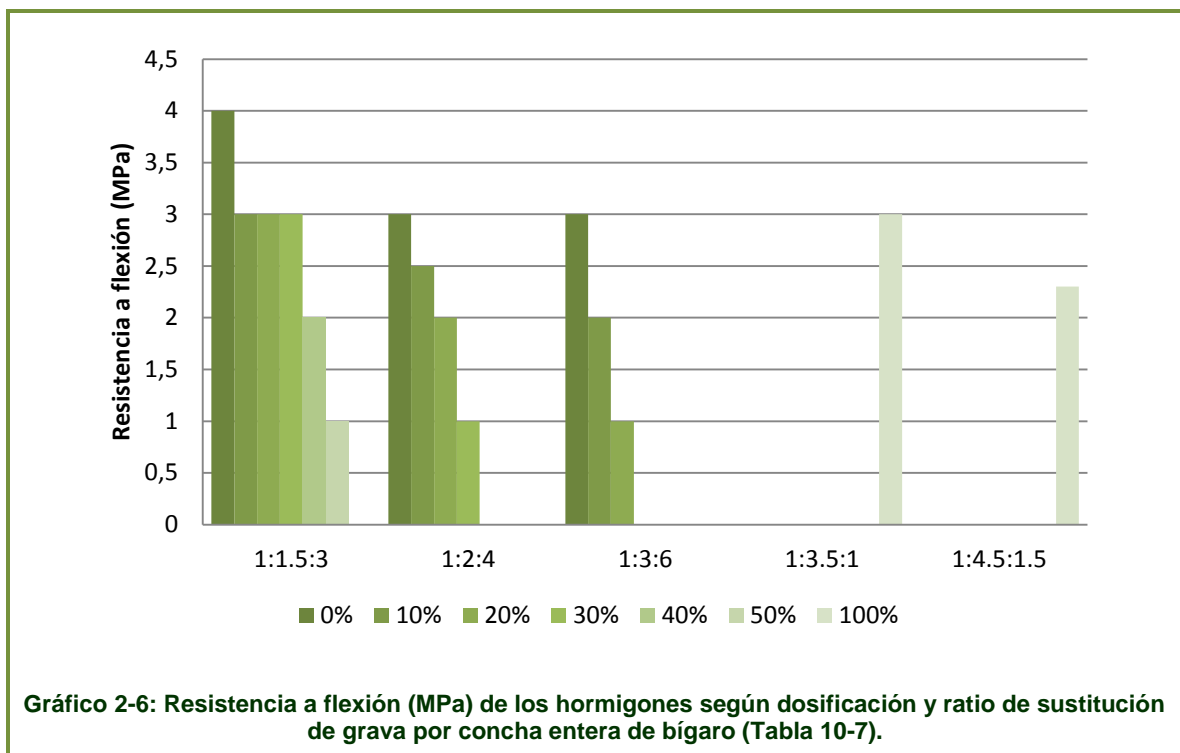
Tabla 2-22: Relación de hormigones con ratio de sustitución 100% de la grava por concha entera de bigaro, donde apreciamos la dificultad de observar que para mayores relaciones árido/cemento disminuyen las resistencias al encontrarnos con relaciones A/C diferentes para cada caso.

Barnaby, C. (58) obtuvo valores de resistencia a compresión muy inferiores a los de un hormigón convencional (en torno a los 4MPa), reducción que atribuye a la suavidad en la superficie de las conchas que perjudica la adherencia de las mismas con la pasta de cemento; a la presencia de cierta cantidad de materia orgánica y a que los trozos de

concha utilizados son demasiado grandes para el tamaño de las probetas, de forma que se producen coqueas que perjudican a la resistencia.

2.5.3.4 Otras propiedades

La resistencia a flexión se ve afectada de manera paralela a la compresión, disminuyendo también con el aumento del porcentaje de sustitución, aunque alcanzándose valores aceptables (Tabla 2-25). Las disminuciones de resistencia a flexión se atribuyen a los mismos factores que las de compresión. Las partículas de concha tienen una superficie específica mayor que las gravas convencionales, por lo que al aumentar las ratios de sustitución en masa y no la cantidad de cemento, existe una mayor relación superficie específica/cemento, que tiene como consecuencia una disminución de las resistencias (72).



La conductividad térmica, a consecuencia de la disminución de la densidad, adquiere valores relativamente bajos (equiparables a los de un polietileno) para el hormigón con sustitución de grava convencional por grava de mejillón (58).

2.5.4 Hormigones y morteros con sustitución de arena

2.5.4.1 Contenido en cloruros

El contenido en cloruros es un parámetro fundamental a considerar en el diseño de hormigones ya que limita su empleo en determinados usos. La mayor parte de los estudios recogidos en este apartado justifican sus ratios de sustitución límite con el cumplimiento de un contenido en cloruros inferior a 0.3kg/m^3 , independientemente de que trabajen con hormigón (77) (78) o mortero (79) (81).

En el caso de los hormigones con sustitución de arena natural por concha de ostra, Eun-ik Yang et al. señala que porcentajes de sustitución superiores al 10% no cumplirían el nivel límite establecido de contenido en cloruros, sin embargo, propusieron ratios de

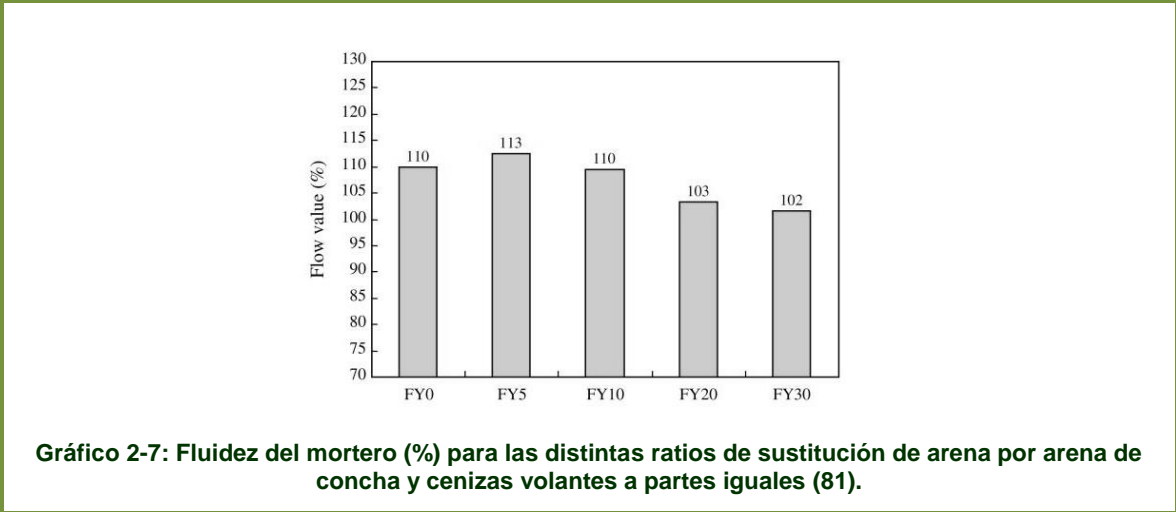
hasta el 20% de sustitución con el fin de identificar la influencia de la arena de ostra sobre el comportamiento de los hormigones de estudio (77) (78).

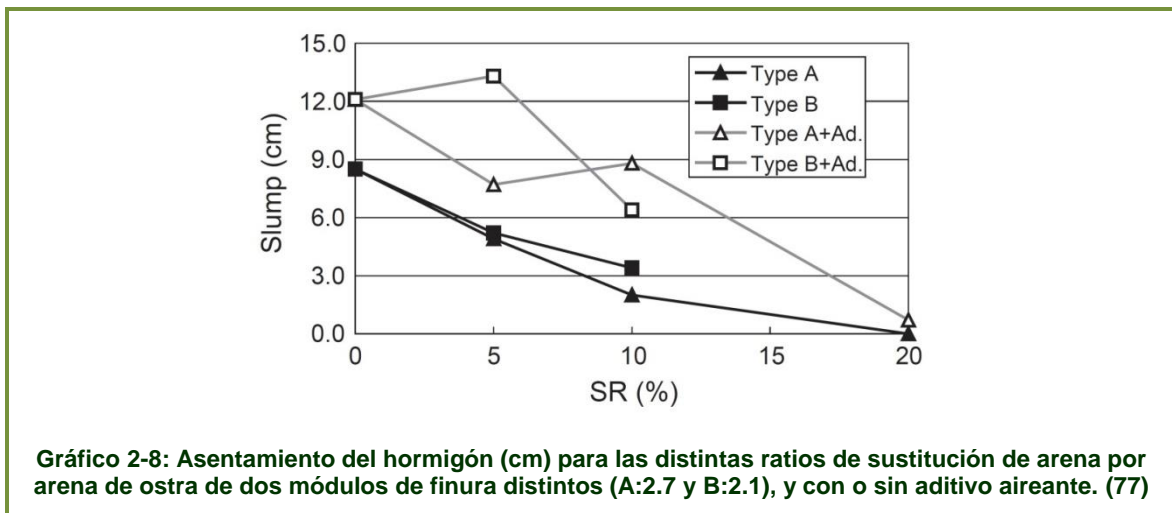
En cuanto al análisis de los morteros con sustitución de arena natural por arena de ostra, se mantiene, al igual que en los hormigones, el límite de sustitución en el 10% debido a la limitación de cloruros, llegando a fabricar morteros con un contenido de hasta el 80% de concha de ostra con el objetivo de definir el efecto de la misma en distintos porcentajes de sustitución (79).

Otro estudio refleja la composición de morteros con sustitución de arena natural por ostra y cenizas volantes a partes iguales, cuya ratio máxima en este caso se fija en el 30%, obteniendo para el mismo un contenido en cloruros aproximadamente la mitad del límite establecido (0.146kg/m^3) (81).

2.5.4.2 Trabajabilidad

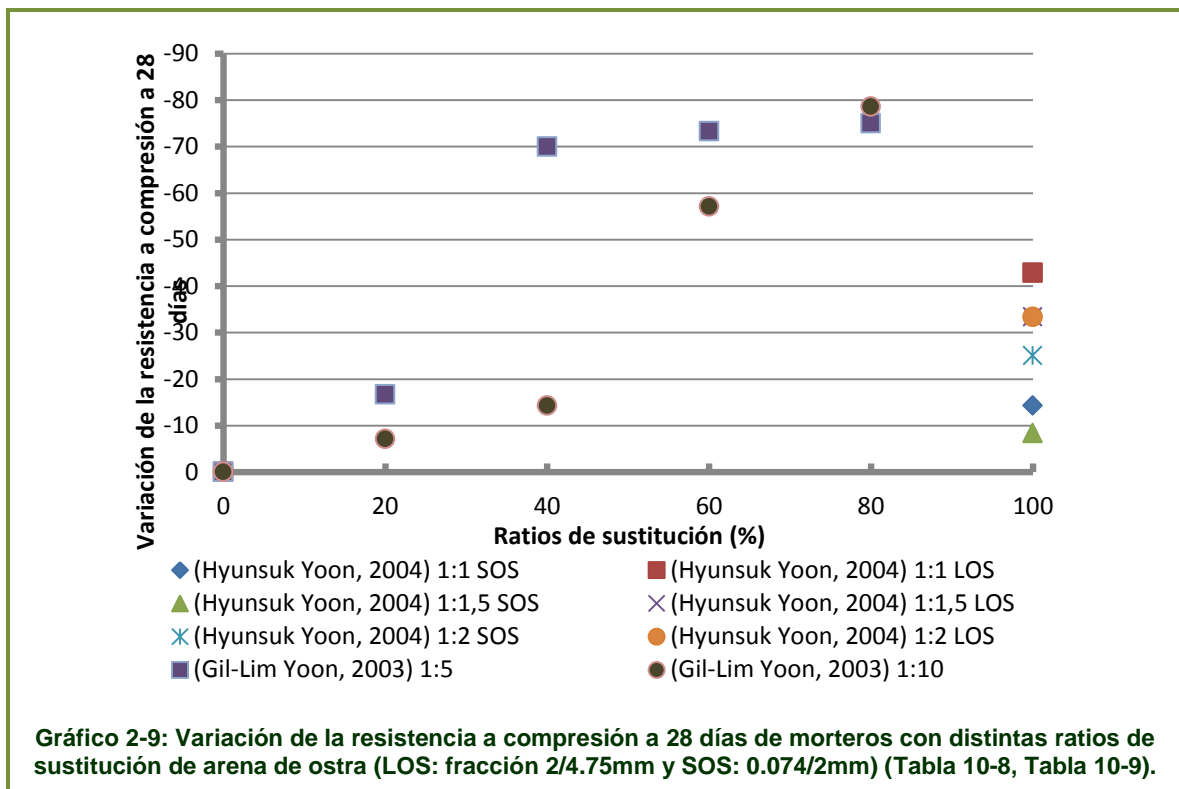
La fluidez del material ligado disminuye cuando aumenta el contenido en partículas de concha (Gráfico 2-7 y Gráfico 2-8) debido a que la forma de estas es más irregular que la de la arena convencional, y a la mayor cantidad de agua que absorben durante el amasado (81). Con el fin de contrarrestar este aumento de la consistencia en el hormigón, Eun-Ik et al. (77) introdujo como variable el módulo de finura de la arena de concha (esperando obtener menores consistencias para módulos de finura menores), pero concluyó que las arenas utilizadas no tenían módulos de finura lo suficientemente distintos como para influir visiblemente sobre la trabajabilidad. Además, añadió una cierta cantidad de aditivo aireante (0.3% del peso del cemento), de lo que constató una escasa influencia sobre los resultados (aunque sería esperable que se consiguiesen mejoras considerables utilizando una mayor cantidad de aditivo). Her-Yung et al. (81), introdujo cenizas volantes en la composición del mortero con el fin de mejorar las resistencias a compresión, obteniendo indirectamente mejoras sobre la trabajabilidad para la ratio de sustitución del 5%. A partir de éste porcentaje los valores volvieron a disminuir siendo las cenizas incapaces de contrarrestar el efecto perjudicial de la arena de concha.





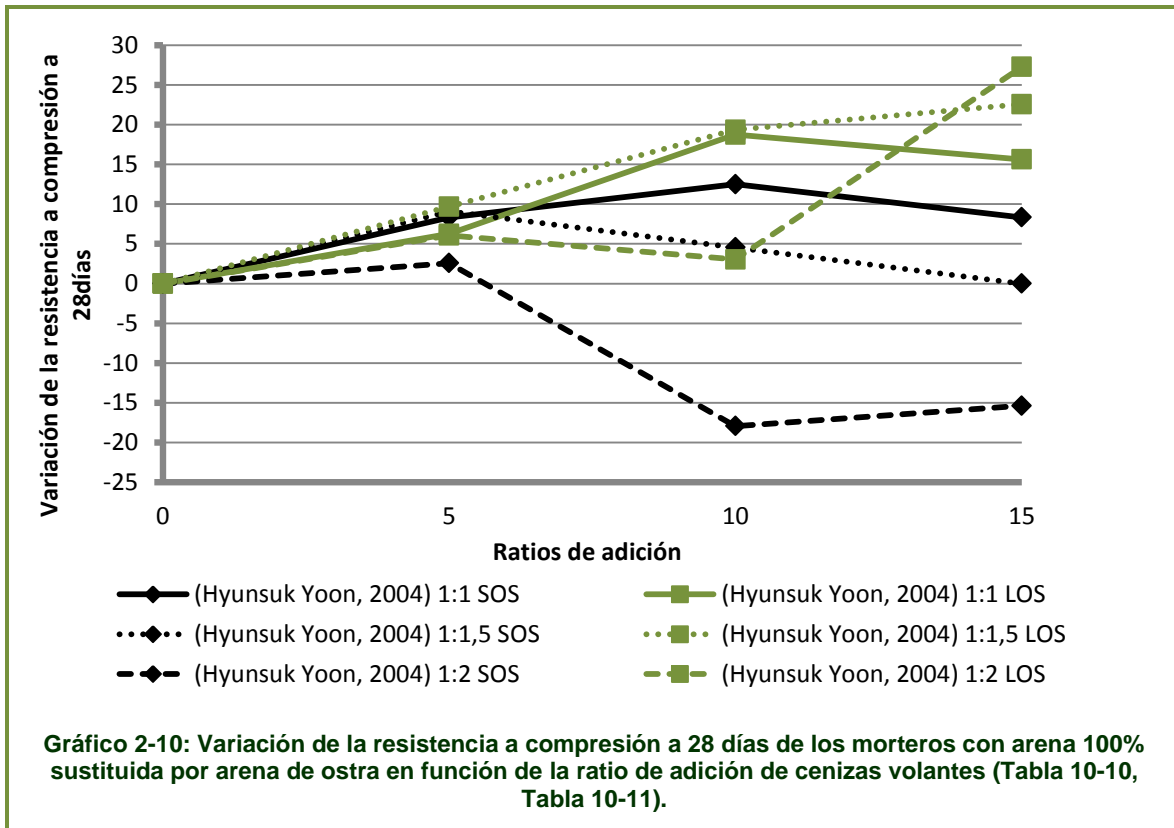
2.5.4.3 Resistencia a compresión

Las disminuciones de resistencia a compresión en los morteros con partículas de concha (Gráfico 2-9) se deben, como ya se comentó anteriormente, a la mayor superficie específica de éstas frente a las arenas convencionales. Al aplicar las ratios de sustitución en masa y no aumentar la cantidad de cemento, existe una mayor relación superficie específica/cemento, que tiene como consecuencia una disminución de las resistencias (80) (79). Además, un tamaño mayor de las partículas de concha puede derivar en la formación de poros más grandes, que también disminuyen la resistencia (80).

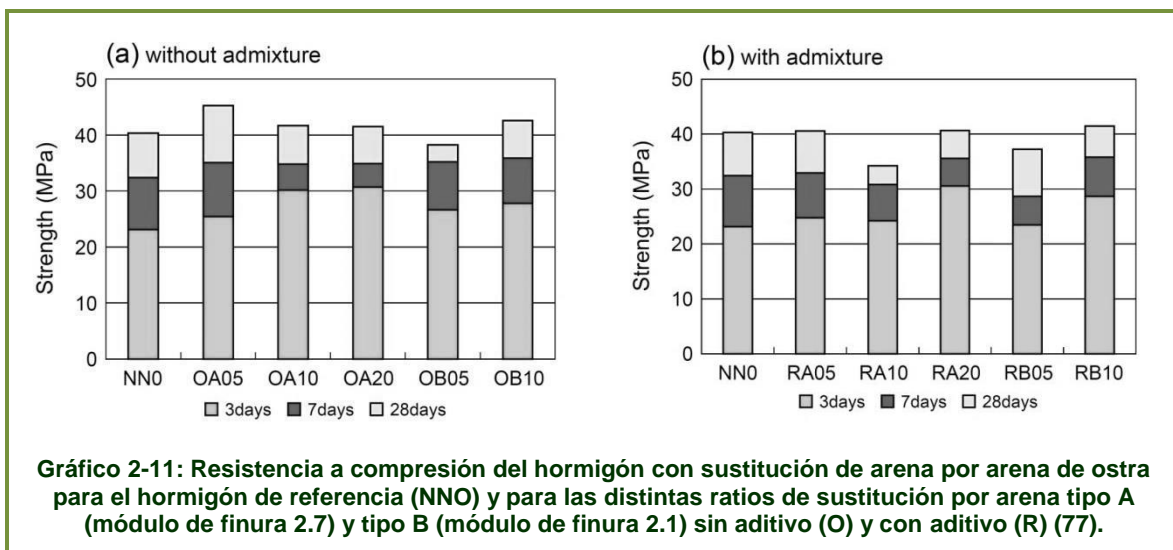


Her-Yung et al. (81) obtuvo valores superiores a los del mortero sin sustitución (hasta un 14% superiores para la ratio 10% (arena+CV)), pero estos incrementos de resistencia se atribuyen exclusivamente a las cenizas volantes, que contrarrestan la reducción de la

misma debida a la presencia de la arena de concha. Hyunsuk Yoon et al. (80) también añadió cenizas volantes a sus morteros con concha para contrarrestar en parte las reducciones de resistencia (Gráfico 2-10).



La resistencia a compresión del hormigón con parte de su arena sustituida crece más rápido que la de un hormigón con arena 100% convencional, efecto que se atribuye a que la concha absorbe más agua. Sin embargo, a medio plazo (28 días) las resistencias obtenidas son similares en el caso de hormigón sin arena de concha y en el de hormigón con sustitución hasta el 20% (Gráfico 2-11). A largo plazo (1 año), los valores obtenidos son inferiores cuanto mayor es la ratio de sustitución (Tabla 2-23).



Ratio de sustitución (%)	Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)	Resistencia a compresión a año (MPa)
0	29.3	40.6
10	29.1	39.2
20	29.6	37.2

Tabla 2-23: Resistencia a compresión del hormigón con aditivo para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de ostra a las edades de 28 días y 1 año (78)

2.5.4.4 Otras propiedades

El estudio llevado a cabo por Eun-Ik Yang et al. (78) sobre hormigones con sustitución de arena natural por arena de ostra, para ratios de sustituciones elevadas, arroja las siguientes conclusiones:

- La porosidad del hormigón disminuye y en consecuencia la densidad aumenta
- La resistencia a la helada mejora
- La permeabilidad se reduce hasta un 80%
- Los tiempos de fraguado y la resistencia a tracción apenas varían
- El módulo elástico disminuye debido a que el propio de la concha es inferior al del árido convencional (a los 28 días, para una sustitución del 20%, el módulo elástico desciende un 10%)
- La retracción aumenta (un 7% para la ratio de sustitución del 10% y un 28% para la ratio 20%) debido a la reducción del módulo elástico
- La carbonatación del hormigón y su resistencia química (ataque con ácido sulfúrico y ácido clorhídrico) no varían.

En el caso de los morteros con sustitución de arena de ostra y cenizas volantes (81), se detecta que los tiempos de fraguado aumentan sensiblemente (Gráfico 2-12), mientras la porosidad (Gráfico 2-13) y la retracción (Gráfico 2-14) disminuyen, y apenas varía la resistencia química al ataque de sulfatos (Gráfico 2-15). Sin embargo, se atribuyen estos resultados a la acción de las cenizas, que contrarrestan en todos los casos el efecto adverso que producen las partículas de concha.

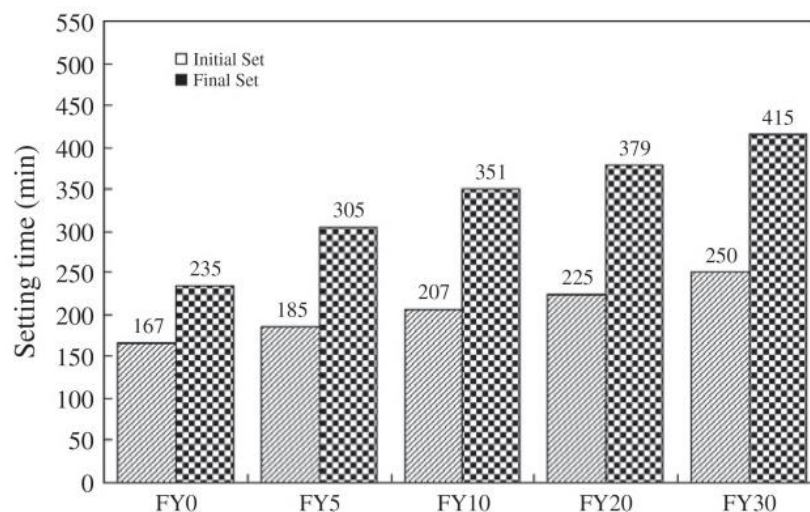
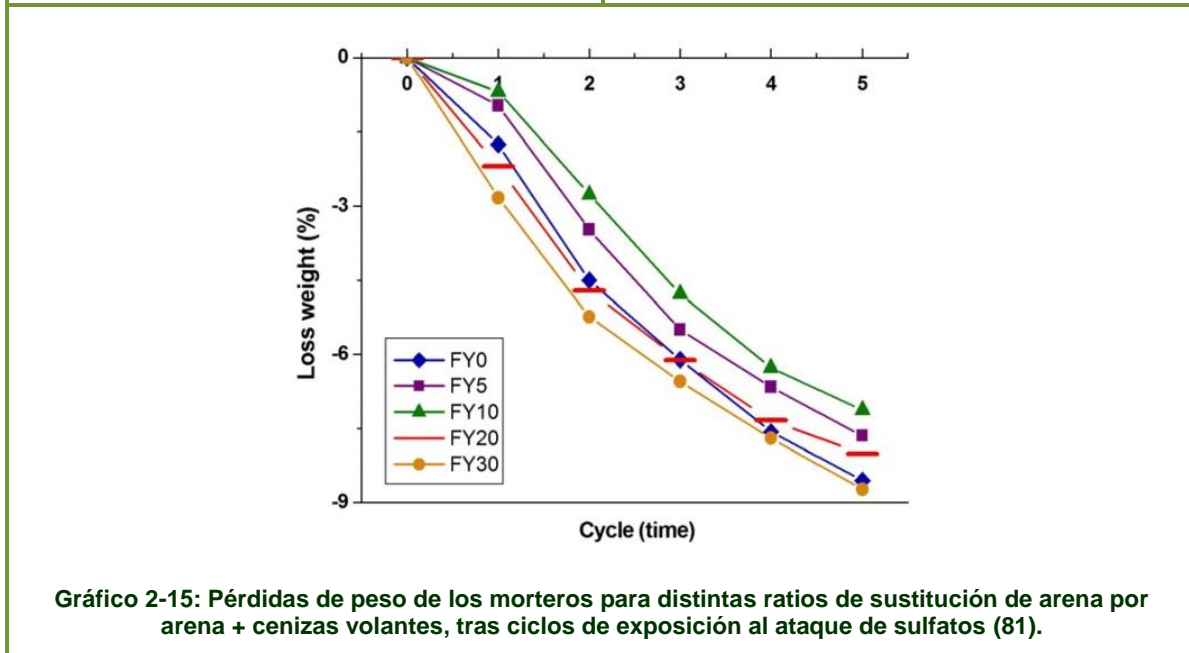
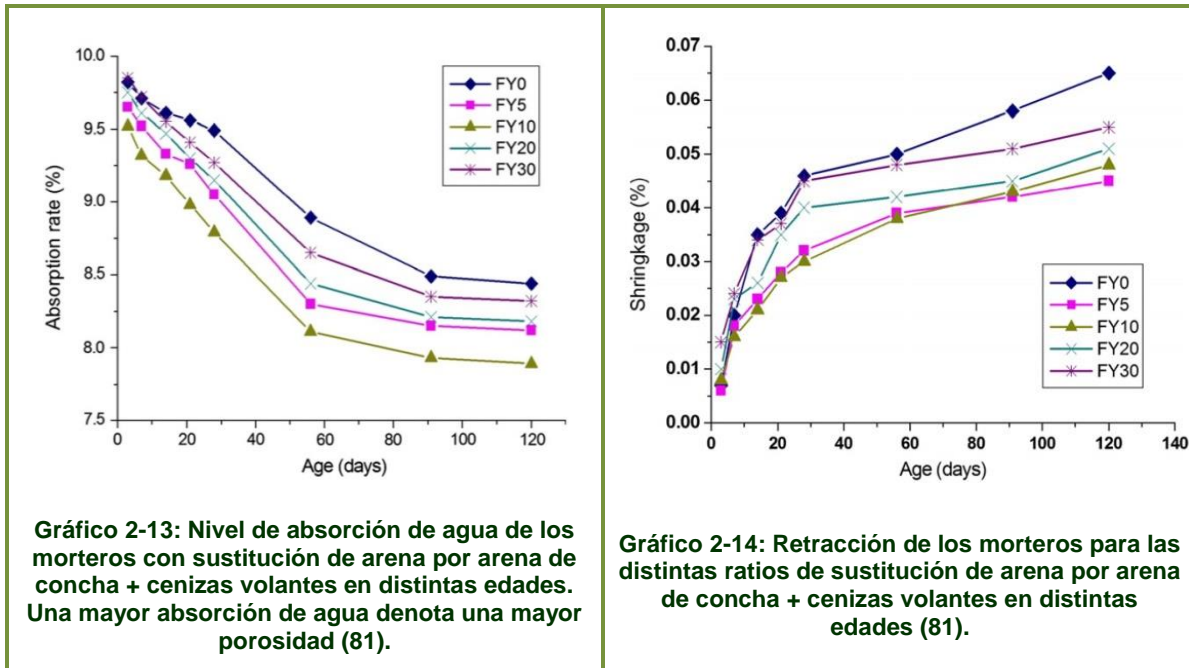


Gráfico 2-12: Tiempos de fraguado inicial y final para las distintas ratios de sustitución de arena por arena de ostra + cenizas volantes (81).



2.5.5 Morteros y pastas con sustitución de filler y/o conglomerante

2.5.5.1 Trabajabilidad

La sustitución de filler por polvo de concha produce un descenso de la trabajabilidad en los morteros (Tabla 2-24) (82).

Por otra parte, si se sustituye una fracción del contenido de cemento, los morteros presentan una mayor trabajabilidad, con influencia variable según el tipo de concha empleada.

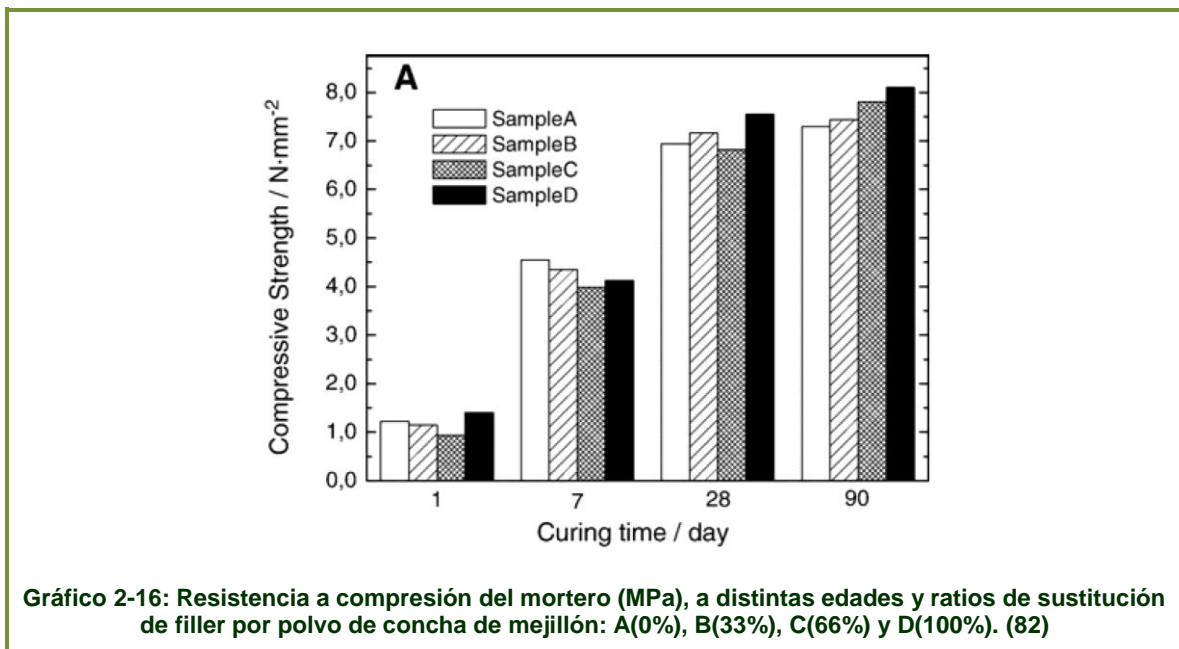
Ratio de sustitución (%)	0	33	66	100
Consistencia (mm)	155	157	157	162

Tabla 2-24: Consistencia de los morteros con sustitución de filler por polvo de mejillón (82).

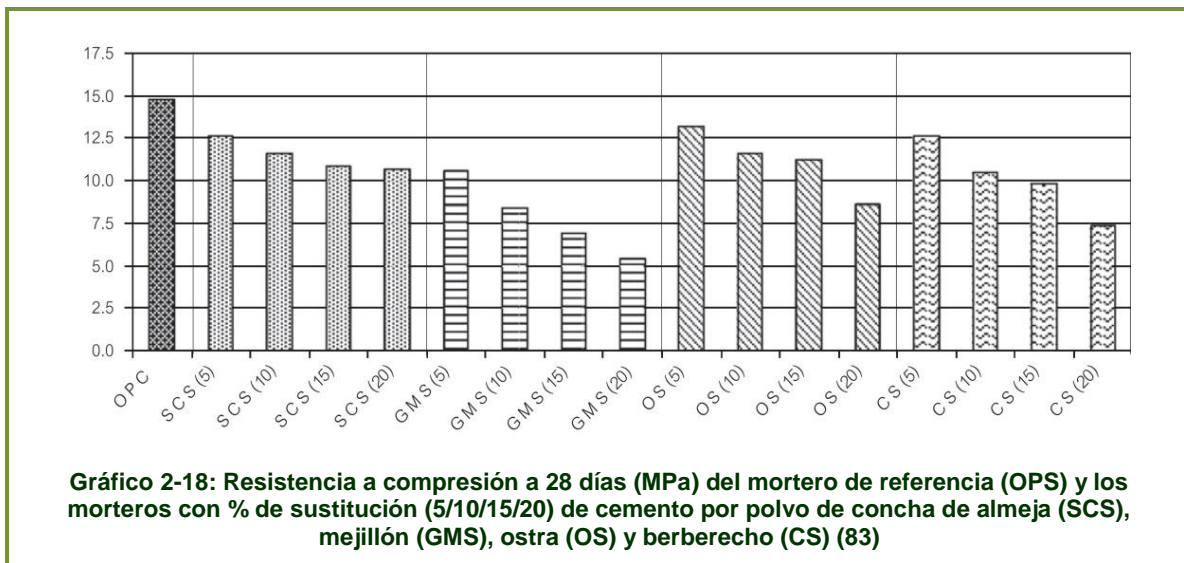
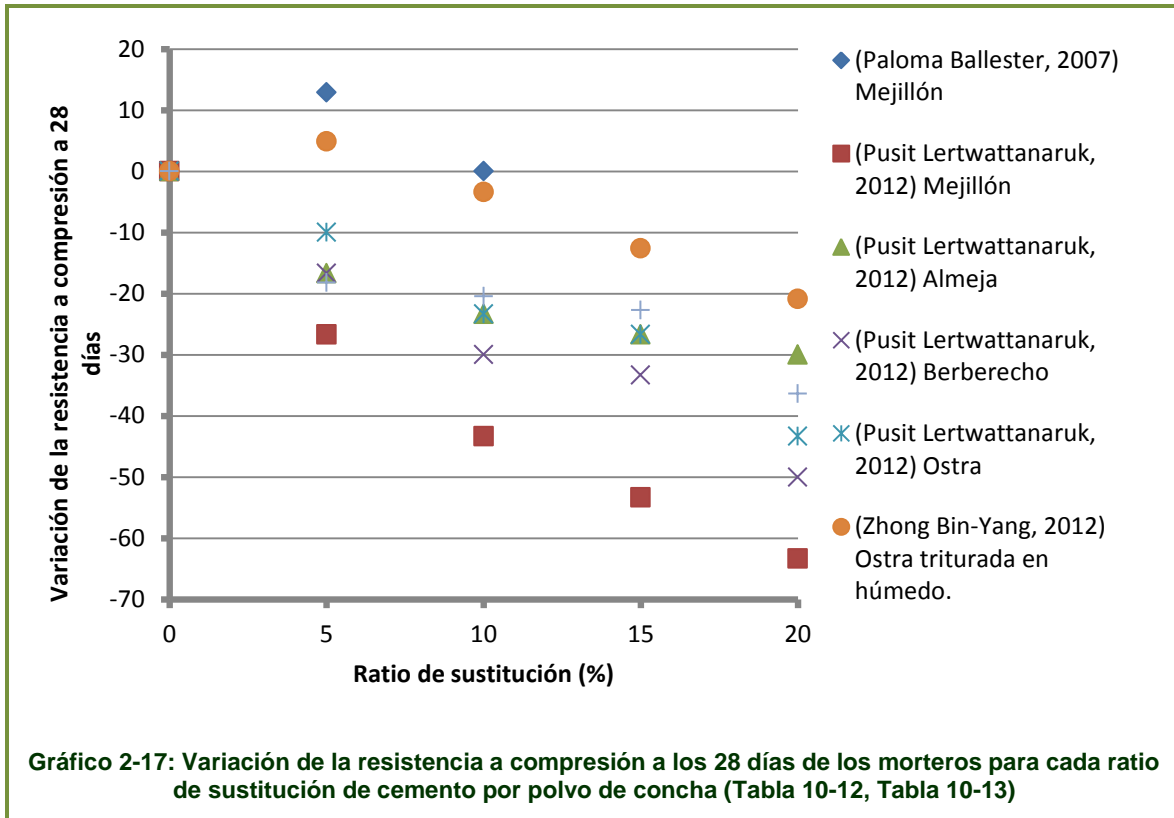
La trabajabilidad de los morteros está directamente relacionada con la cantidad de agua, de forma que el hecho de emplear concha de ostra en la fabricación de morteros supone una mayor demanda de agua que en los demás tipos de concha, debido principalmente a su mayor superficie específica (83).

2.5.5.2 Resistencia a compresión

La sustitución de filler por polvo de concha de mejillón incrementa las resistencias a compresión en los morteros (Gráfico 2-16) debido a la forma de las partículas de mejillón en aguja, que al combinarse con fracciones más redondeadas de árido convencional generan un entramado que rellena mejor los poros, obteniendo un mortero más compacto (82).



Sustituyendo todo el filler por polvo de mejillón y una parte del cemento se mantienen e incluso se mejoran las resistencias (82). Sin embargo Pusit Lertwattanakul et al. (83) y Zhong Bin-Yang (84) obtuvieron menores resistencias a compresión sustituyendo porcentajes de cemento por polvo de los diferentes tipos de concha utilizados (Gráfico 2-17). Tales reducciones se atribuyen al hecho de que el polvo de concha es un elemento inerte, que en ningún caso puede ejercer la misma función que el cemento (83). En cuanto a los distintos tipos de concha empleados, el mejillón provoca resistencias menores al ser sus partículas más grandes y generarse con ellas poros mayores (Gráfico 2-18). En el caso de las resistencias el polvo de ostra muestra menores reducciones al ser obtenido por trituración en húmedo porque es más fino y homogéneo que el obtenido por trituración en seco (84).



En el caso de la pasta de cal con sustitución de cal por polvo de concha de ostra y cenizas volantes, se obtuvieron valores de resistencia a compresión más bajos cuanto mayor fue la cantidad de concha empleada (Gráfico 2-19). Este resultado indica que no existe reacción puzolánica entre el polvo de ostra y las cenizas, y que por lo tanto éstas solo contribuyen a aumentar la resistencia de la pasta cuando interaccionan con la cal (85).

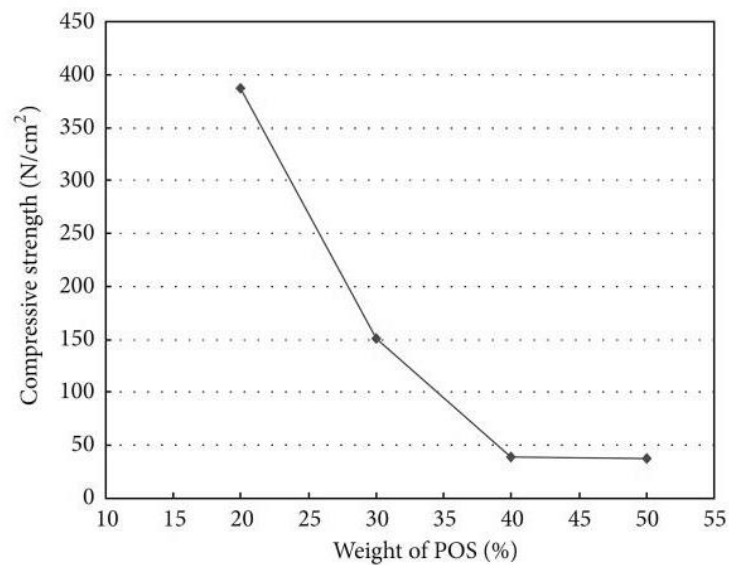


Gráfico 2-19: Resistencia a compresión (N/cm²) de la pasta de cal para las distintas ratios de sustitución de la misma por polvo de concha de ostra (85).

2.5.5.3 Otras propiedades

Al igual que los morteros con sustitución de arena, la resistencia a flexión sigue la misma tendencia que la de compresión (Gráfico 2-20, Gráfico 2-21) (82) (84).

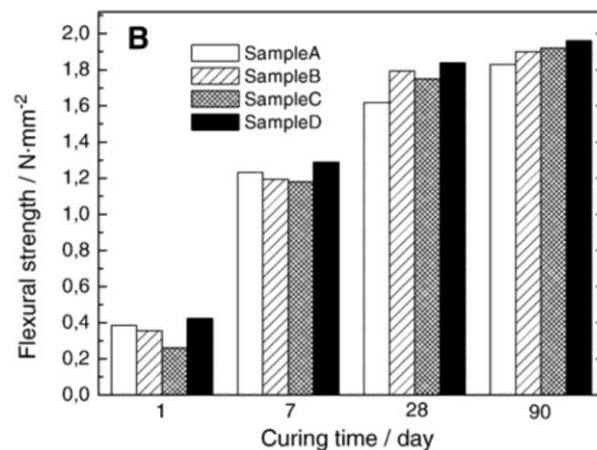


Gráfico 2-20: Resistencia a flexión de los morteros con sustitución de filler por polvo de concha de mejillón para distintas edades (82)

Respecto a otras propiedades, se constataron ligeros incrementos en los tiempos de fraguado al sustituir una parte del cemento por polvo de concha (Gráfico 2-22); menor conductividad térmica, especialmente con el mejillón, ya que al ser sus partículas más grandes se generan mayores poros entre ellas (Gráfico 2-23); menores deformaciones por retracción al emplear concha de ostra o almeja y superiores si la sustitución de filler se realiza con polvo de berberecho o mejillón (83).

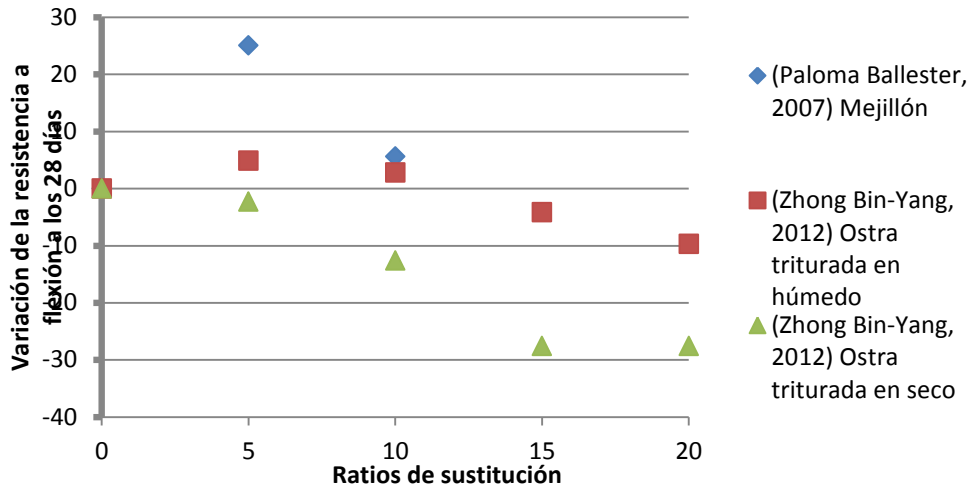


Gráfico 2-21: Variación de la resistencia a flexión en los morteros para las distintas ratios de sustitución de cemento por polvo de concha (Tabla 10-14, Tabla 10-15).

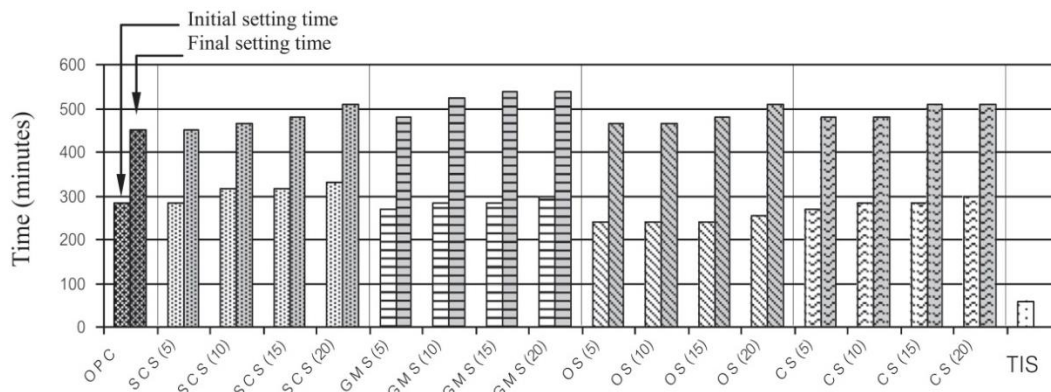


Gráfico 2-22: Tiempos de fraguado inicial y final para el mortero de referencia (OPC) y para las distintas ratios de sustitución de cemento por polvo de concha de almeja (SCS), mejillón (GMS), ostra (OS) y berberecho (CS). (83)

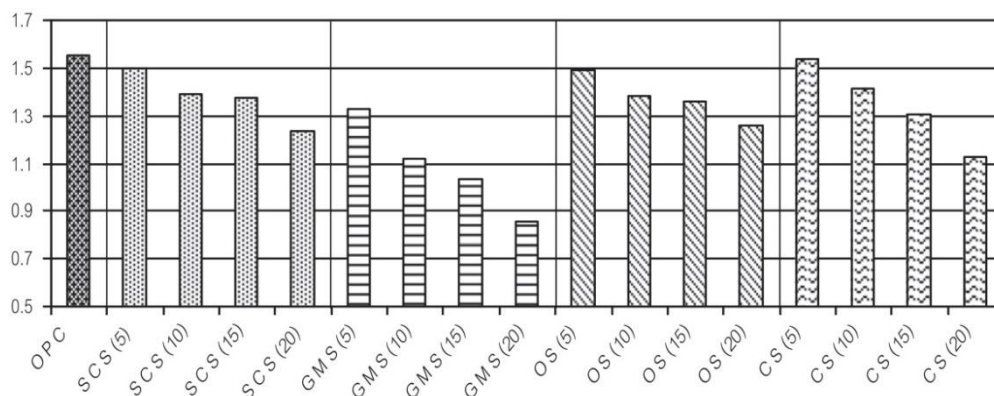


Gráfico 2-23: Conductividad térmica en W/m*K del mortero de referencia (OPS) y de los morteros con ratio de sustitución (5/10/15/20) de cemento por polvo de concha de almeja (SCS), mejillón (GMS), ostra (OS) y berberecho (CS). (83)

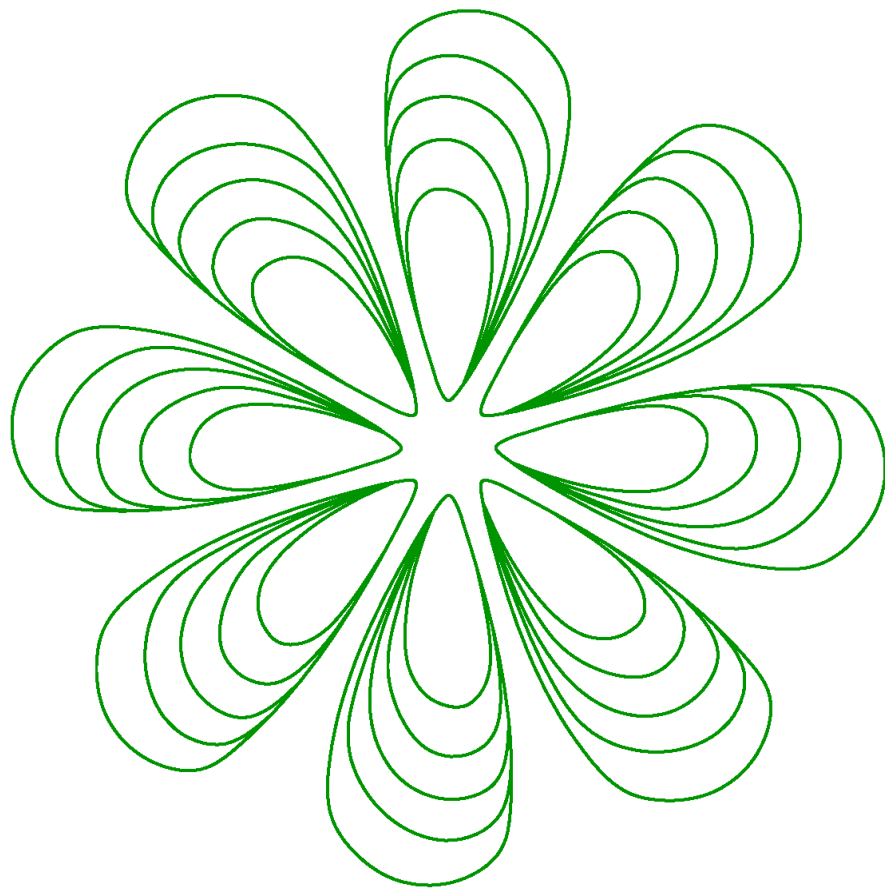
Rodríguez Álvaro, Roberto

Por último, se constatan mayores fuerzas de adhesión en morteros con sustitución de filler por concha de mejillón, tal como se muestra en la Tabla 2-25 (82).

Ratio de sustitución (%)	0	33	66	100
Fuerza de adhesión (N/mm ²)	0.32	0.43	0.44	0.47

Tabla 2-25: Fuerza de adhesión de los morteros para las distintas ratios de sustitución de filler por polvo de concha de mejillón (82)

3 Caracterización del material



3 Caracterización del material

3.1 Introducción

A continuación se describen las características de los tres componentes básicos de los morteros: ligantes, agua y áridos. Se realizan morteros de cemento, cal aérea en pasta y barro.

3.2 Ligantes

3.2.1 Cemento

El cemento utilizado es un CEM II/A-M(V-L) 42.5R [cemento portland con adiciones (CEM II) mixto (M) con un 6-20% (A-M) de cenizas volantes silíceas (S) y caliza (L), y un 0-5% de componentes minoritarios, de clase resistente 42.5 y de alta resistencia inicial (R)] (87) (Imagen 3-1) suministrado por Rodiñas Técnicos S.L. Las características de este cemento se recogen en la Tabla 3-1 (los valores escritos en cursiva son los especificados por la instrucción para la recepción de cementos RC-08 (87)).

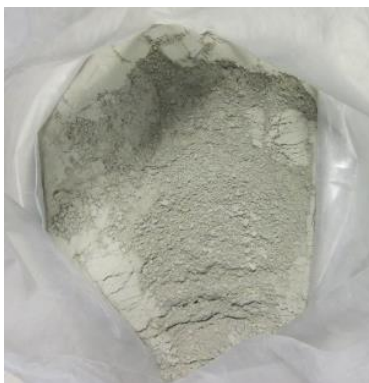


Imagen 3-1: Cemento utilizado: CEM II/A-M(V-L) 42.5R

Propiedades mecánicas y físicas			
Resistencia inicial a 2 días (MPa)	Resistencia nominal a los 28 días (MPa)	Inicio de fraguado (min)	Fin de fraguado (h)
UNE-EN 169-1	UNE-EN 169-1	UNE-EN 196-3	UNE-EN 196-3
<i>≥20</i>	<i>≥42.5 & ≤62.5</i>	<i>≥60</i>	<i>≤12</i>
Densidad aparente de conjunto (kg/dm ³)	Densidad de partícula (kg/dm ³)	Calor de hidratación a 41h (J/s)	Calor de hidratación a 7 días (J/s)
UNE-EN 1097-3	UNE-EN 1097-6	UNE-EN 196-9	UNE-EN 196-8
<i>1.03</i>	<i>3.01</i>	<i>≤270</i>	<i>≤270</i>
Expansión máxima (mm)	Pérdida por deshidratación parcial del yeso a >100°C (%)	Pérdida por calcinación en 3h a 900°C (%)	
UNE-EN 196-3	H ₂ O liberado por deshidratación parcial del yeso	H ₂ O liberado por deshidratación completa del yeso	
<i>≤10</i>	<i>1.4</i>	<i>4.0</i>	

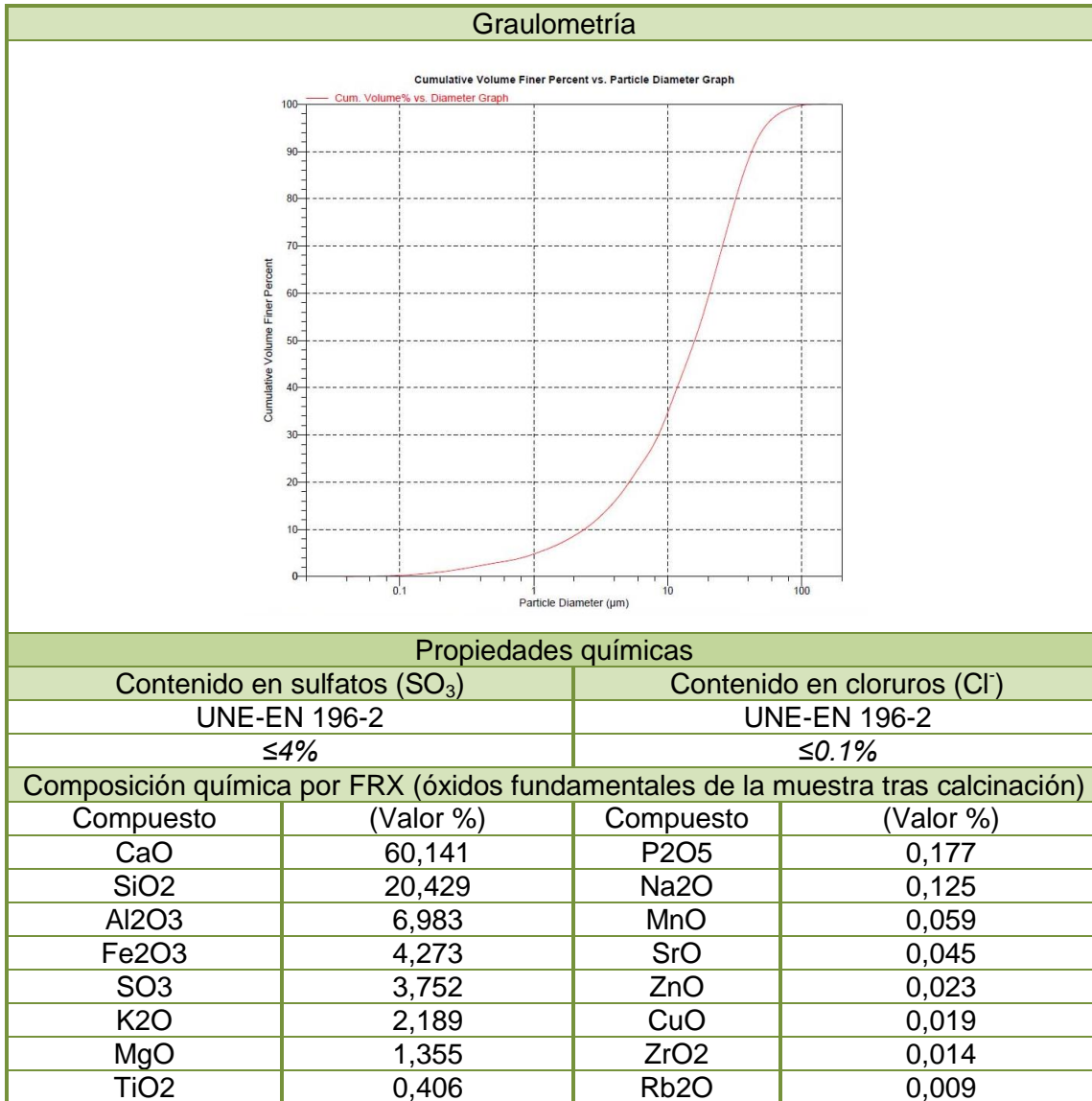


Tabla 3-1: Propiedades del cemento

3.2.2 Cal aérea en pasta

La cal utilizada es del tipo EN 459-1 CL 90-S PL [cal aérea cálcica (CL) con más de un 90% de contenido en óxidos de calcio y magnesio (90) hidratada y suministrada en pasta (S_PL) (hidróxido de calcio sin ninguna adición hidráulica ni puzolánica producido por apagado de cal viva)] (29) Imagen 3-2), suministrada por la empresa Comcal. Se almacena en cubos y sumergida bajo una capa de agua (Imagen 3-3), que se utiliza como agua de amasado.

Las características de la cal se recogen la Tabla 3-2 (los valores escritos en cursiva son los característicos especificados por la norma UNE-EN 459-1 (29)).

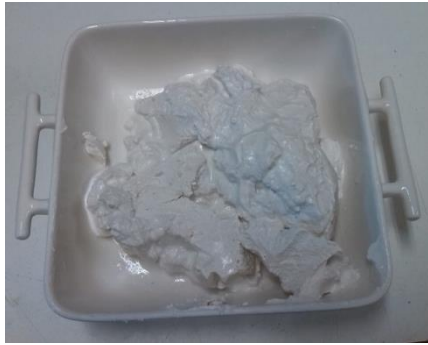


Imagen 3-2: Cal en pasta escurrida sobre cápsula

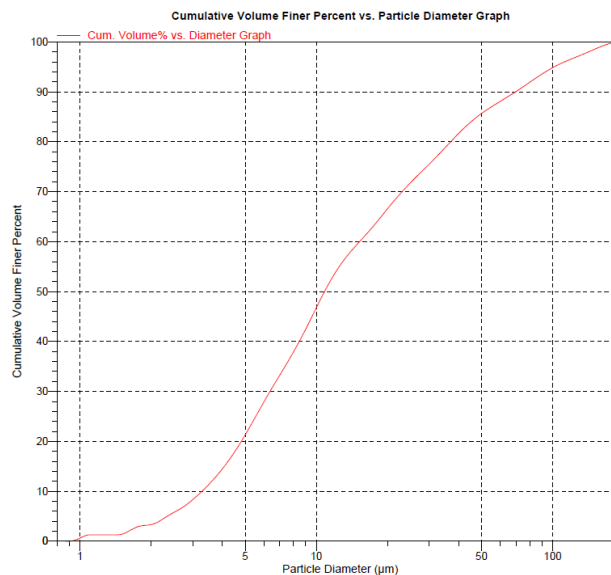


Imagen 3-3: Cal en pasta almacenada en cubo sumergida en agua

Propiedades mecánicas y físicas

Estabilidad	Densidad de partícula (kg/dm ³)	Humedad de la muestra (%)	Pérdida por calcinación en 3h a 900°C (%)
UNE EN 459-2	UNE EN 1097-6	UNE EN 1097-5	CO ₂ liberado por descomposición del CaCO ₃
Cumple	2.25	67.3	23.4

Granulometría



Propiedades químicas

% de (CaO + MgO)	% de MgO	% de CO ₂	% de SO ₃
UNE EN 459-2	UNE EN 459-2	UNE EN 459-2	UNE EN 459-2
≥90	≤5%	≤4%	≤2%

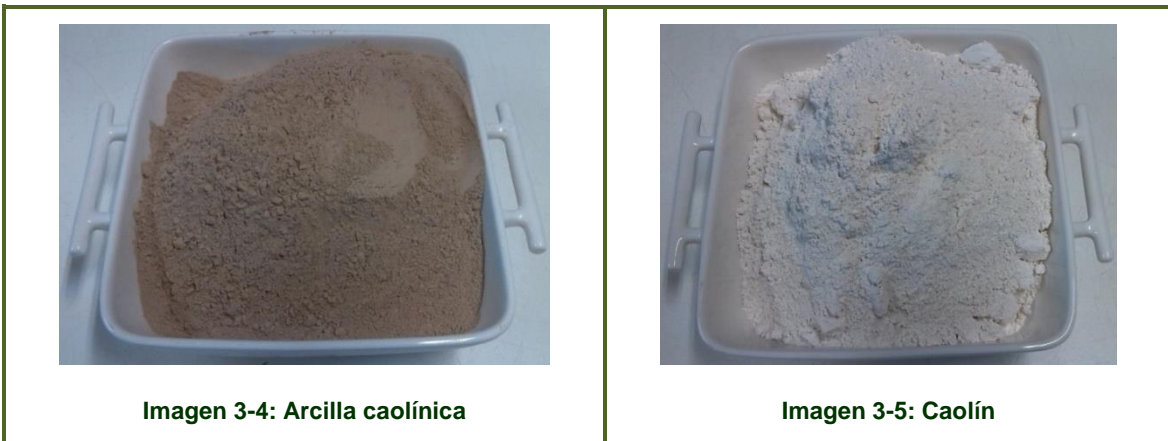
Composición química por FRX (óxidos fundamentales de la muestra tras calcinación)

Compuesto	(Valor %)	Compuesto	(Valor %)
CaO	95,503	Fe ₂ O ₃	0,248
MgO	1,568	K ₂ O	0,068
SiO ₂	1,202	SrO	0,048
Al ₂ O ₃	0,732	CuO	0,017
SO ₃	0,614		

Tabla 3-2: Propiedades de la cal

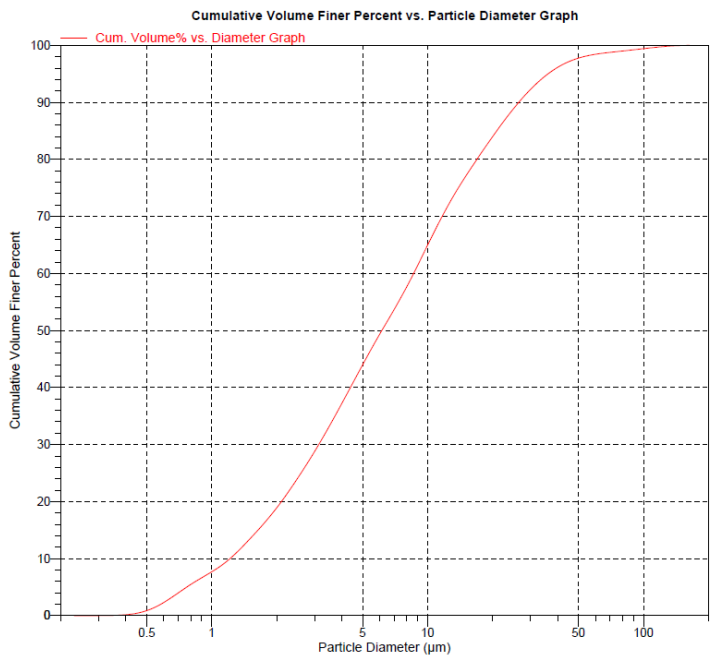
3.2.3 Barro: Minerales arcillosos

La arcilla utilizada se corresponde con la fracción granulométrica inferior al tamaño de partícula 2µm de dos minerales ligeramente diferentes: una arcilla caolínica (Imagen 3-4) y caolín (Imagen 3-5). La arcilla caolínica fue suministrada por la empresa Epifanio Campo S.L., mientras que el caolín procede de Caolines de Vimianzo S.A.U. Ambos materiales contienen un 20% de partículas de arcilla que actuará como ligante y un 80% de limos que actúan como filler en los morteros (ver apartado 2.3.5). Las principales características de estos materiales se recogen en la Tabla 3-3 y Tabla 3-4.



Propiedades mecánicas y físicas			
Densidad aparente de conjunto (kg/dm ³)	Densidad de partícula (kg/dm ³)	Humedad de la muestra (%)	Pérdida por calcinación en 3h a 900°C (%)
1097-3	1097-6	1097-5	
0.68	2.36	7.4	11.5

Granulometría

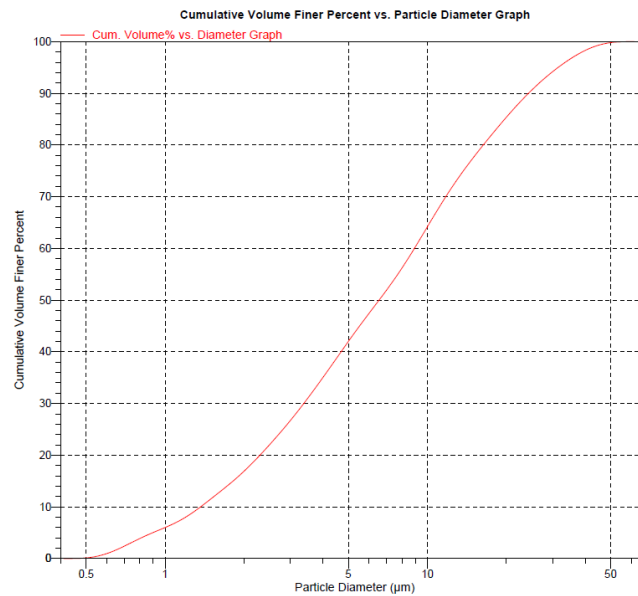


Propiedades químicas			
Composición química por FRX (óxidos fundamentales de la muestra tras calcinación)			
Compuesto	(Valor %)	Compuesto	(Valor %)
SiO ₂	55,630	Na ₂ O	0,024
Al ₂ O ₃	35,350	MnO	0,018
Fe ₂ O ₃	4,419	ZnO	0,017
TiO ₂	1,926	Cr ₂ O ₃	0,015
K ₂ O	1,473	Rb ₂ O	0,012
SO ₃	0,487	Ga ₂ O ₃	0,008
MgO	0,317	CuO	0,007
CaO	0,238	SrO	0,006
ZrO ₂	0,050	Y ₂ O ₃	0,003

Tabla 3-3: Propiedades de la arcilla caolínica

Propiedades mecánicas y físicas			
Densidad aparente de conjunto (kg/dm ³)	Densidad de partícula (kg/dm ³)	Humedad de la muestra (%)	Pérdida por calcinación en 3h a 900°C (%)
1097-3	1097-6	1097-5	
0.46	2.64	1.5	13.1

Granulometría



Propiedades químicas			
Composición química por FRX (óxidos fundamentales de la muestra tras calcinación)			
Compuesto	(%)	Compuesto	(%)
SiO ₂	52,862	TiO ₂	0,077
Al ₂ O ₃	42,936	Rb ₂ O	0,036
K ₂ O	2,193	MnO	0,017
Fe ₂ O ₃	1,385	CaO	0,015
P ₂ O ₅	0,185	ZrO ₂	0,007
MgO	0,185	SrO	0,006
SO ₃	0,096		

Tabla 3-4: Propiedades del caolín

3.3 Agua

El agua utilizada en la ejecución de los morteros debe tener una calidad adecuada para que no afecte a las propiedades de éstos. En los morteros de cemento y barro se utilizó el agua potable (88) de los laboratorios de construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad da Coruña, avalada por experiencias anteriores (Imagen 3-6). En los morteros de cal se utilizó el agua en el que ésta se encuentra sumergida dentro de los bidones (ver apartado 2.3.4). Para conseguir la cantidad precisa en cada amasada se hace uso de una pipeta con succionador (Imagen 3-7, Imagen 3-8).

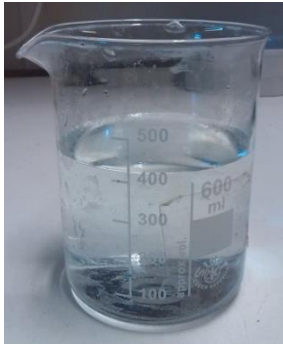


Imagen 3-6: Agua utilizada

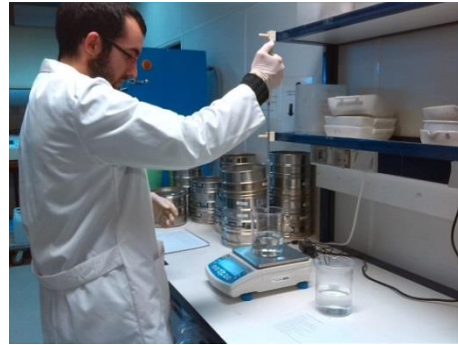


Imagen 3-7: Uso de pipeta con succionador



Imagen 3-8: Pipeta con succionador

3.4 Áridos

Se producen arenas combinadas formadas por arena de mejillón (AM) y arena natural modificada (ANMod) en distintas proporciones, de tal manera que la arena de mejillón represente el 0, 25, 50, 75 y 100% del volumen de partícula de la arena combinada. Estos porcentajes pueden interpretarse como ratios de sustitución de la arena de naturaleza convencional por la arena procedente de concha de mejillón. De esta manera podemos estudiar la evolución de las distintas propiedades del mortero según se aumenta la ratio de sustitución.

Con el objetivo de eliminar la variable de la humedad en los áridos, específica de cada muestra y dependiente en gran parte de las condiciones de almacenamiento, estos se secaron en estufa (Imagen 3-9) a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ (Imagen 3-10) hasta masa constante (masa determinada tras pesadas sucesivas realizadas a intervalos de al menos 1h y que no difieren entre sí en más del 0.1%), previamente a su combinación.

Con el fin de separar las distintas fracciones de arena natural necesarias para la composición de la arena modificada, se tamizaron las muestras de material (Imagen

3-12), obteniendo las distintas cantidades de arena de mejillón y de arena natural. Para ello se emplea una báscula con precisión de centésima de gramo (Imagen 3-11). Las distintas arenas combinadas se guardan en bolsas independientes para cada amasada (Imagen 3-13).



Imagen 3-9: Estufa



Imagen 3-10: Termostato de estufa



Imagen 3-11: Báscula precisión centésima de gramo



Imagen 3-12: Tamizadora

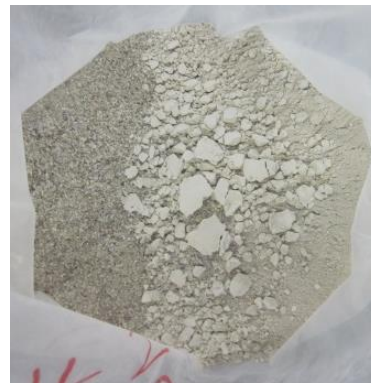


Imagen 3-13: Arena sin mezclar: a la izquierda AMF, en el centro AN0-0.063 y a la derecha AN0.063-0.25

3.4.1 Arena de mejillón (AM)

Se dispone de dos tipos de arena procedente de concha de mejillón: AMF (Imagen 3-14) y AMG (Imagen 3-15), cuyas granulometrías se exponen a continuación (Tabla 3-5, Gráfico 3-1) y (Tabla 3-6, Gráfico 3-2) y cuyos módulos granulométricos son 1.90 y 4.64 respectivamente (calculados según la siguiente fórmula).

$$MG = \frac{\sum_{0.125}^8 (R + A)}{100}$$

Se fijó como objetivo trabajar con una arena de mejillón de tamaño máximo de árido 2mm (valor recomendable para los morteros para revoco de tierra según Gernot Minke (36) y para los revocos de cal y de tierra según Adam Weismann & Kate Bryce (Imagen 3-16) (27)).

Caracterización del material



Imagen 3-14: AMF



Imagen 3-15: AMG

Abertura del tamiz (mm)	PA(%)
16	100
14	100
12,5	100
11,2	100
10	100
8	100
4	99,96
2	99,93
1	99,57
0,5	63,55
0,25	31,08
0,125	15,87
0,063	8,42

Tabla 3-5: Granulometría AMF

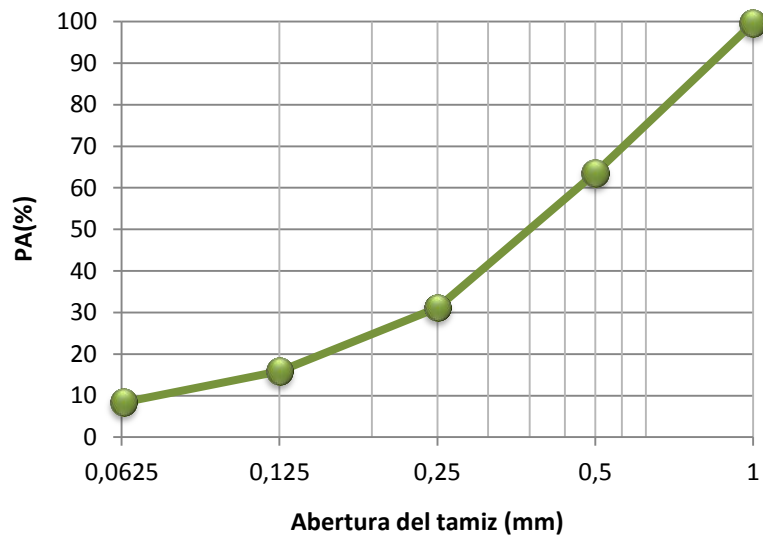


Gráfico 3-1: Granulometría AMF

Abertura del tamiz (mm)	PA(%)
16	100
14	100
12,5	100
11,2	100
10	100
8	100
4	93,81
2	31,21
1	6,04
0,5	1,83
0,25	1,55
0,125	1,36
0,063	1,22

Tabla 3-6: Granulometría AMG

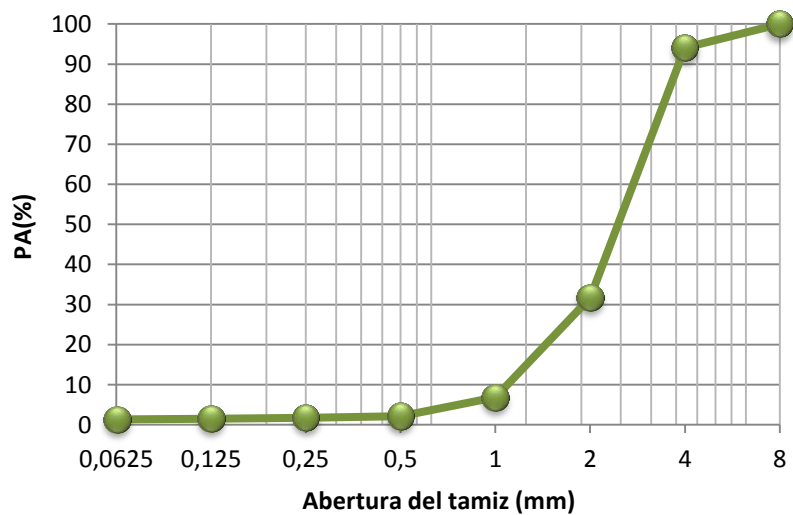


Gráfico 3-2: Granulometría AMG



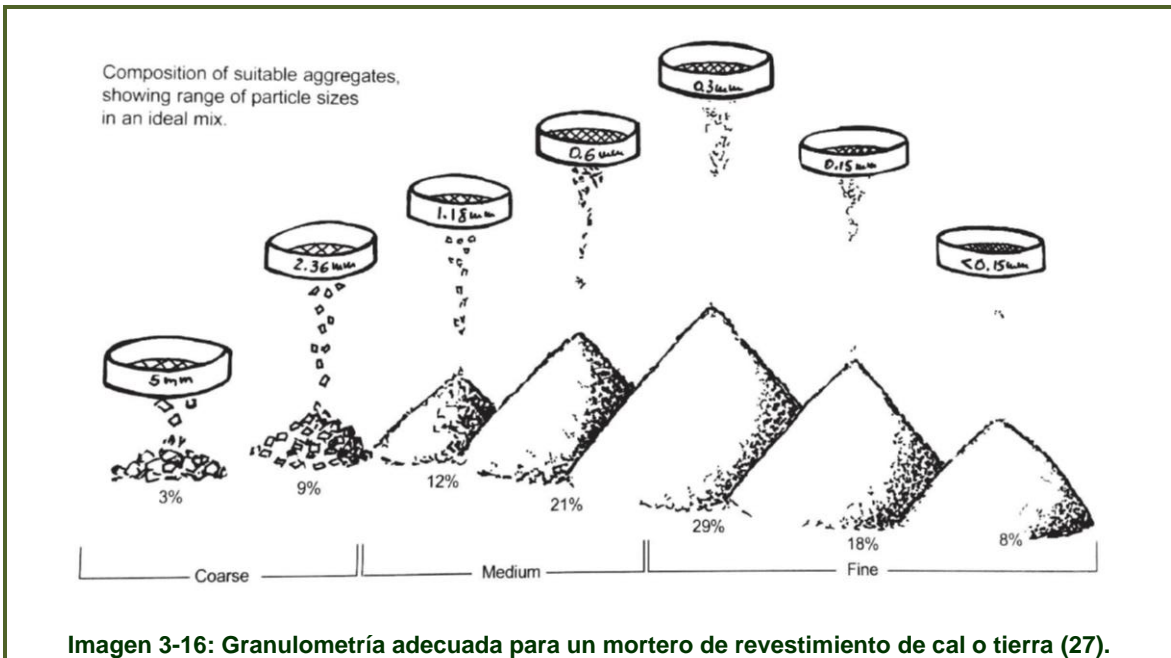
Para conseguir una arena así, se combinó un 11.5% de AMG con un 88.5% de AMF (en masa). Estos porcentajes se obtuvieron de la resolución del siguiente sistema:

$$\begin{aligned} X \times (PA)_{\#2AMF} + Y \times (PA)_{\#2AMG} &= 92 \\ X + Y &= 100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (PA)_{\#2AMF} &= 99.93 \\ (PA)_{\#2AMG} &= 31.21 \end{aligned}$$

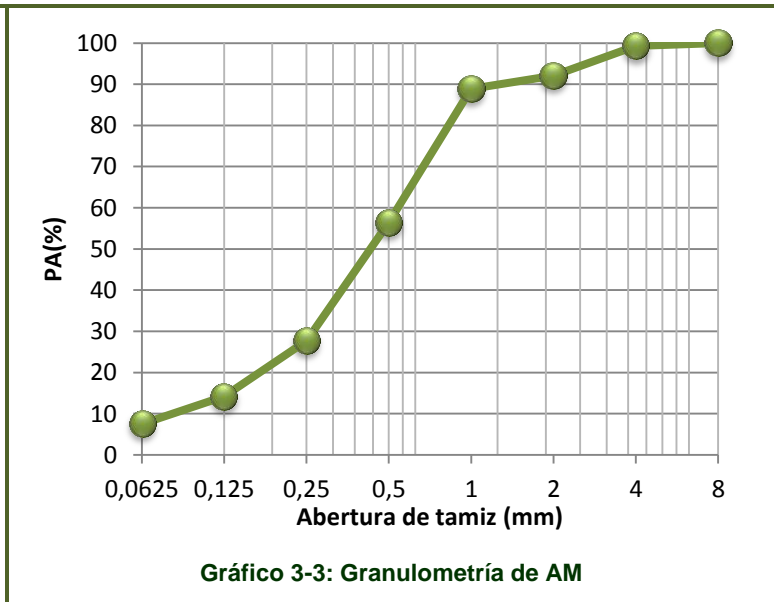
$$\begin{aligned} X &= 88.5 \text{ (\%AMF)} \\ Y &= 11.5 \text{ (\%AMG)} \end{aligned}$$

Dando lugar a la siguiente granulometría (Tabla 3-7, Gráfico 3-3).



Abertura del tamiz (mm)	PA(%)
8	100,00
4	99,29
2	92,08
1	88,90
0,5	56,49
0,25	27,71
0,125	14,21
0,063	7,60

Tabla 3-7: Granulometría de AM

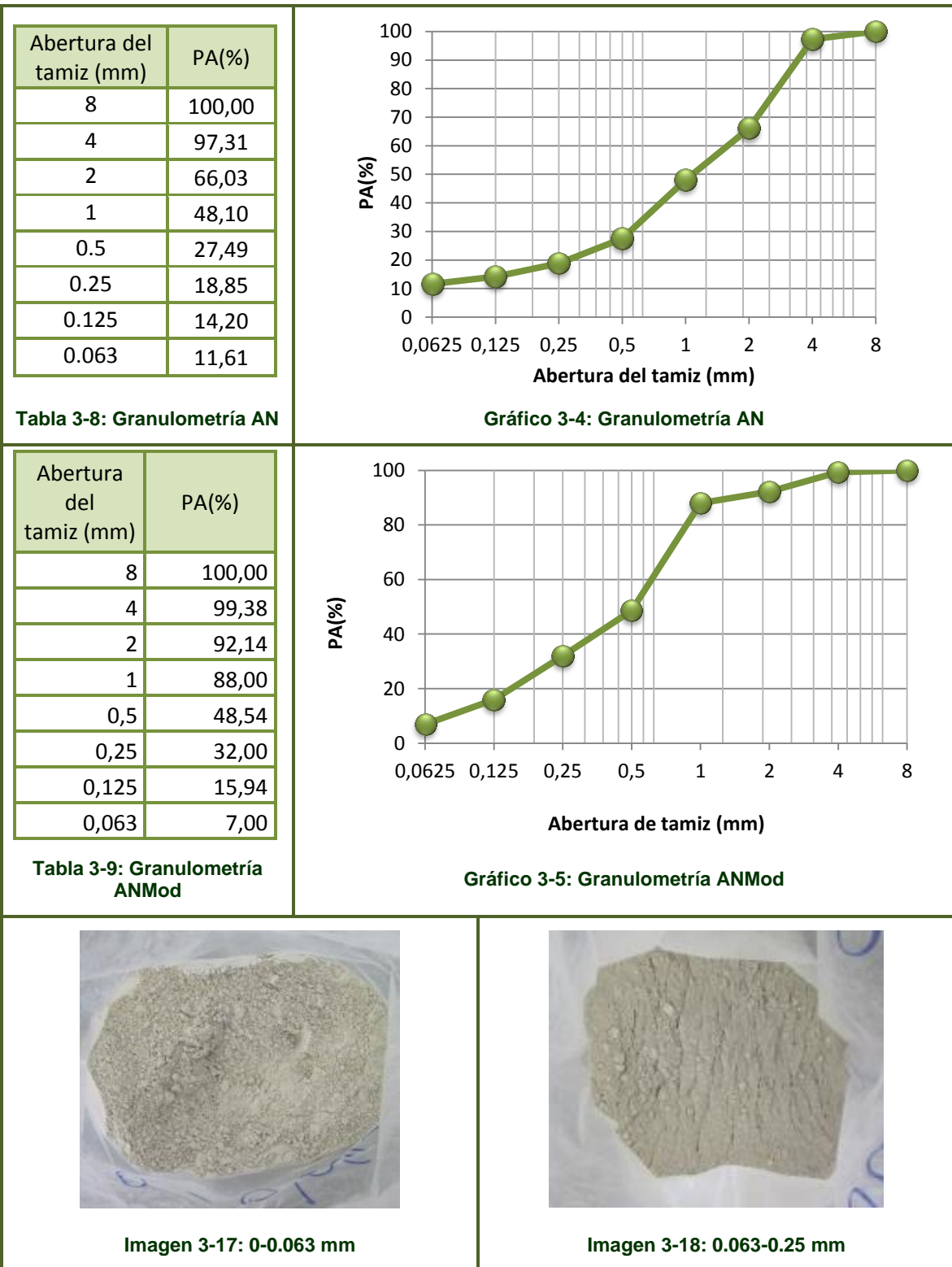


3.4.2 Arena natural modificada (ANMod)

Se emplea arena natural procedente de machaqueo de piedra caliza de la cantera Mezalocha situada en Zaragoza. Su granulometría se recoge en la Tabla 3-8 y el Gráfico 3-4.

Caracterización del material

Con el objetivo de conseguir una arena natural modificada de granulometría similar a la de la arena de mejillón (Tabla 3-9, Gráfico 3-5), se combinaron distintas fracciones de la arena natural original (Imagen 3-17, Imagen 3-18, Imagen 3-19 e Imagen 3-20) en los porcentajes recogidos en la Tabla 3-10.





0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4
7%	25%	56%	12%

Tabla 3-10: Porcentajes en masa de cada una de las fracciones separadas de arena natural para formar combinadas la arena natural modificada.

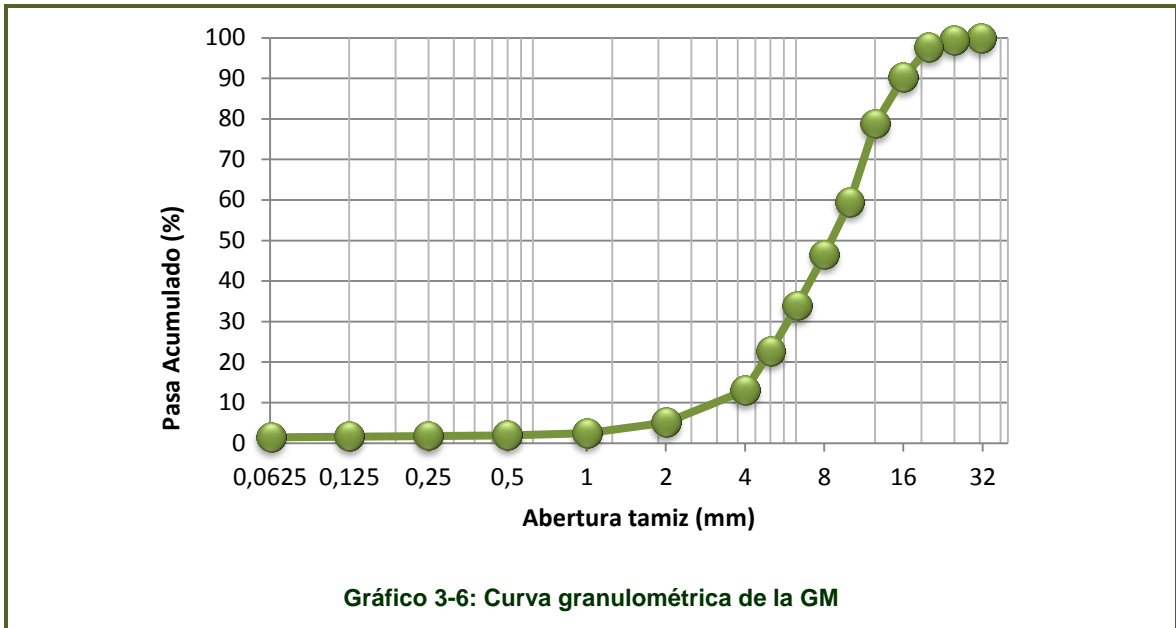
3.5 Caracterización del material procedente de concha de mejillón


El material utilizado es concha de mejillón suministrada en cuatro fracciones granulométricas diferentes por Abonamar S.L., empresa gallega dedicada al reciclaje de conchas marinas. Estas fracciones son las recogidas en la Tabla 3-11, cuya caracterización básica resulta de sus correspondientes granulometrías. Este material se obtiene en distintas fases de un proceso industrial patentado llevado a cabo en las instalaciones de Abonamar S.L. y que se resume en el Esquema 3-1. El consumo de energía del proceso se estima en unos 0.009GJ/t.

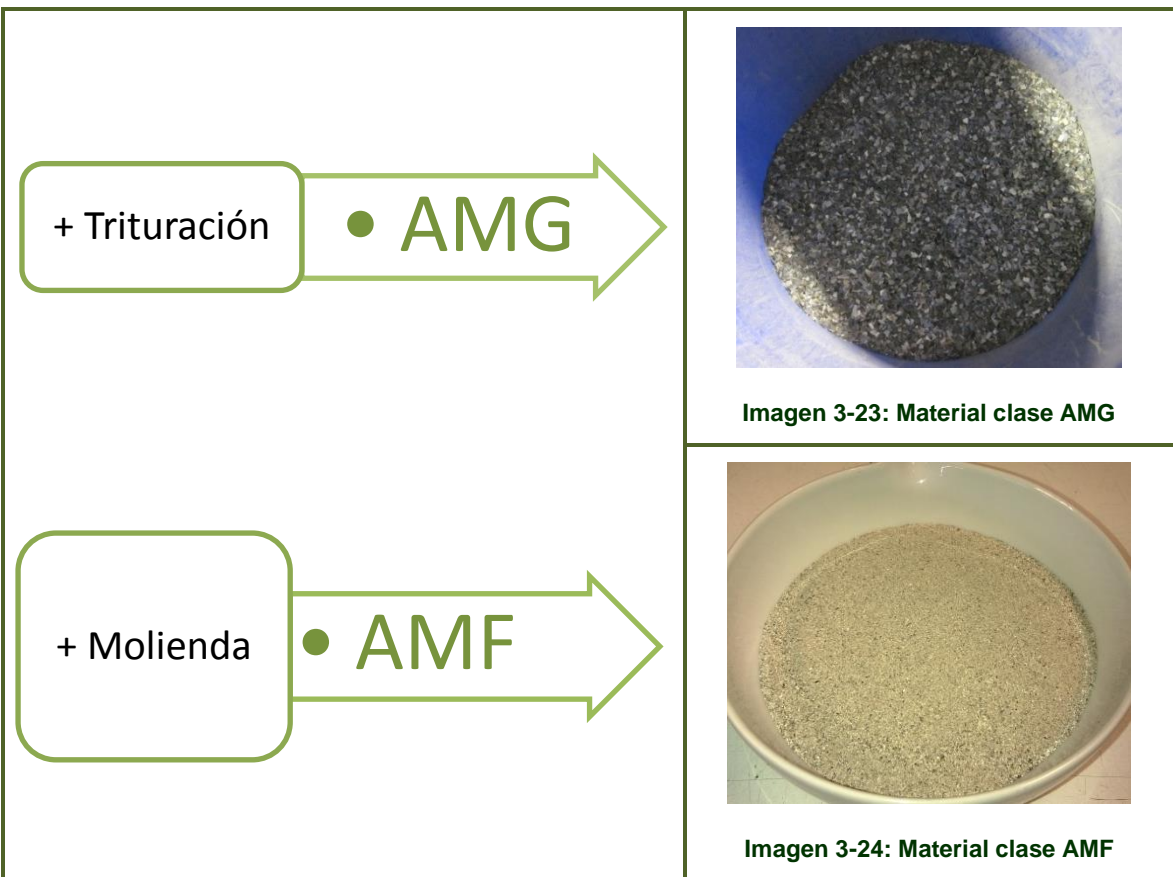
Nombre	Acrónimo	D/d	Granulometría
Concha Entera	CE	-	Gráfico 3-9 y Gráfico 3-10
Gravilla de mejillón	GM	16/4	Gráfico 3-6
Arena de mejillón gruesa	AMG	4	Gráfico 3-7
Arena de mejillón fina	AMF	2	Gráfico 3-8

Tabla 3-11: Caracterización básica de las cuatro fracciones de concha de mejillón.

Las granulometrías de GM, AMG y AMF se realizan según norma UNE-EN 933-1 (89). Cabe destacar que el ensayo de tamizado está concebido y es representativo para partículas con coeficientes de forma bajos por lo que el método no es del todo apropiado para nuestro material, que es predominantemente lajoso y acicular.



<p>Suministro directo del cocedero sin tratamiento</p>	<p>• CE</p>	 <p>Imagen 3-21: Material clase CE</p>
<p>Tratamiento de calor con volteo a 135°C durante 32min*</p>	<p>• GM</p>	 <p>Imagen 3-22: Material clase GM</p>



Esquema 3-1: Proceso de obtención de las distintas clases de material. *El tratamiento térmico aplicado es el exigido según normativa sanitaria para poder ser destinado a pienso avícola.

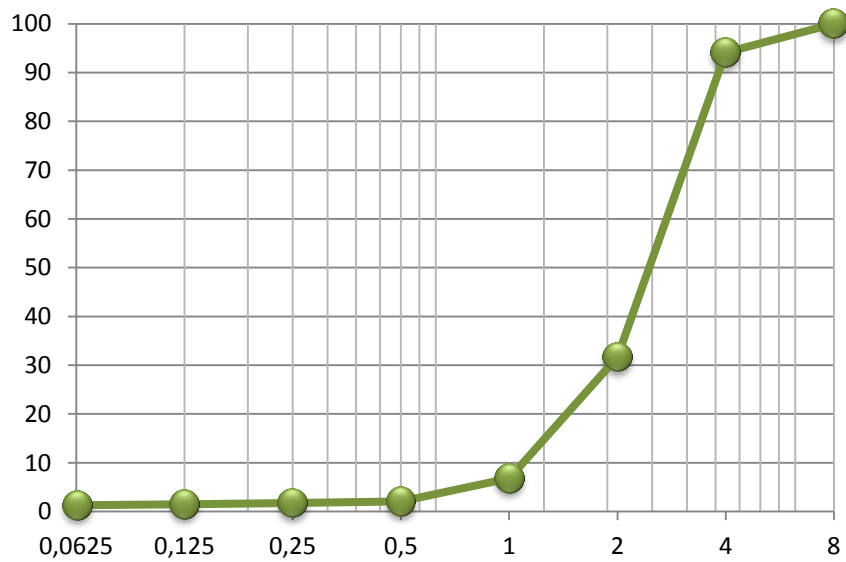
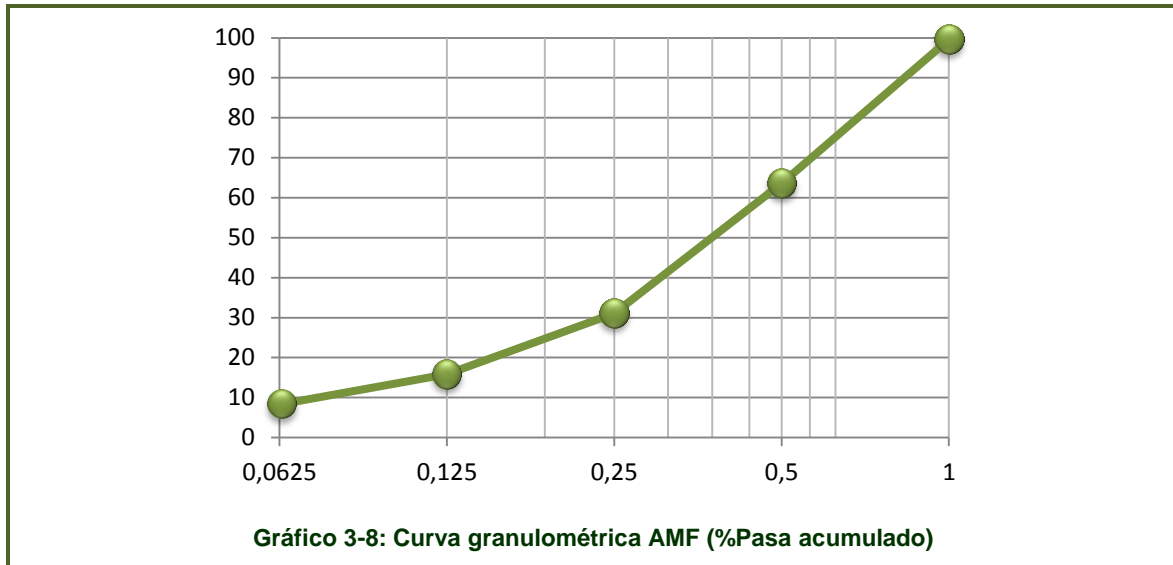


Gráfico 3-7: Curva granulométrica AMG (%Pasa acumulado).

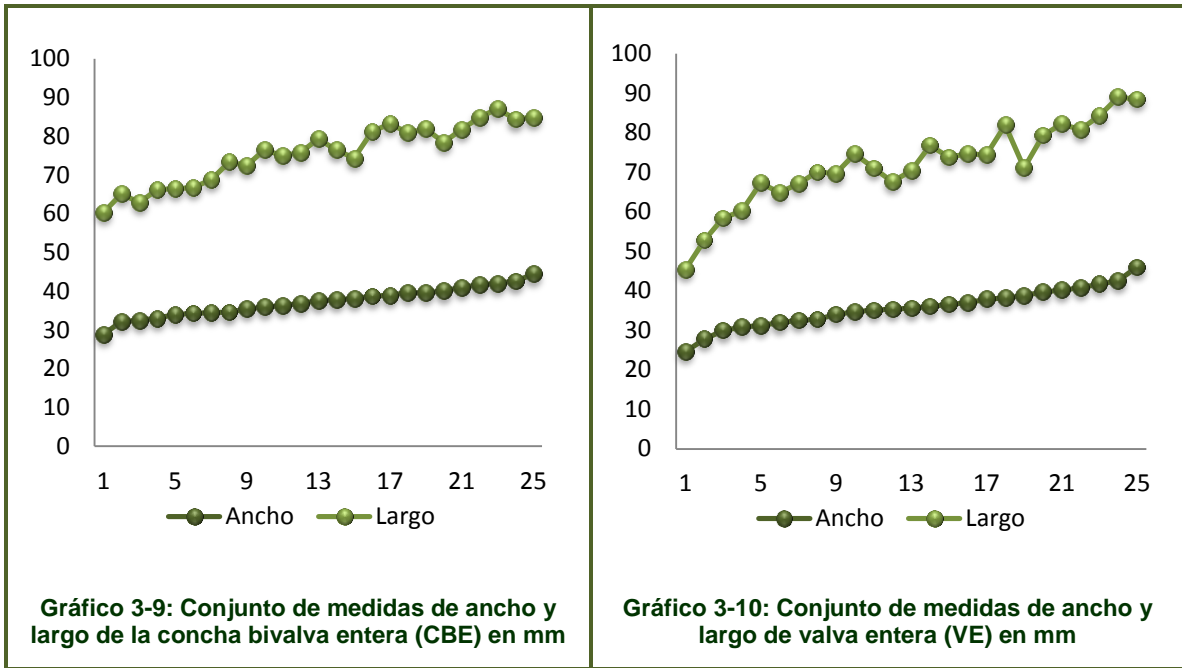




En el caso de la concha entera (CE), debido al gran tamaño de las partículas, se desechó la posibilidad de realizar una granulometría por tamizado y se decidió llevar a cabo un estudio geométrico directo. Este estudio alternativo consistió en medir con un calibre electrónico (Imagen 3-25) el largo y el ancho de 25 partículas de cada una de las subfracciones identificadas. Los datos obtenidos para cada muestra se representan en el Gráfico 3-9, el Gráfico 3-10 y la Tabla 3-12. Adicionalmente, se detalla en el Gráfico 3-11 la granulometría Coulter realizada del filler de la AMF.

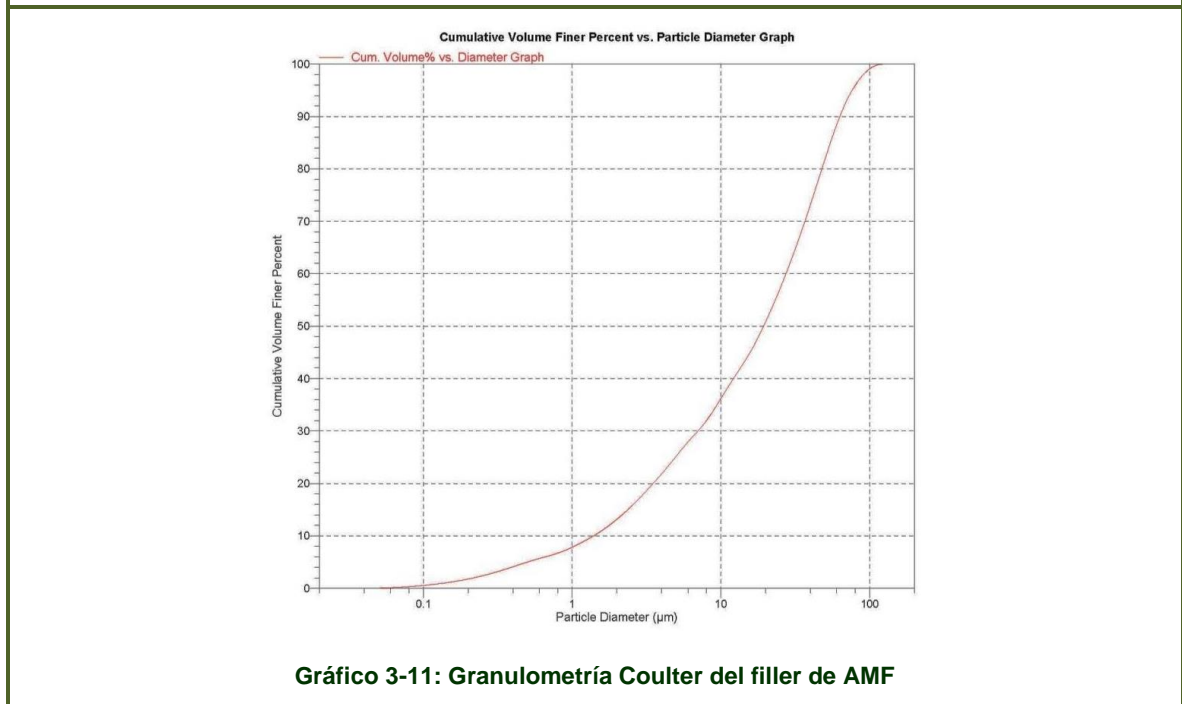
La caracterización del material se divide en tres grandes grupos de ensayos que se corresponden con el estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las cuatro fracciones disponibles. Todos los ensayos se han realizado sobre un mínimo de tres muestras representativas del material con las que obtener un valor medio que proporcione finalmente las diferentes propiedades del material.





	CBE	VE
Largo	75,56	71,88
Ancho	37,22	35,70

Tabla 3-12: Medias obtenidas estudio geométrico CE



3.5.1 Características físicas

3.5.1.1 Clasificación macroscópica

La clasificación macroscópica es necesaria para conocer la proporción de otros elementos distintos a la concha de mejillón que podemos encontrar en nuestro material. Además, aunque las conchas salen del cocedero enteras y con sus dos valvas unidas por la charnela, su manipulación hasta llegar al laboratorio conduce a la separación de muchas en sendas valvas e incluso a la rotura de algunas de éstas. Por lo tanto se realiza el ensayo de clasificación macroscópica según norma UNE-EN 933-11 (90), si bien se omite la separación de las partículas flotantes por estimarse que representan una cantidad muy pequeña. El ensayo sólo puede realizarse para las fracciones GM y CE, pero los resultados pueden considerarse orientativos de la composición macroscópica de las arenas puesto que todas las fracciones se producen a partir de CE. A continuación se especifican cuáles son las subclases en que se clasificó cada fracción (Tabla 3-13 y Tabla 3-14), así como las fotografías de cada una de ellas y las gráficas que representan las proporciones obtenidas en masa.

- **CE: Concha entera**

CBE	Concha bivalva entera. Estado en el que sale el material del cocedero.
CBR	Concha bivalva rota. Las valvas permanecen unidas por la charnela pero presentan fracturas.
VE	Valva entera.
VR	Valva rota.
X	Concha blanca (otras especies diferentes al mejillón como almejas, vieiras o berberechos), lapas, y conchas de mejillón con gran cantidad de lapas adheridas.

Tabla 3-13: Subclases de la fracción CE

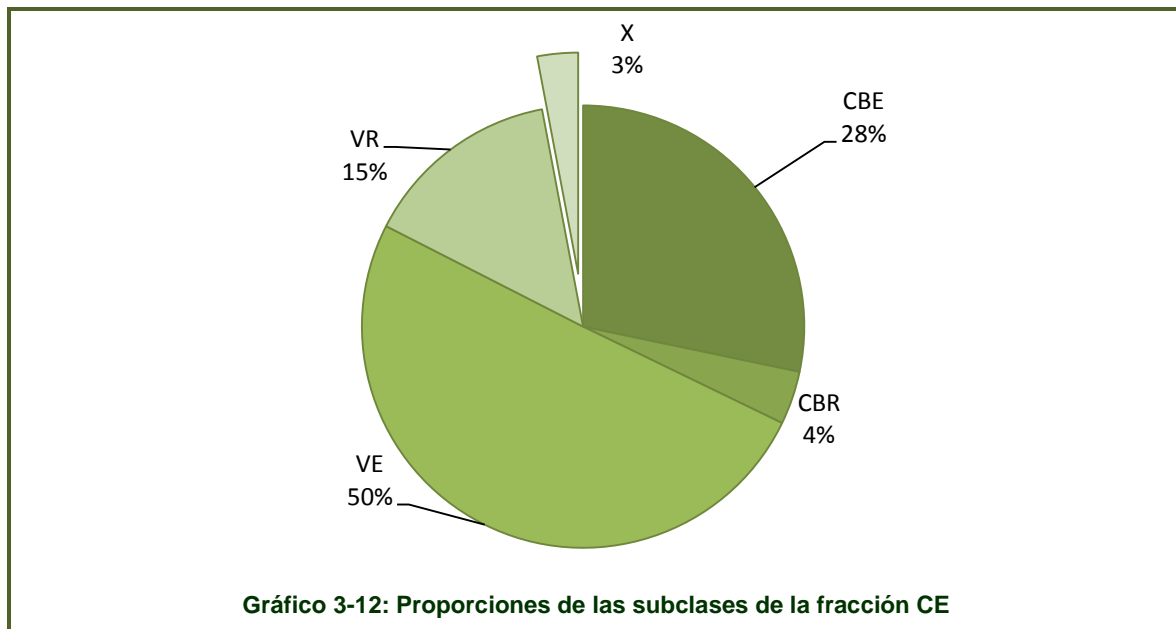




Imagen 3-26: Subclase CBE



Imagen 3-27: Subclase CBR



Imagen 3-28: Subclase CIE



Imagen 3-29: Subclase CIR



Imagen 3-30: Subclase X



Imagen 3-31: Subclases de CE separadas tras clasificación macroscópica de aproximadamente 1000 partículas.

- **GM: gravilla de mejillón**

CM	Concha de mejillón (triturada)
CB	Concha blanca: trozos de conchas de otras especies como almejas, vieiras o berberechos
L	Lapas
P	Pelos y otros restos orgánicos

Tabla 3-14: Subclases de la fracción GM



Imagen 3-32: Concha de mejillón



Imagen 3-33: Concha blanca



Imagen 3-34: Lapas



Imagen 3-35: Pelos y otros restos orgánicos

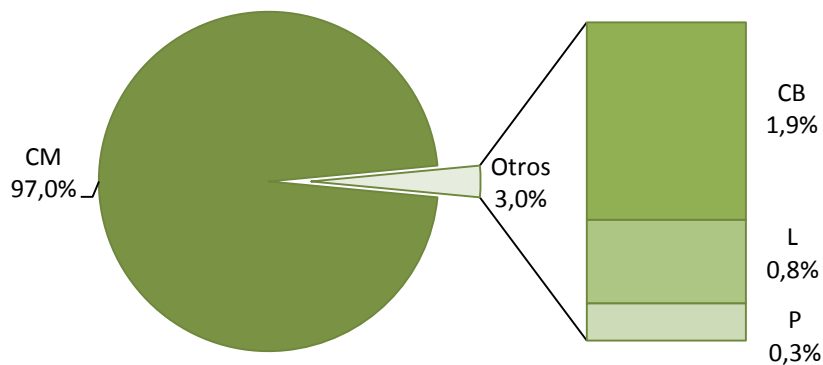
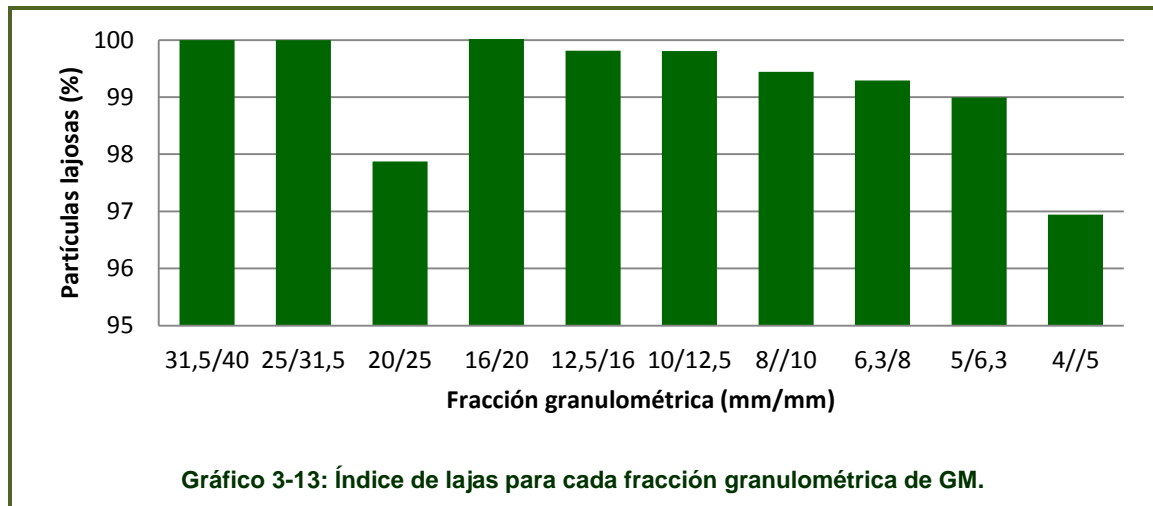


Imagen 3-36: Proporciones de las subclases de la fracción GM.

3.5.1.2 Índice de Lajas

El índice de lajas, ensayo realizado según norma UNE-EN 933-3 (91) proporciona información sobre el contenido porcentual de partículas laminares de un material granular. Aunque solamente ha podido aplicarse a la fracción GM, el resultado puede asumirse para todas las fracciones, es decir, que todas son predominantemente lajosas (hecho que puede intuirse visualmente). El índice global de lajas de GM es del 99.24%, y en el Gráfico 3-13 se muestra el índice de lajas para cada fracción granulométrica.



Este carácter lajoso del material aporta una de las principales diferencias con la arena convencional, y tendrá previsiblemente consecuencias sobre los morteros, aumentando el contenido de aire ocluido y disminuyendo la trabajabilidad y la resistencia mecánica.

Cabe destacar sobre este ensayo que durante su realización se percibe que las partículas retenidas en el tamiz más fino (4mm) se corresponden con concha blanca, constatando que una presencia mayor de especies como la almeja, la vieira o el berberecho hacen que el material sea menos lajoso, al menos en sus fracciones más finas.



3.5.1.3 Densidad aparente de partícula

Este ensayo se realiza según norma UNE-EN 1097-6 (92). Como puede apreciarse en la Tabla 3-15, los valores de densidad de partícula apenas varían para las distintas fracciones.

	GM	AMG	AMF
Densidad aparente de partícula (pa)	2,62	2,65	2,73
Densidad real de partícula tras secado en estufa (prd)	2,48	2,48	2,45
Densidad de partícula saturada con la superficie seca (pssd)	2,53	2,54	2,55

Tabla 3-15: Densidades aparentes de partícula para las fracciones AMG y AMF (kg/l)

3.5.1.4 Absorción de agua

La absorción de agua de los áridos se determina según la norma 1097-6 (92). Los resultados que se muestran en la Tabla 3-16 indican una mayor absorción de agua para la arena fina, hecho que puede atribuirse a su mayor superficie específica.

	GM	AMG	AMF
Absorción de agua (WA24)	2,17	2,56	4,12

Tabla 3-16: Absorción de agua para las fracciones AMG y AMF (%)



3.5.1.5 Densidad aparente de conjunto

Se ensaya según norma UNE-EN 1097-3 (93). Los resultados muestran una densidad aparente de conjunto muy similar en ambas fracciones de arena.

	CE	GM	AMG	AMF
Densidad de conjunto	0.24	0.56	1,07	1,05

Tabla 3-17: Densidad aparente de conjunto del material procedente de concha (kg/l)

3.5.1.6 Aire ocluido

El aire ocluido se halla a partir de los datos correspondientes para cada fracción de su densidad aparente de conjunto y su densidad aparente de partícula, utilizando la siguiente fórmula:

$$A. O. (\% \text{ en Volumen de onjunto}) = \frac{\text{Densidad de partícula} - \text{Densidad de conjunto}}{\text{Densidad de partícula}}$$

	CE	GM	AMG	AMF
Aire ocluido (%)	90.8	78.6	59,6	61,5

Tabla 3-18: Aire ocluido % en volumen aparente del material procedente de concha

3.5.1.7 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Mediante este ensayo se pueden observar tres zonas claramente diferenciadas en la estructura interna de las conchas: una principal en la parte central de espesor superior a 1000 µm y dos capas de aspecto continuo que la encierran: una exterior de 40 µm de espesor (Imagen 3-42) y otra interna de menos de 10 µm (Imagen 3-43). Entre ambas capas se sitúa una estructura cristalina con presencia de estructuras prismáticas ordenadas en capas.

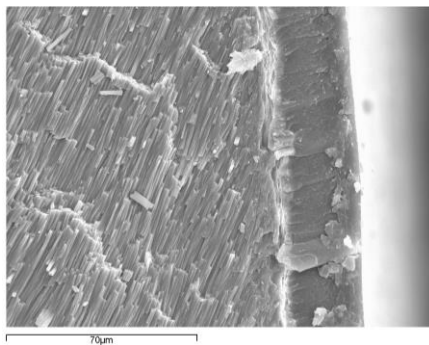


Imagen 3-42: MEB zona externa de CE

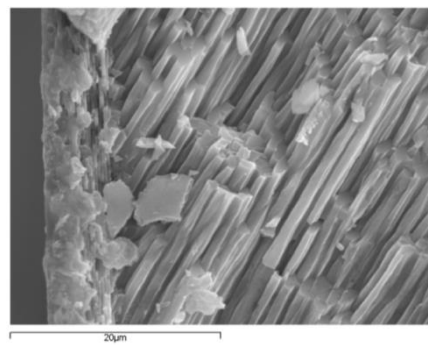


Imagen 3-43: MEB zona interna de CE

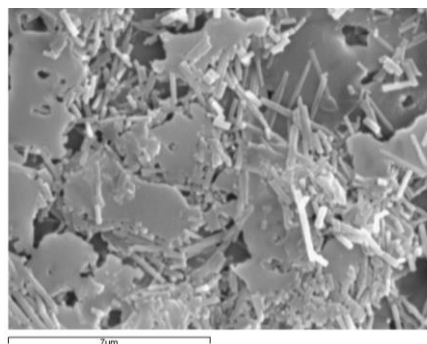


Imagen 3-44: Microscopía electrónica de barrido de concha fracturada (zona externa, superior)

Otras imágenes que aportan información interesante son aquellas de las conchas una vez trituradas. En la Imagen 3-44 se puede observar que los cristales de carbonato cálcico y la capa de nácar se rompen durante la trituración dando lugar a partículas marcadamente aciculares en el caso del carbonato y a placas en el nácar.

3.5.1.8 Equivalente de arena

El equivalente de arena se realiza según la norma UNE-EN 933-8 (94) para las fracciones AMF (0/2), AMG (0/2) y AMG (0/4), cuyos resultados se recogen en la Tabla 3-19. Este ensayo evalúa el contenido en partículas arcillosas, es decir, con un tamaño inferior a 2µm. Se obtienen valores elevados de equivalente de arena, lo cual indica la escasa presencia de partículas de este tipo.

AMF (0/2)	AMG (0/2)	AMG (0/4)
68.2	97.2	99.3

Tabla 3-19: Valores de equivalente de arena para las fracciones AMF y AMG

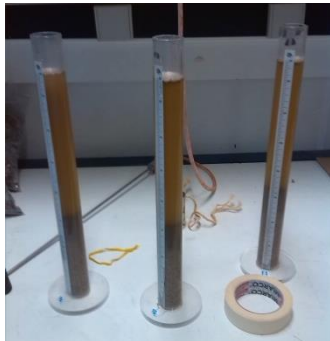


Imagen 3-45: Probetas cilíndricas graduadas con árido sedimentándose



Imagen 3-46: Medida del pisón a la parte superior de la probeta



Imagen 3-47: Probeta colocada en máquina de agitación

3.5.2 Características químicas

Con el objetivo de establecer la composición química y mineralógica de las arenas de mejillón, se realizan los ensayos de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y análisis termogravimétrico. Además, se realizan los ensayos habituales para áridos que miden el contenido en cloruros, sulfatos y materia orgánica.

3.5.2.1 Fluorescencia de Rayos X

La realización de un ensayo de fluorescencia de rayos X es muy útil para conocer la composición aproximada de materiales inertes en función de sus óxidos fundamentales. Para utilizar esta técnica es preciso calcinar previamente el material a ensayar, eliminando cualquier fracción volátil hasta los 900°C.

Como se puede observar en la Tabla 3-20, el componente mayoritario de ambas arenas es el carbonato cálcico en un porcentaje aproximado del 95 %. El segundo compuesto con mayor presencia en el material es el óxido de silicio, más abundante en la arena fina, y en tercer lugar destaca el óxido de sodio, relacionado con la presencia de cloruro sódico en las muestras.

	GM	AMG	AMF
CaCO ₃ *	95,248	95,088	94,664
SiO ₂	0,056	1,112	2,580
Na ₂ O	0,294	0,354	0,508
Al ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	< 0,01
SO ₃	0,173	0,176	0,308
MgO	0,229	0,205	0,277
Fe ₂ O ₃	< 0,005	< 0,005	< 0,005
SrO	0,113	0,116	0,192
K ₂ O	< 0,006	< 0,006	< 0,006
P ₂ O ₅	0,045	0,087	0,105
Cl	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Br	0,015	0,009	0,012
ZnO	< 0,004	< 0,004	< 0,004
CuO	0,010	0,010	0,011
ZrO ₂	0,005	0,005	0,010
Pérdida 550 °C		4,058	4,280
Pérdida 975 °C	4,634	44,208	42,108

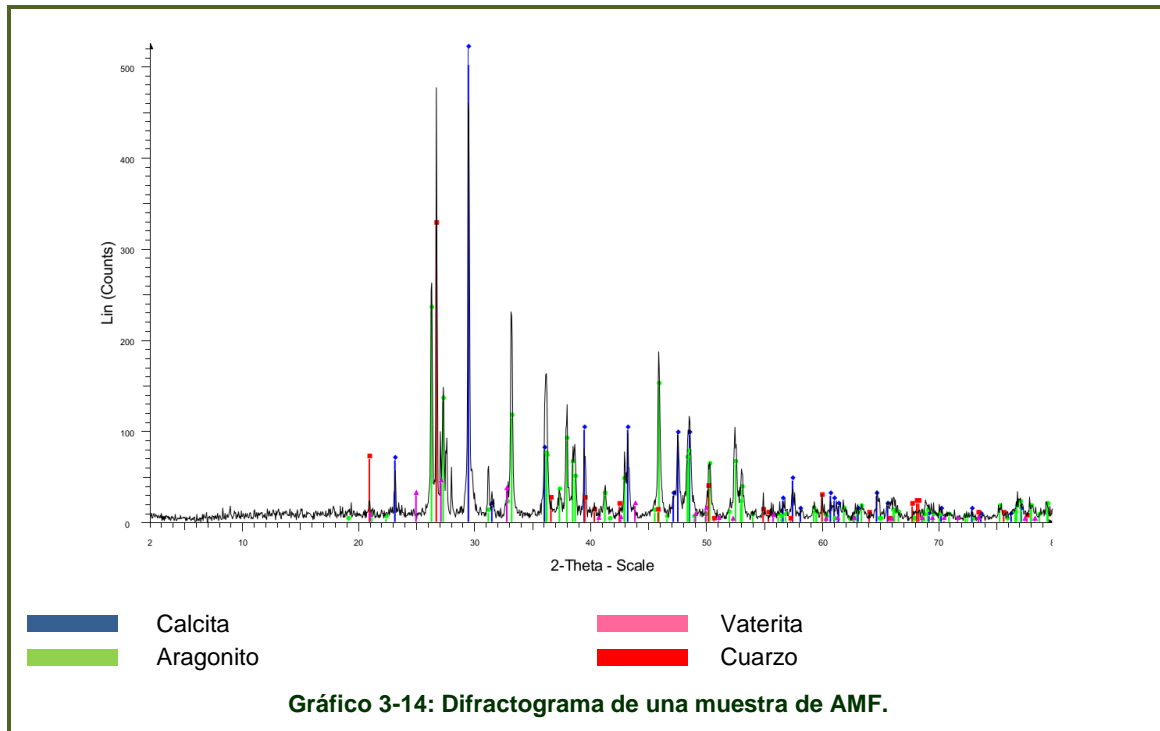
Tabla 3-20: Proporción de cada componente químico en AMG y AMF (%). *Calculado estequiométricamente

3.5.2.2 Difracción de Rayos X

La Difracción por rayos-X es una técnica muy utilizada en caracterización de rocas y de materiales pétreos. Este método permite obtener la composición mineralógica de un material cristalino, sea de origen ígneo, sedimentario, metamórfico o biológico. El resultado de este ensayo es semicuantitativo y se muestra en forma de picos de intensidad a lo largo del espectro. Es decir, cada pico o grupo de picos en longitudes de onda específicas se asocia a un mineral concreto de una manera unívoca. Cuando hay varios minerales presentes estos picos se pueden superponer y el difractograma muestra muchos picos diferentes. Este podría ser el resultado, por ejemplo, del análisis de un suelo o de una roca meteorizada. En el caso de materiales puros, se obtiene un patrón muy evidente que identifica el mineral en cuestión.

En los análisis de DRX (Gráfico 3-14) se corroboran los resultados de FRX evidenciándose fuertes picos de calcita así como trazas significativas de algunas otras variedades polimórficas del carbonato cálcico.

Como se puede ver las estructuras cristalinas del carbonato cálcico presentes en las conchas de mejillón son mayoritariamente calcita con una fracción de aragonito y aparece además una variante que sólo se encuentra en sistemas biológicos: la vaterita.



3.5.2.3 Análisis Termogravimétrico

Consiste en someter la muestra a unos 1000°C, con el fin de obtener una curva que represente las pérdidas de masa que se producen sobre la muestra a las diferentes temperaturas alcanzadas. Estas pérdidas de masa se interpretan después como presencia de materia orgánica, agua o generación de procesos químicos en los que se liberan gases. En nuestro caso, se someten a análisis termogravimétrico la AMF y el filler de AMF.

La curva de pérdida de masa en función de la temperatura de la AMF se representa en el Gráfico 3-15. Hasta los 300°C se pierde agua y volátiles orgánicos, es decir, parte de la estructura celular del animal. Esta reducción es siempre inferior al 4%. Este fenómeno continúa pero aparecen nuevas reacciones, en el entorno de los 490°C sucede la transformación del hidróxido de calcio en óxido de calcio. A una temperatura más elevada, entre 670 y 800°C sucede la principal transformación, la descarbonatación del carbonato cálcico. En este rango se producen pérdidas de masa superiores al 40%. En el caso de carbonato cálcico con un 100% de pureza, el cálculo estequiométrico predice una pérdida de masa en este último rango de temperaturas del 43,9%. Esto confirma la pureza del material ya que si se realizan los cálculos estequiométricos esta pérdida de CO₂ indica una pureza superior al 91%, lo cual concuerda con los resultados de fluorescencia de rayos X.

Por otro lado, se sometió al mismo ensayo el filler de AMF, quedando constancia de las diferencias entre estas partículas más finas y las de AMF. En primer lugar, en el filler se produce una mayor pérdida de masa hasta los 300°C, debido a la mayor presencia de materia orgánica, restos de algas, lapas, etc. Otra diferencia sustancial se produce en el entorno de los 490°C, pues en el filler la pérdida de masa es mayor. Esto es indicativo de una mayor presencia de hidróxido de calcio en esta granulometría.

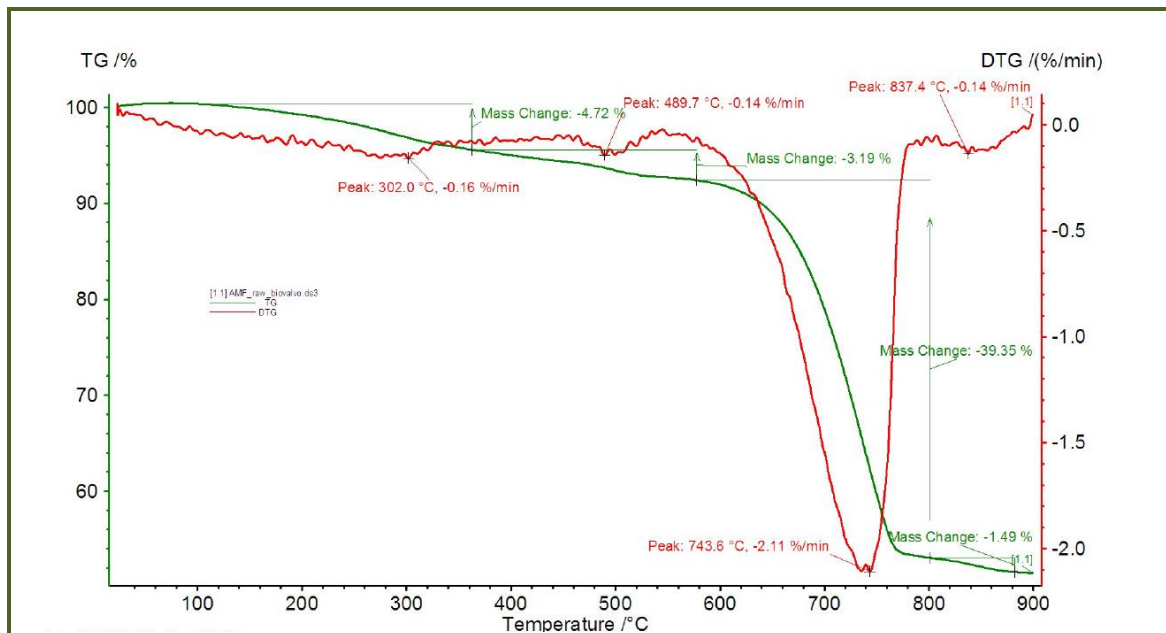


Gráfico 3-15: Resultado del análisis termogravimétrico de la AMF. En verde, curva de pérdida de masa; en rojo, balance energético, se trata de una reacción endotérmica con picos a diferentes temperaturas.

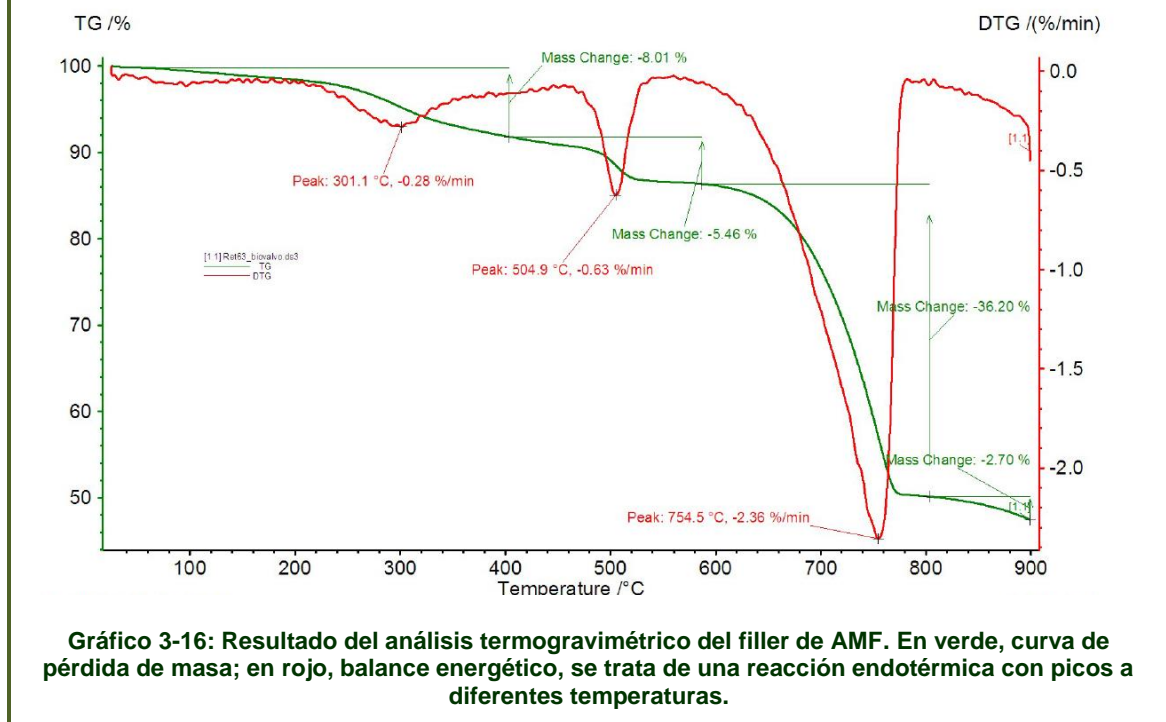


Gráfico 3-16: Resultado del análisis termogravimétrico del filler de AMF. En verde, curva de pérdida de masa; en rojo, balance energético, se trata de una reacción endotérmica con picos a diferentes temperaturas.

3.5.2.4 Lixiviación

Este ensayo nos permite conocer la posible agresividad química que tiene un determinado material frente al medio en el hipotético caso de vertido accidental o si al finalizar su vida útil se deposita en un vertedero. Según esta agresividad química, consecuencia de la presencia en el material de ciertos compuestos químicos, el material

puede clasificarse como inerte, no peligroso o peligroso. El ensayo se realiza según la norma UNE-EN 12427-4 (95) y la clasificación según la Decisión 2003/33/CE (96).

	AMF	AMG	GM	CE	Límites para un residuo inerte
pH	8,5	8,81	8,63	8,12	--
Conductividad (mS/cm)	2,61	1,16	2,32	0,38	--
Elemento (mg/kg)					
As	0,023	0,008	0,008	<0,02	0,5
Ba	0,22	<0,2	<0,2	<0,2	20
Cd	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04
Cr	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Cu	0,434	0,139	0,147	<0,10	2
Hg	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01
Mo	0,071	<0,02	<0,02	<0,02	0,5
Ni	0,139	<0,2	<0,2	<0,2	0,4
Pb	0,117	0,017	<0,01	<0,01	0,5
Sb	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,06
Se	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,1
Zn	1,501	1,286	0,314	0,168	4
Fluoruro	3,125	0,435	0,418	0,275	10
Cloruro	7186	2787	6333	147	800
Sulfato	1022	215,3	193	179	1000

Tabla 3-21: Resultados de lixiviación para las distintas fracciones (mg/kg) y comparación con las exigencias de la directiva europea 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 para residuos inertes. En rojo, los valores que no cumplen.

El incumplimiento se produce en GM, AMG y AMF para los cloruros y en el caso de la AMF también para los sulfatos. Por su parte, la CE cumple con creces esos parámetros. Cabe señalar que las limitaciones para residuo no peligroso en el caso de sulfatos es de 20000 mg/kg y en los cloruros de 15000 mg/kg. Por tanto, todas las fracciones estarían en el límite de residuo no peligroso.

3.5.2.5 Cloruros, Sulfatos y Materia Orgánica

La presencia de cloruros, sulfatos o materia orgánica en las arenas podría alterar las condiciones de fraguado y la durabilidad de los morteros, por lo que se estudiaron según las normas UNE-EN 1744-1 (97) y UNE 103-204-93 (98). Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 3-22.

Aunque no existe una norma que limite el contenido de estos componentes en los morteros de revestimiento, es destacable que según los límites establecidos por la EHE-08 (99), estos áridos sólo podrían utilizarse en ciertas cantidades en hormigón armado debido al contenido en cloruros, e incluso en hormigones en masa existirían limitaciones debido al contenido en sulfatos y materia orgánica.



	GM	AMG	AMF
Cloruros	0,46	0,28	0,51
Sulfatos solubles en ácido	0,40	0,63	0,59
Compuestos totales de azufre	1,5	1,6	1,3
Materia orgánica	Más oscuro que el patrón	Más claro que el patrón	Más oscuro que el patrón
Materia orgánica	0,0	1,49	2,15

Tabla 3-22: Contenido en compuestos químicos potencialmente perjudiciales para el mortero (%)



3.5.3 Características mecánicas

Aunque la resistencia de un mortero de revestimiento no tiene por qué ser elevada y probablemente la influencia de la resistencia de los áridos sea pequeña en comparación con su lajosidad, resulta conveniente tener alguna referencia en este sentido. Los ensayos escogidos son el coeficiente de Los Ángeles y el de friabilidad, que si bien no miden de forma directa la resistencia de los áridos, puede deducirse de manera aproximada a partir de los resultados obtenidos.

3.5.3.1 Los Ángeles

Este ensayo se realizó conforme a la norma UNE-EN 1097-2 (100), pero introduciendo una variante para una de las tres muestras ensayadas. Ante la sospecha de que el secado en estufa pudiese repercutir negativamente sobre la resistencia de la GM, se decidió ensayar una de las muestras sin lavarla y secarla previamente en estufa. Sin embargo, el resultado obtenido fue muy similar al de las muestras secadas en estufa.

GM Lavada	GM Sin lavar
19.8	21.0

Gráfico 3-17: Coeficientes de Los Ángeles (%)



Imagen 3-50: Fracción modificada de GM (10/14)

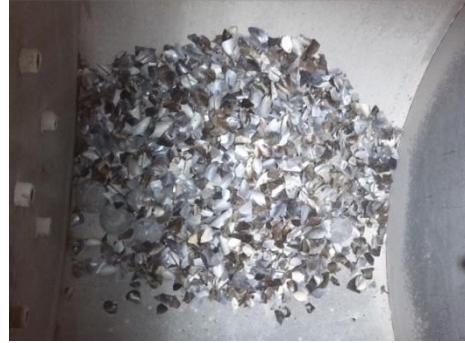


Imagen 3-51: Material en el tambor junto con las bolas de acero



Imagen 3-52: Material lavado tras 500 vueltas en el tambor



Imagen 3-53: Material que pasa por tamiz 1.6mm mientras se lava

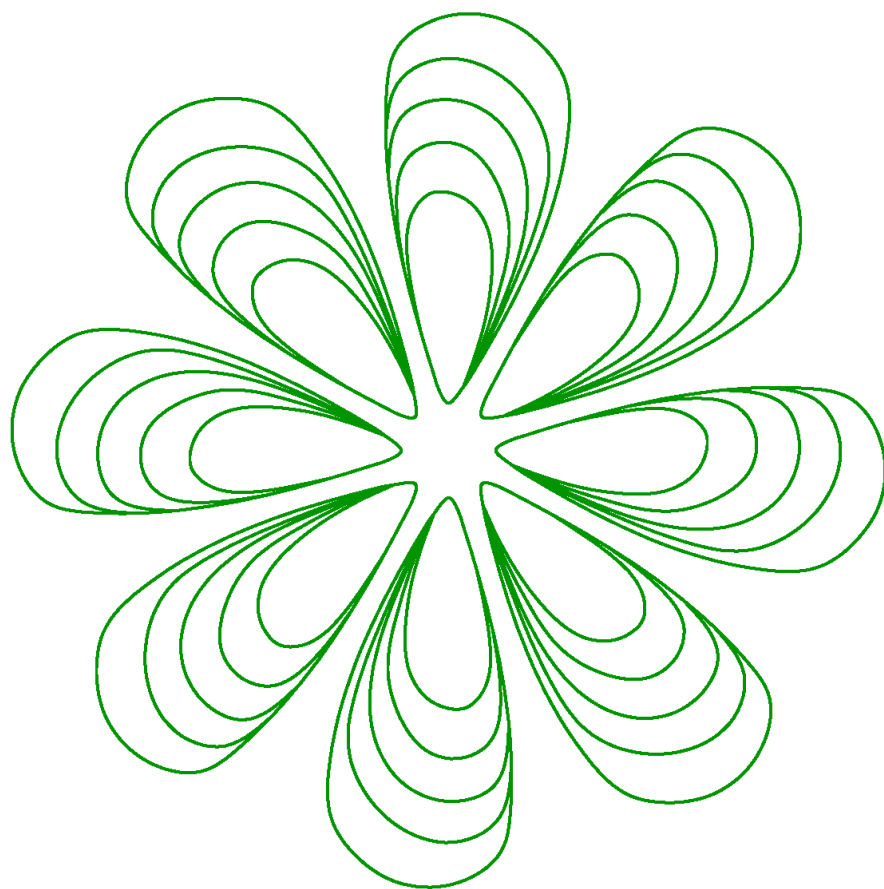
3.5.3.2 Micro-Deval

Este ensayo se corresponde con la norma UNE 83-115-89 (101). Analizando los resultados de la Tabla 3-23 se constata una gran resistencia al desgaste de los áridos de concha de mejillón.

GM (10/14)	AMG (0/2)	AMF (0/2)
27	4	17

Tabla 3-23: Coeficientes de friabilidad (%)

4 Morteros de estudio



4 Morteros de estudio

4.1 Introducción

Se pretende fabricar morteros para revestimiento exterior monocapa (revoco monocapa) de cemento, cal aérea en pasta y barro, sin aditivos y con parámetros de dosificación similares que permitan establecer comparaciones entre ellos e identificar las ventajas y beneficios entre un ligante y otro.

Por otra parte, se introduce una variable adicional a los tipos de ligante empleados, como es la fabricación de los morteros con distintas ratios de sustitución de arena natural modificada (ANMod) por arena de mejillón (AM) en tanto por ciento de volumen de partícula. De esta manera se fijó para cada ligante la relación pasta/árido en volumen aparente de partícula, con el fin de atenuar las diferencias entre la ANMod y la AM.

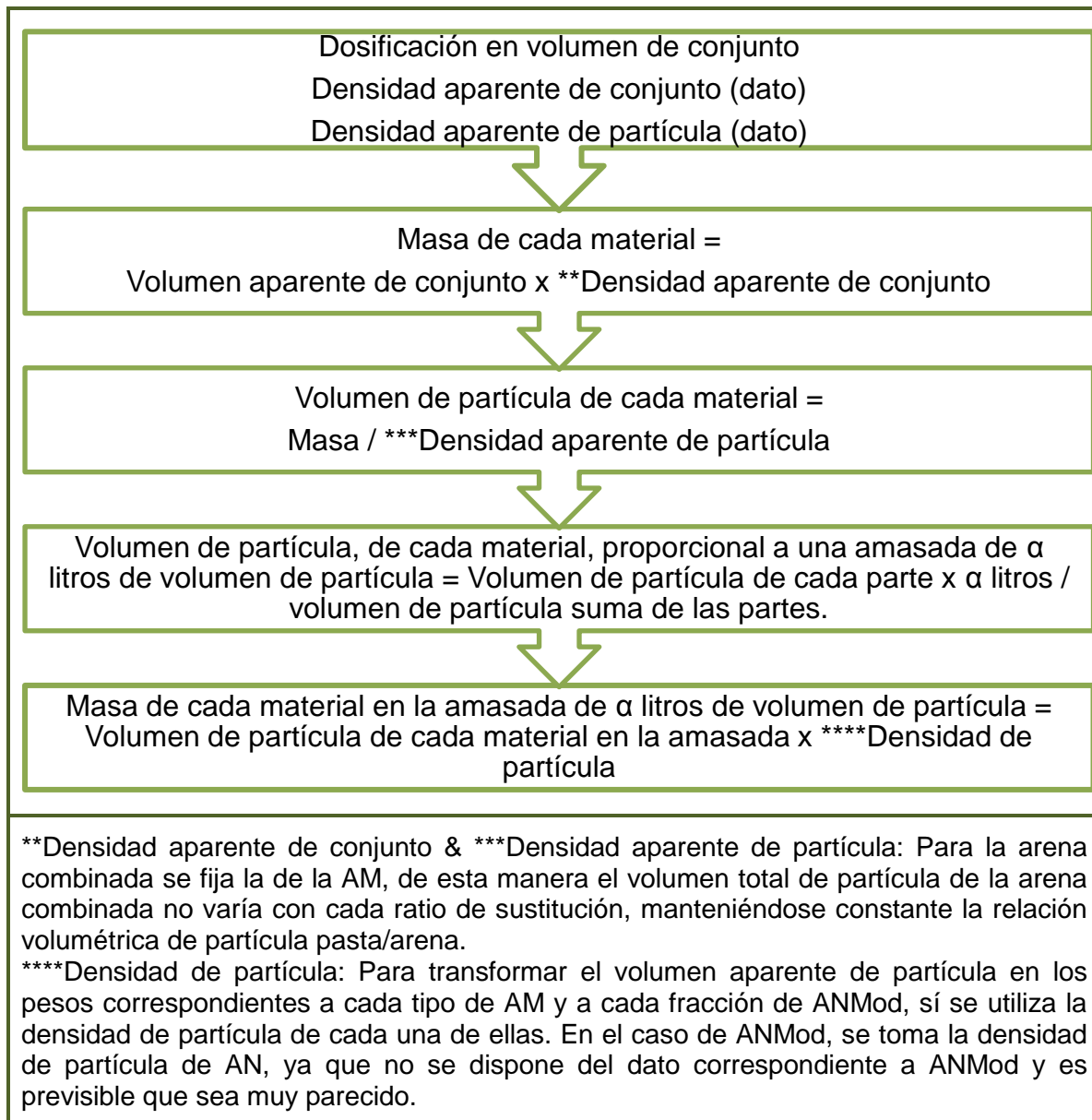
Se diseñaron finalmente 15 morteros diferentes, 5 de cemento (MC), 5 de cal (MK) y 5 de barro (MB). Dentro de cada ligante se distinguen por el contenido de arena de mejillón empleado: 0% (mortero patrón), 25%, 50%, 75% y 100%. La nomenclatura empleada para designar a los distintos morteros de estudio se recoge en la Tabla 4-1:

Ratio de sustitución de ANMod por AM (%)	Ligante		
	Cemento	Cal	Barro
0	MC0	MK0	MB0
25	MC25	MK25	MB25
50	MC50	MK50	MB50
75	MC75	MK75	MB75
100	MC100	MK100	MB100

Tabla 4-1: Nomenclatura de morteros según la ratio de sustitución de arena natural por arena de mejillón.

El proceso de ajuste de las dosificaciones se resume en el Esquema 4-1.





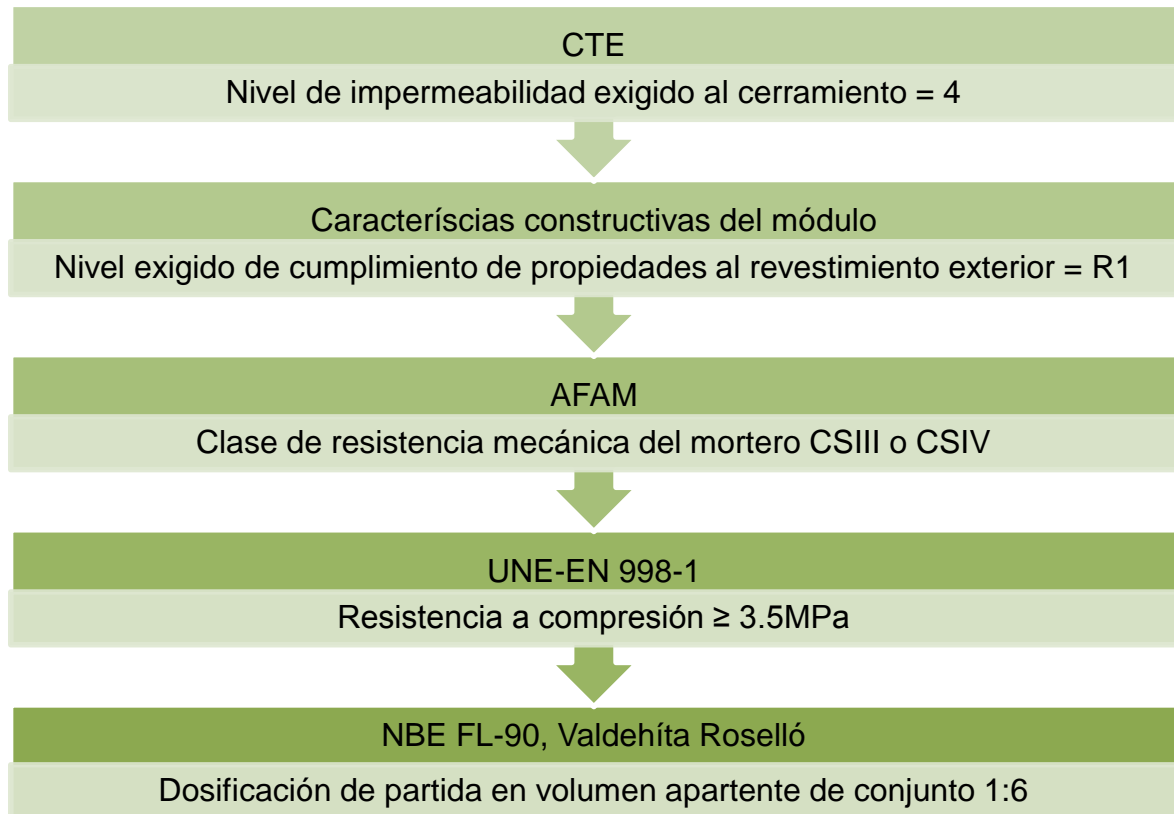
Esquema 4-1: Proceso de obtención del volumen de partícula de cada material para la amasada de α litros de volumen de partícula, partiendo de la dosificación en volumen aparente de conjunto.

4.2 Morteros de cemento

4.2.1 Ajuste de la dosificación

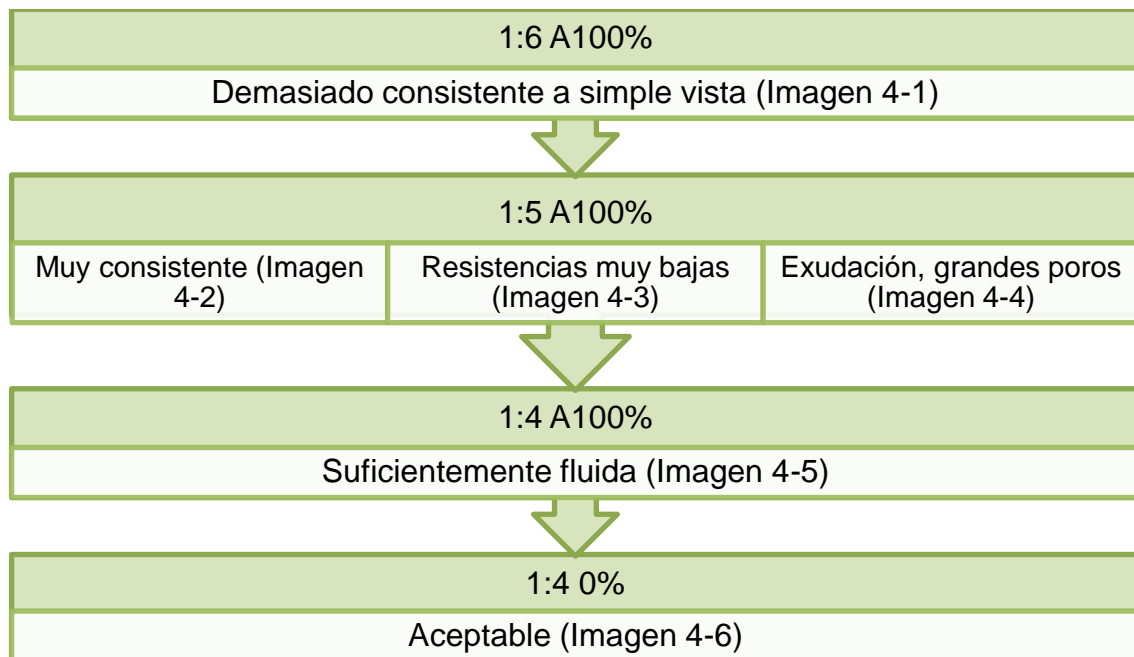
No existe ninguna normativa vigente que especifique o dé una orientación sobre qué dosificación y qué relación agua/cemento deben utilizarse a la hora de fabricar un mortero con el objetivo de que éste sirva a un determinado uso. El proceso seguido para encontrar una dosificación de partida se resume en el Esquema 4-2 y se explica de manera más extensa en el Anejo 5. Todo este proceso se realiza con la intención de fabricar un mortero de revestimiento apto para el módulo de bioconstrucción que se prevé construir en el marco del Proyecto BIOVALVO en que se engloba este trabajo.





Esquema 4-2: Proceso seguido para obtener la dosificación de partida

En cuanto a la relación agua/cemento, se decidió usar el valor 1 utilizado en varios de los estudios consultados sobre fabricación de morteros con sustitución de arena por arena procedente de concha (79) (80) (ver apartado 2.5.5).



Esquema 4-3: Proceso seguido para obtener la dosificación final

Morteros de estudio

La primera amasada se realizó con la relación agua/cemento y la dosificación de partida escogidas en el apartado 4.2.1. Los morteros con mayor ratio de sustitución son menos trabajables, por lo que se realizaron los ajustes de dosificación con sustituciones de arena del 100% con el fin de garantizar la fabricación de probetas con todas las ratios. A partir de esta amasada se modificó la dosificación hasta conseguir consistencias aceptables tanto en ratios de sustitución del 100% como del 0%. Este proceso se resume en el Esquema 4-3.



4.2.2 Diseño final

Siguiendo el Esquema 4-1, se exponen en la Tabla 4-2 los valores obtenidos para fabricar cada amasada de 1l de mortero.

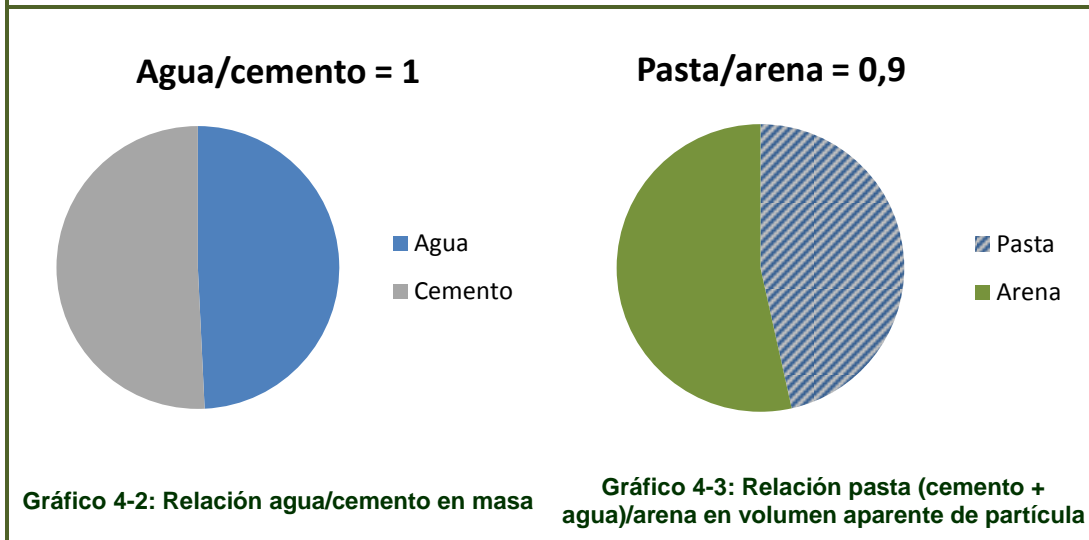
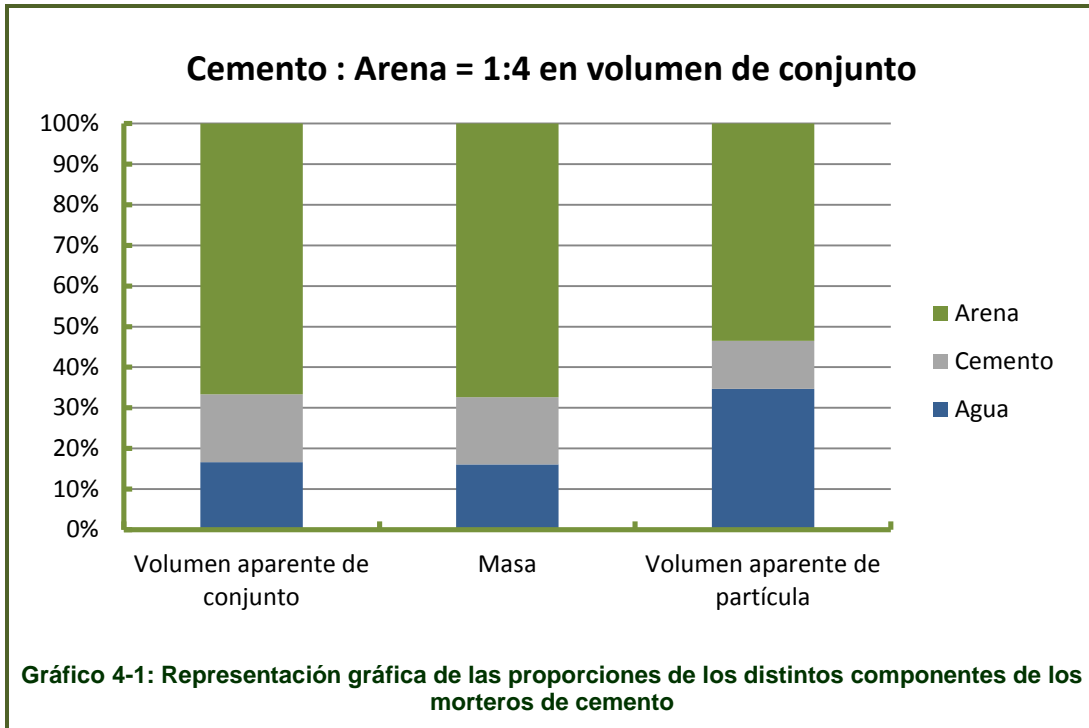


Dosificación en volumen aparente de conjunto MC					
Agua		Cemento		AN(~ANMod)	AM
				Arena combinada	
1,00		1,00		4,00	
Densidad aparente de conjunto (kg/m ³)					
1,00		1,03		1,05	
Densidad aparente de partícula (kg/l)					
1		3,01		2,67	2,72
Masa de cada material (kg)					
1,00		1,03		4,20	
Volumen de partícula de cada material (l)					
1		0,34		1,54	
Volumen (l) de partícula de cada material para una amasada de				1 litro	
0,3464		0,1187		0,5349	
Masa de agua y de cemento para una amasada (g)					
Agua			Cemento		
346,42			357,17		
Masa de cada fracción de ANMod según la ratio de sustitución para una amasada (g)				Masa de cada tipo de AM según la ratio de sustitución para una amasada (g)	
MC 0					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
99,98	357,06	799,81	171,39	0,00	0,00
MC 25					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
74,98	267,79	599,86	128,54	321,91	41,83
MC 50					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
49,99	178,53	399,90	85,69	643,83	83,66
MC 75					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
24,99	89,26	199,95	42,85	965,74	125,49
MC 100					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
0,00	0,00	0,00	0,00	1287,65	167,32

Tabla 4-2: Ficha de dosificación del mortero de cemento finalmente escogido, con relación cemento: arena en volumen de conjunto 1:4 y relación agua/cemento en masa 1.

En los siguientes gráficos se representan las distintas proporciones que definen la dosificación:





4.3 Morteros de cal

4.3.1 Ajuste de la dosificación

En un primer momento, se pretendió diseñar el mortero de cal utilizando la misma relación pasta/árido en volumen de partícula y la misma relación agua/ligante que resultó en la dosificación final del mortero de cemento. El objetivo de mantener estos parámetros era reproducir morteros comparables con diferentes ligantes, de manera que no solo se estudiase el efecto de la sustitución de arena natural por arena procedente de concha de mejillón, sino también el cambio de ligante. Sin embargo, resultó inviable

mantener la relación agua/ligante, puesto que en el cemento esta relación era igual a 1 y en la cal, por la propia humedad de la pasta utilizada, se partía de una relación de 1,3.

La intención de fabricar una serie de morteros de cal que tuviesen la misma relación pasta/árido en volumen de partícula que el mortero de cemento también resultó inviable, puesto que la dosificación equivalente en volumen de conjunto se alejaba mucho de las indicaciones y recomendaciones de la bibliografía consultada. Además, resultarían morteros muy secos a los que habría que añadir grandes cantidades de agua para poder alcanzar consistencias aceptables, y en la bibliografía se recoge que a los morteros de cal únicamente se les pueden añadir pequeñas cantidades de agua de forma excepcional. Por ello, se propuso una dosificación cal:arena = 1:2 en volumen aparente de conjunto, que entra en el rango recomendado por otros autores (1:2 a 1:3), y sin añadir agua, es decir, con una relación agua/cal = 1,3.

Puesto que esta dosificación dio lugar a un mortero demasiado seco (Imagen 4-7) se decidió añadir una pequeña cantidad de agua suficiente para garantizar una fluidez tal que al sustituir la arena convencional por la proveniente de concha de mejillón se alcanzasen valores adecuados de consistencia. De esta manera se utilizaron las relaciones agua/cal 1.5 (Imagen 4-8), 1.6 y 1.7 (Imagen 4-9, Imagen 4-10), adoptando esta última como la dosificación óptima.



Imagen 4-7: Mortero de cal con relación cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y relación agua/cal en masa = 1.3



Imagen 4-8: Mortero de cal con relación cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y relación agua/cal en masa = 1.5



Imagen 4-9: MK75 (cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y agua/cal en masa 1.7)



Imagen 4-10: MK100 (cal:arena en volumen de conjunto = 1:2 y agua/cal en masa 1.7)

4.3.2 Diseño final

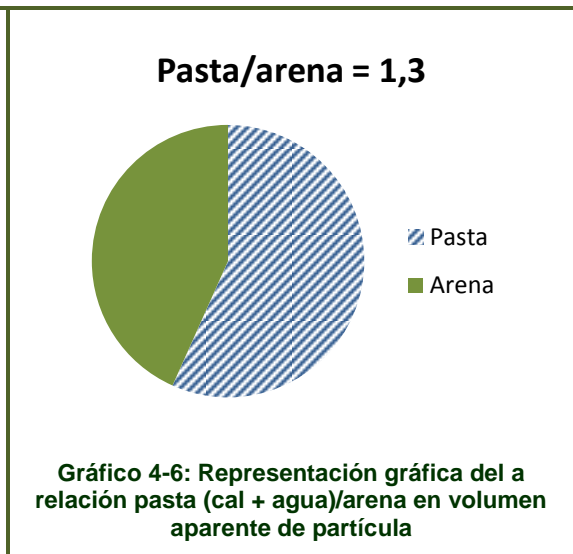
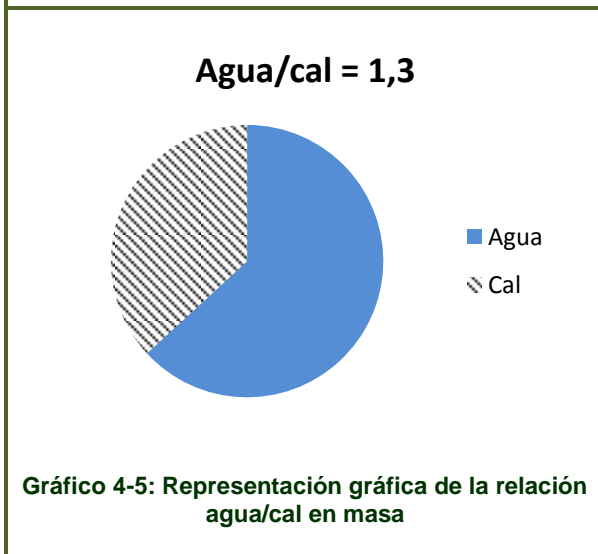
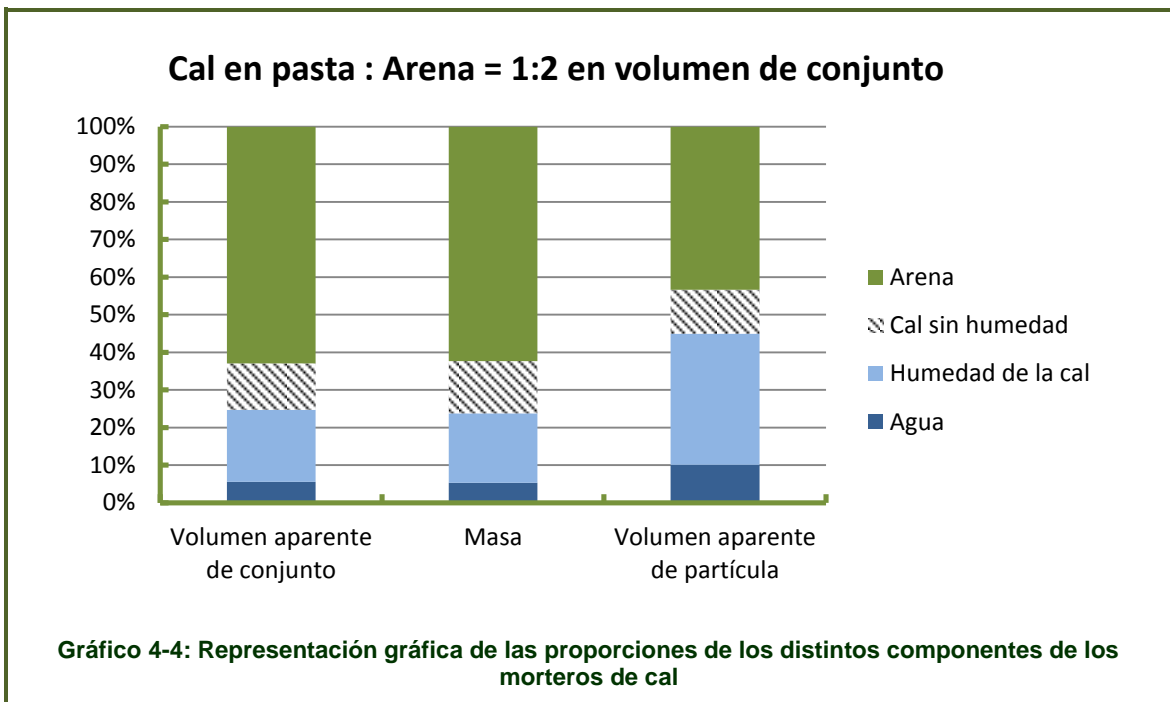
En la Tabla 4-3 se recogen las proporciones necesarias para la fabricación de 1litro de mortero de cal con los distintos porcentajes de sustitución.

Dosificación en volumen aparente de conjunto Pasta de cal:arena=1:2 A/K=1,7					
Agua	Humedad	Cal (sin contar la humedad)		AN(~ANMod)	AM
				Arena combinada	
0,18	0,61	0,39		2,00	
Densidad aparente de conjunto (kg/m ³)					
1,02	1,02	1,20		1,05	
Densidad aparente de partícula (kg/l)					
1	1	2,25		2,67	2,72
Masa de cada material (kg)					
0,18	0,62	0,47		2,10	
Volumen de partícula de cada material (l)					
0,18	0,62	0,21		0,77	
Volumen de partícula de cada material para una amasada de 1 l					
0,10	0,35	0,1167		0,4332	
Masa de agua y de cal escurrida para una amasada (g)					
Agua			Cal		
101,00			611,70		
Masa de cada fracción de ANMod según la ratio de sustitución para una amasada (g)				Masa de cada tipo de AM según la ratio de sustitución para una amasada (g)	
MK 0					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
80,96	289,16	647,71	138,79	0,00	0,00
MK 25					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
60,72	216,87	485,78	104,10	260,69	33,88
MK 50					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
40,48	144,58	323,85	69,40	521,39	67,75
MK 75					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
20,24	72,29	161,93	34,70	782,08	101,63
MK 100					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	01-abr	AMF	AMG
0,00	0,00	0,00	0,00	1042,78	135,50

Tabla 4-3: Ficha de dosificación del mortero de cal finalmente escogido, con relación cal:arena en volumen de conjunto 1:2 y agua/cal en masa 1.7.



En los siguientes gráficos se representan las distintas proporciones que definen la dosificación:



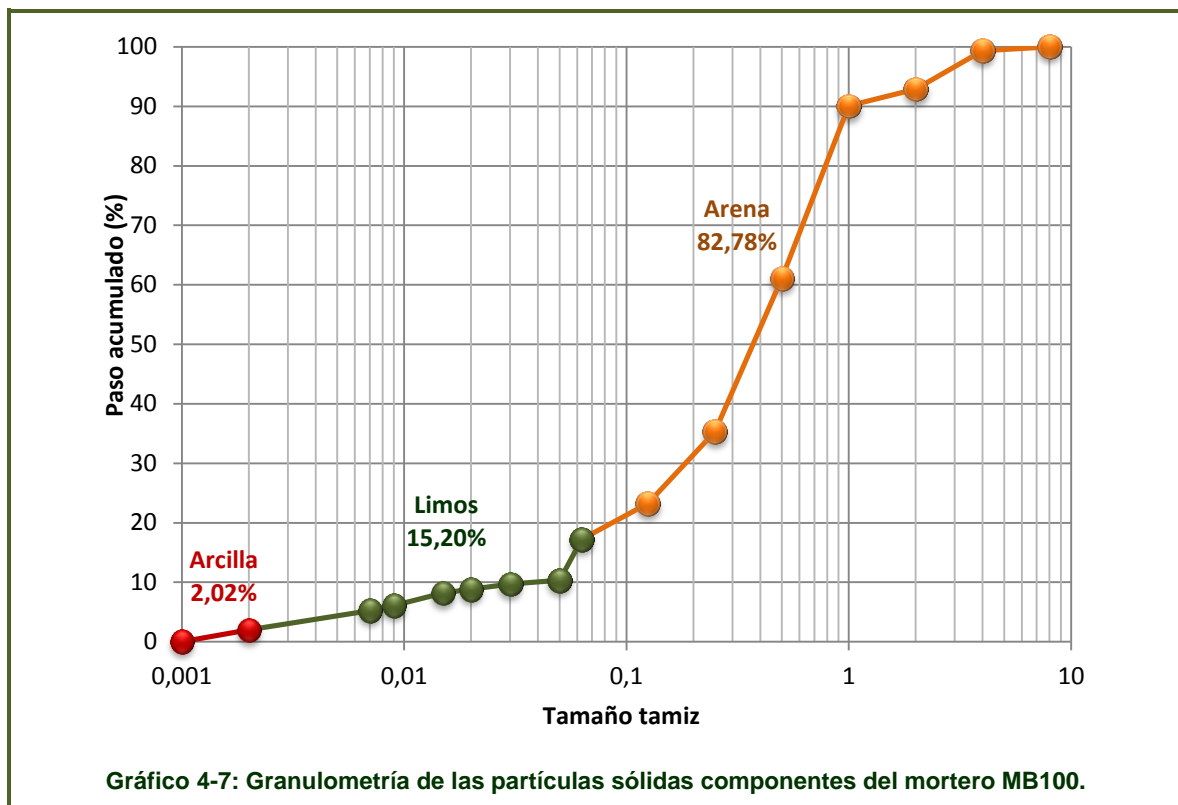
4.4 Morteros de barro

4.4.1 Ajuste de la dosificación

Siguiendo las recomendaciones del libro de Gernot Minke (36), se realizaron morteros de barro con una proporción de arcilla en masa de entre 5 y 12% respecto del peso total sólida.

En cuanto a la proporción de agua, el procedimiento más adecuado sería sumergir la muestra seca en agua y dejar que sature (ver apartado 2.3.5). Sin embargo, este procedimiento no puede aplicarse ya que no resultaría la misma relación para todos los porcentajes de sustitución y, por tanto, sería difícil establecer comparaciones entre ellos. Por este motivo, se realizaron pruebas con distintas proporciones de agua hasta alcanzar una consistencia visiblemente apropiada para un mortero de barro sin arena de mejillón, mortero patrón o de comparación (MBO).

Visualmente se estimó que el contenido en arcilla podía reducirse por debajo del 5%, hasta llegar al contenido del 2%. Esta percepción de que el mortero contenía demasiada arcilla se atribuye a que solamente se considera arcilla a las partículas de tamaño inferior a $2\mu\text{m}$ de los materiales arcillosos, y es posible que cierta proporción de limos actuasen con poder aglomerante como si fuesen arcillas.



4.4.2 Diseño final

Se exponen en la Tabla 4-4 los datos de la dosificación necesarios para fabricar 1 litro de mortero con cada ratio de sustitución.

Dosificación en peso A/S=0,2 2% de arcilla					
Agua		Arcilla caolínica seca	Caolín seco	Arena combinada	
11,00		4,00	1,00	45,00	
Dosificación equivalente en volumen aparente de conjunto					
10,69		6,32	2,21	42,86	
Agua	Humedad A.C. y C.	Arcilla	Caolín	AN(~ANMod)	AM
				Arena combinada	
Densidad aparente de conjunto (kg/m ³)					
1,00	1,00	0,68	0,46	1,05	
Densidad aparente de partícula (kg/l)					
1	1	2,36	2,64	2,67	2,72
Masa de cada material (kg)					
10,69	0,31	4,30	1,02	45,00	
Volumen de partícula de cada material (l)					
10,69		1,82	0,38	16,54	
Volumen de partícula de cada material (l) para una amasada de				1	l
0,3631		0,0618	0,0131	0,5620	
Masa de agua, arcilla caolínica y caolín para una amasada (g)					
Agua			Arcilla caolínica	Caolín	
363,10			145,93	34,48	
Masa de cada fracción de ANMod según la ratio de sustitución para una amasada (g)				Masa de cada tipo de AM según la ratio de sustitución para una amasada (g)	
MB 0					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
105,04	375,14	840,30	180,06	0,00	0,00
MB 25					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
78,78	281,35	630,23	135,05	338,21	43,95
MB 50					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
52,52	187,57	420,15	90,03	676,42	87,90
MB 75					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
26,26	93,78	210,08	45,02	1014,63	131,85
MB 100					
ANMod				AM	
0-0.063	0.063-0.25	0.25-1	1-4	AMF	AMG
0,00	0,00	0,00	0,00	1352,85	175,79

Tabla 4-4: Ficha de dosificación del mortero de barro finalmente escogido, con relación agua:sólido en masa 0,2 y un 2% de arcilla en masa.

En los siguientes gráficos se representan las distintas proporciones que definen la dosificación:

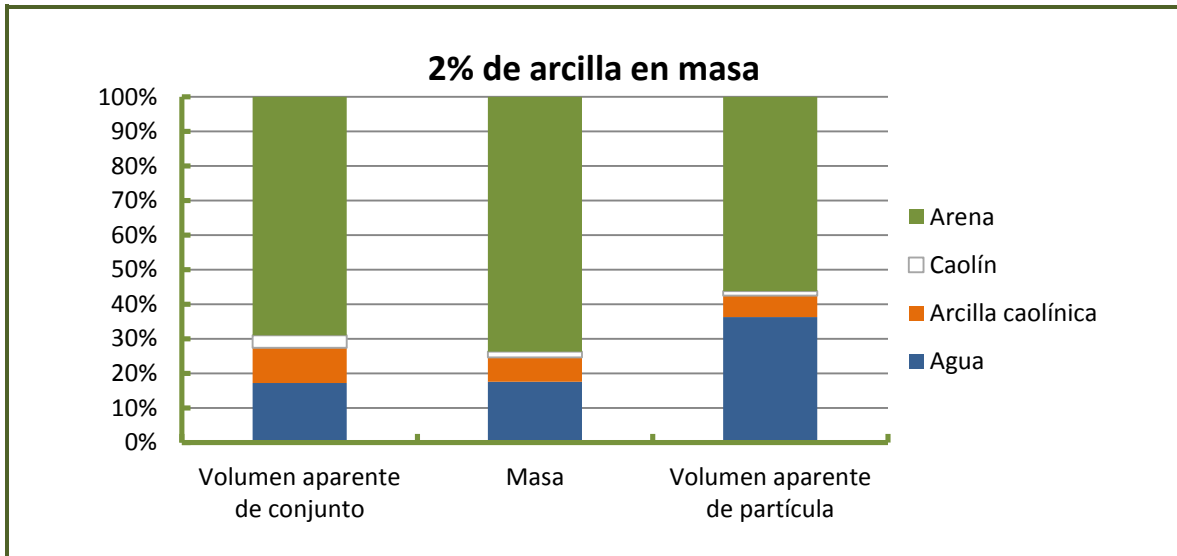


Gráfico 4-8: Representación gráfica de las proporciones de los distintos componentes de los morteros de barro

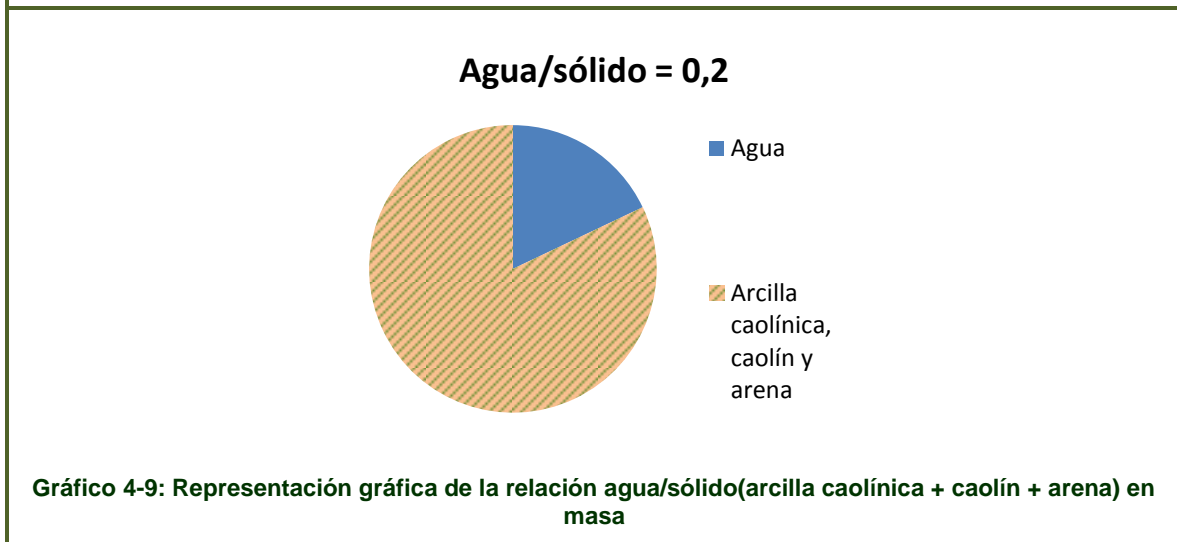


Gráfico 4-9: Representación gráfica de la relación agua/sólido (arcilla caolínica + caolín + arena) en masa



Imagen 4-12: Probetas de mortero de barro con distintos ratios de sustitución (0 a 100% de izquierda a derecha)

4.5 Fabricación de los morteros

4.5.1 Amasado

Para la fabricación de los morteros se utiliza una amasadora con pala mezcladora (Imagen 4-15, Imagen 4-14). En primer lugar, se limpia y humedece el recipiente de la amasadora sin que se perciba acumulación de agua en el fondo (Imagen 4-13). A continuación, se vierten los materiales siguiendo el proceso de amasado previamente establecido (según se expone en el Esquema 4-4).

La hora de amasado es un dato importante puesto que respecto de ella se calculan los momentos en los que se deben realizar algunos ensayos. En el caso de los morteros de cemento, se estableció como hora de amasado el momento en el que entran en contacto el agua y el cemento, en el caso de la cal, cuando se mezclan la cal y la arena y en el caso del barro cuando se mezclan el agua y el sólido (caolín, arcilla caolínica y arena).

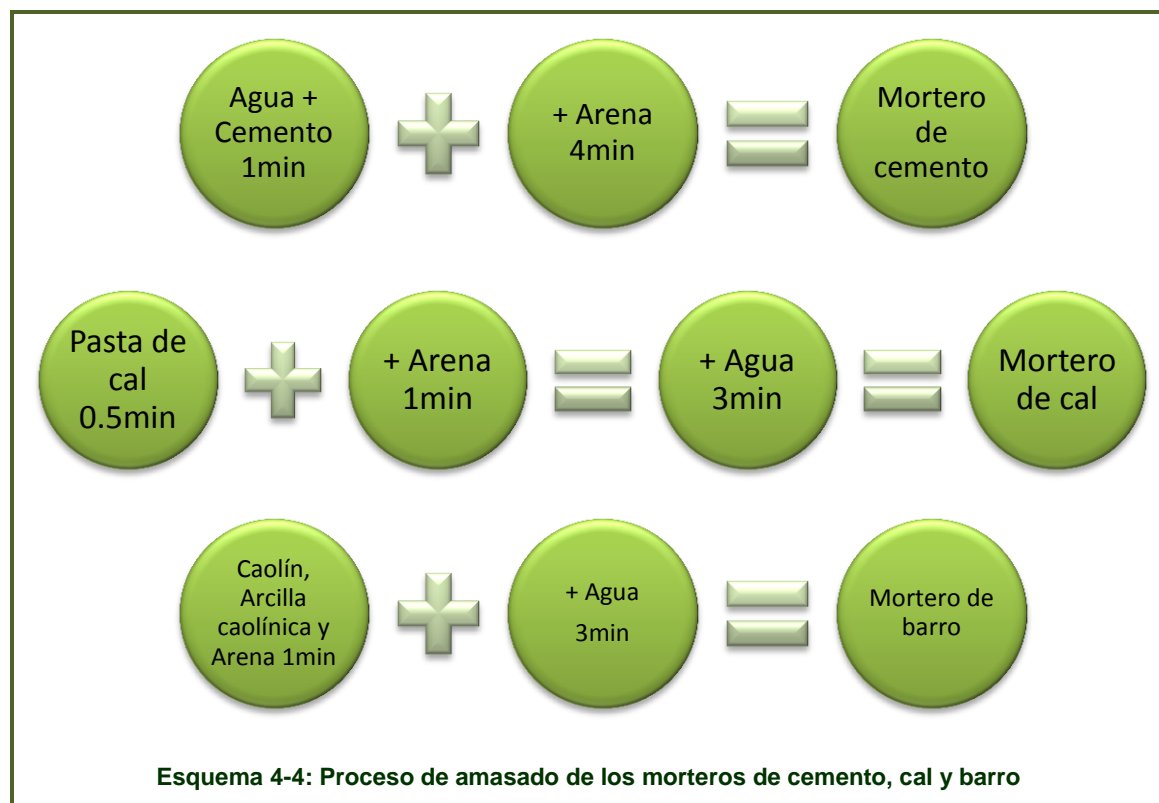




Imagen 4-14: Amasadora planetaria para mortero



Imagen 4-13: Recipiente de amasadora



Imagen 4-15: Pala mezcladora

4.5.2 Preparación de moldes, vertido y compactación.

Para el desarrollo del programa experimental en estado endurecido se fabricaron probetas prismáticas de 4x4x16cm empleando moldes triples con estas dimensiones (Imagen 4-16). Previamente al vertido del mortero en los moldes, se comprueba que esté limpio y se aplica una capa de desencofrante (Sika LN en nuestro caso).

El ensayo de consistencia, que se explica en apartados sucesivos, interfiere en el proceso de vertido y compactación del mortero, de manera que se coloca el molde con sus topes en la compactadora (Imagen 4-17, Imagen 4-18) y se vierte mortero en la mitad libre de cada probeta. Posteriormente, se retiran los topes y se acciona la compactadora para que produzca 60 sacudidas. Tras este primer ciclo, se extiende el mortero dentro de cada probeta hasta que quedan llenas en su mitad inferior, y se añade más mortero hasta llenarlas por completo. De nuevo, se activa un ciclo de 60 sacudidas. Finalmente se enrasa cada probeta y se almacenan a temperatura ambiente del laboratorio hasta su desmoldado.



Imagen 4-16: Molde



Imagen 4-17: Compactadora



Imagen 4-18: Topes



4.5.3 Marcado, desmoldado y curado.

Previamente a ser desmoldadas, todas las probetas fueron identificadas con la nomenclatura establecida para cada mortero: MC, MK y MB con el porcentaje de sustitución empleado, 0, 20, 50, 75 y 100% (Imagen 4-19).

La edad de desmoldado de las probetas suele oscilar entre un mínimo de 16 horas y un máximo de 3 días. En este caso, se optó por desmoldar a 2 días los morteros de cemento, ya que las probetas fabricadas íntegramente con arena de mejillón requieren un mayor tiempo de fraguado (Imagen 4-20). Los morteros de cal y barro se desmoldaron a los 5 días para garantizar su correcta carbonatación y secado.

Una vez desmoldadas, se almacenan en laboratorio (Imagen 4-21) bajo condiciones higrométricas ambientales (Tabla 4-5, Gráfico 4-10). Estos datos de humedad y temperatura se registraron diariamente.

	Media	Máxima	Mínima
Humedad (%)	53,4	66,0	41,0
Temperatura (°C)	21,4	25,5	18,9

Tabla 4-5: Condiciones higrotérmicas ambientales desde el 13-2 al 14-5.

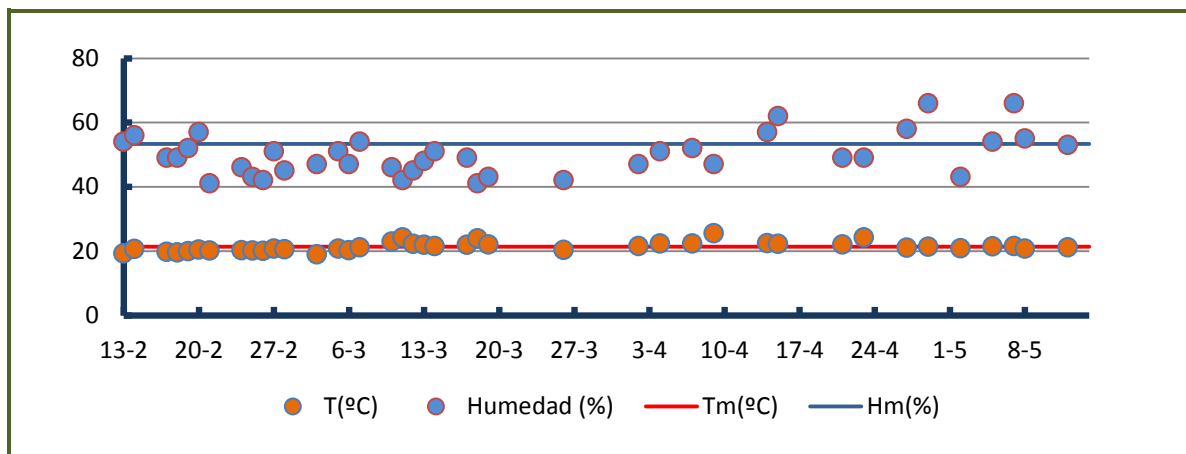


Gráfico 4-10: Condiciones higrotérmicas ambientales desde el 13-2 al 14-5.



Imagen 4-19: Marcado de las probetas x, y, z.

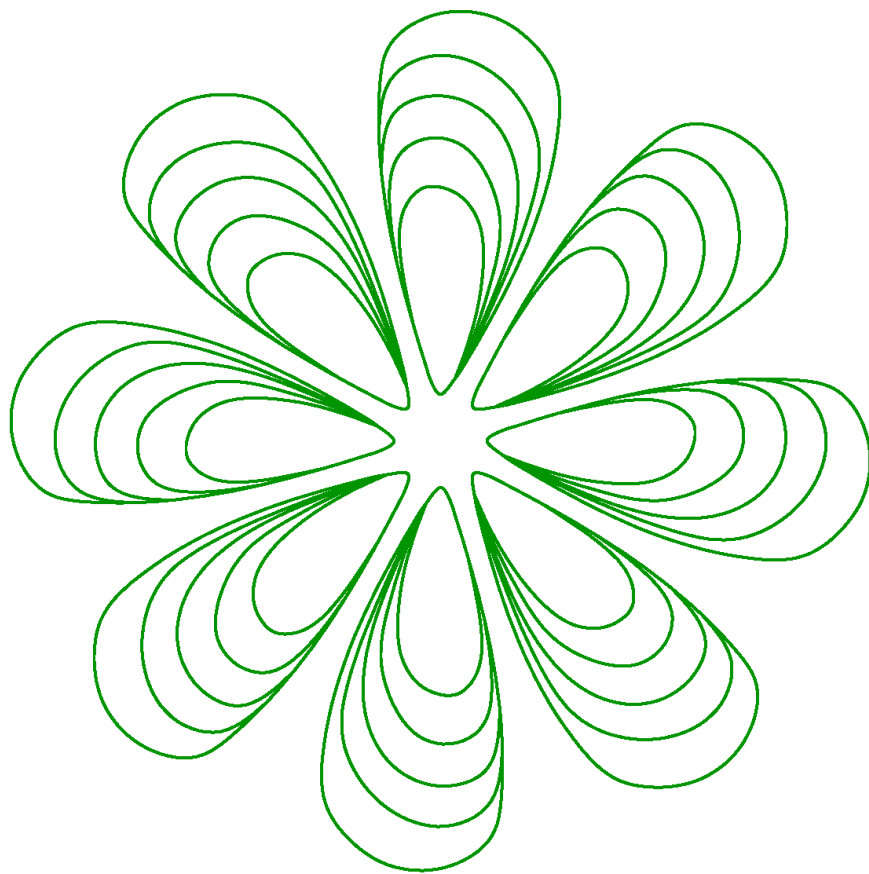


Imagen 4-20: Desmoldado de MC100 a las 24h.



Imagen 4-21: Probetas almacenadas a temperatura y humedad del laboratorio

5 Plan de ensayos



5 Plan de ensayos

Con el objeto de determinar cuáles son las ratios de sustitución válidos para fabricar un mortero de revestimiento de capa gruesa y monocapa (revoco monocapa), se realizan los ensayos descritos en los siguientes apartados, que son los indicados por la norma UNE 998-1 (22).

5.1 Estado fresco

5.1.1 Consistencia

La consistencia se mide con el número de golpes que tarda cada mortero en llegar desde la mitad de la probeta donde se vierte al extremo opuesto. Este procedimiento desarrollado por Arturo Martínez viene avalado por numerosas experiencias previas (102).

El proceso consiste en fijar el molde a la placa base de la compactadora y colocar los topes en la mitad de cada probeta. La otra parte se llena con el mortero (Imagen 5-1) y se enrasa. A continuación se retiran los topes y se acciona la compactadora que inicia una secuencia de 60 sacudidas. El mortero se va asentando y ocupando una mayor superficie del molde, hasta que toca la pared opuesta del mismo (Imagen 5-3), en ese instante se registra el número de golpes que han sido necesarios y se establece ese dato como consistencia del mortero.



Imagen 5-1: Vertido de mortero en molde

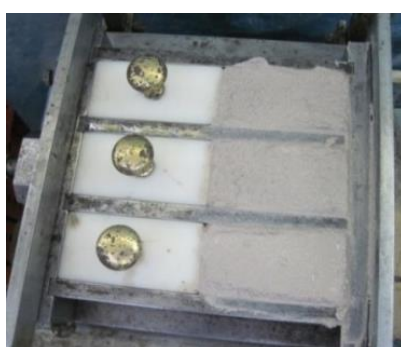


Imagen 5-2: Molde con medias probetas llenas y la otra parte ocupada por el tope



Imagen 5-3: Mortero avanzando por el efecto de las sacudidas de la compactadora

5.1.2 Densidad

La densidad en fresco se obtiene dividiendo el peso de las tres probetas de cada molde entre el volumen nominal de las mismas. Para ello es necesario determinar el peso del molde antes (tara) y después del vertido de los morteros en su interior. Para ello, se utiliza una báscula con precisión de gramo (Imagen 5-9). El volumen nominal de las tres probetas que ocupan un molde es igual de $3 \times 4 \times 4 \times 16 \text{cm} = 0.768$ litros.

5.1.3 Contenido en aire

Este ensayo se realiza según la norma UNE-EN 1015-7 (103), que contempla dos métodos: "A" o método de presión y "B" o método del alcohol. El método A (Imagen 5-4,



Imagen 5-5, Imagen 5-6) es de aplicación a aquellos morteros cuyo contenido en aire es inferior al 20%, mientras que el método B (Imagen 5-7, Imagen 5-8) se aplica a los que superan dicho valor. En los morteros de cal y barro solamente se ha utilizado el método A, mientras que para los morteros de cemento se han utilizado ambos al superarse el 20% de contenido en aire para las ratios de sustitución del 50, 75 y 100%.



Imagen 5-4: Compactación del mortero con pisón.



Imagen 5-5: Recipiente lleno de mortero enrasado.



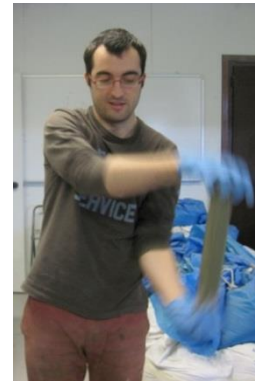
Imagen 5-6: Medidor de contenido en aire con pipeta llena de agua conectada a una de sus válvulas.



Imagen 5-7: Picnómetro lleno



Imagen 5-8: Inversión del picnómetro. Este movimiento se repite 20 veces para conseguir la dispersión del mortero en la mezcla agua-alcohol.



5.2 Estado endurecido

5.2.1 Densidad

La densidad en estado endurecido tras el desmoldado se obtiene dividiendo el peso de cada probeta entre su volumen nominal. Para ello es necesario cuantificar el peso de cada probeta tras su desmoldado. Se utiliza una báscula de precisión hasta las centésimas de gramo (Imagen 5-10). El volumen nominal de cada probeta es igual a $4 \times 4 \times 16 \text{ cm} = 0.256$ litros.



Imagen 5-9: Báscula con precisión de gramo



Imagen 5-10: Báscula con precisión de centésima de gramo

5.2.2 Resistencia mecánica

Las probetas utilizadas para el ensayo de resistencia mecánica (flexión y compresión) son de 4x4x16cm, dimensiones que fija la norma UNE-EN 1015-11 (104) para el desarrollo del ensayo, que se realiza en una prensa de Ibertest (Imagen 5-11).

Se ensayan tres probetas de mortero de cada ratio de sustitución a 2, 7 y 28 días para los morteros de cemento, y únicamente a 28 días en los de cal y barro, debido a las bajas resistencias que presentan estos últimos a edades tempranas.

El ensayo a compresión se realiza a continuación del de flexión con las dos mitades obtenidas de la probeta ensayada en el primero, siguiendo la norma UNE-EN 1015-11 (104).



Imagen 5-11: Máquina para ensayo de morteros a resistencia mecánica

5.2.2.1 Resistencia a flexión

Este ensayo se realiza conforme a la norma UNE-EN 1015-11 (104), colocando siempre la probeta con las caras en contacto con el molde como caras inferior y superior sobre la que se aplica la carga. En la parte de la probeta libre, que no estaba en contacto con el molde o sobre su opuesta, se realizan tres marcas: una en la mitad de la longitud de la probeta y otras dos a 30mm de los extremos. Estas marcas servirán para posicionar la probeta dentro del dispositivo de flexión (Imagen 5-12), de manera que el rodillo superior se apoye centrado sobre su cara superior (Imagen 5-13).

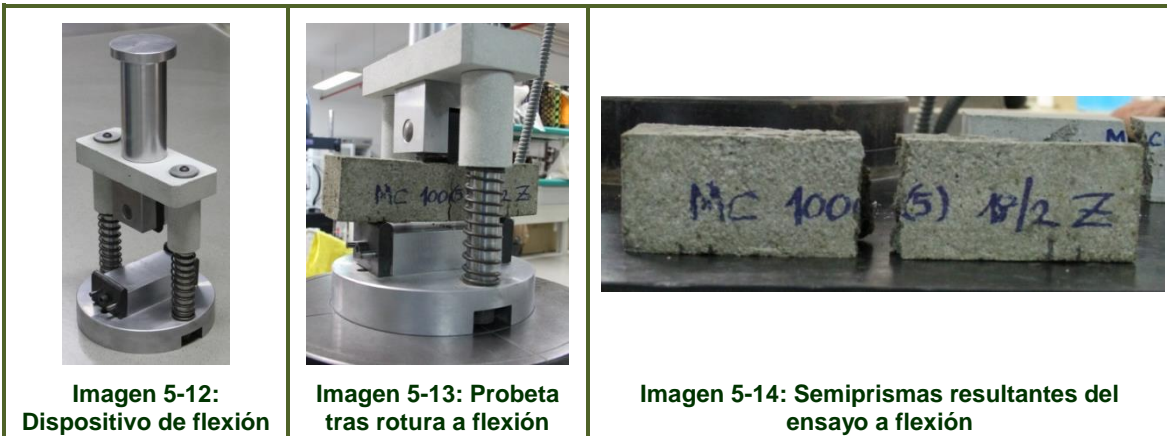
La prensa ejerce sobre la probeta, a través de los rodillos del dispositivo, una fuerza que aumenta gradualmente. Una vez realizado el ensayo se registra la carga máxima aplicada (F) en N, obteniendo, a partir de este valor y de las medidas de la probeta



(b =ancho, d =canto, l =longitud entre rodillos inferiores), la resistencia a flexión en MPa según la siguiente expresión:

$$RF = 1.5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2}$$

Tras el ensayo, la probeta queda dividida en dos semiprismas (Imagen 5-14) que serán ensayados a compresión.



5.2.2.2 Resistencia a compresión

Este ensayo se realiza conforme a la norma UNE-EN 1015-11 (104), empleando los semiprismas obtenidos tras la rotura a flexión. La prensa ejerce sobre la probeta, a través de los platos de apoyo del dispositivo, una fuerza que aumenta gradualmente. De nuevo, se registra el valor de la carga máxima aplicada (F), que teniendo en cuenta las medidas de la probeta (b =ancho, d =canto), permite obtener la resistencia a compresión en MPa.

$$RC = \frac{F}{b \times d}$$



5.2.3 Pérdida de peso

Diariamente, se realizan pesadas de las probetas mediante una báscula con precisión de centésima de gramo (Imagen 5-10) que permite conocer las variaciones de peso que experimentan los diferentes morteros de estudio. De esta forma, se pretende conocer la retracción por pérdida de peso sobre los morteros de estudio.

5.2.4 Densidad en seco

Este ensayo consiste en obtener la densidad de las probetas de mortero tras su secado en estufa a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Para su desarrollo se siguió la norma UNE-EN 1015-10 (105), utilizando el volumen real de las probetas, obtenido para cada una a partir de la medida de sus 12 aristas.

5.2.5 Coeficiente de capilaridad

Una vez obtenida la densidad en seco se emplearon las mismas probetas para el ensayo de capilaridad por absorción según la norma UNE-EN 1015-18 (106). El material impermeabilizante utilizado fue parafina y el soporte sobre el que se apoyaron las probetas durante el ensayo un tamiz de lajas.

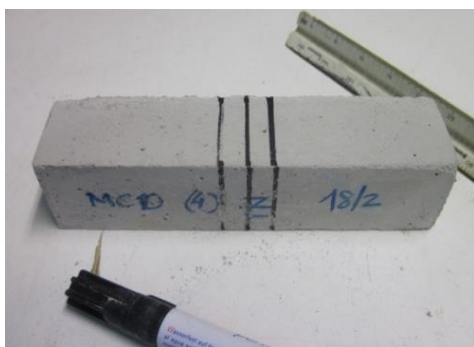


Imagen 5-18: Marcado de probetas por la mitad (sección de corte) y a 1 cm a cada lado de la mitad (profundidad de sumergido)



Imagen 5-19: Parafina y cazuela utilizada para fundirla.



Imagen 5-20: Probetas con la sección de corte sumergida, apoyadas en un tamiz de barras. El agua está contenida en una bandeja.



Imagen 5-21: Probetas tras ensayo de capilaridad (las de la izquierda MC0, las de la derecha MC100)

5.3 Otras propiedades

5.3.1 Reacción al fuego

No se ha realizado ningún ensayo de reacción al fuego. Simplemente se ha determinado qué morteros pueden ser clasificados sin necesidad de ensayo como clase de reacción al fuego A1 y cuáles no. Esto se determina a partir del contenido en materia orgánica del mortero, obtenido de forma analítica en % de masa de mortero fresco.



5.3.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica del mortero se predice a partir de la densidad en seco, siguiendo la tabla A.12 de la norma UNE-EN 1745 (107) (Tabla 5-1), donde se toman los valores cuya probabilidad de ser superados es del 50% y se interpola linealmente.

Tabla A.12 – Morteros (mortero para fábrica y mortero para enfoscado)

Densidad del material (densidad neta en seco) [kg/m ³]	$\lambda_{10,drv,mat}$ [W/(m·K)]		Coeficiente de difusión del vapor de agua μ	Calor específico c_p [J/(kg·K)]
	$P = 50\%^a$	$P = 90\%$		
200	0,074	0,081	5/20	1 000
300	0,086	0,094	5/20	1 000
400	0,10	0,11	5/20	1 000
500	0,12	0,13	5/20	1 000
600	0,14	0,15	5/20	1 000
700	0,16	0,17	5/20	1 000
800	0,18	0,20	5/20	1 000
900	0,21	0,23	5/20	1 000
1 000	0,25	0,27	5/20	1 000
1 200	0,33	0,36	5/20	1 000
1 400	0,45	0,49	5/20	1 000
1 600	0,61	0,66	15/35	1 000
1 800	0,82	0,89	15/35	1 000
2 000	1,11	1,21	15/35	1 000

$f_{\psi} = 4 \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}$

^a Los cálculos en apoyo de la Directiva sobre la eficiencia energética de los edificios (*Energy Performance of Buildings Directive, EPBD*) corresponden a los edificios y no a los productos individuales. Los valores U utilizados en tales cálculos están basados en la resistencia térmica media de los elementos para fábrica. Por ello, el valor λ recomendado del material es del fractil del 50%.

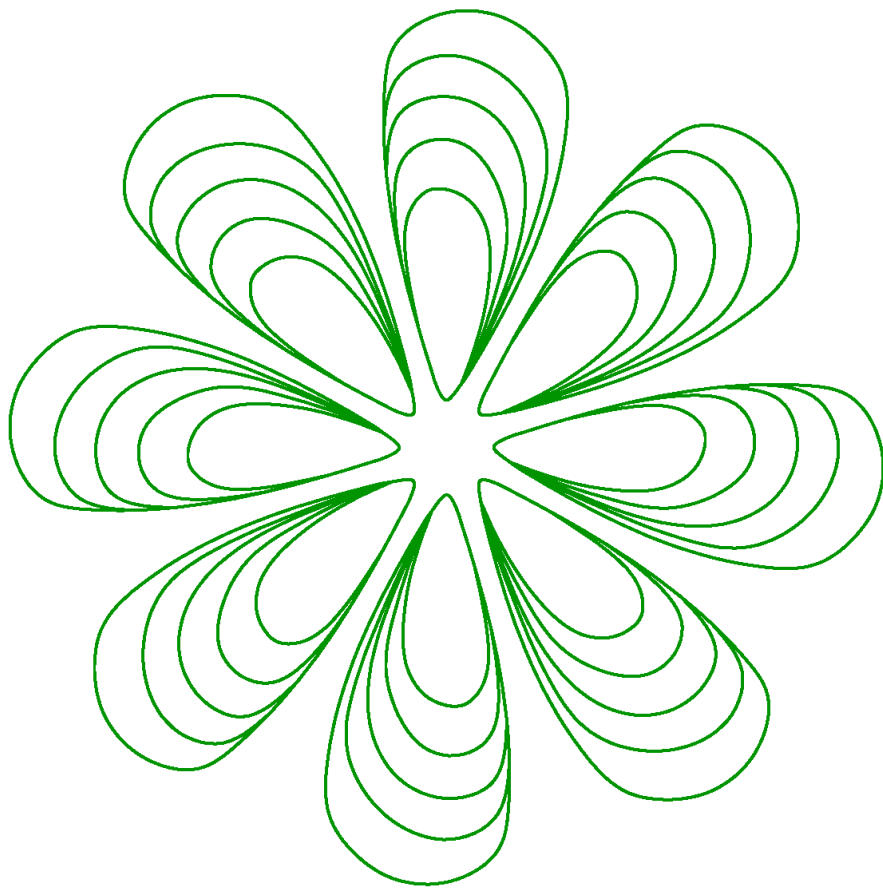
Tabla 5-1: Tabla A.12 de la norma UNE-EN 1745.

5.3.2 Permeabilidad al vapor de agua

De nuevo, se predice la permeabilidad al vapor de agua según la tabla A.12 de la norma UNE-EN 1745 (107) (Tabla 5-1), tomando los valores cuya probabilidad de ser superados es del 50% e interpolando linealmente.



6 Resultados



6 Resultados

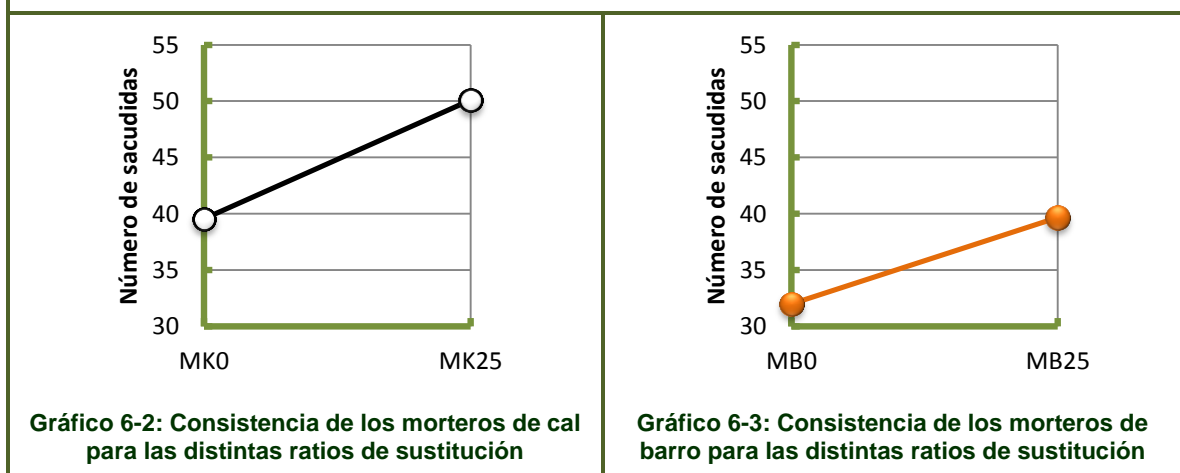
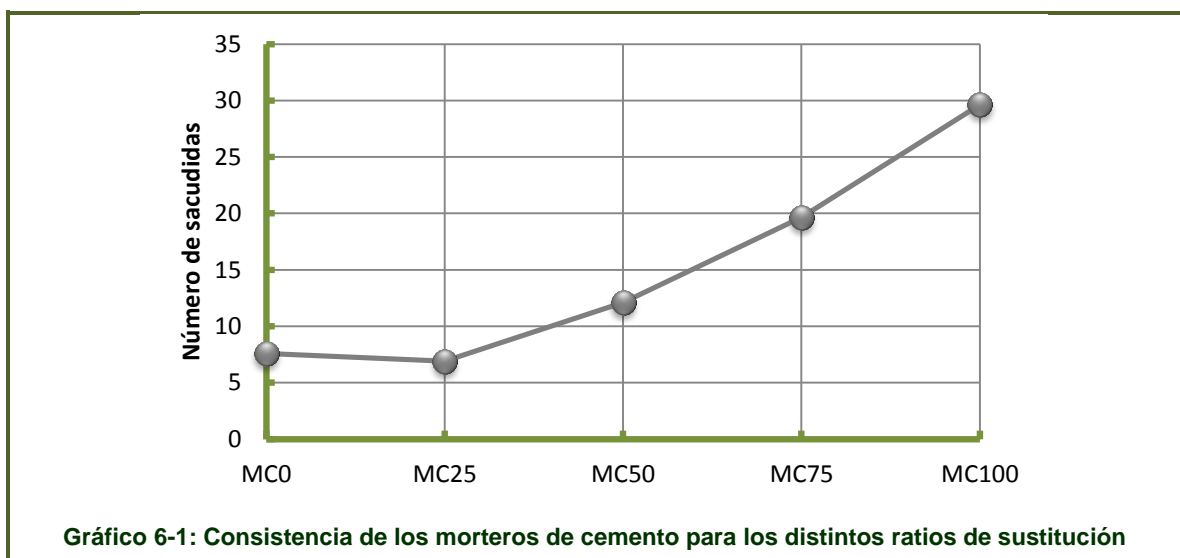
A continuación se exponen los resultados obtenidos con la realización del plan de ensayos detallado en el apartado anterior. Cada material se representa en los gráficos siguiendo la misma leyenda:

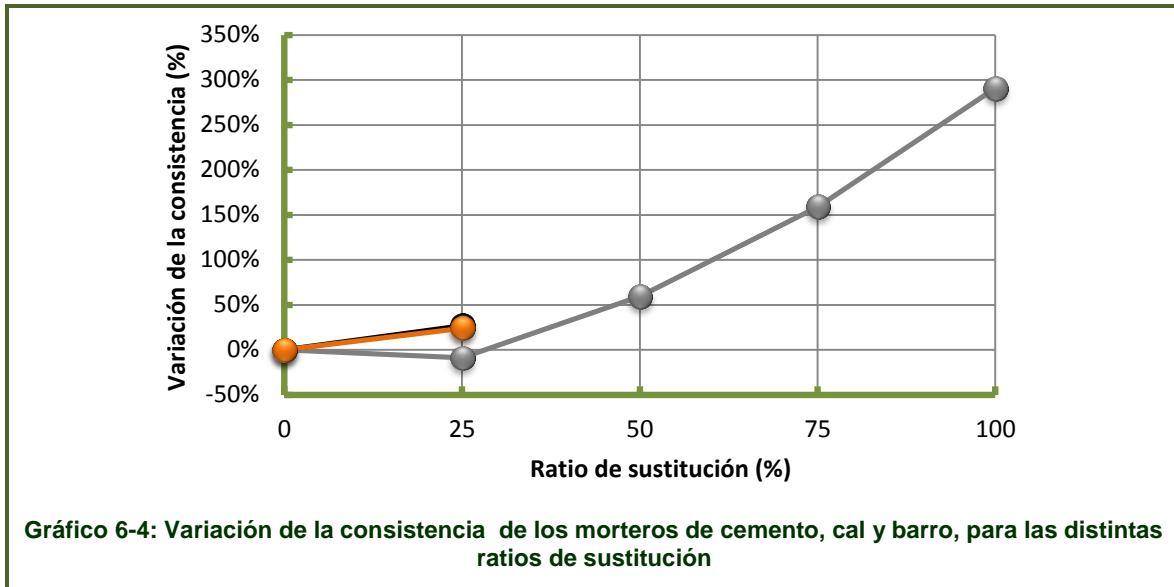
Cemento		Cal		Barro	
---------	---	-----	---	-------	---

6.1 En fresco

6.1.1 Consistencia

Como puede observarse, para las dosificaciones empleadas, la consistencia de los morteros de cemento es menor que la de los morteros de cal y de barro. Además, la consistencia de los morteros de cal y de barro, a partir de la ratio de sustitución 25%, es demasiado alta para ser evaluada mediante el procedimiento de ensayo utilizado.





El aumento de la consistencia entre los porcentajes de sustitución 0 y 25% en los morteros de cal y barro es prácticamente idéntico (aproximadamente un 25%), mientras que en el cemento, para estas dos ratios, se produce una ligera reducción de la consistencia. A partir del 25% de sustitución solamente se dispone de datos sobre el mortero de cemento, y puede observarse como la consistencia aumenta de manera prácticamente lineal, hasta alcanzar una variación del 300% para el MC100. Este aumento de la consistencia del mortero puede atribuirse por un lado a la lajosidad del árido procedente de concha de mejillón y, por otra parte, a su mayor superficie específica respecto del árido convencional. Dado que la relación agua/ligante se mantiene constante para todas las ratios de sustitución, el aumento en la cantidad de concha supone una mayor relación superficie específica/agua provocando, de esta forma, un aumento de la consistencia.

6.1.2 Densidad

La presencia de arena de concha de mejillón en los morteros produce un descenso de la densidad respecto a aquellos fabricados con arena natural. Este efecto se debe principalmente a la mayor porosidad que producen en los morteros.

El Gráfico 6-6 revela mayores variaciones de la densidad en fresco para los morteros de cemento a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de arena natural por arena procedente de concha de mejillón, llegando a reducciones de un 30% para el MC100 respecto del valor obtenido para el MC0.

En los morteros de cal y barro las variaciones son notablemente inferiores, alcanzándose disminuciones del 3 y el 5% para MK100 y MB100, respectivamente.



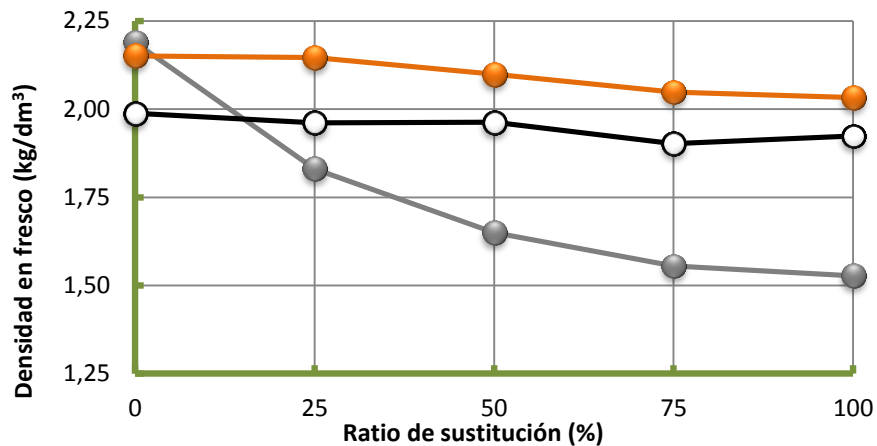


Gráfico 6-5: Densidad en estado fresco de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución

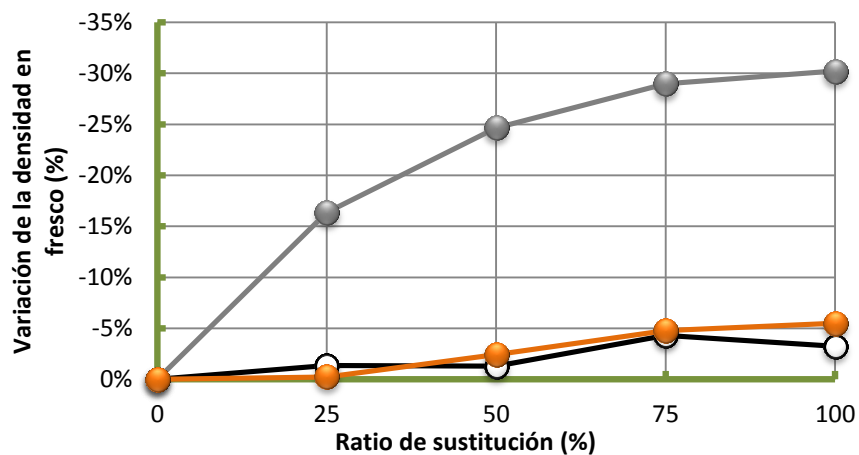


Gráfico 6-6: Variación de la densidad en fresco de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.

6.1.3 Contenido en aire

El contenido en aire presenta valores similares para los morteros de cal y barro, en torno al 6% para sustituciones del 50% de arena o del 8% para el 100%. Sin embargo, en los morteros de cemento el contenido en aire alcanza el 35% para las ratios más altas, dato que supone un aumento de seis veces el valor obtenido para el MC0.

Estas diferencias entre los morteros fabricados con los distintos ligantes se corresponden con el patrón de comportamiento de la densidad en estado fresco y endurecido, donde los morteros de cemento con altos porcentajes de concha de mejillón experimentaron variaciones considerablemente superiores a los fabricados con cal o barro. Se constata, por tanto, un aumento del contenido en aire y un descenso de la densidad a medida que se incrementa la presencia de concha de mejillón en los morteros.

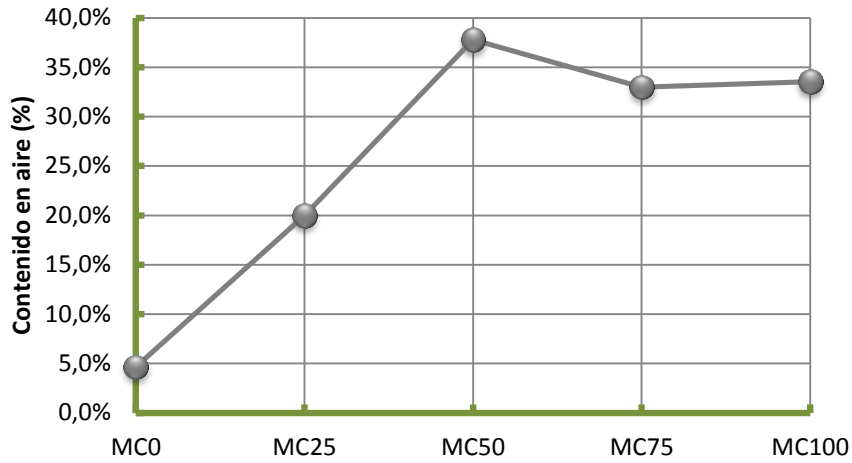


Gráfico 6-7: Contenido en aire del morteros de cemento, para las distintas ratios de sustitución

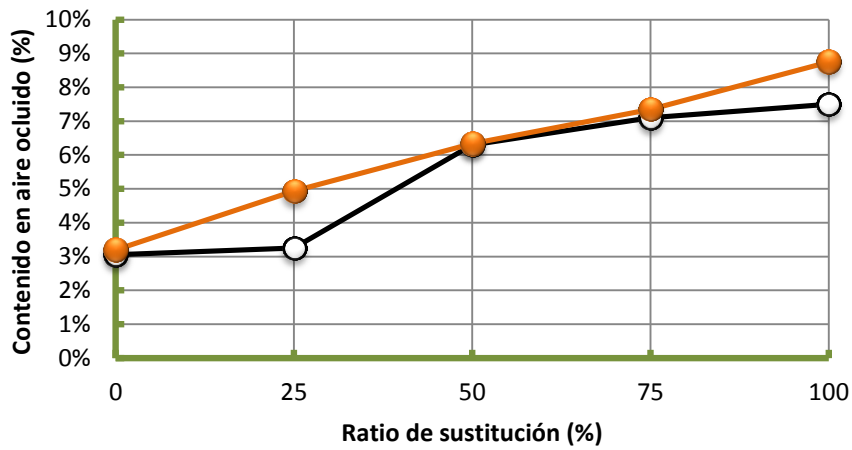


Gráfico 6-8: Contenido en aire de los morteros de cal y barro para las distintas ratios de sustitución

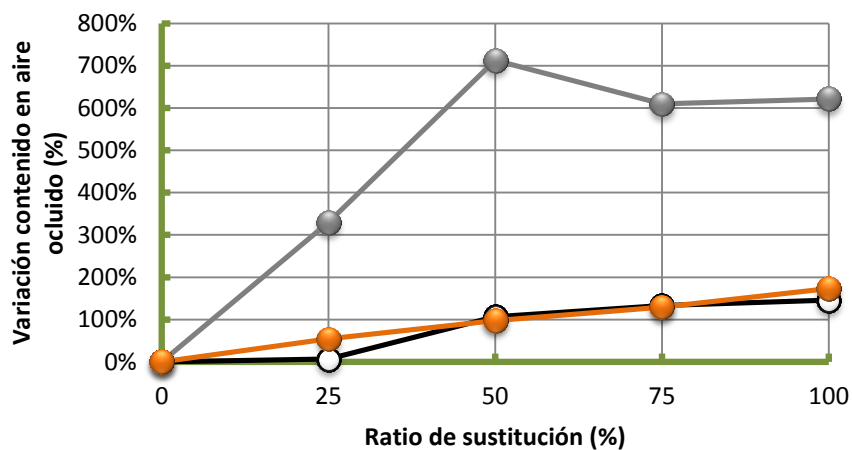


Gráfico 6-9: Variación del contenido en aire de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.

6.2 En endurecido

6.2.1 Densidad

Al igual que en estado fresco, se obtiene un descenso de la densidad a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de arena natural por concha de mejillón. De nuevo, se producen mayores variaciones en los morteros de cemento que en los fabricados con cal y barro, donde la densidad del MC100 se reduce en un 30% respecto al mortero de comparación, frente a variaciones del 4 y 8% para el MK100 y MB100, respectivamente.

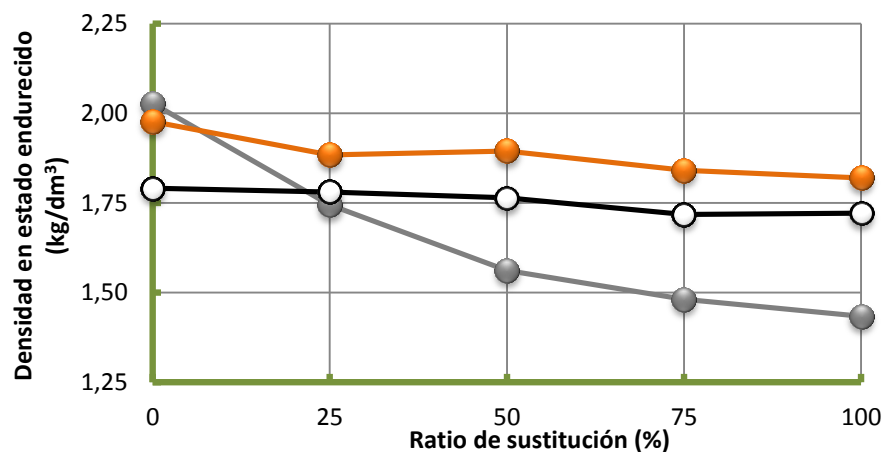


Gráfico 6-10: Densidad en estado endurecido de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución

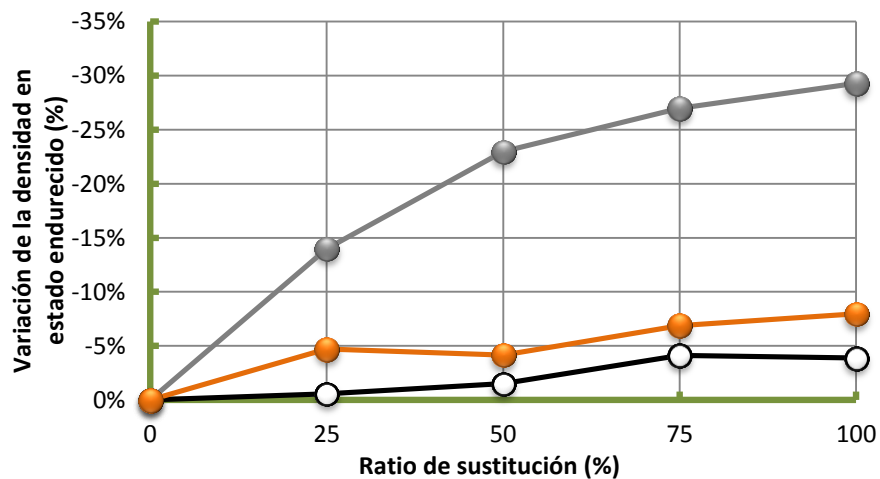


Gráfico 6-11: Variación de la densidad en estado endurecido de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.



6.2.2 Resistencia mecánica

6.2.2.1 A flexión

La resistencia a flexión de los morteros de cemento disminuye conforme aumenta la ratio de sustitución de arena procedente de concha de mejillón. Esta variación puede atribuirse al aumento de la relación superficie específica de árido/ ligante, al descenso de la densidad y al aumento de la porosidad.

En cuanto a la evolución temporal que experimentan los morteros de cemento, se observa un comportamiento similar a edades tempranas, 2 y 7 días, para los distintos porcentajes de sustitución. Debido al efecto retardador del fraguado y del endurecimiento que tiene la presencia de materia orgánica, los morteros de cemento con concha de mejillón siguen aumentando su resistencia hasta los 28 días de edad, a diferencia del MC0 que apenas ve incrementado valor entre 7 y 28 días.

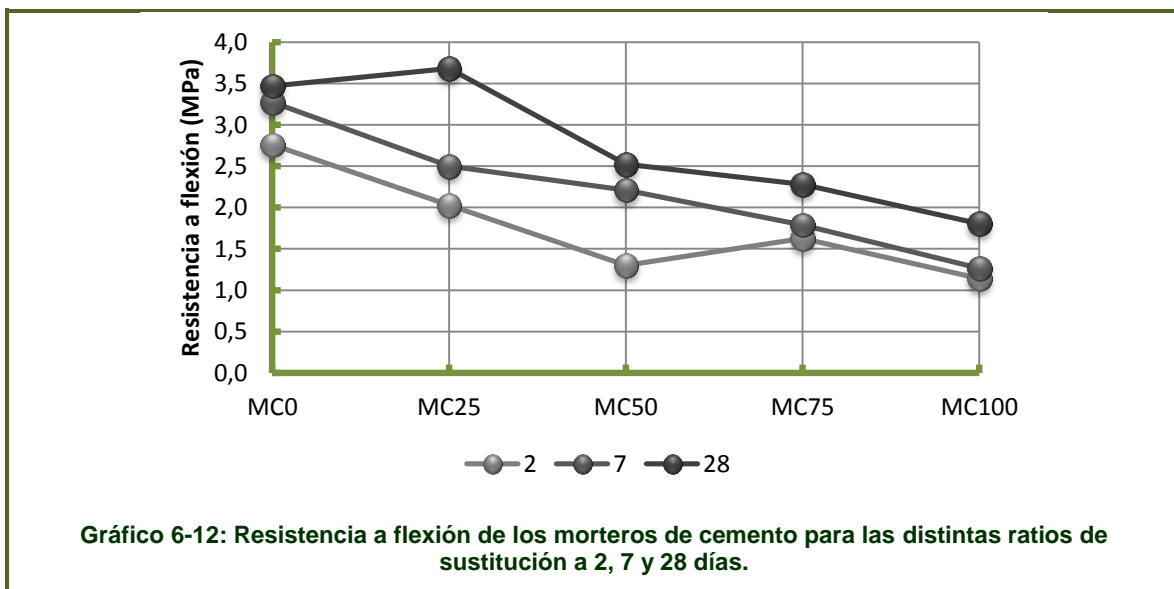


Gráfico 6-12: Resistencia a flexión de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución a 2, 7 y 28 días.

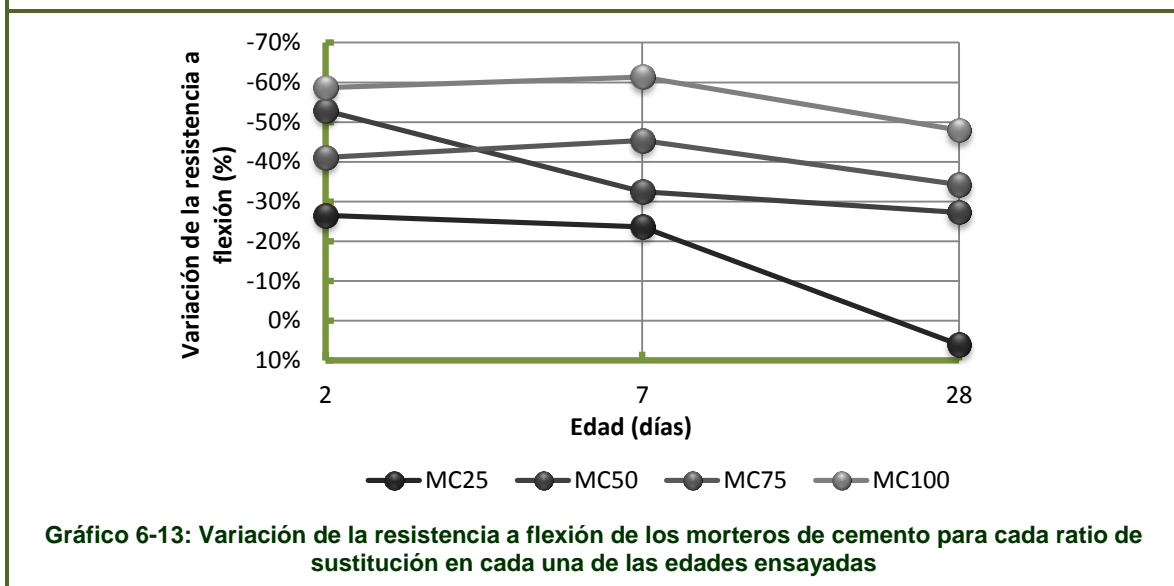


Gráfico 6-13: Variación de la resistencia a flexión de los morteros de cemento para cada ratio de sustitución en cada una de las edades ensayadas

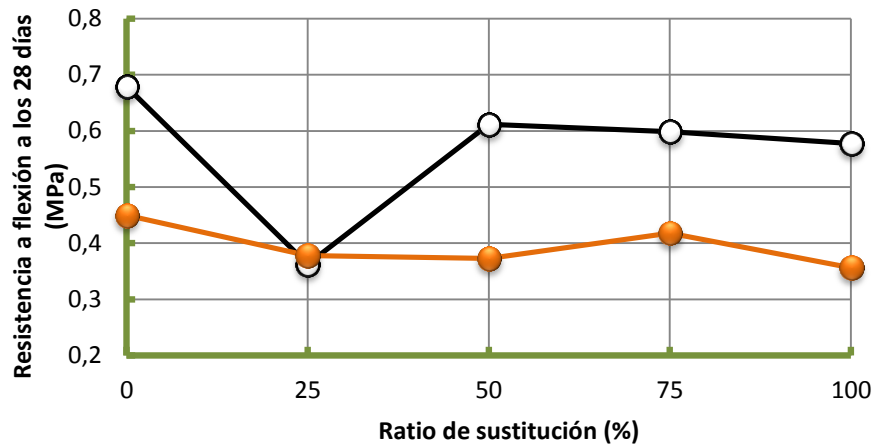


Gráfico 6-14: Resistencia a flexión a los 28 días de los morteros de cal y barro para las distintas ratios de sustitución.

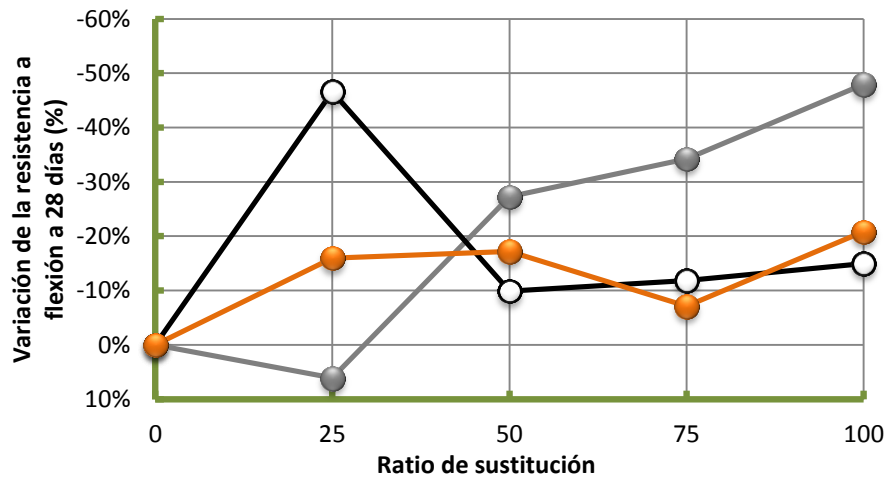


Gráfico 6-15: Variación de la resistencia a flexión a los 28 días de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.

Los morteros de cal y barro experimentan un comportamiento similar en presencia de concha de mejillón, con caídas de su resistencia a flexión del 10-20% para altos porcentajes de sustitución de la arena natural (>50%), frente al 30-50% que sufren los morteros de cemento.

La disminución de la resistencia a flexión se atribuye al aumento de la relación superficie específica de árido/ligante, al aumento de la porosidad en el mortero y al descenso de la densidad con el aumento de la concha de mejillón presente en los morteros. Por tanto, se constata, como era previsible, una mayor caída de la resistencia a flexión en morteros de cemento que en aquellos fabricados con cal y barro.



6.2.2.2 A compresión

La resistencia a compresión muestra un comportamiento similar a la de flexión. De nuevo, los morteros de cemento experimentan un descenso de su resistencia a medida que aumenta la ratio de sustitución de arena natural por concha de mejillón. Esta disminución se debe al aumento de la relación superficie específica de árido/ ligante, a la menor densidad y mayor porosidad de los morteros con concha de mejillón. Con el paso del tiempo, la variación entre los distintos ratios se reduce sensiblemente debido al ya comentado efecto retardador del fraguado y endurecimiento que produce la presencia de materia orgánica.

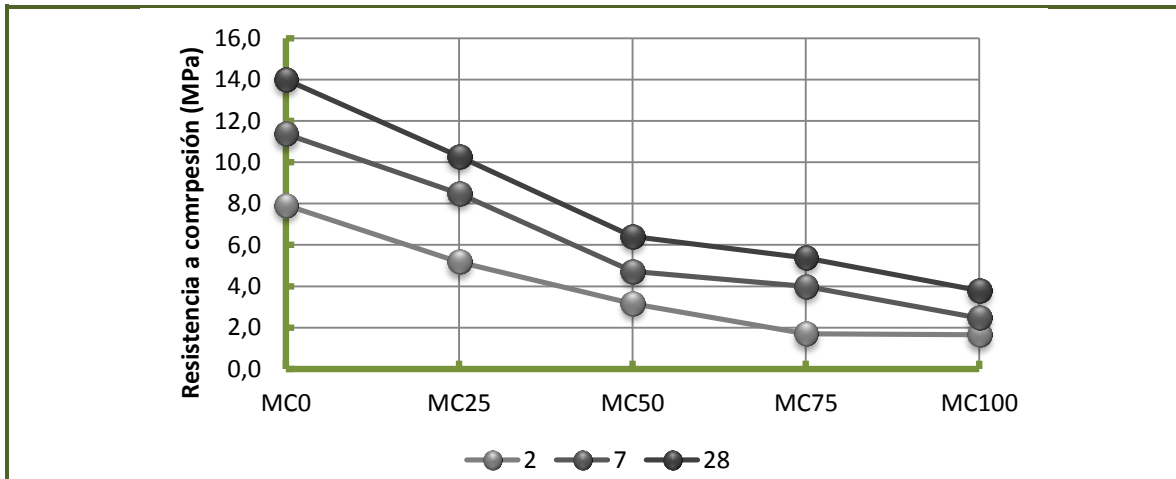


Gráfico 6-16: Resistencia a compresión de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución a 2, 7 y 28 días.

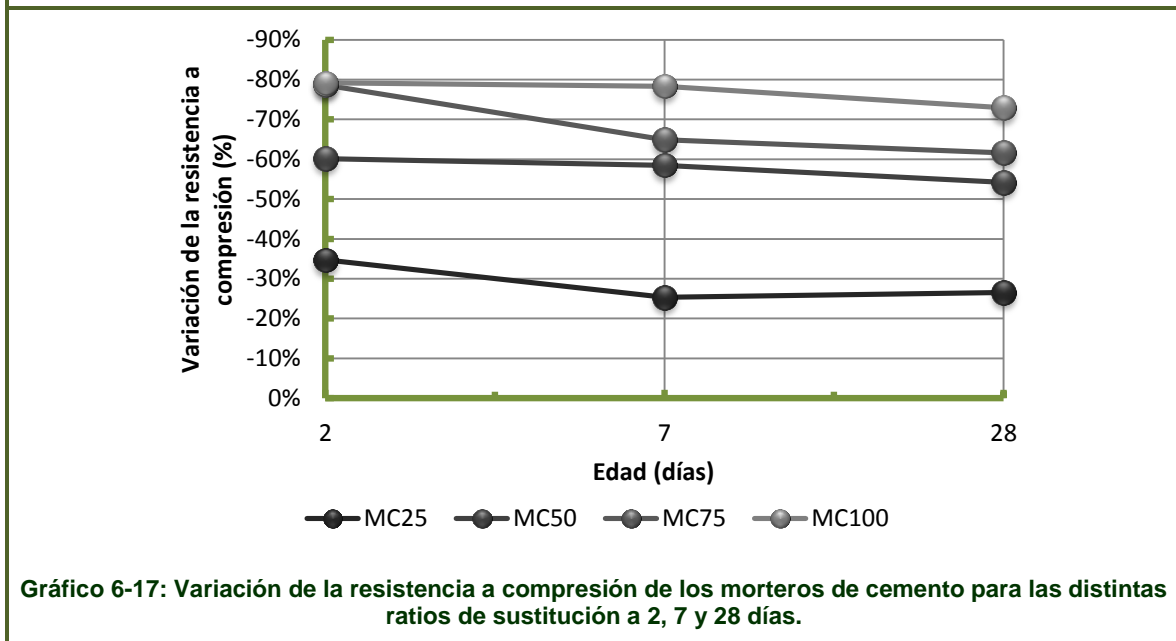


Gráfico 6-17: Variación de la resistencia a compresión de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución a 2, 7 y 28 días.



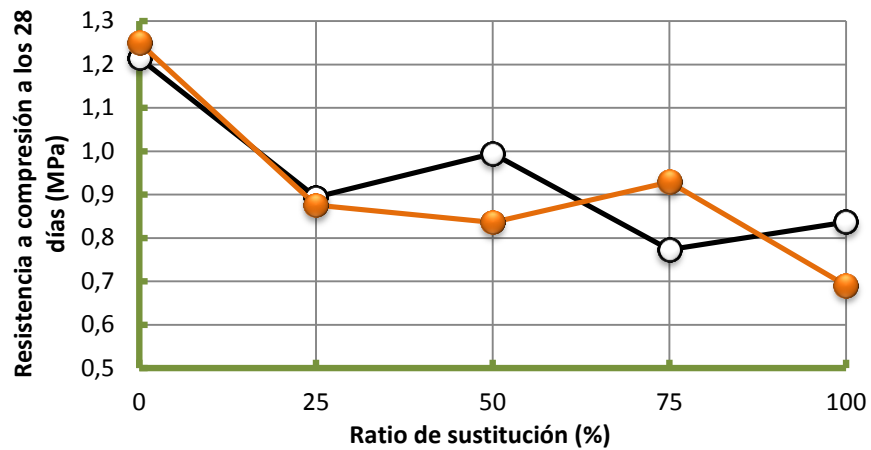


Gráfico 6-18: Resistencia a compresión de los morteros de cal y barro para las distintas ratios de sustitución

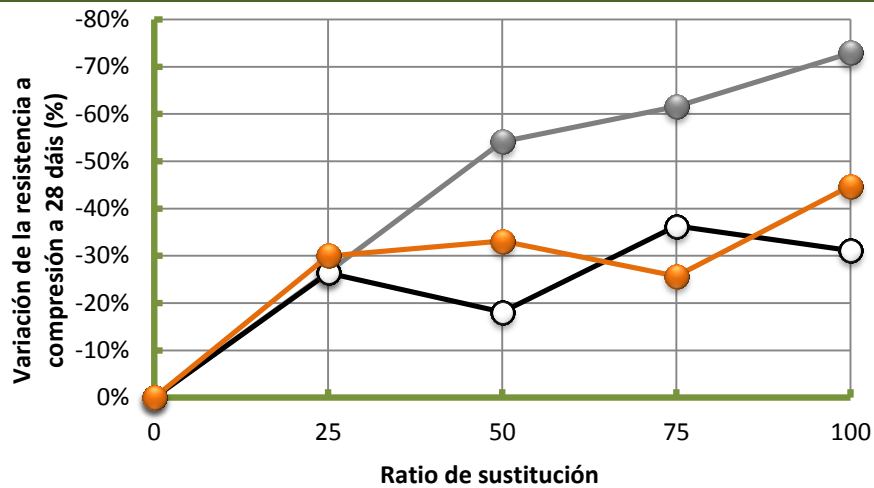
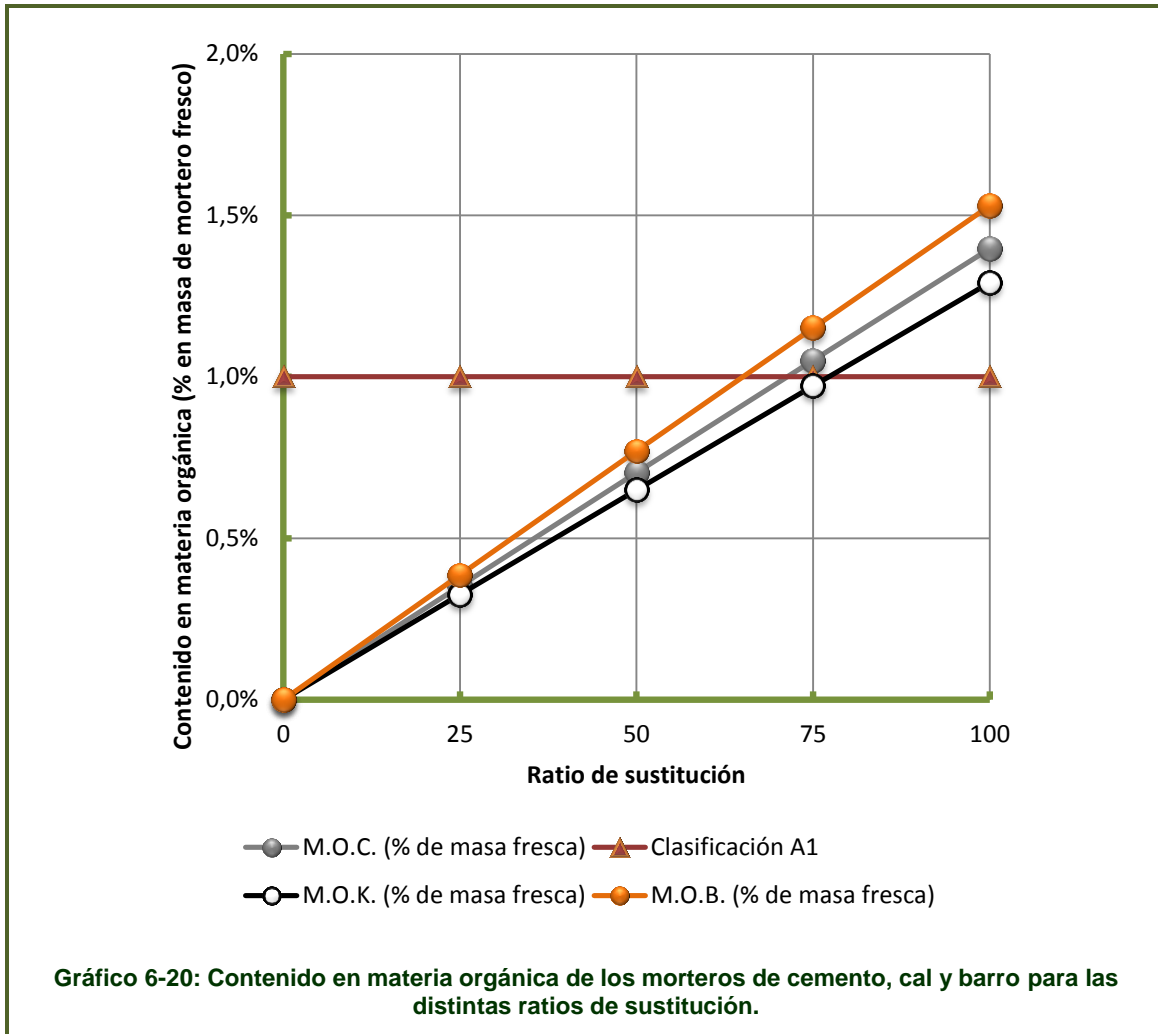


Gráfico 6-19: Variación de la resistencia a compresión de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución

Los morteros de cal y barro presentan una menor caída de su resistencia a compresión que aquellos fabricados con cemento para altos contenidos de concha de mejillón (>50%). Este efecto se atribuye a la mayor variación de densidad que presentan los MC.

6.2.3 Reacción al fuego

Como puede apreciarse, los morteros fabricados íntegramente con arena de mejillón, el MC75 y el MB75, contienen una proporción de materia orgánica tal que no pueden ser clasificados automáticamente como A1 según su reacción al fuego. Estos morteros requerirían ser ensayados según norma UNE-EN 13501-1 para determinar esta propiedad.



6.3 Otras propiedades de los morteros de cemento

Además de las propiedades detalladas en el apartado anterior, se incluyen a continuación algunas de las propiedades que en este caso se obtuvieron únicamente para los morteros de cemento.

6.3.1 Pérdida de peso

Las curvas de pérdida de peso de los MC permiten conocer las variaciones que sufre cada mortero en ausencia de carga y que, por tanto, están relacionadas con la retracción.

En este caso, el MC0 experimenta mayores pérdidas de peso que los fabricados con concha de mejillón, alcanzando valores superiores al 8%. Por otra parte, el MC50 presenta la menor pérdida de peso con un 6.5%, siendo un 24% menor que el mortero patrón.



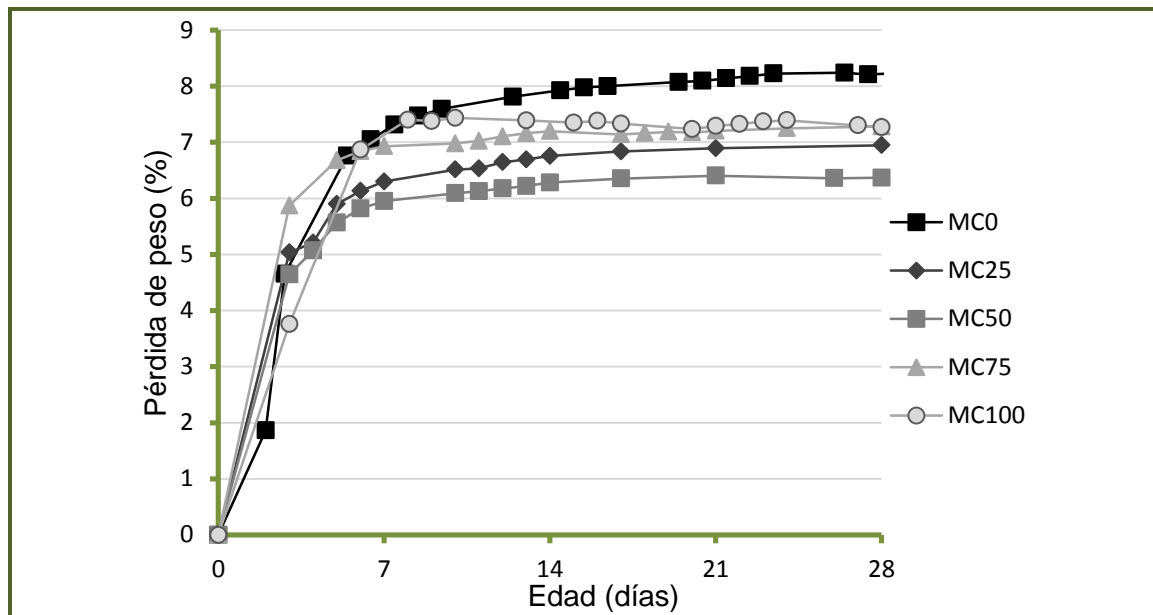


Gráfico 6-21: Pérdida de peso de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución

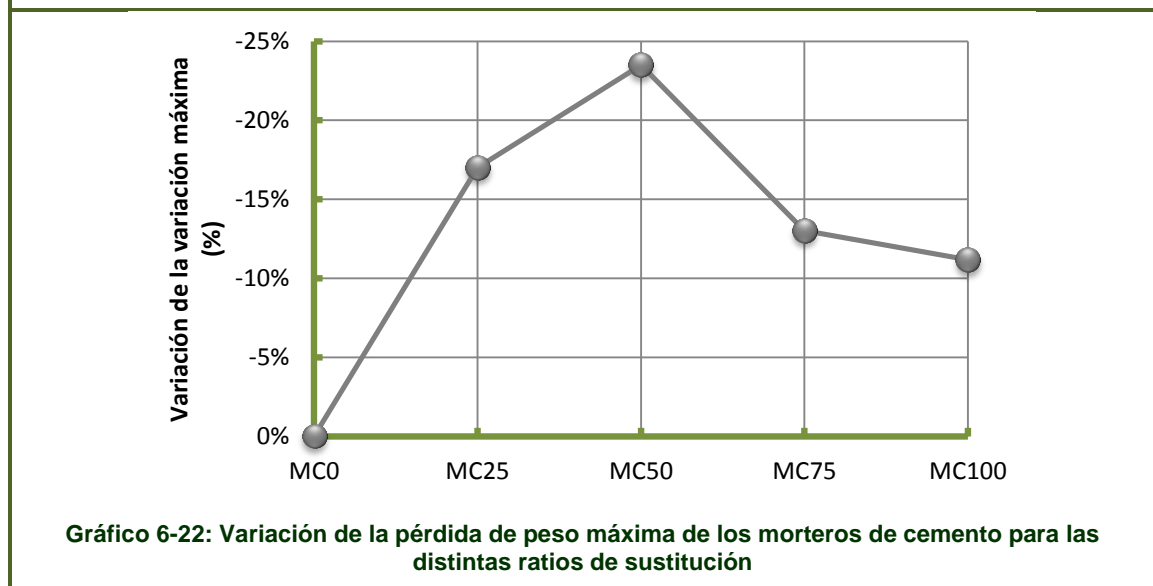


Gráfico 6-22: Variación de la pérdida de peso máxima de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución

6.3.2 Densidad en seco

La densidad en seco disminuye con el aumento del porcentaje de sustitución de arena natural por concha de mejillón. De esta forma, se registró la máxima variación para el MC100, donde se alcanza un valor de 1.278kg/l, que supone una reducción del 32% frente a los 1.871kg/l que se obtuvieron para el MC0.

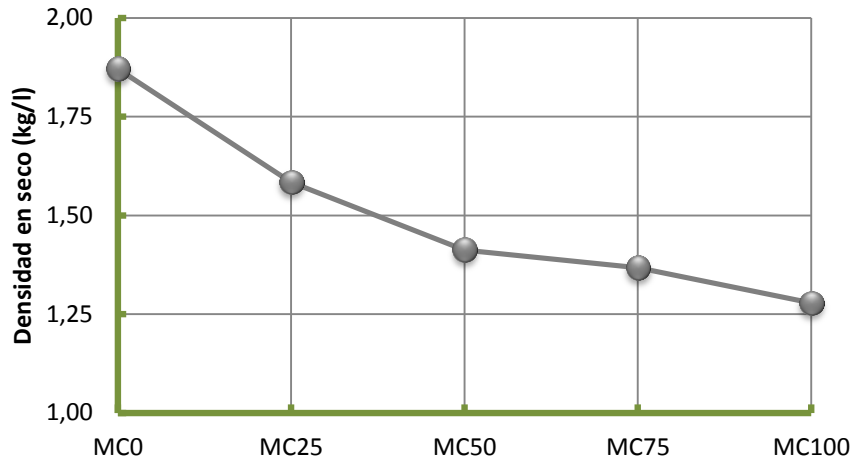


Gráfico 6-23: Densidad en seco de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución

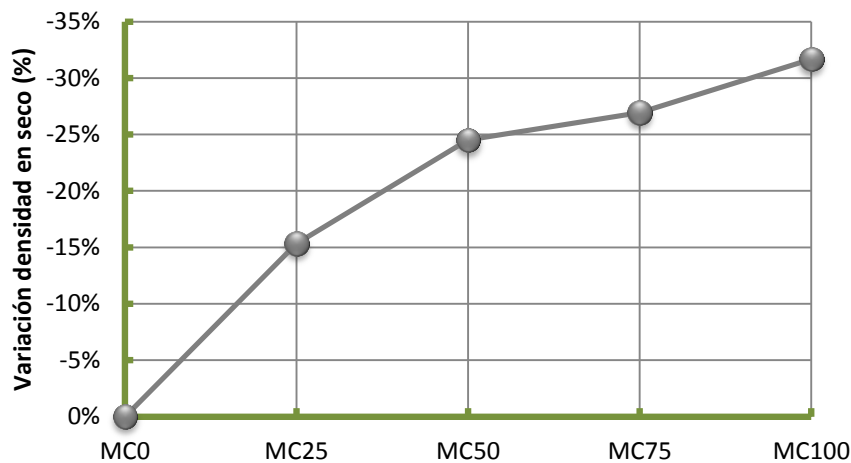


Gráfico 6-24: Variación de la densidad en seco de los morteros de cemento

6.3.3 Coeficiente de capilaridad

El coeficiente de capilaridad disminuye cuando aumenta la ratio de sustitución, siendo esta disminución especialmente destacable para el MC25 respecto del mortero patrón (60%). Observando los valores absolutos, se concluye que los morteros MC25 y MC50 se clasifican en función a su coeficiente de capilaridad, según la norma UNE-EN 998-1, como W1, mientras que MC75 y MC100 se clasifican como W2.



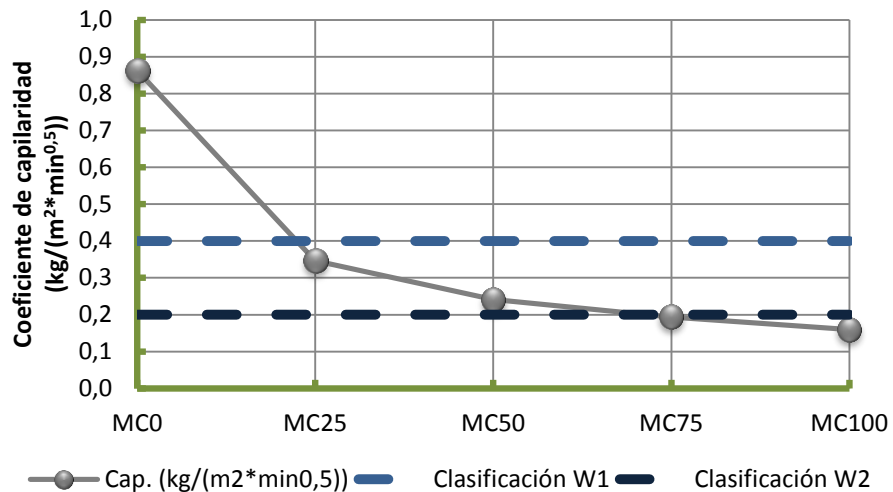


Gráfico 6-25: Coeficiente de capilaridad de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución

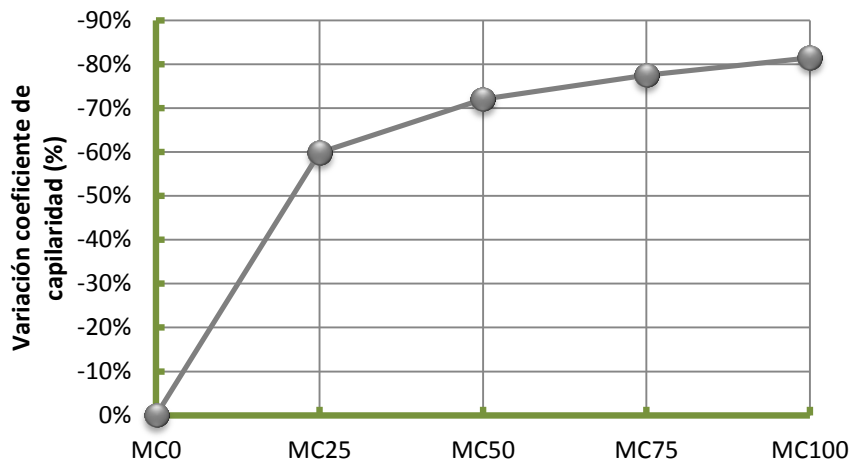


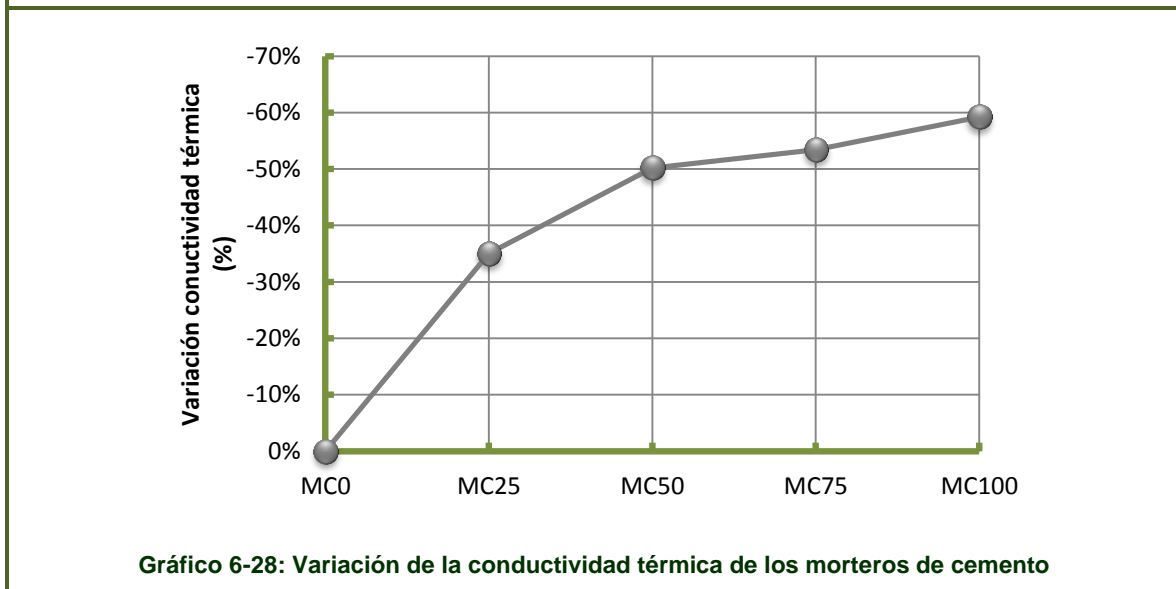
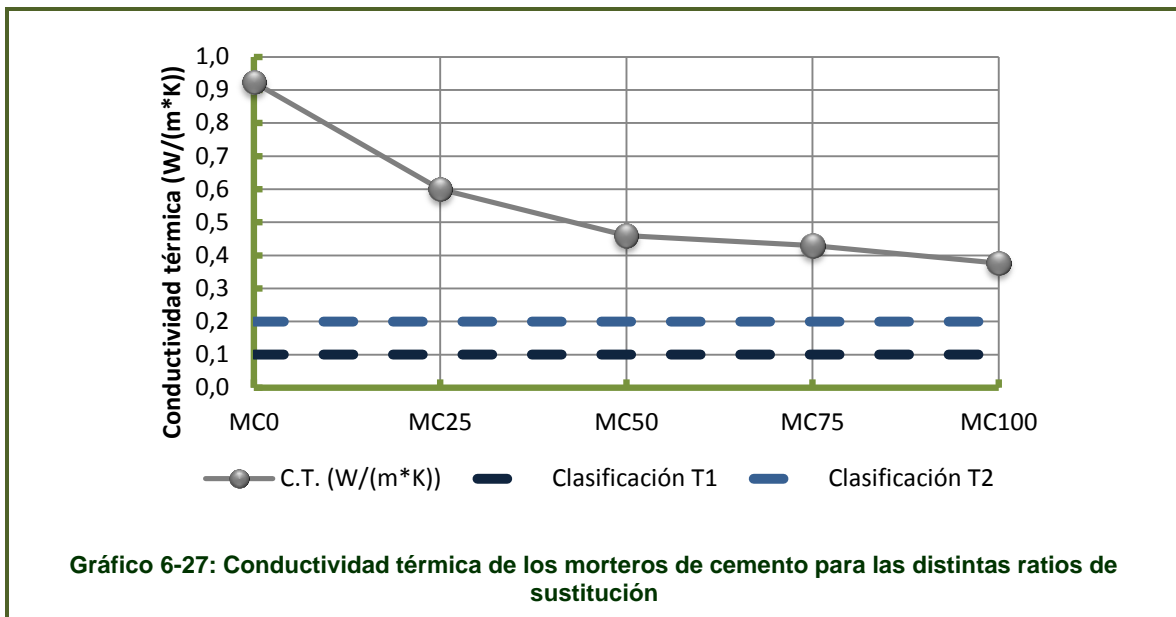
Gráfico 6-26: Variación del coeficiente de capilaridad de los morteros de cemento

6.3.4 Conductividad térmica

La conductividad térmica es directamente proporcional a la densidad en seco, por lo que, al igual que esta otra propiedad, disminuye conforme aumenta la ratio de sustitución, siendo esta variación menos perceptible cuanto mayores son los porcentajes de sustitución entre los que se estudia.

En cuanto a los valores absolutos, cabe destacar que la menor conductividad registrada son los 0.38W/(m*K) del MC100, por lo que ninguno de los morteros puede ser clasificado como mortero térmico según la norma UNE-EN 998-1.





6.3.5 Permeabilidad al vapor de agua

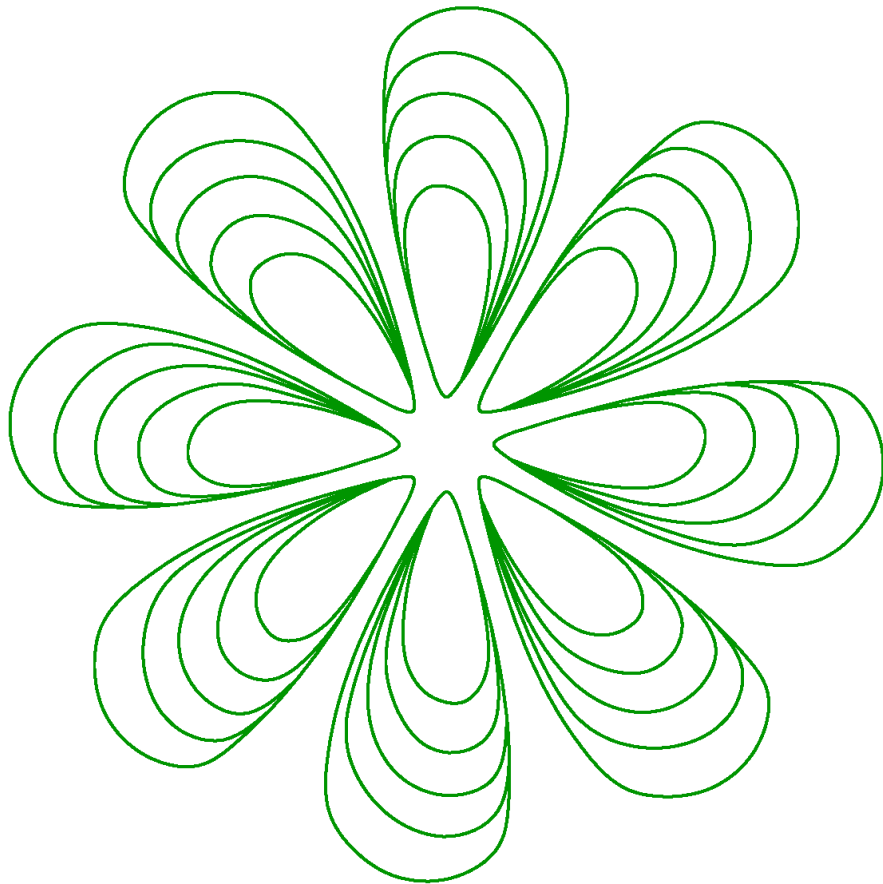
La norma UNE-EN 1745 (107) recoge los valores del coeficiente de difusión del vapor de agua (μ) para morteros de enfoscado. Según la tabla A.12 de dicha norma, los morteros con una densidad en seco por encima de los 1600kg/m^3 , valor superado únicamente por el MC0, tienen un coeficiente de entre 15 y 35.

Los morteros fabricados con concha de mejillón tendrían un coeficiente de entre 5 y 20 al tener una densidad en seco por debajo de 1600kg/m^3 .



7 Relación

BREEAM - TFG



7 Relación BREEAM - TFG

7.1 ¿Qué es BREEAM?

BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Method) es el método de evaluación y certificación de la sostenibilidad de la edificación más utilizado del mundo. Se corresponde con un conjunto de herramientas y procedimientos encaminados a medir, evaluar y ponderar los niveles de sostenibilidad, tanto en fase de diseño, como en las fases de ejecución y mantenimiento, contemplando las particularidades propias de cada una de las principales tipologías de uso existentes (residencial, oficinas, industria, centros comerciales, centros de salud, enseñanza, etc.).

The logo for BREEAM ES, featuring the text "BREEAM" in a green, sans-serif font followed by "ES" in a larger, bold, green, sans-serif font. A registered trademark symbol (®) is positioned between the two words.

Imagen 7-1: Logotipo de BREEAM España

BREEAM es una marca privada, independiente de organismos públicos, consolidada y de prestigio, con una trayectoria de más de 20 años en el mercado de la edificación sostenible. Su práctica y experiencia está contrastada con más de 200.000 certificados emitidos, 1.000.000 de edificios registrados y una red de más de 4.700 asesores licenciados independientes.

BREEAM evalúa el impacto medioambiental de los edificios en 10 categorías: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso del Suelo y Ecología, Contaminación e Innovación, permitiendo la certificación de acuerdo a distintos niveles de sostenibilidad y sirviendo a la vez de referencia y guía técnica para una construcción más sostenible.



Imagen 7-2: Logos de cada categoría del manual BREEAM ES Comercial

Cada una de las categorías anteriores está dividida en requisitos. Cada requisito aspira a minimizar el impacto de una edificación nueva o rehabilitada en su entorno definiendo un objetivo de eficiencia medioambiental y unos criterios de evaluación que deben alcanzarse para confirmar la consecución de dicho objetivo. Toda la información se recoge en distintos manuales que varían según la tipología del edificio a evaluar.

Los objetivos van más allá de los requisitos legales y representan las buenas o mejores prácticas actuales. Cuando se logra el objetivo, el Asesor puede asignar los puntos disponibles y determinar la clasificación del edificio. (108)

7.2 Efecto de utilizar los morteros propuestos en el presente trabajo sobre la clasificación BREEAM de un edificio.

Puesto que el manual BREEAM ES Nueva Construcción se encuentra actualmente en proceso de adaptación, en el presente capítulo se referirá al manual BREEAM ES Comercial, aplicable a edificios de uso comercial, industrial u oficinas, vigente desde el año 2010 y que puede descargarse en la página web de BREEAM ES.

Una vez analizado el manual, se determina que existen tres requisitos en los cuales un proyecto que utilice morteros de cal o barro con árido secundario procedente de concha de mejillón podría obtener puntos por utilizar ese material. Estos requisitos son Gestión 3, Materiales 1 y Materiales 5.

7.2.1 GST 3: Impactos en la Zona de Obras

El objetivo del requisito es reconocer e impulsar que la gestión de las zonas de obras se lleve a cabo de manera respetuosa con el medio ambiente en términos de uso de recursos, consumo de energía y contaminación.

Para cumplir dicho objetivo, el requisito propone cumplir varias condiciones, organizadas en grupos:

- a) Seguimiento, información y establecimiento de objetivos relativos a la producción de CO₂ de los consumos de energía procedentes de las actividades de la obra.
- b) Seguimiento e información de CO₂ o energía procedente del transporte comercial a y desde la obra.
- c) Seguimiento, información y establecimiento de objetivos de consumo de agua procedentes de las actividades de la obra.
- d) Adopción de políticas de “mejores prácticas” con relación a la contaminación del aire (por partículas de polvo) proveniente de actividades de la obra.
- e) Adopción de políticas de “mejores prácticas” en relación a la contaminación de las aguas (superficiales y subterráneas) en la obra.
- f) Contratista principal con una política medioambiental de materiales.
- g) Contratista principal que aplica un Sistema de Gestión Ambiental.

Dentro del grupo “f” se plantean varios propósitos a cuyo cumplimiento contribuiría la utilización de los morteros estudiados en el presente trabajo. Estos serían:

- Uso de materiales locales
- Uso de materiales adquiridos de forma responsable
- Uso de materiales con un alto contenido reciclado
- Uso de materiales con bajo impacto incorporado

7.2.2 MAT 1: Materiales de Bajo Impacto Ambiental

El objetivo de este requisito es recompensar e impulsar la utilización de materiales de construcción de bajo impacto ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio.



Este objetivo puede alcanzarse cumpliendo uno de los siguientes criterios de evaluación:

- Que los componentes principales de los elementos del edificio contengan productos y materiales que dispongan de etiquetas y/o declaraciones ambientales.
- Que se haya utilizado una herramienta de ACV (Análisis de Ciclo de Vida) y se pueda demostrar que dicha evaluación ha influido positivamente en el diseño del edificio.

La cal y la tierra no se comercializan con etiqueta ambiental por ser materiales simples y poco procesados. El árido procedente de concha de mejillón no dispone aún de ningún tipo de etiqueta, puesto que se encuentra en fase experimental.

En cualquier caso, la segunda vía para cumplir este requisito siempre será posible, ya que de realizarse un ACV de un edificio con este material, éste siempre repercutiría sobre el mismo de manera positiva. Actualmente, se sabe que la extracción de árido convencional de cantera consume (para fabricación de hormigón) entre 0.021 y 0.043 GJ/t liberando entre 1.31 y 2.66 kg/t de CO₂ (37). Por otra parte, la obtención del árido de mejillón supone un consumo de energía de entre 0.008 y 0.01 GJ/t por lo que la sustitución del primero por el segundo siempre supone un ahorro energético y la reducción de emisiones de CO₂.

7.2.3 MAT 5: Aprovisionamiento Responsable de Materiales

El objetivo de este requisito es reconocer y fomentar la especificación, en los elementos principales del edificio, de materiales que hayan sido adquiridos de forma responsable.

El material estudiado en el presente trabajado se adquiere de manera responsable, puesto que es un subproducto industrial que de no reciclarse acabaría depositado en vertedero. Esto podría demostrarse mediante un certificado sobre el propio producto (por ejemplo según la norma BES6001:2008) o teniendo implantado la empresa suministradora un sistema de gestión ambiental certificado (SGA).

7.2.4 RSD 2: Áridos reciclados

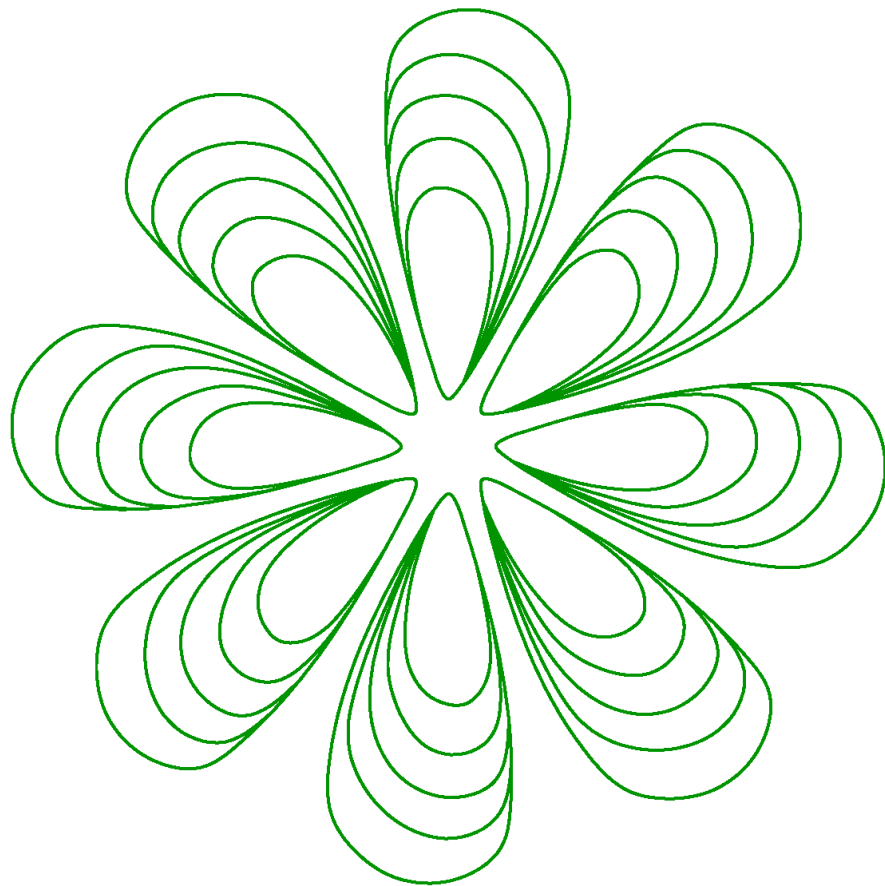
El objetivo de este requisito es reconocer y fomentar el uso de áridos reciclados y secundarios en la construcción, reduciendo así la demanda de material virgen.

Este objetivo se concreta en la exigencia de utilización de un 25% de áridos reciclados y/o secundarios en ciertos elementos constructivos, entre los que no se encuentran los revestimientos con mortero. Por lo tanto, este requisito no guardaría relación con nuestro material, aunque en futuros manuales se prevé la modificación del requisito para tener en cuenta el uso de áridos reciclados y/o secundarios en morteros.

7.3 Conclusión

Los morteros fabricados con concha de mejillón presentan un menor impacto ambiental que aquellos que contienen arena natural. Por este motivo pueden relacionarse con un modelo de certificación como BREEAM, contribuyendo a la obtención de puntos por parte de un hipotético edificio cuyo equipo de diseño decidiese incluir este tipo de material para la ejecución de sus revestimientos, tal como se plantea en este trabajo.

8 Conclusiones y futuras líneas



8 Conclusiones y futuras líneas

El sector de la construcción genera un considerable volumen de residuos y contaminación a nivel global. En los últimos años se ha tomado conciencia de la necesidad de cambio por lo que han surgido nuevos conceptos como la bioconstrucción, definida como la forma de construir respetuosa con la salud de las personas, del entorno y del planeta.

Los materiales acordes con los principios de bioconstrucción son los no tóxicos y de bajo impacto ambiental y social. Dentro de estos materiales se encuentra el árido procedente de concha de mejillón, un subproducto que se obtiene a partir de un residuo generado por una de las principales actividades industriales de Galicia. El proceso al que se somete este residuo conlleva un consumo energético considerablemente inferior al que requiere la extracción en cantera de árido convencional. También se enmarcan como materiales propios de la bioconstrucción la cal y el barro, presentes en la construcción tradicional pero desplazados en la actualidad por el cemento.

8.1 Conclusiones

Tras el análisis de las propiedades del árido procedente de concha de mejillón y la caracterización de los morteros de revestimiento fabricados con este árido y con cal, barro y cemento como ligantes, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

8.1.1 Sobre el material procedente de concha de mejillón

La composición química del árido procedente de concha de mejillón resulta similar a la de otros áridos convencionales (carbonato cálcico). Sin embargo, contiene ciertas cantidades de cloruros y de materia orgánica que podrían ser un inconveniente si se plantease su uso con acero, como podría ser el caso del hormigón armado. Por otra parte, se constató su buena resistencia al desgaste así como una densidad de partícula similar a la de los áridos convencionales. Pero sin duda la principal particularidad del árido procedente de concha de mejillón es la forma de sus partículas. Éstas son predominantemente lajosas, y esto repercute directamente sobre las características de cualquier material que se produzca con ellos, ya que la disposición entre las lajas generará una red de poros mayor que la que pueden provocar las partículas redondeadas de un árido convencional.

8.1.2 Sobre los morteros

Tras el desarrollo del programa experimental, se han obtenido una serie de resultados que avalan el uso del árido procedente de concha de mejillón en distintos porcentajes de sustitución para fabricar morteros de revestimiento con cemento. Con los datos obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los morteros de cemento con concha de mejillón presentan un menor coeficiente de capilaridad, una menor conductividad térmica y una menor pérdida de peso frente a los morteros con arena natural. Por tanto, la concha de mejillón mejora las prestaciones de los morteros convencionales en este ámbito.
- El carácter lajoso de la concha de mejillón provoca un aumento de la consistencia y un descenso de la resistencia a flexión y a compresión, efecto que puede ser compensado con mayores proporciones de agua o de ligante respectivamente. En cualquier caso los requerimientos de resistencia para un



mortero de revestimiento son muy bajos, por lo que su reducción no supone un problema para este uso.

En cuanto a los morteros de cal y barro, únicamente se han obtenido los resultados de los ensayos en estado fresco y las resistencias mecánicas a 28 días. Dado que otros de los ensayos se encuentran en fase de desarrollo, no se disponen de datos suficientes para realizar conclusiones definitivas sobre su uso. Sin embargo, sí puede constatarse una menor influencia del contenido de concha de mejillón en los morteros de cal y barro, pues se registran disminuciones de densidad o de resistencia mecánica menores que en los de cemento.

Estas conclusiones coinciden con los resultados obtenidos en otros estudios con distintos tipos de concha.

8.1.3 Sobre la relación con el certificado BREEAM

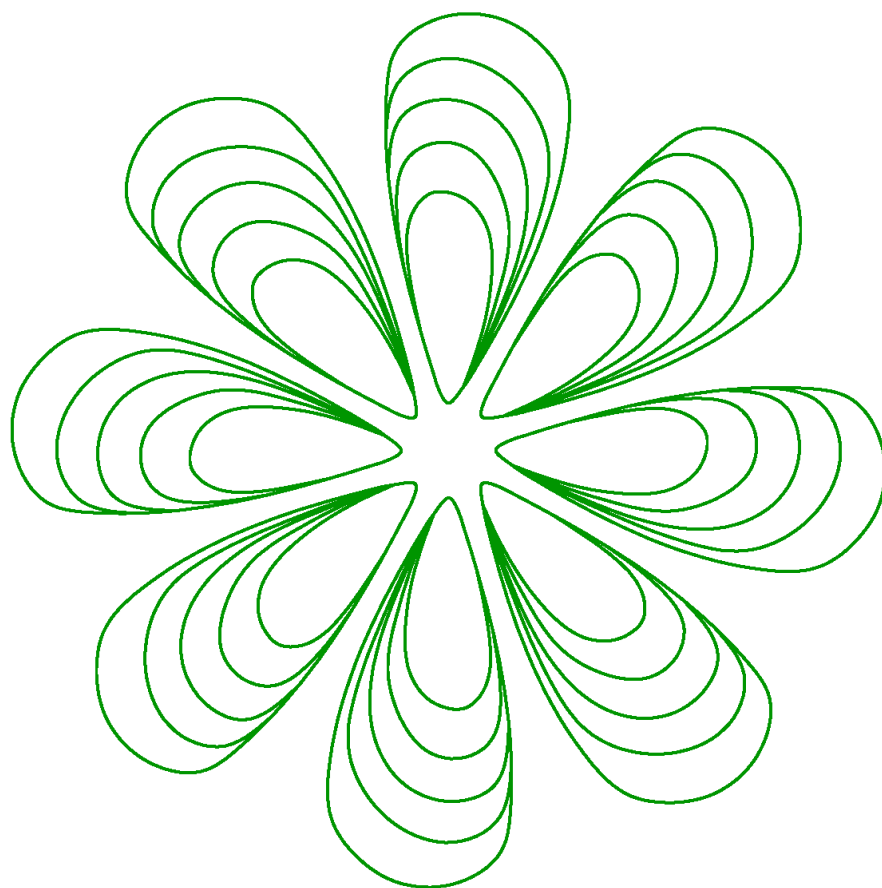
Los morteros fabricados con concha de mejillón presentan un menor impacto ambiental que aquellos que contienen arena natural. Por este motivo pueden relacionarse con un modelo de certificación como BREEAM, contribuyendo a la obtención de puntos por parte de un hipotético edificio cuyo equipo de diseño decidiese incluir este tipo de material para la ejecución de revestimientos, tal como se plantea en este trabajo.

8.2 Futuras líneas

Como futura línea de trabajo se plantea el desarrollo de una serie de ensayos específicos para morteros de revestimiento con el fin de evaluar la permeabilidad al vapor de agua, la adhesión al soporte, la permeabilidad al agua líquida, y la resistencia a ciclos de hielo-deshielo y frío-calor. Sería conveniente, además, profundizar en el ajuste de dosificaciones y relaciones agua/ ligante que pudiesen proporcionar morteros de revestimiento con propiedades equiparables a los realizados con arena convencional, corrigiendo los efectos negativos sobre la consistencia y la resistencia mecánica evidenciados en este trabajo.



9 Bibliografía



9 Bibliografía

1. **Baño Nieva, Antonio & Vigil-Escalera del Pozo, Alberto.** *Guía de construcción sostenible.* Madrid : ISTAS, 2005.
2. **Ahorro y eficiencia energética S.L.U.** Eficiencia Energética. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] www.eficienciaenergetical.es.
3. **Plataforma Edificación Passivhaus.** Plataforma Edificación Passivhaus. [En línea] [Citado el: 18 de 05 de 2014.] <http://www.plataforma-pep.org/>.
4. **García, M^a Dolores.** Arquitectura Bioclimática. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] <http://abioclimatica.blogspot.com.es/>.
5. *La construcción sostenible.* **Ramírez, Aurelio.** Física y Sociedad.
6. **Alavedra, Pere, Domínguez y Javier, Gonzalo, Engracia & Serra, Javier.** La construcción sostenible. El estado de la cuestión. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/apala.html>.
7. **Badia i Pascual, Jordi.** Bioconstrucción, Bioclimatismo y Construcción Sostenible. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] http://www.laciuataverda.org/cat/biblioteca/articulos/bioconst_integral.htm.
8. **Biohaus Goierri S.L.** Biohaus. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] <http://www.biohaus.es/bioconstruccion.php>.
9. **Red Verde.** Red Verde: Materiales Ecológicos para Bioconstrucción. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] http://www.redverde.es/que_es_bioconstruccion.
10. **Fresno, Miguel.** Arquitectu Tecnica na Rede: Construcción Ecológico + Rehabilitación Artesanal + Abellugu. [En línea] [Citado el: 19 de 4 de 2014.] <http://arquitectutecnica.wordpress.com/2013/06/17/que-es-la-bioconstruccion/>.
11. **Bello Llorente, Juan & Martínez García, Carolina.** *Bioconstrucción. Construir respetando la salud y el medio ambiente.* 2012.
12. **Instituto Español de Baubiologie.** Instituto Español de Baubiologie. [En línea] [Citado el: 18 de 05 de 2014.] <http://www.baubiologie.es/>.
13. **Jebens-Zirkel, Petra.** Bioconstrucción: la construcción con futuro. *Xornadas Téncias sobre Bioconstrucción, Eficiencia Enerxética e Medio Ambiente.* [Conferencia]. Ourense : s.n., Enero de 2014.
14. **García, Socorro Castro.** Sustancias peligrosas para la salud y el medio ambiente en los materiales de construcción. *Xornadas Téncias sobre Bioconstrucción, Eficiencia Enerxética e Medio Ambiente.* [Conferencia]. Ourense : s.n., Enero de 2014.
15. **Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales & Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.** *NTP 521: Calidad de aire interior: emisiones de materiales utilizados en la construcción, decoración y mantenimiento de edificios.* España : s.n., 1999. Nota Técnica de Prevención.
16. **Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales & Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo.** *NTP 289: Síndrome del edificio enfermo: factores de riesgo.* España : s.n., 1999. Norma Técnica de Prevención.
17. **AENOR.** *UNE-EN 15643-3: Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 3: Marco para la evaluación del comportamiento social.* Madrid : s.n., 2012. Norma.



18. **AENOR.** *UNE-EN 15643-2: Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 2: Marco para la evaluación del comportamiento ambiental.* Madrid : s.n., 2012. Norma.
19. **AENOR.** *UNE-EN 15804: Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.* Madrid : s.n., 2014. Norma.
20. **CIFP Someso.** FP Construcción Sostenible. [En línea] [Citado el: 2 de 5 de 2014.] <http://www.fpconstruccionsostenible.org/modulo-balas-de-paja/>.
21. **Souto García, Valentín & Souto Blázquez, Gonzalo.** *Revestimientos continuos de paramentos: Enfoscados y revocos.* Santiago de Compostela : s.n., 2012.
22. **AENOR.** *UNE-EN 998-1: Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido.* Madrid : s.n., 2010.
23. **AENOR.** *UNE-EN 1015-3: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).* 2000.
24. **Gomá, F.** *El cemento portland y otros aglomerantes.* Barcelona : Editores técnicos asociados, S.A., 1979. ISBN 84-7146-192-7.
25. **AENOR.** *UNE-EN 197-1: Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.* Madrid : s.n., 2011. Norma.
26. **Gobierno de España.** *NBE FL-90 Norma Básica de la Edificación: Muros resistentes de fábricas de ladrillos.* Madrid : LITEAM, 1990.
27. **Weismann, Adam & Bryce, Kate.** *Using natural finishes. Lime & earth-based plasters, renders & paints.* UK : Green Books Ltd, 2008.
28. *Análisis de la variación de la composición de los morteros utilizados en los muros de fábrica tradicionales: la compatibilidad de los morteros tradicionales de cal y la incompatibilidad de los morteros de cemento en (...) muros de fábrica tradicionales.* **Iglesias Martínez, M^a Cruz.** Madrid : s.n., 1996. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. págs. 271-276.
29. **AENOR.** *UNE-EN 459-1: Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.* Madrid : s.n., 2011.
30. **Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España.** *Guía práctica para los morteros con cal.* Madrid : s.n.
31. **Gárate Rojas, Ignacio.** *Artes de la cal.* España : Ministerio de cultura, 1994. ISBN 84-7483-966-1.
32. **Historic Scotland. Technical Conservation, Research and Education Division.** *Preparation and Use of Lime Mortars.* Edinburgh : s.n., 2003.
33. **Castilla Pascual, Francisco Javier.** *Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra.* Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid : s.n., 2004. Tesis doctoral.
34. **Fernández Vázquez, Óscar & Iglesias Martínez, M^a Cruz.** *Procedimientos de ensayo para la identificación de las prestaciones de revocos de barro.* Escola Técnica Superior de Edificación da Coruña : s.n., 2013. Trabajo Final de Grado.
35. **DIN.** *DIN 18947 (2013-08) Earth Platers - Terms And Definitions, Requirements, Test Methods.* Berlín, Alemania : s.n., 2013.



36. **Minke, Gernot.** *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual.* s.l. : Fin de siglo, 1994. ISBN 9974-49-347-1.
37. **Grupo de Ingeniería y Dirección de Proyectos de la UDC.**
38. **Delestrac, Denis.** *Sand Wars.* Rappi Productions and La Compagnie des Taxi-Brousse, 2013.
39. *Abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates strength.* **Thomas, B.S., y otros.** United Kingdom : Elsevier, 2014, Construction and Building Materials, Vol. 59, págs. 204-2012.
40. *Impact response of steel fibre reinforced lightweight concrete with crumb rubber.* **Mutsuddy, R., Bindiganavile, V. y Lubel, A.S.** Canada : s.n., 2011, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Vol. 2, págs. 1434-1444.
41. *Utilization of crushed clay brick in concrete industry.* **Aliabdo, A.A., Abd-Elmoaty, A.E.M. y Hassan, H.H.** Egypt : Elsevier, 2014, Alexandria Engineering Journal, Vol. 53, págs. 151-168.
42. *Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET waste as a partial substitution of natural aggregate.* **Saikia N. & De Brito, J.** Portugal & India : Elsevier, 2014, Construction and Building Materials, Vol. 52, págs. 236-244.
43. *Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete.* **Frigione, M.** 6, Italy : Elsevier, 2010, Waste Management, Vol. 30, págs. 1101-1106.
44. *Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties.* **Lucolano, F., y otros.** Italy : Elsevier, 2013, Materials and Design, Vol. 52, págs. 916-922.
45. *Reuse of plastic waste in cementitious concrete composites.* **Marzouk, O.Y., Dheilily, R.M. y Queneudec, M.** France : s.n., 2005, Proceedings of the International Conference on Cement Combinations for Durable Concrete, págs. 817-824.
46. *Strength and durability characteristics of copper tailing concrete.* **B.S. Thomas, A. Damare, R.C. Gupta.** India : Elsevier, 2013, Construction and Building Materials, Vol. 48, págs. 894-900.
47. *Properties of concretes produced with waste ceramic tile aggregate.* **Tavakoli, D., Heidari, A. y M., Karimian.** Iran : s.n., 2013, Asian Journal of Civil Engineering, Vol. 14, págs. 369-382.
48. *Behaviour of glass in cement-based materials: Its role on ASR.* **D., Serpa, y otros, y otros.** Portugal : s.n., 2011, Materials Science Forum, Vols. 730-732, págs. 415-420.
49. *High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust fine aggregates.* **Raman, S.S., y otros.** 2011, 21st Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, págs. 843-848.
50. *Effect of Replacement of Normal Weight Coarse Aggregate with Oil Palm Shell on Properties of Concrete.* **Shafigh, P., Jumaat, M.Z. y Mahmud, H.B.** 4, Malasia : s.n., 2012, Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 37, págs. 955-964.
51. *Reuse of ash coal in the formulation of mortars.* **Siquira, J.S., Souza, C.A.G. y Souza, J.A.S.** 346, Brasil : s.n., 2012, Ceramica, Vol. 58, págs. 275-279.
52. *Performance of olive waste ash concrete exposed to elevated temperatures.* **Al-Akhras, N.M., Al-Akhras, K.M. y Attom, M.F.** 3, Emiratos Árabes Unidos : Elsevier, 2009, Fire Safety Journal, Vol. 44, págs. 370-375.

53. **FitzGerald, Andrew.** *Shell waste in aggregates.* 2007. págs. 1-24. ISBN-978-1-906634-14-8.
54. **Consellería do Medio Rural e do Mar.** *Datos xerais de acuicultura mariña no 2012.* Galicia : s.n., 2013.
55. **Observatorio de Precios de los Alimentos (MARM).** *Estudio de la cadena de valor y formación de precios del mejillón fresco de acuicultura.* 2011.
56. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** *Mytilus galloprovincialis.* 2014.
57. *Uses of seas shells for civil construction works in costaL Bayelsea State, Nigeria: A waste management perspective.* **Ohimain, Elijah I. y Sunday Bassey & Dorcas Bawo, D.S.** 9, s.l. : Medwell Journals, 2009, Research Journal of Biological Sciences, Vol. 4, págs. 1025-1031.
58. **Barnaby, Claire.** *Industry, An investigation into the reuse of organic waste produced by the New Zealand Mussel.* Master of Applied Science, Auckland Universtity of Technology. Auckland, New Zealand : s.n., 2004. Thesis.
59. *By og Byg Resultater 033 Halmhuse Udforming og materialeegenskaber.*
60. *Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials.* **Chang Hoon Lee, Do Kyonung Lee, Muhammad Aslam Ali, Pil Joo Kim.** South Korea : s.n., 2008, Waste Management, Vol. 28, págs. 2702-2708.
61. *Effects of mussel shell addition on the chemical and biological properties of a Cambisol.* **Paz-Ferreiro, J., y otros.** A Coruña & Madrid : Elsevier, 2012, Chemosfere: science for environmental technology, Vol. 86, págs. 1117-1121.
62. *Effect of bitumen emulsion and sea shell powder in the unconfined compressive strength of black cotton soil.* **Jayaganesh, K., y otros.** India : s.n., 2012, International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 2, págs. 242-245.
63. *Heavy metal retention in copper mine soil treated with mussel shells: Barch and column experiments.* **Ramírez-Pérez, A.M., y otros.** Ourense & Lugo : Elsevier, 2013, Journal of Hazardous Materials, Vols. 248-249, págs. 122-130.
64. *Reuse of Waste Shells as a SO₂/NO_x Removal Sorbent.* **Jong-Hyeon Jung, Jae-Jeong Lee, Gang-Woo Lee, Kyung-Seun Yoo and Byung-Hyun Shon.** [ed.] Dimitris Achilias. 2012, Material Recycling-Trends and Perspectives, págs. 301-323.
65. *Phosphate removal by hydrothermally modified fumed silica and pulverized oyster shell.* **Yan Yu, Renping Wu, Malcolm Clark.** China & Australia : Elsevier, 2010, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 350, págs. 538-543.
66. *Recycling waste oyster shells for eutrophication control.* **Hyok-Bo Kwon, Chan-Won Lee, Byung-Sei Jun, Jon-do Yun, Seung-Yeon Weon, Ben Koopman.** South Korea & Florida : Elsevier, 2004, Resources Conservation & Recycling, Vol. 41, págs. 75-82.
67. *Analysis of Egeria radiata and Thasis coronata Shells as Alternative Source of Calcium for Food Industry in Nigeria.* **Malu, S.P., y otros.** Nigeria : s.n., 2009, Pakistan Journal of Nutrition, Vol. 8, págs. 965-969.
68. *Production of hydroxiapatite from waste mussel shells.* **Mark I Jones, Haneen Barakat, Darrell Alec Patterson.** New Zealand : IOP Publishing, 2011, IOP Materials Science and Engineering, Vol. 18, págs. 1-5.



69. *Characterization of Calcium Carbonate Obtained from Oyster and Mussel Shells and Incorporation in Polypropylene.* **Rosa Hamester, Michele Regina, Santos Balzer, Palova y Becker, Daniela.** 2, Brasil : s.n., 2012, Materials Research, Vol. 15, págs. 204-208.
70. *Thermal Conductivity of Reinforced Cement Stabilized Lateritic Brick.* **Omubo-Pepple, V.B. y Opara, F.E. & Ogbonda C.** 2, Nigeria : Medwell Journals, 2010, Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 5, págs. 178-180.
71. *Making Concrete Tiles From Oyster and Mussel Shells.* **Repil, Christian I.** 2, Islas Filipinas : s.n., 1993, Investigatory Projects, Vol. 13, págs. 16-18.
72. *An investigation of periwinkle shells as coarse aggregate in concrete.* **Falade, F.** 4, Great Britain : Elsevier Science, 1995, Building and Environment, Vol. 30, págs. 573-577.
73. *The potential use of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete.* **Awaro, J.O. & Osarenmwinda, A.O.** Benin City, Nigeria : Trans Tech Publications, 2009, Advanced Materials Research, Vols. 62-64, págs. 39-43.
74. *Exploratory study of periwinkles shells as coarse aggregates in concrete works.* **Adewuyi, A. P. & Adegoke, T.** 6, Hitachi, Japan & Ogbomoso, Nigeria : Asian Research Publishing Network, 2008, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3.
75. *Suitability of periwinkle shell as partial replacement for river gravel in concrete.* **Olufemi Isaac Agbede, Joel Manasseh.** Makurdi Benue State, Nigeria : s.n., 2009, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, págs. 59-66.
76. *Cockle Shell: A potencial partial coarse aggregate replacement in concrete.* **Sabri, K. Muthusamy & N.A.** 4, Pahang, Malaysia : s.n., 2012, International Journal of Science, Environment and Technology, Vol. 1, págs. 260-267.
77. *Effect of oyster shell substituted form fine aggregate on concrete characteristics: Part 1. Fundamental properties.* **Eun-Ik Yang, Seong-Tae Yi, Young-Moon Leem.** South Korea : Elsevier, 2005, Cement and Concrete Research, Vol. 35, págs. 2175-2182.
78. *Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete.* **Eun-Ik Yang, Myung-Yu Kim, Hae-Geun Park, Seong-Tae Yi.** South Korea : Elsevier, 2010, Construction and Building Materials, págs. 758-765.
79. *Chemical-mechanical characteristics of crushes oyster-shell.* **Gil-Lim Yoon, Byung-Tak Kim, Baeck-Oon Kim, Sang-Hun Han.** Ansan City, Corea del Sur : Elsevier, 2003, Waste Management, Vol. 23, págs. 825-834.
80. *Oyster shell as substitute for aggregate in mortar.* **Hyunsuk Yoon, Sangkyo Park, Kiho Lee, Junboom Park.** Seoul, Korea : International Solid Waste Assosiation, 2004, Waste Management & Research, Vol. 22, págs. 158-170.
81. *Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar.* **Her-Yung Wang, Wen-Ten Kuo, Chih-Chung Lin, Chen Po-Yo.** Kaohsiung, Taiwan : Elsevier, 2013, Construction and Building Materials, Vol. 41, págs. 532-537.
82. *Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars.* **Ballester, Paloma, y otros.** Córdoba, España : Elsevier, 2007, Cement and Concrete Research, Vol. 37, págs. 559-564.
83. *Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering .* **Pusit Lertwattanaruk, Natt Makul, Chalothorn Siripattaraprat.** Pathumthari & Bangkok, Tailandia : Elsevier, 2012, Journal of Environmental Management, págs. 133-141.

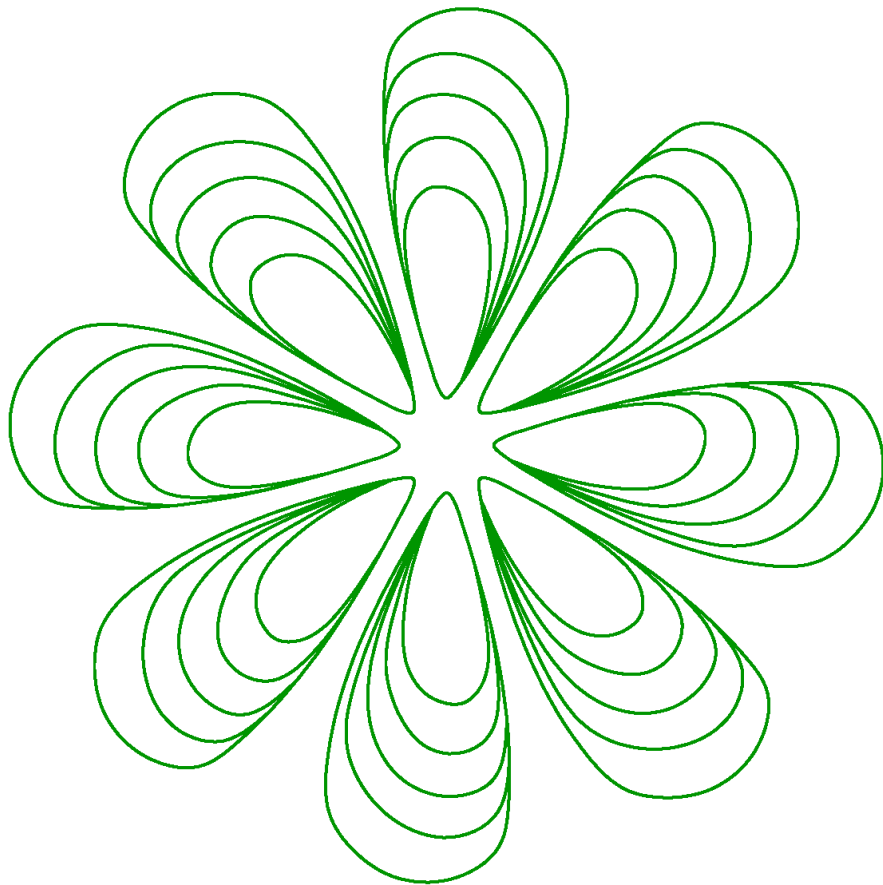
84. *Structure and property characterization of oyster shell cementing material*. **Zhong Bin-Yang, Zhou Qiang, Chan Chang-Feng, Yu Yan**. 1, Fujian, China : National Natural Science Foundation of China, 2012, Chinese Journal Structural Chemicals, Vol. 31, págs. 85-92.
85. *Feasibility of pulverized oyster shell as a cementing material*. **Wang, Chou-Fu Liang and Hung-Yu**. Pingtung, Taiwan : Hindawi Publishing Corporation, 2013, Advances in Materials Science and Engineering, págs. 1-7. ID 809247.
86. **Ministerio de fomento**. Anejo 16: Recomendaciones para la utilización de hormigón ligero. *Instrucción de Hormigón Estructural EHE*. 2008.
87. **Ministerio de fomento e industria, turismo y comercio**. *Instrucción para la recepción de cementos*. España : s.n., 2008. Instrucción técnica.
88. **AENOR**. *UNE-EN 13914-1: Diseño, preparación y aplicación del revoco exterior y del enlucido interior Parte 1: Revoco exterior*. Madrid : s.n., 2006. Norma.
89. **AENOR**. *UNE-EN 933-1 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*. España : s.n., 2012.
90. **AENOR**. *UNE-EN 933-11: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados*. Madrid : s.n., 2009.
91. **AENOR**. *UNE-EN 933-3 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos*. Madrid : s.n., 2012.
92. **AENOR**. *UNE-EN 1097-6: Ensayo para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*. Madrid : s.n., 2001.
93. **AENOR**. *UNE-EN 1097-3: Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos*. Madrid : s.n., 1999.
94. **AENOR**. *UNE-EN 933-8: Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos*. Madrid : s.n., 2012.
95. **AENOR**. *UNE-EN 15427-4: Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Partes 4*. Madrid : s.n., 2003.
96. **Consejo de la Unión Europea**. *Decisión 2003/33/CE por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II del a Directiva 1999/31/CEE*. UE : s.n., 2002.
97. **AENOR**. *UNE-EN 1744-1: Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Part 1: Análisis químico*. Madrid : s.n., 2013.
98. **AENOR**. *UNE 103-204-93: Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico*. Madrid : s.n., 1993.
99. **Ministerio de la Presidencia, Gobierno de España**. *EHE08 Instrucción de Hormión Estructural*. España : s.n., 2008.
100. **AENOR**. *UNE-EN 1097-2: Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*. Madrid : s.n., 2010.
101. **AENOR**. *UNE 83-115-89: Áridos para hormigones. Medida del coeficiente de friabilidad de las arenas*. Madrid : s.n., 1989.



102. **Vázquez Herrero, C.** *Estudio de la adherencia de cordones de pretensado en elementos prefabricados de hormigón de altas prestaciones iniciales.* 2000. Tesis Doctoral.
103. **AENOR.** *UNE-EN 1015-7: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.* Madrid : s.n., 1999.
104. **AENOR.** *UNE-EN 1015-11: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.* Madrid : s.n., 2000.
105. **AENOR.** *UNE-EN 1015-10: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido.* Madrid : s.n., 2000.
106. **AENOR.** *UNE-EN 1015-18: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.* Madrid : s.n., 2003.
107. **AENOR.** *UNE-EN 1745: Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar las propiedades térmicas.* Madrid : s.n., 2013.
108. **BREEAM-ES.** Manual BREEAM ES Comercial 2014.
109. **AENOR.** *UNE-EN 13914-1: Diseño, preparación y aplicación del revoco exterior y del enlucido interior Parte 1: Revoco exterior.* Madrid : s.n., 2006.
110. **Gobierno de España.** *DB-HS 1: Documento Básico HS Salubridad 1 Protección frente a la humedad.* Madrid : s.n., 2006.
111. **AFAM.** *Manual de fachadas.* España : s.n., 2013.
112. **Valdehíta Roselló, M^a Teresa.** *Morteros de cemento para albañilería.* España : Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, 1976.



10 Anejos



10.1. Anejo 1: Tablas correspondientes a los gráficos del apartado 2.5.

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución										
		0	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
(Falade, 1995)	1:1,5:3	2631		2480		2213		2172	1902	1700		
(Falade, 1995)	1:2:4	2495				2184		2056				
(Falade, 1995)	1:3:6	2385				2053						
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:2:4	2700					2350			2300	1950	1605
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:3:6	2600					2300			2250	2200	1728
(Olufemi Isaac Agbede, 2009)	1:1,5:3	2508					2311			2164	2128	1944

Tabla 10-1: Densidad de los hormigones con sustitución de grava (kg/m³).

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución										
		0	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
(Falade, 1995)	1:1,5:3	0		-5,7		-16		-17	-28	-35		
(Falade, 1995)	1:2:4	0				-12		-18				
(Falade, 1995)	1:3:6	0				-14						
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:2:4	0					-13			-15	-27,78	-41
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:3:6	0					-12			-13	-15,38	-34
(Olufemi Isaac Agbede, 2009)	1:1,5:3	0					-7,9			-14	-15,15	-22

Tabla 10-2: Variaciones de densidad de los hormigones con sustitución de grava (%).

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución										
		0	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
(Falade, 1995)	1:1,5:3	30		24		15		10	5	2		
(Falade, 1995)	1:2:4	13		10		4		2				
(Falade, 1995)	1:3:6	10		6		1						
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:2:4	18					15			10	8	5
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:3:6	15					11			8	5	2
(Olufemi Isaac Agbede, 2009)	1:1,5:3	80					70			62	45	35
(Sabri, s.f.)	—	55	47	45	20	18	10	8				

Tabla 10-3: Valores representativos de la consistencia de los hormigones con sustitución de grava.



Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución											
		0	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100	
(Falade, 1995)	1:1,5:3	0		-20		-50		-67	-83	-93			
(Falade, 1995)	1:2:4	0		-23		-69		-85					
(Falade, 1995)	1:3:6	0		-40		-90							
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:2:4	0					-17			-44	-56	-72	
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:3:6	0					-27			-47	-67	-87	
(Olufemi Isaac Agbede, 2009)	1:1,5:3	0					-13			-23	-44	-56	
(Sabri, s.f.)	_	0	-15	-18	-64	-67	-82	-85					

Tabla 10-4: Variaciones de consistencia de los hormigones con sustitución de grava (%)

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución												
		0	5	10	15	20	25	30	35,4	40	42,5	50	75	100
(Falade, 1995)	1:1,5:3	21,56		17,33		15,56		14,67				8,00		
(Falade, 1995)	1:2:4	17,78		16,22		13,26		9,33						
(Falade, 1995)	1:3:6	16,44		12,00		4,44								
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:2:4	26,00					23,00		21,00			18,00	13,00	8,00
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:3:6	22,00					18,00			15,00	14,00	9,00	5,00	
(Sabri,s.f.)	_	30,00	26,00	29,00	30,00	35,00	25,00	23,00						
(Olufemi Isaac Agbede, 2009)	1:1,5:3											16,30	14,71	13,05

Tabla 10-5: Resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de grava (MPa)

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución												
		0	5	10	15	20	25	30	35,4	40	42,5	50	75	100
(Falade, 1995)	1:1,5:3	0		-20		-28		-32				-63		
(Falade, 1995)	1:2:4	0		-9		-25		-48						
(Falade, 1995)	1:3:6	0		-27		-73								
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:2:4	0					-12		-19			-31	-50	-69
(A. P. Adewuyi, 2008)	1:3:6	0					-18			-32	-36	-59	-77	
(Sabri,s.f.)	_	0	-13	-3	0	17	-17	-23						

Tabla 10-6: Variaciones de la resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de grava (%).

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución						
		0	10	20	30	40	50	100
(Falade, 1995)	1:1.5:3	4,0	3,0	3,0	3,0	2,0	1,0	
(Falade, 1995)	1:2:4	3,0	2,5	2,0	1,0			
(Falade, 1995)	1:3:6	3,0	2,0	1,0				
(Falade, 1995)	1:3.5:1							3,0
(Falade, 1995)	1:4.5:1.5							2,3

Tabla 10-7: Resistencia a flexión de hormigones con sustitución de grava (MPa)



Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución					
		0	20	40	60	80	100
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 SOS	14,00					12,00
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 LOS	14,00					8,00
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 SOS	12,00					11,00
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 LOS	12,00					7,75
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 SOS	12,00					9,75
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 LOS	12,00					8,25
(Gil-Lim Yoon, 2003)	1:5	6,00	5,00	1,80	1,60	1,50	
(Gil-Lim Yoon, 2003)	1:10	1,40	1,30	1,20	0,60	0,30	

Tabla 10-8: Resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de arena (MPa)

Fuente	Dosif.	Ratio de sustitución					
		0	20	40	60	80	100
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 SOS	0					-14
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 LOS	0					-43
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 SOS	0					-8
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 LOS	0					-35
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 SOS	0					-19
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 LOS	0					-31
(Gil-Lim Yoon, 2003)	1:5	0	-17	-70	-73	-75	
(Gil-Lim Yoon, 2003)	1:10	0	-7	-14	-57	-79	

Tabla 10-9: Variaciones de la resistencia a compresión de los hormigones con sustitución de arena (%)

Fuente	Dosif.	Ratio de adición CV			
		0	5	10	15
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 SOS	12,00	13,00	13,50	13,00
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 LOS	8,00	8,50	9,50	9,25
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 SOS	11,00	12,00	11,50	11,00
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 LOS	7,75	8,50	9,25	9,50
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 SOS	9,75	10,00	8,00	8,25
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 LOS	8,25	8,75	8,50	10,50

Tabla 10-10: Resistencia a compresión de hormigones con sustitución del 100% de su arena, en función de la cantidad de adición de cenizas volantes que se les añade.

Fuente	Dosif.	Ratio de adición CV			
		0	5	10	15
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 SOS	0	8	13	8
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1 LOS	0	6	19	16
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 SOS	0	9	5	0
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:1,5 LOS	0	10	19	23
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 SOS	0	3	-18	-15
(Hyunsuk Yoon, 2004)	1:2 LOS	0	6	3	27

Tabla 10-11: Variaciones en la resistencia a compresión de hormigones con sustitución del 100% de su arena, en función de la cantidad de adición de cenizas volantes que se les añade.



Fuente	Concha utilizada	Ratio de sustitución				
		0	5	10	15	20
(Paloma Ballester, 2007)	Mejillón	7,75	8,75	7,75		
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Mejillón	15,00	11,00	8,50	7,00	5,50
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Almeja	15,00	12,50	11,50	11,00	10,50
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Berberecho	15,00	12,50	10,50	10,00	7,50
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Ostra	15,00	13,50	11,50	11,00	8,50
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra t.h.	46,90	49,20	45,30	41,00	37,10
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra t.s.	44,00	36,00	35,00	34,00	28,00

Tabla 10-12: Resistencia a compresión de los moreros con sustitución de cemento (MPa)

Fuente	Concha utilizada	Ratio de sustitución				
		0	5	10	15	20
(Paloma Ballester, 2007)	Mejillón	0	13	0		
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Mejillón	0	-27	-43	-53	-63
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Almeja	0	-17	-23	-27	-30
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Berberecho	0	-17	-30	-33	-50
(Pusit Lertwattanak, 2012)	Ostra	0	-10	-23	-27	-43
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra tritura	0	5	-3	-13	-21
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra tritura	0	-18	-20	-23	-36

Tabla 10-13: Variaciones en la resistencia a compresión de los morteros con sustitución de cemento (%)

Fuente	Concha utilizada	Ratio de sustitución				
		0	5	10	15	20
(Paloma Ballester, 2007)	Mejillón	1,80	2,25	1,90		
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra triturada en húmedo	7,20	7,55	7,40	6,90	6,50
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra triturada en seco	8,70	8,50	7,60	6,30	6,30

Tabla 10-14: Resistencia a flexión de los morteros con sustitución de cemento (MPa)

Fuente	Concha utilizada	Ratio de sustitución				
		0	5	10	15	20
(Paloma Ballester, 2007)	Mejillón	0	25	6		
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra triturada en húmedo	0	5	3	-4	-10
(Zhong Bin-Yang, 2012)	Ostra triturada en seco	0	-2	-13	-28	-28

Tabla 10-15: Variaciones en la resistencia a flexión de los morteros con sustitución de cemento (%)



10.2Anejo 2: Dosificación de partida del mortero de cemento

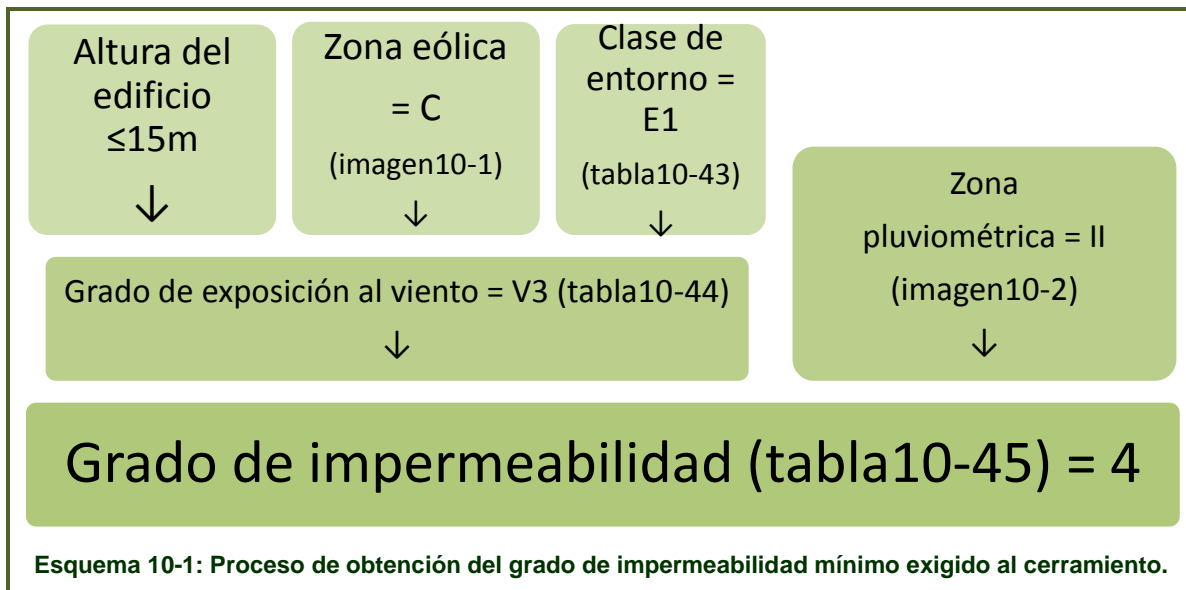
No existe ninguna normativa que especifique u oriente sobre qué dosificación y qué relación agua/cemento deben utilizarse a la hora de fabricar un mortero con el objetivo de que éste sirva a un determinado uso. Al respecto, la norma UNE-EN 13914-1 (109) dice que las mezclas hechas en obra “se deberían hacer dosificando los conglomerantes y los áridos específicos en las proporciones adecuadas. Estas proporciones no se dan en esta norma” y al pie de la página nos remite a la siguiente nota: “Debido a los múltiples materiales y técnicas existentes en Europa no es posible en algunos aspectos de las normas entrar con suficiente detalle en los usos y prácticas en cada país. Las recomendaciones complementarias que se requieran, que no alteren ninguna recomendación básica europea, se incluyen en la documentación preparada por cada país.” Por este motivo, recondujimos nuestra búsqueda al Código Técnico de la Edificación y a otras fuentes solventes relacionadas con los morteros.

El DB-HS1 (110) describe las características que deben tener las soluciones constructivas de los cerramientos en relación con su grado de permeabilidad exigido, incluyendo los revestimientos continuos exteriores, categoría a la que pertenece nuestro revoco monocapa. Sin embargo, esta descripción de características es meramente cualitativa y no se refiere en ningún caso a valores obtenidos a través de ensayos normativos, por lo que su cumplimiento o no por parte de las distintas soluciones constructivas es imposible de determinar de manera objetiva. La Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM) identifica esas características con las descritas en la UNE 998-1 (22) como clase de resistencia mecánica y clase de resistencia a la absorción de agua por capilaridad (Tabla 10-20) (111). Por último, valiéndose de la NBE (26) y una monografía sobre morteros para albañilería (112) se puede deducir cuál sería la dosificación necesaria para conseguir un mortero con una clase de resistencia mecánica determinada.

10.2.1 Nivel de impermeabilidad exigido al cerramiento según DB-HS1

El grado de impermeabilidad mínimo exigido a un cerramiento vertical es función de varios parámetros relacionados con el edificio y su emplazamiento. En el Esquema 10-1 se recogen los valores obtenidos para cada uno de ellos según las distintas imágenes y tablas que ofrece el propio CTE, y considerando como características del edificio las del módulo de bioconstrucción que se prevé construir en el marco del Proyecto BIOVALVO en que se engloba este trabajo.





Tipo de terreno		Clase de entorno
Tipo I	Borde del mar o lago con zona despejada de agua $\geq 5\text{km}$.	E0
Tipo II	Zona rural llana sin obstáculos ni arbolado relevantes	
Tipo III	Zona rural con árboles o pequeñas construcciones	
Tipo IV	Zona urbana, industrial o forestal	E1
Tipo V	Centro de grandes ciudades con edificios en altura	

Tabla 10-16: Clase del entorno del edificio en función al tipo de terreno en el que se encuentra.



		Clase del entorno del edificio					
		E1			E0		
		Zona eólica			Zona eólica		
		A	B	C	A	B	C
Altura del edificio en m	≤15	V3	V3	V3	V2	V2	V2
	16 - 40	V3	V2	V2	V2	V2	V1
	41 – 100 ⁽¹⁾	V2	V2	V2	V1	V1	V1

⁽¹⁾ Para edificios de más de 100 m de altura y para aquellos que están próximos a un desnivel muy pronunciado, el grado de exposición al viento debe ser estudiada según lo dispuesto en el DB-SE-AE.

Tabla 10-17: Clase de exposición al viento en función a la altura del edificio, la zona eólica y la clase de entorno.

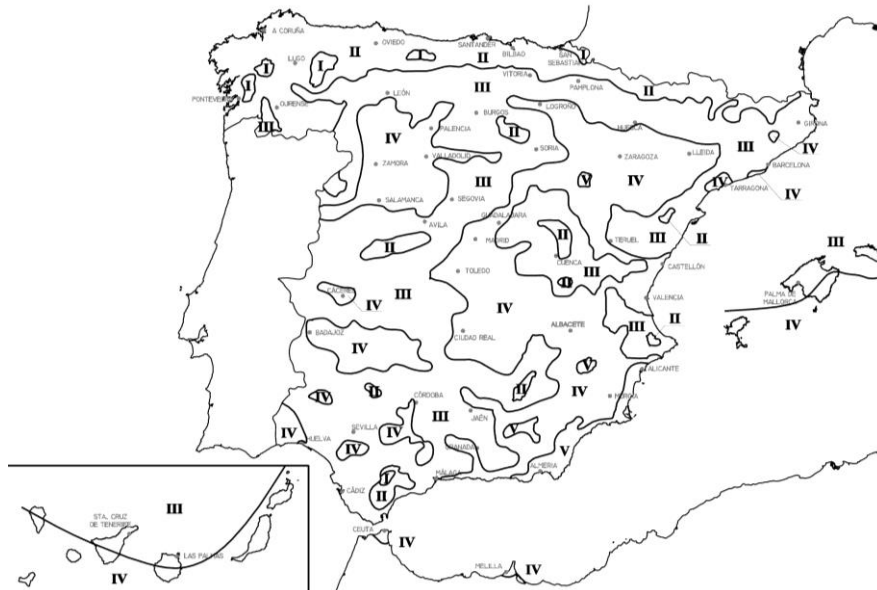


Imagen 10-2: Mapa de zonas pluviométricas

		Zona pluviométrica de promedios				
		I	II	III	IV	V
Grado de exposición al viento	V1	5	5	4	3	2
	V2	5	4	3	3	2
	V3	5	4	3	2	1

Tabla 10-18: Nivel mínimo exigido de impermeabilidad según el grado de exposición y la zona pluviométrica

10.2.2 Nivel exigido de cumplimiento de propiedades al revestimiento exterior

Para cada grado de impermeabilidad mínimo exigido, el mismo DB-HS1 (110) exige al revestimiento exterior una cierta combinación de grados de cumplimiento de algunas de las propiedades de sus distintos elementos (Tabla 10-19)

		Con revestimiento exterior				Sin revestimiento exterior							
Grado de impermeabilidad	≤1	R1+C1 ⁽¹⁾				C1 ⁽¹⁾ +J1+N1							
	≤2					B1+C1+J1+N1		C2+H1+J1+N1		C2+J2+N2		C1 ⁽¹⁾ +H1+J2+N2	
	≤3	R1+B1+C1		R1+C2		B2+C1+J1+N1		B1+C2+H1+J1+N1		B1+C2+J2+N2		B1+C1+H1+J2+N2	
	≤4	R1+B2+C1		R1+B1+C2		R2+C1 ⁽¹⁾		B2+C2+H1+J1+N1		B2+C2+J2+N2		B2+C1+H1+J2+N2	
	≤5	R3+C1		B3+C1		R1+B2+C2		R2+B1+C1		B3+C1			

⁽¹⁾ Cuando la fachada sea de una sola hoja, debe utilizarse C2.

Tabla 10-19: Combinaciones de grados de cumplimiento de propiedades de las distintas partes del cerramiento del edificio (R=revestimiento exterior, B=barrera contra la penetración de agua, C=hoja principal) en función del grado mínimo exigido de impermeabilidad del mismo.

Para determinar qué nivel de cumplimiento debe tener nuestro mortero, tenemos que atribuir un nivel de cumplimiento a los otros elementos del cerramiento del módulo de bioconstrucción:

- En cuanto a la composición de la hoja principal (C), el CTE sólo clasifica las hechas de fábrica cerámica, de piedra o de bloque de hormigón. Puesto que nuestra hoja principal estará constituida por otro material (madera), tomamos como condición de la misma C1 (la más desfavorable).
- Nuestro cerramiento no dispondrá de barrera contra la penetración de agua (B).

La combinación de grados de cumplimiento que debemos elegir es la R2+C1. Un revestimiento continuo no puede pertenecer al grupo de soluciones R2, por lo que habrá que exigirle el grado de cumplimiento R3, que describe así:

- “El revestimiento exterior debe tener una resistencia muy alta a la filtración. Se considera que proporcionan esta resistencia revestimientos continuos de las siguientes características:
 - Estanqueidad al agua suficiente para que el agua de filtración no entre en contacto con la hoja del cerramiento dispuesta inmediatamente por el interior del mismo.
 - Adherencia al soporte suficiente para garantizar su estabilidad.
 - Permeabilidad al vapor suficiente para evitar su deterioro como consecuencia de una acumulación de vapor entre él y la hoja principal.
 - Adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento muy bueno frente a la fisuración, de forma que no se fisure debido a los esfuerzos mecánicos producidos por el movimiento de la estructura, por los esfuerzos térmicos relacionados con el clima y con la alternancia día-noche, ni por la retracción propia del material constituyente del mismo.
 - Estabilidad frente a los ataques físicos, químicos y biológicos que evite la degradación de su masa.”

10.2.3 Clase de resistencia mecánica del mortero

Como la descripción del grado de cumplimiento para el revestimiento exterior R3 es sólo cualitativa resulta imposible probar de manera objetiva si lo cumple o no. Con el objetivo de salvar esta carencia de la normativa, la Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM) (111) incluye en una de sus publicaciones la Tabla 10-20 mostrando



con qué clase de resistencia mecánica (CS) y con qué clase de resistencia a la absorción de agua por capilaridad (W) (ambas especificaciones recogidas en la UNE-EN 998-1 (22)) debería corresponderse cada uno de los grados de cumplimiento de cada propiedad que exige el CTE en función al nivel de permeabilidad exigido. Basándonos en dicha tabla, concluimos que nuestro mortero tendrá una clase resistente CSIII o CSIV y una resistencia a la absorción de agua por capilaridad W2.

Tipos de aplicación		Condición según CTE DB HS-1 FACHADAS ⁽¹⁾	Mortero CE UNE EN 998-1 ⁽²⁾	
REVESTIMIENTOS INTERIORES		Resistencia no necesaria a la filtración: - Capas de regularización. - Enlucidos de particiones u hojas interiores.	CS II - W0 CS III - W0	
REVESTIMIENTOS EXTERIORES	NO MONOCAPA	ENFOSCADO O REVOCO VISTO	Resistencia media a la filtración del revestimiento exterior R1 proporcionada por un revestimiento continuo acabado con una capa plástica delgada. Resistencia muy alta a la filtración del revestimiento exterior R3 proporcionada por un revestimiento continuo acabado con una capa plástica delgada.	CS III - W1 CS IV - W1 CS III - W2 CS IV - W2
		SISTEMAS DE AISLAMIENTO TÉRMICO POR EL EXTERIOR ⁽³⁾	Resistencia alta a la filtración de la barrera contra la penetración del agua proporcionada por un aislante no hidrófilo B2 dispuesto por el exterior de la hoja principal protegido con un mortero R1 .	CS IV - W1
		ENFOSCADO TRAS PLAQUETAS, CHAPADOS, ETC.	Resistencia media R1 , o alta R2 , a la filtración del revestimiento exterior proporcionada por un recubrimiento protector discontinuo fijado sobre el mortero.	CS III - W1 CS IV - W1
			Resistencia muy alta a la filtración del revestimiento exterior R3 proporcionada por un recubrimiento protector discontinuo fijado sobre el mortero.	CS III - W2 CS IV - W2
	MONOCAPA (OC)	Resistencia media a la filtración del revestimiento exterior R1 proporcionada por un revestimiento continuo .	OC CS III - W1 OC CS IV - W1	
		Resistencia muy alta a la filtración del revestimiento exterior R3 proporcionada por un revestimiento continuo .	OC CS III - W2 OC CS IV - W2	
REVESTIMIENTOS AISLANTES		Morteros de aislamiento térmico alto $\lambda \leq 0,1$ W / m K. Morteros de aislamiento térmico medio $\lambda \leq 0,2$ W / m K.	CS III - W1 - T1 CS IV - W1 - T1 CS III - W1 - T2	

Tabla 10-20: Correspondencia entre los grados de cumplimiento de propiedades exigidos por el CTE y las clases de resistencia mecánica y resistencia a la absorción de agua por capilaridad. (111)

10.2.4 Resistencia a compresión a 28 días

Una vez decidido que nuestro mortero tendrá una clase de resistencia mecánica CSIII o CSIV y una clase de resistencia a la absorción de agua por capilaridad W2, decidimos que será la primera de las dos la que nos sirva para definir la dosificación. La clase CSIII, según la norma UNE-EN 998-1 (22) se corresponde con una resistencia a compresión a los 28 días de entre 3.5 y 7.5MPa, mientras que la CSIV incluye a los morteros con resistencia superior a 6MPa.

10.2.5 Dosificación de partida

Sólo encontramos referencias a dosificaciones relacionadas con resistencias en publicaciones y normativas derogadas. A continuación se expone la información obtenida de la NBE FL-90 (26) y la monografía sobre morteros de cemento para albañilería de Valdehíta Roselló (112) (Tabla 10-21, Tabla 10-22).

Nomenclatura	Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)	Dosificación en volumen
M-20	2	1:8
M-40	4	1:6
M-80	8	1:4
M160	16	1:3

Tabla 10-21: Correspondencia entre las clases resistentes de la NBE FL-90 (26) y dosificaciones en volumen de morteros de cemento

Dosificación en volumen	Resistencia a compresión a los 28 días (MPa)
1:6	5.8
1:3	17.7

Tabla 10-22: Correspondencia entre ciertas dosificaciones de morteros de cemento y sus resistencias a compresión a los 28 días (112)

Basándonos en esta información, pretendiendo conseguir un mortero de cemento con una resistencia superior a los 3.5MPa, decidimos partir de una dosificación 1:6.



10.3 Anejo 3: Resultados individuales de los ensayos.

10.3.1 En fresco

10.3.1.1 Consistencia

	Consistencia (nº de golpes)	Variación (%)	Consistencia (nº de golpes)	Variación (%)	Consistencia (nº de golpes)	Variación (%)
Ratio (%)	MC		MK		MB	
0	7,58	0%	39,56	0%	32,00	0%
25	6,91	-9%	50,11	27%	39,67	24%
50	12,09	59%	70,22	78%	52,11	63%
75	19,64	159%	83,44	111%	82,56	158%
100	29,64	291%	71,78	81%	98,89	209%

Tabla 10-23: Consistencia (número de golpes) y variación de la consistencia (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.

10.3.1.2 Densidad

	Densidad en fresco (kg/l)	Variación (%)	Densidad en fresco (kg/l)	Variación (%)	Densidad en fresco (kg/l)	Variación (%)
Ratio (%)	MC		MK		MB	
0	2,19	0%	1,99	0%	2,15	0%
25	1,83	-16%	1,96	-1%	2,15	0%
50	1,65	-25%	1,96	-1%	2,10	-2%
75	1,56	-29%	1,90	-4%	2,05	-5%
100	1,53	-30%	1,92	-3%	2,03	-5%

Tabla 10-24: Densidad en fresco (kg/l) y variación de la densidad en fresco (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.

10.3.1.3 Contenido en aire

	Contenido en aire (%)	Variación (%)	Contenido en aire (%)	Variación (%)	Densidad en fresco (kg/l)	Contenido en aire (%)
Ratio (%)	MC		MK		MB	
0	4,7%	0,0%	3,1%	0%	3,2%	0%
25	20,0%	330%	3,3%	7%	4,9%	54%
50	37,8%	712%	6,3%	107%	6,3%	98%
75	33,0%	609%	7,1%	133%	7,4%	130%
100	33,5%	621%	7,5%	146%	8,8%	173%

Tabla 10-25: Contenido en aire (%) y variación de la densidad en fresco (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución.



10.3.2 En endurecido

10.3.2.1 Densidad

	Densidad (kg/l)	Variación (%)	Densidad (kg/l)	Variación (%)	Densidad (kg/l)	Variación (%)
Ratio (%)	MC		MK		MB	
0	2,03	0%	1,79	0%	1,98	0%
25	1,74	-14%	1,78	-1%	1,88	-5%
50	1,56	-23%	1,76	-1%	1,90	-4%
75	1,48	-27%	1,72	-4%	1,84	-7%
100	1,43	-29%	1,72	-4%	1,82	-8%

Tabla 10-26: Densidad en estado endurecido (kg/l) y variación de la densidad en estado endurecido (%) de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución

10.3.2.2 Resistencia mecánica

10.3.2.2.1 Resistencia a flexión

		R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)
		MC				MK		MB			
Rat. (%)	Edad	2 días		7 días		28 días					
0		2,8	0%	3,3	0%	3,5	0%	0,7	0%	0,5	0%
25		2,0	-26%	2,5	-24%	3,7	6%	0,4	-47%	0,4	-16%
50		1,3	-53%	2,2	-32%	2,5	-27%	0,6	-10%	0,4	-17%
75		1,6	-41%	1,8	-45%	2,3	-34%	0,6	-12%	0,4	-7%
100		1,1	-59%	1,3	-61%	1,8	-48%	0,6	-15%	0,4	-21%

Tabla 10-27: Resistencia a flexión (MPa) y variación de la resistencia a flexión (%) de los morteros de cemento, cal y barro, para las distintas ratios de sustitución y a las distintas edades ensayadas

10.3.2.2.2 Resistencia a compresión

		R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)	R. (MPa)	V. (%)
		MC				MK		MB			
Rat. (%)	Edad	2 días		7 días		28 días					
0		7,9	0%	11,4	0%	14,0	0%	1,2	0%	1,3	0%
25		5,2	-35%	8,5	-25%	10,3	-27%	0,9	-26%	0,9	-30%
50		3,2	-60%	4,7	-58%	6,4	-54%	1,0	-18%	0,8	-33%
75		1,7	-79%	4,0	-65%	5,4	-62%	0,8	-36%	0,9	-26%
100		1,7	-79%	2,5	-78%	3,8	-73%	0,8	-31%	0,7	-45%

Tabla 10-28: Resistencia a compresión (MPa) y variación de la resistencia a compresión (%) de los morteros de cemento, cal y barro, para las distintas ratios de sustitución y a las distintas edades ensayadas



10.3.2.3 Pérdida de masa

Edad	MC0	MC25	MC50	MC75	MC100
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1					
2	1,86				
3	4,65	5,04	4,64	5,87	3,76
4		5,21	5,07		
5	6,76	5,90	5,56	6,68	
6	7,05	6,13	5,82	6,84	6,87
7	7,31	6,30	5,95	6,93	
8	7,47				7,40
9	7,60				7,38
10		6,51	6,09	6,98	7,44
11		6,53	6,13	7,02	
12	7,81	6,65	6,18	7,10	
13	7,92	6,69	6,22	7,16	7,39
14		6,76	6,28	7,20	
15	7,98				7,35
16	8,00				7,38
17		6,83	6,35	7,14	7,33
18				7,16	
19	8,07			7,19	
20	8,09			7,18	7,24
21	8,14	6,89	6,40	7,20	7,29
22	8,18				7,33
23	8,23				7,37
24				7,25	7,39
25					
26	8,24		6,36		
27	8,21				7,30
28	8,23	6,95	6,37	7,28	7,27

Tabla 10-29: Pérdida de masa de los morteros de cemento para las distintas ratios de sustitución para distintas edades respecto de la masa inicial (%)

10.3.2.4 Densidad en seco

	MC0	MC25	MC50	MC75	MC100
D.S. (kg/l)	1,871	1,584	1,412	1,367	1,278
Var. (%)	0%	-15%	-25%	-27%	-32%

Tabla 10-30: Densidad en seco (kg/l) y variación de la densidad en seco (%) del mortero de cemento para las distintas ratios de sustitución (kg/l)

10.3.2.5 Coeficiente de capilaridad

	MC0	MC25	MC50	MC75	MC100
Coef. Cap.	0,86	0,35	0,24	0,19	0,16
Var. (%)	0%	-60%	-72%	-78%	-81%

Tabla 10-31: Coeficiente de capilaridad ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$) y variación del coeficiente de capilaridad (%) del mortero de cemento para las distintas ratios de sustitución

10.3.2.6 Contenido en materia orgánica

	0	25	50	75	100
MC	0,00%	0,35%	0,70%	1,05%	1,40%
MK	0,00%	0,33%	0,65%	0,97%	1,29%
MB	0,00%	0,39%	0,77%	1,15%	1,53%

Tabla 10-32: Contenido en materia orgánica de los morteros de cemento, cal y barro para las distintas ratios de sustitución (% de masa fresca)

10.3.2.7 Conductividad térmica

	MC0	MC25	MC50	MC75	MC100
C.T. ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	0,92	0,60	0,46	0,43	0,38
Var. (%)	0%	-35%	-50%	-53%	-59%

Tabla 10-33: Conductividad térmica ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) y variación de la conductividad térmica (%) del mortero de cemento para las distintas ratios de sustitución

