

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA CONCHA DE MEJILLÓN COMO ÁRIDO PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES EN MASA

APLICACIÓN EN LA CIMENTACIÓN DE UN MÓDULO
EXPERIMENTAL (MÓDULO BIOVALVO)

AUTORA: **MARTÍNEZ GARCÍA, CAROLINA**
DIRECTORES: **PÉREZ ORDÓÑEZ, JUAN LUIS**
GONZÁLEZ FONTEBOA, BELÉN

GRADO EN ARQUITECTURA TÉCNICA
JULIO 2016

Departamento de Tecnología de la Construcción



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCOLA UNIVERSITARIA DE
ARQUITECTURA TÉCNICA

TRABAJO FIN DE GRADO



Agradecimientos

Sería impensable abarcar este trabajo sin la colaboración de todo el grupo de investigación “gCONS” de la Escuela de Caminos Canales y Puertos de la UDC. Quiero agradecer enormemente a cada una de las personas que han ayudado con ilusión, horas de trabajo y esfuerzo desinteresado a que este proyecto pudiera tener cabida y saliese adelante.

Como parte del Proyecto Biovalvo (ver más adelante) agradecer a las empresas del consorcio Extraco, Galaicontrol y Serumano, así como también a Casadobe, Obrabio y también al Grupo de ingeniería y dirección de proyectos (GRIDP) de la Escuela de Ingeniería Industrial de Ferrol, por su apoyo y conocimientos.

A María Recarey por sus grandes conocimientos en el trabajo de laboratorio, que con paciencia y trabajo completamente desinteresado, me ha acompañado y enseñado. También incluir en este grupo a los diferentes estudiantes que han querido participar dedicando horas en el laboratorio, imprescindibles en todo proceso experimental.

De forma excepcional agradecer a Fernando Martínez Abella, Belén González Fonteboa (co-Directora de este trabajo) y a Diego Carro López por creer desde el principio en este trabajo y apoyarme en todo momento.

Agradecer a Juan Luis Pérez Ordóñez, además de cómo parte del gCONS, como director de este trabajo, por su paciencia y amabilidad.

Resumen

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de la concha de mejillón como árido para hormigones en masa. La concha de mejillón utilizada proviene de la industria conservera que produce más de un millón de toneladas de subproducto al año en el mundo. Estas conchas son procesadas térmicamente a 135 °C durante 30 minutos, de donde se obtiene una gravilla que es triturada y tamizada posteriormente obteniendo dos tipos de arena de diferente granulometría. Los áridos de mejillón han sido estudiados por difracción de rayos x, análisis termogravimétrico y con microscopía electrónica de barrido.

De esta forma se diseñan dos hormigones diferentes, un hormigón de limpieza (HL) y otro hormigón en masa estructural (HM). En ambos, se reemplazan los áridos naturales (arena o gravilla y ambos juntos) por áridos de mejillón en diferentes porcentajes. Todos los hormigones se han caracterizado tanto en estado fresco como endurecido (microestructura, tiempo de fraguado, trabajabilidad, resistencias a compresión y tracción, módulo de elasticidad, pérdida de peso y permeabilidad al agua).

Los resultados obtenidos permiten afirmar que con este tipo de tratamiento, la sustitución de las conchas de mejillón no debe ser superior al 25% de las arenas o gravillas naturales, y no superior al 12,5% si la sustitución es de ambos, arenas y gravilla, juntos. Con estos porcentajes, se pueden ejecutar hormigones de limpieza y en masa con comportamientos adecuados.

Palabras clave:

Áridos de conchas marinas, hormigón de limpieza, hormigón en masa estructural, propiedades mecánicas, permeabilidad

Abstract

In this work the performance of mussel shell as aggregate in plain concrete has been studied. The mussel shell used came from the cannery industry, which produces more than 1 million tonnes of shell by-product a year worldwide. The mussel shell has been heat-treated at 135 °C for 30 minutes and then crushed and sieved into sand and gravel. The new aggregates have been studied by X-ray diffraction (XRD), TGA and SEM microscopy.

Then two different conventional concretes were designed, a non-structural concrete (NSC) and a plain structural concrete (SC). In both of them the natural aggregates (sand, gravel, and both sand and gravel) were replaced with mussel shell aggregates at different percentages. All concretes were characterized in fresh and hardened states (microstructure, workable life progression, workability, compressive and splitting strength, longitudinal modulus of elasticity, weight loss and water permeability).

The results lead to establishing that with this treatment, mussel shell replacement should be limited to 25% of fine or coarse aggregates, or 12.5% of both fine and coarse aggregates. With these percentages the NSC and the SC will display a correct behaviour.

Keywords

Seashell aggregates; non-structural concrete; plain structural concrete; mechanical properties; permeability

Índice de contenido

1.	Introducción y objetivos generales	15
2.	Estado del conocimiento.....	21
2.1.	Introducción. Problemática.....	21
2.2.	Características de las conchas marinas	22
2.3.	Aplicaciones como áridos en materiales de base cemento	23
2.3.1.	Hormigones con áridos de conchas marinas.....	25
2.3.2.	Morteros y pastas con áridos de conchas marinas	31
2.4.	Aplicaciones como material suelto	33
2.5.	Otras aplicaciones	35
2.6.	Objetivos específicos.....	36
3.	Materiales y mezclas.....	40
3.1.	Cemento, Agua, aditivos	40
3.2.	Áridos naturales y de mejillón.....	41
3.2.1.	Microestructura de los áridos de mejillón	45
3.2.2.	Composición de las conchas de mejillón.....	46
3.2.3.	Análisis termogravimétrico	48
3.2.4.	Lixiviación	50
3.3.	Diseño de las mezclas.....	51
4.	Programa experimental.....	57
4.1.	Estado fresco	58
4.2.	Estado endurecido.....	59
5.	Resultados y discusión	65
5.1.	Microestructura del hormigón con áridos de mejillón	65
5.2.	Consistencia, absorción y densidad en fresco y endurecido.....	66
5.3.	Tiempo abierto de trabajabilidad.....	71
5.4.	Resistencia a compresión.....	72
5.5.	Resistencia a tracción	74
5.6.	Módulos de elasticidad	75
5.7.	Permeabilidad al agua	76
5.8.	Pérdida de peso.....	76
6.	Aplicación en edificio experimental: Módulo Biovalvo	81
6.1.	Introducción	81
6.2.	Módulo. Hormigones	81
6.3.	Hormigones usados en la cimentación	85

7.	Conclusiones y futuras líneas	89
8.	Bibliografía	93
9.	Anexo: publicaciones.....	101
10.	Contenido del CD.....	102

Índice de figuras

Figura 1. Difracción rayos-X de (a) Anadara granosa (almeja) y (b) Perna perna (mejillón).	23
Figura 2. Imagen MEB de las conchas de moluscos (Izq. Anadara granosa- almeja, Dcha. Perna perna- mejillón)	23
Figura 3. Consumo de áridos en construcción. (8).....	24
Figura 4. Variación densidad (endurecido) de hormigones según % sustitución de conchas marinas.	28
Figura 5. Variación asiento en hormigones según % sustitución de conchas marinas.	29
Figura 6. Variación de la resistencia a compresión a 7 días, en hormigones según % sustitución de conchas marinas.....	30
Figura 7. Variación de la resistencia a compresión a 28 días en hormigones según % sustitución de conchas marinas.....	30
Figura 8. Variación de la resistencia a tracción a 7 días en hormigones según % sustitución de conchas marinas.....	31
Figura 9. Detalle de solera con base aislante y capa drenante de mejillón (Muslingeskaller, 500mm y Mulsigeskaller 70mm) (40).....	34
Figura 10. Ensayo de carga sobre bañera de conchas de mejillón. (41)	34
Figura 11. Diferentes construcciones danesas con concha de mejillón (cimentación y cubierta). (40)	35
Figura 12. Áridos de mejillón.....	42
Figura 13. Materiales empleados en la fabricación de los hormigones. Cemento, arena, gravilla y grava natural.	43
Figura 14. Curvas granulométricas de los áridos convencionales para hormigón de limpieza y en masa.	44
Figura 15. Ensayos químicos para áridos (Izq. Materia orgánica, Cent. Sulfatos solubles, Der. Contaminantes ligeros)	44
Figura 16. Descripción microestructura de la concha de mejillón mediante MEB.....	46
Figura 17. Difracción de rayos X (DRX) de una muestra de arena de mejillón (AMF).....	46
Figura 18. Resultado del análisis termogravimétrico de la AMF.....	49
Figura 19. Resultado del análisis termogravimétrico de la AMF tras su molienda.....	49
Figura 20. Resultado del análisis termogravimétrico de filler de AMF (menor de 0,063 mm).....	49
Figura 21. Proceso de amasado de los hormigones.....	53
Figura 22. Moldes para la elaboración de probetas de hormigón de limpieza y hormigón en masa estructural respectivamente.....	57

Figura 23. Vibrado y enrasado del hormigón en los moldes.....	58
Figura 24. Medida de la consistencia mediante cono de Abrams.	58
Figura 25. Probeta de ensayo del tiempo abierto de trabajabilidad sobre mortero de cemento con sustitución del 25% de la arena natural por arena de mejillón.	59
Figura 26. Pesado de probetas de hormigón, cálculo densidades.....	59
Figura 27. Inmersión probetas cúbicas en agua, ensayo absorción.....	60
Figura 28. Ensayos de resistencia mecánica.	61
Figura 29. Ensayo de permeabilidad al agua. Probetas resultantes del ensayo a tracción una vez sometidas a agua a presión.....	62
Figura 30. Probetas de hormigón endurecido acopiadas para el control por pérdida de peso.	62
Figura 31. Sección de una muestra de hormigón (HM30 A+G12,5%) rota por ensayo a compresión	66
Figura 32. Observación por MEB de la microestructura del hormigón en masa (HM30 A+G 12,5%)	66
Figura 33. Hormigones descartados por consistencia.	67
Figura 34. Consistencia. Valor del asiento en cono (cm).	69
Figura 35. Densidad en estado fresco.	70
Figura 36. Densidad en estado endurecido.....	70
Figura 37. Relación entre densidad y materia orgánica.....	71
Figura 38. Absorción.....	71
Figura 39. Variación del tiempo de trabajabilidad de los morteros de cemento con respecto a su contenido en material orgánica.	72
Figura 40. Resistencia a compresión a 3, 7, 28 y 90 días. Hormigones de limpieza.	74
Figura 41. Resistencia a compresión a 3, 7, 28 y 90 días. Hormigones en masa estructural.....	74
Figura 42. Resistencia a tracción	75
Figura 43. Módulo de deformación longitudinal.	75
Figura 44. Módulo de deformación transversal.....	76
Figura 45. Porcentajes de la pérdida de peso de los distintos hormigones a lo largo del tiempo. .	77
Figura 46. Diseño del Módulo Biovalvo.....	81
Figura 47. Proceso constructivo de la cimentación del Módulo Biovalvo.	83
Figura 48. Granulometría de las arenas.	84
Figura 49. Granulometría de las gravillas y gravas.....	84
Figura 50. Dosificaciones (en peso con humedad).....	85
Figura 51. Consistencia de los hormigones elaborados en laboratorio y en Central, para el módulo Biovalvo.	85

Índice de tablas

Tabla 1. Estudios sobre hormigón con áridos de conchas marinas.	25
Tabla 2. Estudio sobre morteros con áridos de conchas marinas.....	32
Tabla 3. Estudios sobre pastas con áridos de conchas marinas.....	33
Tabla 4. Publicaciones sobre otras aplicaciones de las conchas marinas.	36
Tabla 5. Propiedades de los áridos naturales para hormigón de limpieza y en masa.	42
Tabla 6. Granulometría de los áridos para hormigón limpieza y masa.....	43
Tabla 7. Propiedades de los áridos de mejillón.....	44
Tabla 8. Resultados de componentes mayoritarios (FRX) en %.....	48
Tabla 9. Resultados de lixiviación de las muestras de árido de concha de mejillón y su referencia a la Decisión 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos.	51
Tabla 10. Dosificación de hormigones patrón de limpieza y en masa estructural.	54
Tabla 11. Hormigones fabricados.....	54
Tabla 12. Probetas realizadas para hormigones limpieza y masa.....	57
Tabla 13. Consistencia, densidad en estado fresco y endurecido.	68
Tabla 14. Permeabilidad al agua.	76
Tabla 15. Propiedades de los hormigones elaborados en laboratorio y en Central, para el módulo Biovalvo.	86

1

Introducción y objetivos



1. Introducción y objetivos generales

La concha de mejillón supone en Galicia un 33% del peso bruto del residuo (incluido el animal), de tal manera que se puede afirmar que la industria conservera genera 25.000 t de residuo de concha cada año. El residuo mayoritariamente se deposita en vertedero o se emplea como abono agrícola. Por otra parte, en los últimos años, en el sector de la construcción se ha ido tomando conciencia de la necesidad de cambio hacia la sostenibilidad. Por ello en la última década se han desarrollado algunos trabajos que se plantean el reciclaje de este residuo en el ámbito de la construcción.

Este trabajo está enmarcado dentro del proyecto de investigación “Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción (BIOVALVO)”, financiado con fondos europeos a través del programa INNTERCONECTA 2013 gestionado por el CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial) dependiente del Ministerio de Economía y Competitividad. En este proyecto, que incluye aplicaciones de la concha de mejillón como material constructivo, se trabajaron los siguientes objetivos científico-técnicos específicos:

O.1- Conocimiento del subproducto: desde el punto de vista del subproducto de conchas de moluscos se analizó su composición química, sus propiedades físicas y su comportamiento mecánico. Para ello se planteó el uso de subproductos de diferente origen y de diferente granulometría, estableciéndose como objetivo principal el determinar cuál de los subproductos (en función de origen y granulometría) o cuál de las combinaciones de ellos, presentan un mejor comportamiento general para los usos definidos. Con este objetivo se alcanzan los siguientes sub-objetivos:

O.1.1- Conocimiento de la composición química del material.

O.1.2- Conocimiento de las propiedades físicas del material.

O.1.3- Conocimiento del comportamiento mecánico del material.

O.1.4- Determinación de materiales (mezcla de diferentes granulometrías y orígenes) con mejor potencial comportamiento para diferentes usos: se escogerán cuatro materiales con los que se continuará el trabajo.

O.2- Desarrollo de dosificación y de unidades básicas: se establecieron recomendaciones y procedimientos de diseño de materiales procesados que empleen estos subproductos, tanto unidades básicas ligadas (capas de firme ligadas y mezclas de base cementosa) como unidades básicas no ligadas (material de drenaje, aislantes térmicos y acústicos y capas de firme no ligadas). En los elementos ligados el objetivo principal fue el de definir requisitos a establecer en el diseño de mezclas en lo que se refiere a proporciones de los materiales a emplear, proporción de uso del

subproducto, granulometrías a utilizar y métodos de dosificación y mezcla. Una vez diseñadas estas unidades básicas, se estableció como objetivo su caracterización. En los elementos no ligados, esencialmente el objetivo fue definir los requisitos sobre proporción de uso del subproducto y granulometrías. De nuevo, una vez diseñadas las unidades básicas no ligadas, se caracterizaron de acuerdo a posibles usos. Con este objetivo se fijaron los siguientes sub-objetivos:

O.2.1- Diseño y caracterización básica de mezclas de hormigones y morteros.

O.2.2- Diseño y caracterización de aislante térmico y acústico no ligado.

O.2.3- Diseño y caracterización de capas de firme ligadas.

O.2.4- Diseño y caracterización de capas de firme no ligadas.

O.2.5- Diseño y caracterización material granular para drenaje.

O.3- Desarrollo de productos acabados: alcanzado el objetivo anterior se diseñaron los productos acabados con las unidades básicas que hayan proporcionado mejores expectativas de comportamiento, estableciéndose como objetivo la caracterización específica de los mismos. De esta forma, se abordaron ensayos específicos sobre hormigones y morteros, de acuerdo al uso definido, se diseñaron elementos no estructurales de hormigón que se caracterizaron de acuerdo a normativa y ejecutaron tramos de prueba con las capas de firme ligadas y no ligadas de mejor comportamiento. En el ámbito de la bioconstrucción se elaboraron elementos constructivos de propiedades térmicas óptimas para la construcción de casa pasiva. El objetivo fue la caracterización de productos que emplean conchas de molusco como material granular y que permitan su uso y comercialización con garantías suficientes. Con este objetivo se fijaron los siguientes sub-objetivos:

O.3.1- Caracterización específica de hormigones y morteros.

O.3.2- Caracterización de elementos de hormigón no estructural.

O.3.3- Caracterización de elementos de bioconstrucción para casa pasiva.

O.3.4- Caracterización de capas de firme ligadas en tramos de prueba.

O.3.5- Caracterización de capas de firme no ligadas en tramos de prueba.

O.4- Aplicación in situ y seguimiento: tras caracterizar soluciones estándar que emplean el árido proveniente de conchas de moluscos se realizaron prototipos de las diferentes soluciones. Estas aplicaciones in situ permitieron que las empresas adquieran experiencia real en la utilización de estos materiales, al mismo tiempo, que permitieron retroalimentar y mejorar el diseño de los materiales que incluyen las conchas. Esto mismo sucede con las aplicaciones de los áridos en carreteras, al realizar tramos acotados pero reales y poder evaluar su comportamiento en el tiempo se dotará a estas soluciones de una fiabilidad muy valiosa, de cara a poder posicionar los productos

y capacidades técnicas en el mercado. Con este objetivo se desarrollaron los siguientes sub-objetivos:

O.4.1- Ejecución de un módulo experimental de bioconstrucción.

O.4.2- Aplicación a capas de firme.

O.4.3- Aplicación a elementos de drenaje (granular).

O.4.5- Control de calidad.

O.5- Evaluación de la Sostenibilidad: dada la perspectiva de utilización y desarrollo de materiales ecológicos pero también de materiales convencionales fue relevante analizar el impacto ambiental y el ciclo de vida de estas soluciones. Es previsible que la comparativa entre un árido natural proveniente de machaqueo y el árido de concha de molusco indique una ventaja competitiva de éste último, tanto en coste como en posibilidades futuras.

Para ello se evaluó la materialidad asociada al subproducto, analizando los aspectos de la sostenibilidad que tienen un impacto financiero importante en la organización, teniendo en cuenta los impactos sociales, ambientales y económicos que puedan afectar a la capacidad de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las de las generaciones futuras (Global Reporting Initiative, 2013). Por otra parte, será necesario realizar una serie de actividades (subtarefas), las cuales se detallan a continuación:

- Recopilación de datos base para establecer los valores que toman los indicadores para cada material o sistema constructivo analizado.
- Determinación de las funciones de distribución para representar los valores que puede tomar cada parámetro sometido a incertidumbre (indicadores, parámetros que definen las funciones de valor, pesos).
- Explotación de modelos y conclusiones acerca de la mejora de sostenibilidad que suponen los diversos materiales o sistemas constructivos analizados.

De todo el proyecto “Biovalvo”, en el presente trabajo exclusivamente se plantea el uso de la concha de mejillón como árido para hormigones. Se trabajó con un hormigón de limpieza (HL) y un hormigón en masa estructural (HM) orientado al uso en cimentaciones y zonas portuarias para bloques de espaldón de diques. Se diseñó la dosificación patrón de ambos hormigones con árido convencional y, a continuación, de los correspondientes hormigones con concha de mejillón con sustituciones, en volumen, del 25%, 50%, 75% y 100% de la fracción fina en una serie, de los mismos porcentajes de la fracción gruesa en otra, y del 5% y 12.5% de la combinación de ambas fracciones en una tercera, estudiándose así un total de 19 mezclas.

Debido al gran impacto ambiental que el residuo de las conchas marinas genera en los más de 40 países productores en todo el mundo, en los últimos años se han realizado un gran número trabajos

que estudian el uso de residuos de concha de mejillón como material de construcción, utilizándolo como áridos para ser incorporados en hormigones, morteros y pastas con base cementosa. Pero ninguno de estos trabajos profundiza en las propiedades de los áridos procedentes de las conchas marinas o en los tratamientos realizados sobre las mismas.

En este estudio, se ha analizado el comportamiento de las conchas como áridos para hormigones. Se busca la viabilidad de las conchas de mejillón, suministradas como un subproducto de la industria pesquera, en la sustitución de los áridos naturales para la fabricación de diferentes hormigones en masa. El objetivo general de este trabajo fin de grado, es el estudio a fondo de los hormigones que incorporen áridos de concha de mejillón, de forma que se garanticen las propiedades de los mismos para el uso al que fueron diseñados.

Sin embargo, la diferencia más significativa entre este estudio y otros, es el hecho de que las conchas de los mejillones se someten a un simple proceso industrial, que implica un bajo consumo de energía y resulta en un subproducto comercializable. El residuo de la concha de mejillón obtenido de las fábricas de conservas se procesa térmicamente a 135 °C durante 32 minutos, utilizando como referencia el tratamiento requerido por la normativa europea para la alimentación de aves de corral (1). Este proceso no sólo ofrece garantías de seguridad para el manejo de conchas de mejillón, sino que también permite que el producto se comercialice como complemento de alimentación de animales de granja, y para la fabricación de fertilizantes orgánicos y enmiendas del suelo.

Tras finalizar la exposición del estado del conocimiento, se plantearán los objetivos específicos de este trabajo fin de grado (ver punto 2.6).

2

Estado del conocimiento



2. Estado del conocimiento

2.1. Introducción. Problemática

Los moluscos bivalvos representan casi el 10% de la producción pesquera total en el mundo, siendo el 26% de todo el volumen y el 14% de la totalidad del valor de la producción acuícola a nivel mundial. De hecho la producción mundial de moluscos bivalvos (de captura y acuicultura) ha aumentado sustancialmente en los últimos cincuenta años, pasando de casi 1 millón de toneladas en 1950 a alrededor de 14,6 millones de toneladas en 2010. La producción por especies de moluscos bivalvos a través de la acuicultura en 2010, constaba de 38% almejas, berberechos y arcas, el 35% ostras, mejillones 14% y 13% vieiras.

China es, con diferencia, el principal productor de moluscos bivalvos, con 10,35 millones de toneladas en 2010, lo que representa el 70,8% de la producción mundial de moluscos y el 80% de la producción global de la acuicultura de moluscos bivalvos, ya que toda la producción de bivalvos en China es mediante el cultivo. Japón es el segundo productor mundial, muy por detrás de China, con una producción en 2010 de aproximadamente 819.131 toneladas, seguido de los Estados Unidos de América (676.755 toneladas), la República de Corea (418.608 toneladas), Tailandia (285.625 toneladas), Francia (216.811 toneladas) y España (206.003 toneladas). Otros principales países productores de bivalvos son Canadá, Chile, Italia y Nueva Zelanda.

A diferencia de la mayoría de las otras especies acuáticas, la producción de mejillón salvaje es mucho menor que la producción de mejillón cultivado. Hay cuatro especies de mejillones comunes (2). El mejillón azul (*Mytilus edulis*) producido principalmente en Francia y los Países Bajos, y criado a lo largo de la costa noreste de América del Norte y el Noroeste del Pacífico. El mejillón mediterráneo (*M. galloprovincialis*) que se produce en gran medida en China, el noroeste de España y la costa norte del Mar Mediterráneo, con la producción también se informó en los países del sur del Mediterráneo, Rusia, Ucrania y Sudáfrica. El mejillón asiático verde (*Perna Vidris*), que se encuentra ampliamente distribuido en la región del Indo-Pacífico, que se extiende desde Japón a Nueva Guinea y desde el Golfo Pérsico hasta las Islas del Pacífico Sur. Por último, el Greenshell (*Perna canaliculus*), que es nativo de Nueva Zelanda, a pesar de que las granjas se limitan a las áreas que son adecuados para el crecimiento (alta submareal y áreas costeras protegidas), los mejillones de Nueva Zelanda se exportan a unos 60 países.

Las condiciones tróficas de Galicia, convierte a las rías y los ecosistemas costeros en el noroeste de la Península Ibérica, en sitios excepcionales para el cultivo extensivo de mejillones (*Mytilus*

galloprovincialis) en balsas flotantes (bateas) (3). En consecuencia, en estas rías se apoya la producción de mejillón más alta de Europa, donde más de tres mil bateas (con una superficie de 500 m² y 500 cuerdas colgantes de 12 m de largo) (4).

Como es bien sabido, la cáscara es de aproximadamente 33% de la totalidad del peso de los residuos concha de mejillón. Por lo tanto, se puede afirmar que la industria conservera genera 25.000 toneladas de residuos al año concha de mejillón de Galicia y más de 1 millón de toneladas en todo el mundo. Esto implica un gran problema de residuos a escala mundial (5), siendo Galicia, el tercer productor a nivel mundial en acuicultura de moluscos (2).

2.2. Características de las conchas marinas

Las diferentes publicaciones sobre la composición microscópica y mineralógica de diferentes tipos de conchas marinas coinciden en gran medida. Todas las conchas se componen principalmente por carbonato cálcico (CaCO₃) 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.

Los resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X también son muy parecidos para todos los tipos de concha. 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 dos variedades polimórficas de carbonato cálcico, tal y como se puede observar en la Figura 1, donde Siriprom y otros (6) comparan la DRX de un tipo de almeja (*Anadara granosa*) con otro de mejillón (*Perna viridis*). Este muestra que la composición de la concha de almeja tiene un 100% de aragonita, mientras que la del mejillón es un 13% calcita y un 78% aragonita. En la Figura 2 se puede ver unas micrografías de las diferentes conchas por microscopía electrónica de barrido (MEB), donde la almeja se compone por plaquetas dispuestas de forma dispersa por toda la superficie de la concha, la forma de agujas del carbonato cálcico que se ve en las imágenes es la forma típica de la aragonita. En el caso de la concha de mejillón las placas de calcita se disponen en un teselado mezclado con una estructura columnas de la aragonita.

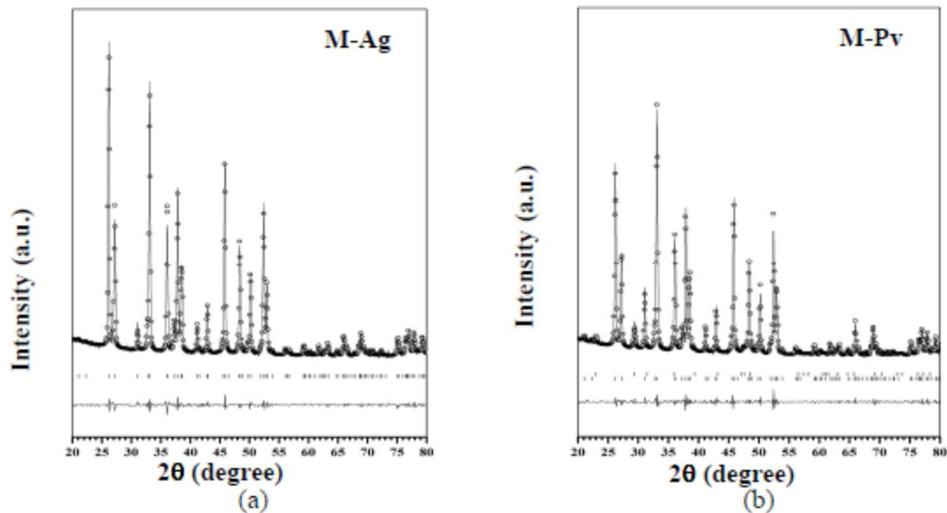


Figura 1. Difracción rayos-X de (a) *Anadara granosa* (almeja) y (b) *Perna viridis* (mejillón).

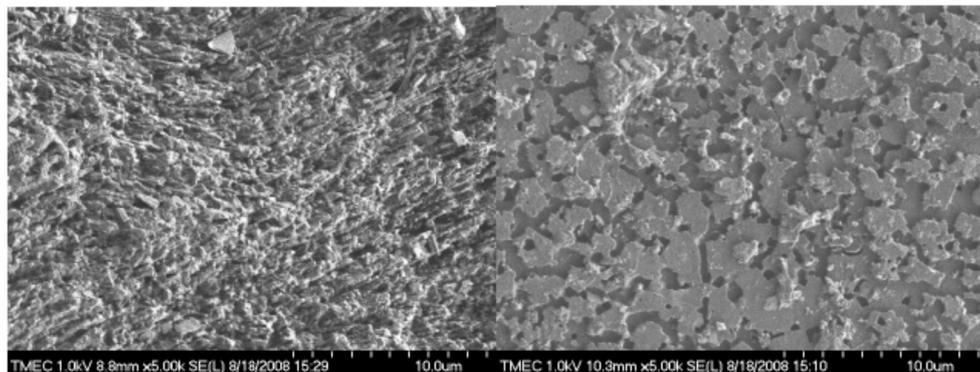


Figura 2. Imagen MEB de las conchas de moluscos (Izq. *Anadara granosa*- almeja, Dcha. *Perna viridis*-mejillón)

2.3. Aplicaciones como áridos en materiales de base cemento

Aunque la construcción supone un factor positivo desde el punto de vista económico, no podemos olvidar que: necesitamos más de 2 toneladas de materias primas por cada m² de vivienda que construimos, la cantidad de energía asociada a la fabricación de los materiales que componen una vivienda puede ascender aproximadamente a un tercio del consumo energético de una familia durante un período de 50 años, y la producción de residuos de construcción y demolición supera la tonelada anual por habitante (7). En la Unión Europea el 40% de los materiales se destina al sector de la construcción (8). Las estimaciones anuales que realiza ANEFA (Asociación Nacional de Empresas Fabricantes de Áridos) partiendo de los datos directos e indirectos disponibles arrojan un nuevo hito histórico en los datos de consumo de áridos para la construcción en 2005: 460,3 millones de toneladas. El consumo per cápita de áridos para la construcción, con casi 11 toneladas por habitante y año, supera ampliamente a la media europea, que se sitúa en torno a 7 toneladas por habitante y año. Según la ANEFA, cada persona consume, en su vida, cerca de 850.000 kilogramos

áridos, más de 10.000 veces su peso, cantidad equivalente a la transportada en 32 camiones bañera.



Figura 3. Consumo de áridos en construcción. (8)

Por esto, en los últimos años, el sector de la construcción ha ido tomado consciencia de la necesidad de cambiar hacia métodos constructivos más sostenibles. Esta toma de conciencia lleva derivando, en la publicación de diversos trabajos que estudian el uso de residuos de conchas marinas como material de construcción en la incorporación de hormigones, morteros o pastas.

Las conchas de bígaro son uno de los moluscos más comunes utilizados en el hormigón, y que se han utilizado como un sustituto de las gravas o gravillas naturales (9) (10) (11) (12) y arenas (13). Las conchas de ostra también se han estudiado como un sustituto del árido fino en el hormigón (14) (15) (16) y como sustitutos de ambos áridos conjuntamente, fino y grueso (17). Por último, las conchas de berberechos, vieiras y mejillones se han estudiado como árido grueso (18) (19) (20) (21), y también como arena (5) (15) en el hormigón. Todos estos estudios concluyeron en que la trabajabilidad, la densidad y la resistencia a compresión del hormigón disminuyen cuanto mayor es el porcentaje de conchas marinas incorporadas. También se determinó, que el uso de conchas de mar afecta a la resistencia a tracción, módulo de elasticidad, retracción y permeabilidad al agua del hormigón.

Sin embargo, la mayoría de estos autores no mencionan haber llevado a cabo ningún tipo de operación de limpieza o tratamiento antiparasitario en las conchas marinas (19) (21) (22) y solo algunos han utilizado los residuos de conchas después de un complejo tratamiento de limpieza. Algunos de ellos han tratado las conchas durante 24 o 4 horas (16) (12) (23) en una estufa de laboratorio (110 °C o 105 °C), otros han realizado un tratamiento térmico a 250-300 °C (18) y otros autores han lavado y secado al aire las conchas de mar a temperatura ambiente (9) (10). En un caso, las conchas se limpiaron con lejía, solución de vinagre blanco, bicarbonato de sodio y utilizando diferentes abrasivos (15).

2.3.1. Hormigones con áridos de conchas marinas

Como ya se ha comentado, son numerosos los estudios que abarcan el uso de áridos de diferentes conchas marinas en sustitución de los áridos convencionales para la fabricación de hormigones. En la Tabla 1 se incluyen las publicaciones sobre este tema en las revistas de investigación con mayor impacto. Se describe en la misma el tipo de especie utilizada y el tamaño por el que sustituye el árido convencional (gravilla o arena), el tamaño granulométrico del árido de concha utilizado, el tratamiento de limpieza que cada autor ha utilizado previo al uso del árido reciclado, el año y autor (ref. bibliográfica), el país de publicación, y las propiedades estudiadas en cada documento.

Tabla 1. Estudios sobre hormigón con áridos de conchas marinas.

Gravilla	Especie		Tamaño	Tratamiento	Año/autor	País	Propiedades estudiadas
	Gravilla	Arena					
Bígaro	-	-	6,3-20 mm	Lavados y secados al aire a tª ambiente	1995, Falade (9)	Reino Unido	Densidad, Consistencia, Rc, Rt
Mejillón	-	-	-	Inmersión 90°C cocederos	2004, Barnaby (21)	Nueva Zelanda	Densidad, Consistencia, Rc, C. térmica
Vieira	-	-	5-25 mm	-	2004, Sugiyama (20)	Japón	Rc, Módulos
-	Ostra	-	5 mm	110°C 24h	2005, Yang (14)	Corea del Sur	Consistencia, C.A., Tiempo fraguado, Rc, Rt, Módulos
Bígaro	-	-	8-20 mm	Secado al sol	2008, Adewuyi (10)	Nigeria	Densidad, Consistencia, Rc
Bígaro	-	-	3,35-15 mm	-	2009, Awaro (11)	Nigeria	Densidad, Rc
Bígaro	-	-	12,70 mm	105 °C 4h	2009, Olufemi (12)	Nigeria	Densidad, Consistencia
-	Ostra	-	1,27 – 8 mm	Varios (*)	2010, Kelley (15)	USA	Densidad, Absorción, Porosidad, C.A., Rc, Permeabilidad Rc, Modulos, Retracción,
-	Ostra	-	5 mm	110°C 24h	2010, Yang (16)	Corea del Sur	Durabilidad, Carbonatación, Ataque químico, Permeabilidad
Berberecho	-	-	-	250-300 °C	2011, Sahari (18)	Malasia	Rc
Berberecho	-	-	10 – 14 mm	Lavado con agua(**)	2012, Sabri (19)	Malasia	Consistencia, Rc
Lapas (Crepidula)	-	-	2/4 mm, 4/6,3 mm	-	2013, Nguyen (13)	Francia	Densidad, Consistencia, Rc, Rt, , Porosidad, Permeabilidad
Vieira	-	-	2-4 mm	No se limpia ni se trata	2013, Nguyen (24)	Francia	Dens., Consist., Rc, Rf, Porosidad, Permeabilidad, R.abrasión,
-	Berberecho	-	Filler	105°C 24h	2013, Nor Hazurina (23)	Malasia	Durabilidad Rc, Rt, Módulos, Porosidad, Permeabilidad

Gravilla	Especie		Tamaño	Tratamiento	Año/autor	País	Propiedades estudiadas
	Arena						
Ostra	Ostra		1,18-4 mm, 4-20 mm	-	2013, Richardson (17)	Reino Unido	Rc, Porosidad, Permeabilidad
-	Vieira		0-5 mm	-	2015, Cuadrado Rica (22)	Francia	C.A., Densidad, Consist., Rc, Rt, Peremeabilidad, Migración de cloro, Durabilidad, PIM

(*)1. Secado al aire + inmersión varios días en agua con lejía + mezclados con lejía y abrasivos (arena, gravilla, piedra caliza). 2. Agua limpia + solución de vinagre blanco + gravilla + inmersión de 48h en bicarbonato de sodio.

(**) Las conchas proceden de la venta en fresco del berberecho.

Rc= resistencia a compresión, Rt=resistencia a tracción, C.A.=contenido en aire, PIM= porosimetría de intrusión de mercurio

De estos estudios se desprende que más de un 60% de los mismos no especifican ningún tratamiento de limpieza o si lo hacen estos se limitan a un secado al sol, lavado con agua o mencionan el tratamiento realizado por el cocedero, casi siempre una inmersión en agua caliente (90-100°C). Un 25% realiza un tratamiento térmico habitual en procesos de secado de materiales en laboratorio, que de efectuarse al residuo como transformación en subproducto supondría elevados costes energéticos y económicos. Sólo 2 de los estudios realizan tratamientos con objetivos de limpieza o eliminación de materia orgánica de forma específica. Estos también conllevan excesivos procesos o gastos energéticos y económicos.

Los áridos utilizados son bígaro, ostra, berberecho, vieira, lapa y mejillón, en su mayoría en sustitución del árido grueso, gravilla hasta 25 mm de tamaño máximo., o del fino, hasta un tamaño de 5 mm. En ningún estudio se incluyen la sustitución conjunta del árido convencional por arena y gravilla de conchas marinas.

Realizando un análisis pormenorizado de las propiedades que el mayor número de los autores analizan, se desarrollan las gráficas incluidas de la Figura 4 a la Figura 8. En estas se han contemplado las variaciones que los distintos porcentajes de sustitución de áridos convencionales por conchas marinas suponen, con respecto a su patrón, tanto para la consistencia, la densidad en estado endurecido y las resistencias mecánicas a distintas edades. Para la elaboración del estudio se incluyeron los autores que realizaron los ensayos partiendo de una dosificación patrón y sobre esta realizan las diferentes sustituciones del árido. En las gráficas se descartaron los estudios que no realizan este método de comparación. Los porcentajes de sustitución mostrados en las gráficas, se corresponden con la fracción de árido a sustituir, no a la totalidad del árido utilizado.

En cuanto a la densidad (estado endurecido), se observa en la Figura 4, que a mayor porcentaje de sustitución utilizado mayores son las caídas del valor de la densidad con respecto al hormigón

patrón, para todos los autores. Los estudios de Falade, Adewuyi y Olufemi, que sustituyen la gravilla convencional por gravilla de bígaro, tienen grandes caídas, registrando valores máximos de -37,4% para el 50% de sustitución, un -38,2% para el 100%, y -22,5% para el 100% respectivamente. Falade, compara tres tipos distintos de dosificación A, B y C, partiendo de hormigones de 2.631k/m^3 , 2.495k/m^3 y 2.385kg/m^3 respectivamente, alcanza caídas muy similares para todas las series, comparando para un 20% de sustitución se observan caídas de entre 12% y el 16%. Los estudios de Adewuyi y Olufemi, aunque también sustituyen la gravilla convencional por la de bígaro, alcanzan valores de caída menores que cualquier serie de Falade, incluso para porcentajes del 100%. Si comparamos las series que sustituyen el 50% del árido, se ven diferencias muy notables en las variaciones: 35% Falade, 10 y 15% Adewuyi, 14% Olufemi. Esto puede ser debido al tamaño máximo del árido de bígaro utilizado. En el caso de la sustitución por vieira y lapa, las caídas son mucho más leves que las mostradas por los estudios con bígaro. En la vieira, Nguyen realiza dos series con dosificaciones distintas, que aun partiendo de densidades de hormigón diferentes (1875 y 1975kg/m^3), ambas alcanzan valores de caídas muy similares (6,1 y 6,6% respectivamente) para un porcentaje de sustitución de 60%. En el caso del uso de concha de lapa, las variaciones con respecto al patrón son también más suaves que las recogidas con el bígaro. Se realizan 3 series, A, B y C, usando árido de 4 a 6,3 mm en la A, 2-4mm en la B y de 2-6,3mm en la C. Para un porcentaje de sustitución de 40% en las tres series, se muestran caídas del 4,6%, 1% y 0,8%, respectivamente, siendo la serie que no incluye tamaño de árido inferior a 4mm la que experimenta la mayor caída de la densidad.

De esto se puede deducir, que para cualquier tipo de especie, la densidad en endurecido de los hormigones con conchas marinas, es menor cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución de árido y cuanto mayor sea el tamaño del mismo. Es probable que la forma lajosa del árido, cree mayores oquedades en la matriz del hormigón, y sea una de las causantes de este fenómeno.

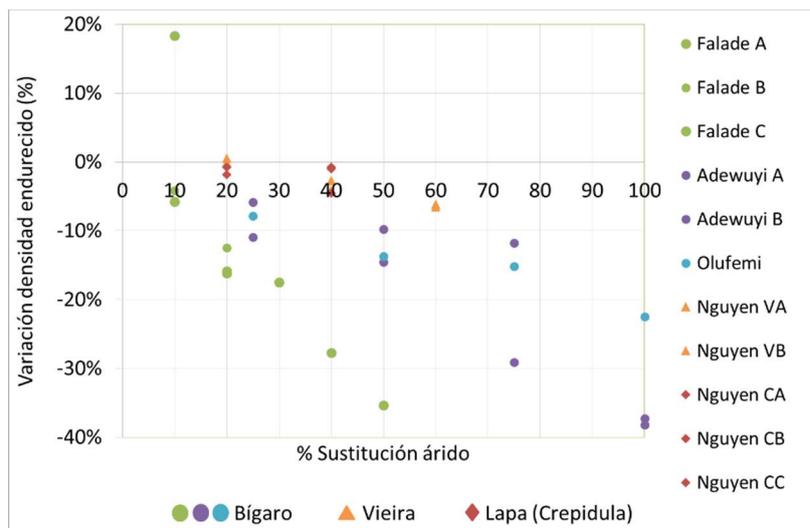


Figura 4. Variación densidad (endurecido) de hormigones según % sustitución de conchas marinas.

Analizando los trabajos que muestran los valores de asiento de los distintos hormigones, se puede ver en la gráfica mostrada en la Figura 5, que cuanto mayor es el porcentaje utilizado de árido de conchas marinas, mayores son las caídas del asiento, por tanto más consistente son las pastas frescas y menos trabajable es la mezcla de hormigón. En el caso de los estudios que utilizan bigaro, al igual que en la densidad, las series de Falade son las que experimentan variaciones más importantes para porcentajes menores, en comparación a las recogidas en los estudios de Adewuyi y Olufemi. Yang (14) compara dosificaciones idénticas para cuatro tipos de series, las dos primeras sin aditivo y otras dos con aditivo, las A y Aa utilizan porcentajes de sustitución excediendo el límite normativo de cloruros, y las B y Ba los porcentajes usados no sobrepasan este límite. Se pueden ver que las variaciones del asiento son muy pronunciadas a pesar que solo llegan a un 20% de sustitución del árido fino. En el caso de los estudios de sustitución de la gravilla convencional por concha de berberecho, los datos de variación del asiento son igualmente elevados, llegando a mostrar una disminución en el asiento del 85% para porcentajes de sustitución del 30%. El trabajo de Sabri muestra una tendencia muy similar a la de Falade.

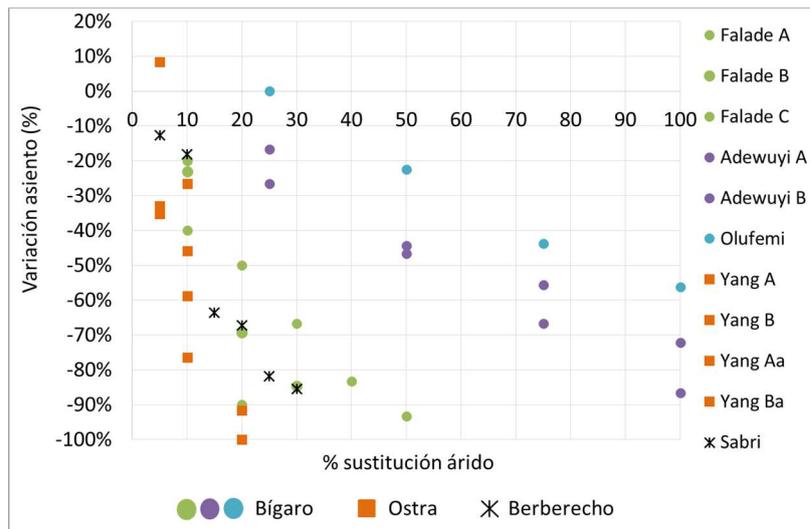


Figura 5. Variación asiento en hormigones según % sustitución de conchas marinas.

Los datos recogidos de las variaciones para el ensayo de compresión a 7 y a 28 días de los distintos estudios, se recogen en las Figura 6 y Figura 7 respectivamente. Ambos gráficos muestran idénticas tendencias. Se puede ver que cuanto mayor es el porcentaje de árido sustituido utilizado mayor es la disminución de la resistencia a compresión tanto a 7 como a 28 días. En ambos gráficos se incluyen estudios con conchas de bígaro, vieira, ostra y berberecho, y además a 28 días se incluye el estudio de Nguyen con conchas de lapa. Es preciso indicar que las caídas de resistencia más pronunciadas a 7 días son las experimentadas por los estudios con sustitución de gravilla por gravilla de bígaro (Adewuyi -70%) y de sustitución del cemento por filler de berberecho (Nor Hazurina -73,3%). Esto coincide con la tendencia de que el árido grueso influye más que el fino en las propiedades del hormigón, y que el filler de conchas marinas es un material inerte sin capacidad ligante. A 28 días se mantienen estas caídas, aunque las más importantes son las de Sugiyama que sustituye la gravilla de vieira por todo el árido (arena 5-15mm), alcanzando valores extremadamente bajos de resistencia 0,30 MPa. Esto puede ser debido a que sus estudios están dirigidos a la fabricación de hormigones de baja resistencia y a que no utiliza arenas para su fabricación empleando una granulometría discontinua. El resto de los estudios que sustituyen arenas, en el caso de Yang 2005, como era de esperar, los valores se mantienen muy similares tanto a 7 como a 28 días, +/-5 MPa, debido a bajos porcentajes de sustitución y a que las diferencias entre las distintas series sólo son en contenido de aditivo y aumento del ratio hasta sobrepasar el límite de cloruros. Lo que pone de manifiesto que los cloruros no influyen para porcentajes inferiores a 20% en la resistencia a compresión a 7 y 28 días. De igual forma ocurre con el trabajo de Yang 2010, las caídas son apenas apreciables sustituyendo la arena de ostra en porcentajes hasta del 20% en ambas edades. El trabajo de Nguyen con la sustitución de arena de vieira, muestra que para una sustitución del 60% para ambas series, las caídas de resistencia a 28 días, son aproximadamente del

20% y 30%, mucho menos representativas que las de sustituciones iguales por el grano grueso. El mismo autor, consigue unas caídas de la resistencia a compresión a 28 días, con sustituciones del 40% del árido grueso, de -36%, -8% y -6%, siendo la más importante la que no incluye árido inferior a 4mm. La forma de la lapa en tamaños mayores, podría producir mayores oquedades en la masa del hormigón, afectando así a sus propiedades mecánicas. Cuando la granulometría de la lapa se reduce a arena, se reducen estas oquedades y la disminución en la resistencia es menor.

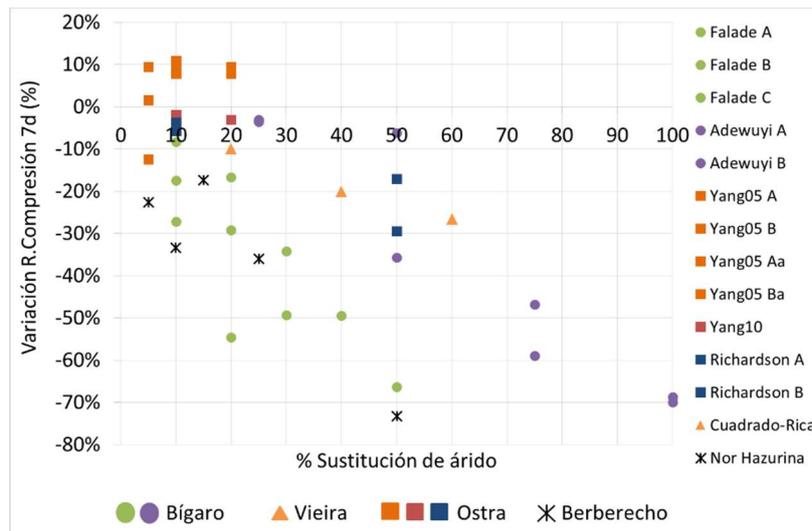


Figura 6. Variación de la resistencia a compresión a 7 días, en hormigones según % sustitución de conchas marinas.

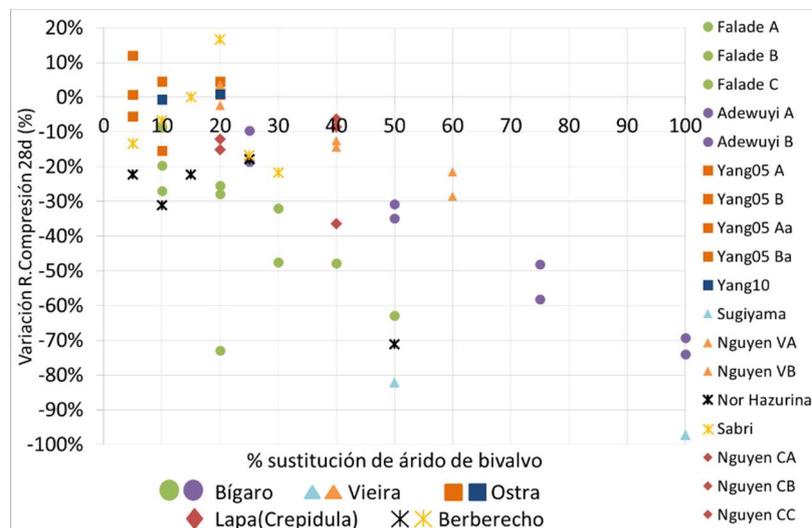


Figura 7. Variación de la resistencia a compresión a 28 días en hormigones según % sustitución de conchas marinas.

El análisis de los resultados de los estudios en cuanto a la variación de la resistencia a tracción a 7 días (Figura 8), es muy similar al de la variación de la resistencia a compresión. Nuevamente se muestra como el filler de berberecho (Nor Hazurina) es un material inerte y no tiene poder ligante, con lo que las caídas de resistencia a tracción son las más notorias (-40%). Las variaciones de los estudios de Yang 2005 con arena de ostra y el de Nguyen con gravilla de vieira son apenas

perceptibles, manteniendo valores de resistencia de +/- 0,3 MPa y de - 1 MPa respectivamente. La sustitución por concha de lapa vuelve a tener caídas algo más notorias para la dosificación que sustituye partículas mayores a 4mm, con caídas de más del 30% con respecto a su patrón.

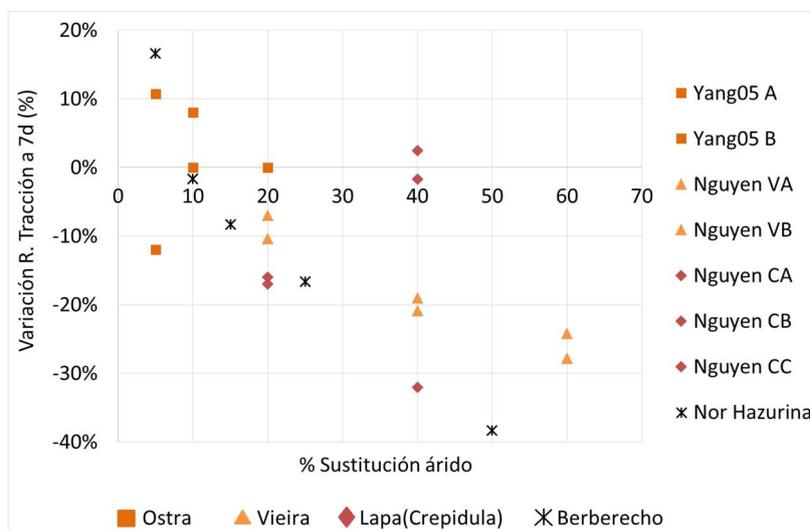


Figura 8. Variación de la resistencia a tracción a 7 días en hormigones según % sustitución de conchas marinas.

2.3.2. Morteros y pastas con áridos de conchas marinas

En la Tabla 2 se recogen la gran mayoría de los estudios publicados hasta la fecha sobre morteros realizados con sustitución de áridos de conchas marinas. La mayoría de los estudios analizan las posibilidades de utilización de las conchas de ostra (5) (25) (26) (27) (28) (29) en la fabricación de morteros de cemento. Los áridos resultantes de machacar estas conchas se han utilizado como sustitutos de la arena natural en distintos porcentajes, concluyéndose que la fluidez, la densidad y la resistencia a compresión disminuyen cuando aumenta la proporción de concha empleada. El aumento de consistencias se debe a que el árido procedente de conchas marinas tiene una forma más irregular y su absorción de agua de amasado es superior a la de la arena convencional. Esta característica singular de las partículas de ostra genera mayor porosidad y provoca el aumento del volumen de poros que, a su vez, influye directamente en la disminución de la densidad y de la resistencia a compresión.

La mitad de las publicaciones no hacen mención a ningún tipo de tratamiento para la limpieza de las conchas, y la otra mitad las trata para secarlas como un paso previo a los ensayos realizados en laboratorio.

El trabajo realizado por Rodríguez Álvaro (30) recoge un gran análisis sobre los distintos estudios de morteros fabricados con conchas marinas, por lo que no se ve necesario añadir ninguna observación en este trabajo.

Tabla 2. Estudio sobre morteros con áridos de conchas marinas.

Especie		Tamaño	Tratamiento	Año/autor	País	Propiedades estudiadas
Arena	Filler					
Ostra	-			2003, Yoon Gil-Lim (5)	Corea del Sur	Rc, tiempo curado
Ostra	-		105°C	2004, Yoon Hyunsuk (25)	Corea del Sur	Rc
Mejillón	Mejillón	< 0,063mm	Varios (*)	2007, Ballester (31)	España	Rc, Rt, trabajabilidad, adhesión
Varios (**)	-		110°C 24h	2012, Lertwattanakul (32)	Thailandia	Trabajabilidad, tiempo fraguado, Rc, retracción, C.térmica
Ostra	-		105°C 24h	2012, Zhong (26)	China	Rc, resistencia rotura
Ostra	-		-	2013, Wang (27)	China	Trabajabilidad, tiempo fraguado, Rc, absorción, retracción
Ostra	-	0 - 1,18 mm	-	2013, Kuo (28)	China	Trabajabilidad, penetración, Rc, absorción, porosidad, retracción, otros(+)
Ostra	-	0 – 5 mm	105°C	2015, Safi (29)	Argelia	Trabajabilidad, densidad, absorción, porosidad, Rc, Rt, módulos, (++)

(*) Lavado para sacar las sales + tratamiento térmico para eliminación agua y materia orgánica + molido del producto calcinado.

(**) Mejillón, almeja, berberecho y ostra

(+) Ultrasonidos, ensayo resistencia impactos, propiedades en la interfaz microscópica, ataque sulfatos

(++) Análisis de la macroestructura ligante-concha

En el caso de las pastas con áridos de conchas marinas, la mayoría no habla del tratamiento de limpieza de las conchas marinas previo a los estudios realizados, aunque otros (33) y (34) si lo hacen, como se indica en la Tabla 3.

El trabajo de Etuk, demuestra que los efectos del filler de conchas marinas sobre la pasta de cemento y sobre los morteros muestra al igual que los trabajos anteriores, aumentos en las consistencias, en el tiempo de fraguado cuanto mayor es el porcentaje de filler de conchas marinas usado. Los estudios de Gengying (34) demuestran que el uso de cenizas de conchas de ostras en combinación con la cal en la producción de ladrillos crudos con cenizas volantes es viable, y no altera las propiedades mecánicas ni de durabilidad, teniendo un efecto positivo sobre los ladrillos, tanto para tiempo seco como húmedo.

La publicación sobre el uso de conchas marinas para geopolímeros (35) así como el trabajo de Motamedi, están encaminados al correcto estudio de las predicciones de distintas propiedades con métodos tecnológicos y no tanto al estudio del efecto que tienen el uso de conchas marinas sobre las distintas mezclas.

Tabla 3. Estudios sobre pastas con áridos de conchas marinas.

Especie	Tamaño	Tipo de ligado	Tratamiento	Año/autor	País	Propiedades estudiadas
Bígaro, ostra y caracol de mar	Filler	Pasta de cemento y morteros	800°C	2012, Etuk (33)	Nigeria	Rc, tiempo fraguado
Conchas marinas (sin especificar)	Filler	Geopolímero	-	2012, Nazari (35)	Iran	Rc
Ostra	Filler	Ladrillos crudos de cenizas volantes + cemento + cal+polvo ostra + arena + agua	Lavado, triturado y calcinado durante 2h a 850-950°C, molido en polvo y almacenado en disolución 0,5% de hidróxido de sodio para evitar carbonatación	2015, Gengying (34)	China	Resistencias mecánicas, durabilidad, retracción, absorción
Ostra	Filler	Probetas de suelo compactado y probetas de cal	-	2013, Liang (36)	China	Rc
Berberecho	Arena (0-1 mm)	Morteros de cemento	Sin tratamiento específico de limpieza	2015, Motamedi (37)	Malasia	Rc

2.4. Aplicaciones como material suelto

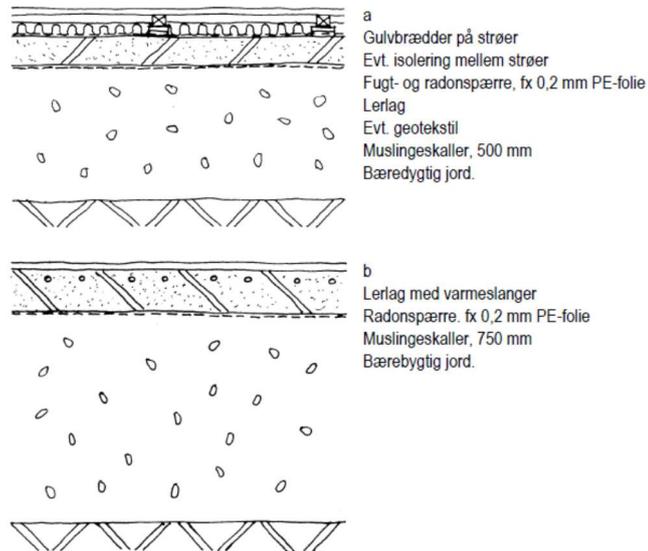
Por uso no ligado se entiende la utilización de las conchas sin la adición de ningún tipo de agente o compuesto aglutinante o aglomerante que las mantenga unidas.

La utilización de conchas en usos no ligados se orienta fundamentalmente hacia la obtención de aislantes térmicos, acústicos e hidrófugos, aunque también existen experiencias de su utilización para la estabilización y mejora de suelos y explanadas.

La principal característica que define la aptitud de un material como aislante térmico es el coeficiente de conductividad térmica (λ), que representa la cantidad de calor que pasa a través de un material cuyas caras presentan una diferencia de temperatura de un grado. Diversos ensayos realizados en Dinamarca (38) concluyeron que para la concha de mejillón puede adoptarse un λ igual a 0,13W/m.K, un valor muy cercano a los que alcanzan los materiales habituales empleados como aislantes térmicos ($\lambda < 0,1W/m.K$).

La capacidad de utilización de conchas de bivalvos como barrera contra la humedad es un tema parcialmente tratado por la bibliografía técnica. Diferentes ensayos realizados por el Instituto Tecnológico Danés (39) muestran que en las mezclas de las conchas de mejillón con diferentes densidades y fracciones de partículas, la capacidad capilar del material varía según la dimensión de

dichas partículas, obteniéndose valores de 6mm para concha entera (288 kg/m³) y valores de 24mm para conchas trituradas eliminando la fracción más pequeña por tamizado (526kg/m³). Estos valores son bajos si los comparamos con otros materiales granulares, lo que indican la posibilidad real de su utilización como barreras capilares. De hecho, en Dinamarca se emplea concha de mejillón triturado como losa aislante en soleras (Figura 9) de viviendas desde hace varios años.



Figur 27. Gulvkonstruktioner isoleret med muslingskaller.

Figura 9. Detalle de solera con base aislante y capa drenante de mejillón (Muslingskaller, 500mm y Mulsigeskaller 70mm) (40)

Respecto a la capacidad de carga de una capa de material constituida únicamente por concha de bivalvos, los diferentes ensayos realizados por el Instituto Tecnológico Danés demuestran una capacidad de carga no superior a los 3.500kg/m², un valor bastante bajo pero suficiente para edificios pequeños con una cimentación que pueda hacer un buen reparto de la carga, como por ejemplo edificios de bioconstrucción con muros de carga de paja embalada.



Figura 10. Ensayo de carga sobre bañera de conchas de mejillón. (41)

Sobre bioconstrucción aporta mucho la experiencia danesa. Dinamarca produce cada año más de 100.000 toneladas de concha de mejillón, (aproximadamente la mitad que Galicia), y es un material de construcción usado con frecuencia. Para ello, el material proviene directamente de fábrica, donde se realiza un lavado y eliminación de todo contenido animal. Luego, en obra, se compacta de forma manual y pasa a formar parte de soluciones constructivas en edificios. Las experiencias que se conocen son en su mayoría cimentaciones y cubiertas, empleando las conchas como aislante térmico y barrera capilar.



Figura 11. Diferentes construcciones danesas con concha de mejillón (cimentación y cubierta). (40)

En las fotografías de la Figura 11 extraídas de las diferentes publicaciones danesas. Se puede observar experiencias con conchas en cimentaciones, soleras, drenajes, cubiertas...

Una empresa danesa de logística vende conchas marinas (sobre todo mejillón y vieira) para su uso en picaderos, caminos, drenaje y jardinería (42).

Otro uso no ligado estudiado es el que se deriva de la mezcla de las conchas con zahorras para su uso como material base de explanadas y vías forestales. El trabajo de Carnero (43) encuentra una adecuada mezcla de concha de mejillón calcinada con zahorras naturales, en un porcentaje óptimo del 18-82%, respectivamente. La concha de mejillón mejora la plasticidad de la mezcla, aumenta su resistencia al desgaste y la capacidad portante y, en definitiva, se presenta como material viable para sustituir una fracción de áridos naturales en vías de poca carga.

2.5. Otras aplicaciones

Según la bibliografía, son conocidas las posibilidades de los áridos de conchas marinas para su utilización en actuaciones de biorremediación, entendiendo como tal cualquier proceso que utilice sustancias naturales para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición

natural. Son destacables los estudios encaminados hacia la utilización de las conchas de mejillones para la retención de metales pesados en suelos afectados por las actividades mineras (44). Los resultados de estas investigaciones muestran que las conchas de mejillones son capaces de retener grandes cantidades de cobre, níquel, cadmio y zinc, impidiendo su propagación en el medio y facilitando la posterior rehabilitación de los suelos afectados por la minería. La Tabla 4 muestra más publicaciones encontradas sobre este tema, en su mayoría los resultados muestran un aumento del pH del suelo, y por tanto una mejora en la productividad o fertilidad de los mismos.

Existen otras aplicaciones como la utilización de la concha de bivalvos como catalizadores en la producción de diversas sustancias químicas, especialmente en la obtención de biodiesel. Los estudios realizados indican que con una correcta caracterización y tratamientos adecuados de las conchas de mejillón, es posible obtener un catalizador económico apto para la producción de biodiesel. Además, son conocidas las aplicaciones de diferentes conchas de moluscos en implantes dentales y de huesos, así como su aplicación en tecnología biomédica.

Tabla 4. Publicaciones sobre otras aplicaciones de las conchas marinas.

Especie	Tamaño	Aplicación	Tratamiento	Año/autor	País	Conclusiones
Mejillón y purín de vaca	Polvo	Enmiendas de suelo	Lavado con agua, tratamiento térmico 500°C y triturado	2012, Paz-Ferreiro (45)	España	Mejora el pH del suelo, disminuye la cantidad de aluminio, mejora la fertilidad
Mejillón	< 1mm	Retención de metales pesados en suelos ácidos	Lavado, y tratado térmicamente, triturado y tamizado	2013, Ramírez-Pérez (44)	España	Aumenta el pH, aumentar retención de Cu, Cd, Ni y Zn, favorece la recuperación y restauración de suelos ácidos contaminados
Ostra	-	Mejora de suelos	-	2008, Lee Chang-Hoon (46)	República de Corea	Aumenta pH suelo, aumenta productividad del suelo
-	Polvo	Tratamiento suelos expansivos	-	2012, Jayaganesh (47)	India	Aumenta la resistencia a compresión no confinada en suelos expansivos
Mejillón	Filler para cerámica	Cerámica aislante de baja temperatura	1100°C (24h)	2011, Felipe-Sesé (48)	España	Obtención de silicatos cálcicos a partir de filler de mejillón y chamota

2.6. Objetivos específicos

Este trabajo tiene como objetivo estudiar hormigones en masa realizados con árido procedente de la concha de mejillón, donde se implementen los debidos ensayos de laboratorio y su correspondiente análisis.

El primer paso será preparar las diferentes probetas de hormigón elaboradas de forma que se puedan observar mediante MEB, tanto para los hormigones elaborados con arena o gravilla así como los elaborados con sustitución conjunta de arena y gravilla de mejillón. De esta forma, el objetivo es evaluar cuál es el comportamiento de la microestructura del hormigón entre la pasta de cemento y los áridos de conchas de mejillón.

El siguiente punto a trabajar es la durabilidad del hormigón. Se estudiará el comportamiento del hormigón cuando cada fracción de áridos naturales (fino o grueso) se sustituye por separado, pero también, cuando ambos se sustituyen al mismo tiempo. Las propiedades del hormigón que se pretenden analizar son la trabajabilidad, absorción de agua, las densidades de fresco y endurecido, el tiempo abierto de trabajabilidad (inicio del fraguado), la pérdida de peso y permeabilidad al agua.

También se estudiarán las propiedades mecánicas de todos los hormigones elaborados, realizando los ensayos de resistencia a compresión y tracción, y módulo de elasticidad según la normativa aplicable.

Finalmente se procederá al diseño y construcción de los diferentes prototipos para la cimentación de un edificio experimental situado en una parcela anexa a las huertas urbanas universitarias, en el Campus de Elviña.

3

Materiales y mezclas



3. Materiales y mezclas.

3.1. Cemento, Agua, aditivos

Los materiales utilizados en la fabricación de los hormigones en masa, tanto de limpieza como el estructural fueron los siguientes:

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) (RC-08)].

Agua

En este trabajo se utilizó el agua potable de los laboratorios de construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la universidad de A Coruña y del CITEEC.

Aditivo

Con el fin de mantener unos valores concretos en las consistencias se constató que era necesario el uso de un aditivo que mejorase la trabajabilidad del hormigón. Los superfluidificantes son polímeros que poseen cadenas de gran longitud y pocas ramificaciones laterales, prácticamente están exentos de impurezas y permiten su uso en las dosificaciones sin introducir, en general, efectos indeseables. En su elección fue importante la compatibilidad de este material con el cemento. A veces se ha comprobado que cemento y aditivos que satisfacen las normativas correspondientes desarrollan, al ser puestos en contacto, comportamientos reológicos que conducen a pérdidas de trabajabilidad inaceptables. Por ello se recurrió al superfluidificante Melcret 222 de la empresa Bettor SL con el que se tenía dilatada experiencia y garantiza su compatibilidad con el cemento y adiciones empleados. Se trata de un superfluidificante de alta eficacia a base de naftalenosulfonato condensado.

El fabricante suministrador del aditivo ofrece sobrada garantía de que el comportamiento del aditivo, en las proporciones previstas, no perturba las características del hormigón ni de las armaduras. Por otra parte, y según Certificado del Laboratori General d'assaigs i Investigacions de la Generalitat de Catalunya, la UNE 83282-90 y la ASTM C-494 tipo A/F, se facilitan una serie de datos técnicos sobre el superfluidificante utilizado:

- Aspecto físico: líquido homogéneo marrón oscuro.
- Densidad: 1,19 +- 0,03 g/cm³.
- pH: 8 +- 1
- Cloruros: < 0,1%
- Viscosidad (Brookfield 20 1 °C): < 90 cps.
- Contenido de azúcares: exento
- Tiempo de almacenaje: 1 año
- Dosificación habitual: en defecto de ensayos oportunos se encuentra entre 0,8% y el 2% sobre peso de cemento.

3.2. Áridos naturales y de mejillón

Para la ejecución de los hormigones de estudio se emplearon áridos naturales y de mejillón.

Los áridos naturales, tanto gruesos como finos, proceden de machaqueo de piedra caliza. Las fracciones granulométricas de cada uno de ellos fueron 0-4 mm para la arena, AN (0-4), 4-16 mm para la gravilla natural GN (4-16), 10-20 mm para la grava natural GN (10-20). Las curvas granulométricas obtenidas para dichos áridos se recogen en la figura y tabla que se muestran a continuación. Adicionalmente a la granulometría, se determinaron otras propiedades físicas de los áridos (de acuerdo a las especificaciones de la EHE). Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 5 en la que, además, se detallan los límites que la Instrucción del Hormigón Estructural – EHE-08 establece sobre las mismas a los áridos a emplear en la fabricación de hormigones.

Los áridos de concha de mejillón usados para este trabajo proceden de la industria conservera. Las conchas proceden del cultivo del mejillón, concretamente de la especie Mejillón Mediterráneo (*Mytilus galloprovincialis*). Estas han sido sometidas a un tratamiento térmico de 135 °C durante 32 minutos, utilizando como referencia el tratamiento requerido por la normativa europea para alimentación de aves de corral (1), salida más común de este material en el mercado. Este procedimiento garantiza la desinfección de los áridos y a su vez un manejo y almacenamiento seguro. Este tratamiento da lugar a la gravilla de concha de mejillón (GM). De esta gravilla de mejillón, se obtienen por trituración y tamizado: una arena gruesa (AMG) y una arena fina (AMF). Por lo tanto, además de la concha entera que sirve de materia prima, son tres las fracciones de áridos de concha de mejillón utilizadas en este trabajo (Figura 12).

Las principales propiedades de los áridos de concha de mejillón se muestran en la Tabla 7 .



Concha entera, CE (sin tratamiento). Largo: 76mm, Ancho: 37mm



Gravilla, GM (tratamiento térmico)



Arena gruesa, AMG (tratamiento térmico, triturado y tamizado)



Arena fina, AMF (tratamiento térmico, triturado y tamizado)

Figura 12. Áridos de mejillón.

En lo que se refiere a los áridos de mejillón, para la ejecución de los hormigones de estudio se empleó la gravilla de mejillón y una arena resultante de la combinación de la arena fina de mejillón (AMF) y la arena de mejillón gruesa (AMG). La combinación de las arenas de mejillón se realizó con el objetivo de obtener una arena mezcla de granulometría equivalente a la de la arena natural, en concreto se buscó una arena mezcla de idéntico módulo granulométrico que la arena natural. Los porcentajes obtenidos fueron 49.66% de AMF y 50.34% de AMG. La nueva arena, de módulo granulométrico 3.28 y tamaño máximo 4mm es la AMGF (0-4).

Tabla 5. Propiedades de los áridos naturales para hormigón de limpieza y en masa.

		Arena	Gravilla	Grava	EHE-08
Módulo granulométrico		3.71	6.20	7.37	
Finos (UNE-EN 933-1)	(%)	11.54	1.49	0.42	<10 (arena) <1.5 (árido grueso)
Densidad (UNE-EN 1097-6)	(kg/l)	2.67	2.61	2.66	
Absorción (UNE-EN 1097-6)	(%)	2.22	2.20	1.33	<5
Equivalente arena (UNE-EN 933-8)		64	--	--	
Índice de lajas (UNE-EN 933-3)		--	14.02	7.21	<35
Coef. Los Ángeles (UNE-EN 1097-2)		--	--	23.10	<40



Figura 13. Materiales empleados en la fabricación de los hormigones. Cemento, arena, gravilla y grava natural.

Tabla 6. Granulometría de los áridos para hormigón limpieza y masa.

Tamiz (mm)	%PA						
	GM (2-16)	AMG (1-4)	AMF (0-1)	AN(0-4)	GN(4-16)	GN (10-20)	AMGF (0-4)
32	99.86	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	99.32	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
20	97.52	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16	90.20	100.00	100.00	100.00	100.00	63.04	100.00
8	46.48	100.00	100.00	100.00	71.52	0.41	100.00
4	12.99	93.81	99.96	97.31	8.98	0.35	96.87
2	5.09	31.21	99.93	66.02	1.77	0.35	65.34
1	2.48	6.04	99.57	48.10	1.55	0.34	52.49
0.5	1.91	1.83	63.55	27.49	1.52	0.34	32.49
0.25	1.75	1.55	31.08	18.85	1.50	0.34	16.22
0.125	1.60	1.36	15.87	14.19	1.47	0.32	8.57
0.063	1.45	1.22	8.42	11.60	1.40	0.31	4.79
m=	6.41	4.64	1.90	3.28	6.12	7.35	3.28
						%AMF	49.66
						%AMG	50.34

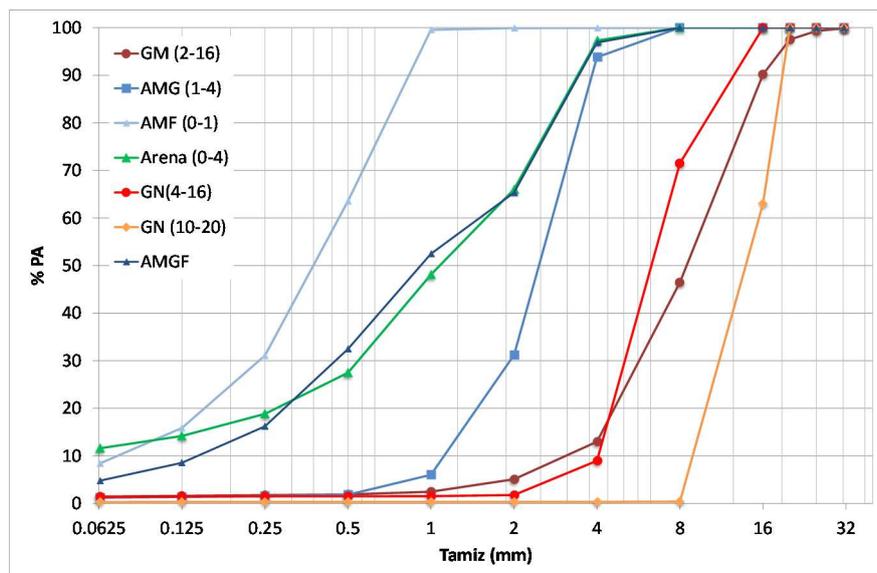


Figura 14. Curvas granulométricas de los áridos convencionales para hormigón de limpieza y en masa.

Tabla 7. Propiedades de los áridos de mejillón.

	(CE)	(GM)	(AMG)	(AMF)
Tratamiento térmico	No tiene		30min a 135°C	
Proceso de machaqueo	No tiene	No tiene	Triturado	Triturado
Módulo granulométrico	-	5.38	1,9	4,64
Densidad de partícula (Kg/l)	-	2.62	2.65	2.73
Absorción de agua (%)	-	2.17	2.56	4.12
Equivalente arena (%) (UNE-EN 933-8)	-	-	99.3	68.2
Índice de lajas (%) (UNE-EN 933-3)	-	99.24	-	-
Coef. Los Ángeles (%) (UNE-EN 1097-2)	-	20	-	-
Cloruros (%) (UNE-EN 1744-1)	-	0.46	0.28	0.51
Sulfatos solubles (%) (UNE-EN 1744-1)	-	0.4	0.63	0.59
Compuestos totales (%) (UNE-EN 1744-1)	-	1.5	1.6	1.3
Materia orgánica (%) (UNE-EN 1744-1)	-	Más oscuro	Más claro	Más oscuro
Partículas Ligeras (%) (UNE-EN 1744-1)	-	0	0.1	
Materia orgánica (%) (UNE 103204)	-	0.27	1.49	2.15



Figura 15. Ensayos químicos para áridos (Izq. Materia orgánica, Cent. Sulfatos solubles, Der. Contaminantes ligeros)

A continuación se detallan algunas de las principales características de estos áridos que repercutirán en las propiedades de los hormigones.

3.2.1. Microestructura de los áridos de mejillón

Como todos los bivalvos, los mejillones se componen de dos conchas calcáreas unidas por un ligamento. Este es el sistema de protección del molusco y esta defensa crece a medida que se desarrolla el mejillón. Estas cáscaras se forman por la biomineralización del carbonato cálcico (CaCO_3) con una pequeña cantidad de materia orgánica que mantiene unida la estructura (49).

Las conchas de mejillón, como todos los bivalvos, se pueden dividir en tres partes: la capa exterior, periostraco, la capa media se llama capa prismática y la capa interior denominada nácar (Figura 16). El periostraco está inmerso entre las capas externas y media, y no está mineralizado compuesto principalmente por una proteína con un espesor aproximado de 40 micras; su función es la de proteger la capa prismática de la abrasión y la disolución por ácidos (50). La capa central y más gruesa (alrededor de 400 micras) tiene una estructura prismática con una serie de prismas de calcita paralelos entre sí (49), de forma poligonal en sección transversal y crecen desde el periostraco en un ángulo de alrededor de 30° con respecto a la superficie. La última capa, aproximadamente 10 micras de anchura, se conoce como nácar y podría ser clasificado como un compuesto biomineralizado (51). Se compone de aragonita laminar cuya orientación es paralela a la superficie y está unido con un material compuesto por una matriz orgánica de polisacáridos (quitina), proteínas y glicoproteínas (50). A través de una fotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido (MEB) se detalla esta formación (Figura 16), conocida como una estructura de ladrillo y mortero.

La presencia de calcita a la que se hace referencia en la literatura (50) (51) se confirma con la difracción por rayos X, junto con trazas de otros polimorfos de calcita como aragonita y vaterita (Figura 17). El núcleo de la concha, o la capa de estructura prismática, está compuesto por calcita. La aragonita existente está vinculada a la formación del nácar en los bloques de construcción de la estructura. La vaterita, de forma cristalina, es un polimorfo que es menos estable y presente debido a la formación de la concha y los procesos de crecimiento.

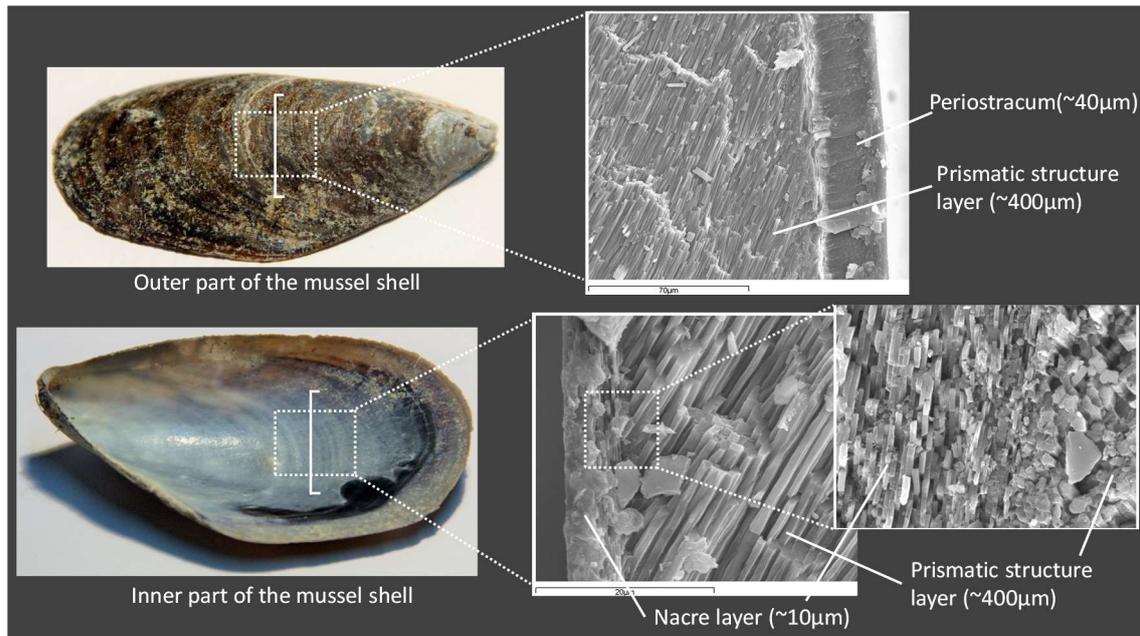


Figura 16. Descripción microestructura de la concha de mejillón mediante MEB

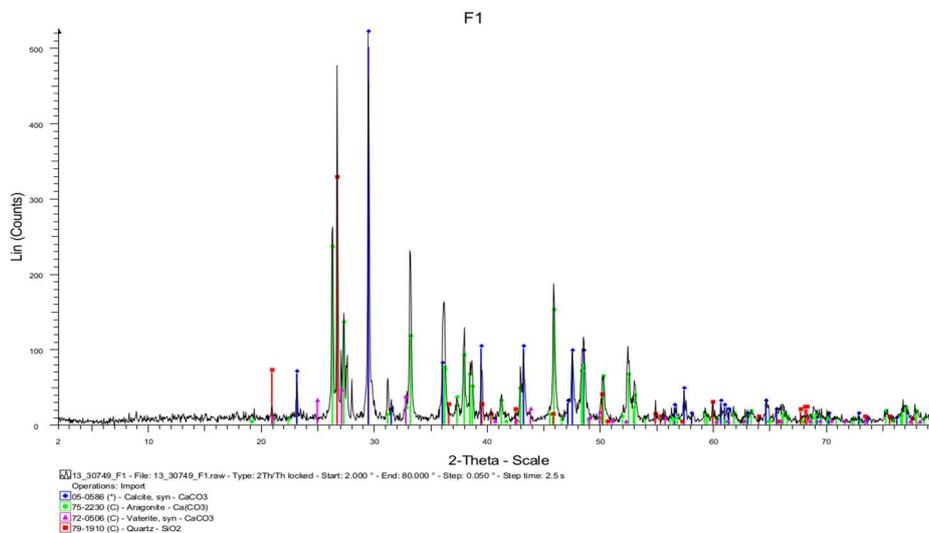


Figura 17. Difracción de rayos X (DRX) de una muestra de arena de mejillón (AMF).

3.2.2. Composición de las conchas de mejillón

Los resultados de la caracterización química de los materiales por fluorescencia de rayos X (FRX) se muestran en la Tabla 8. Se puede observar que el componente principal de las conchas en todas de las muestras es el carbonato de calcio, aproximadamente a un porcentaje del 95%. Los tres tipos de áridos de mejillón son comparados con la concha de vieira usada como referencia. El segundo compuesto presente es óxido de silicio, que tiene una cantidad mayor en los áridos más finos. En tercer lugar es la presencia de óxido de sodio que puede estar relacionado con la presencia de cloruro de sodio en las muestras. Estos resultados son coincidentes con los publicados por varios autores tanto para mejillones, ostras como para berberechos (10) (15), etc.

Los áridos utilizados en morteros y hormigones tienen que cumplir con ciertos criterios físicos (Tabla 9) y químicos específicos. Los áridos de concha de mejillón cumplen los criterios de la normativa española sobre la calidad de los áridos para el concreto con la excepción del cloruro, contenido total en sulfatos y materia orgánica (visual). El primer valor superado es el relacionado con el cloruro, lo que podría producir la rápida corrosión del acero. Por lo tanto, esto impide o limita severamente el uso de áridos de mejillón en hormigón armado o pretensado.

El alto contenido de sulfatos podría dar lugar a una reacción expansiva en el hormigón endurecido y, por tanto, debería establecerse un límite máximo para el contenido de áridos de mejillón, por lo que los áridos totales (concha de mejillón más áridos naturales) no deben superar los límites totales de sulfato. Cabe señalar que el sulfato soluble en ácido está por debajo de los límites (0,8%) lo que indica que la reactividad potencial de este sulfato se reduce.

Por último, los resultados de las pruebas de materia orgánica, de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1, indican que existe un contenido de la misma. Este parámetro también se midió por medio del método de permanganato de potasio (UNE 103 204: 93) y muestra que la presencia de material orgánico es bajo 2,5%. Con esta prueba se miden las sustancias orgánicas presentes en la superficie específica de las conchas de mejillón (polisacáridos, proteínas y glicoproteínas). Como era previsible, el resultado de esta prueba aumenta con la finura de la trituración de la concha de mejillón, debido a la gran superficie específica de las partículas de la arena. Por último, el resultado de la pérdida por calcinación a 550 °C (Tabla 8) indica que todas las muestras presentan una reducción similar en la masa (siempre por debajo del 5%). Este porcentaje corresponde con todas las sustancias orgánicas volátiles que están presentes en el interior de las conchas.

Tabla 8. Resultados de componentes mayoritarios (FRX) en %.

Parámetro	(GM) (%)	(AGM) (%)	(AFM) (%)	Vieira(%)
CaCO ₃ *	95.248	95.088	94.664	98.143
SiO ₂	0.056	1.112	2.580	0.1
Na ₂ O	0.294	0.354	0.508	0.33
Al ₂ O ₃	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
SO ₃	0.173	0.176	0.308	0.47
MgO	0.229	0.205	0.277	0.17
Fe ₂ O ₃	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005
SrO	0.113	0.116	0.192	0.13
K ₂ O	< 0.006	< 0.006	< 0.006	< 0.006
P ₂ O ₅	0.045	0.087	0.105	0.10
Cl	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009
Br	0.015	0.009	0.012	0.008
ZnO	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
CuO	0.010	0.010	0.011	0.009
ZrO ₂	0.005	0.005	0.010	0.004
L. l. 550 °C	4.634	4.058	4.280	2.2
L. l. 975 °C	45.722	44.208	42.108	43.7

*Nota: Calculado estequiométricamente

3.2.3. Análisis termogravimétrico

La Figura 18 muestra los resultados del análisis termogravimétrico de muestras de arena de conchas de mejillón seco (AMF). La curva de pérdida de masa, de acuerdo con la temperatura, muestra un perfil característico de las conchas (48) (52), con una pérdida continua de hasta 500°C de las sustancias orgánicas, es decir, parte de la estructura celular del molusco (polisacáridos, proteínas y glicoproteínas) y algas podrían estar unidas a la superficie. Esta reducción es menor de 6%, lo que concuerda con la pérdida en los resultados de la calcinación.

Además, en esta gama de temperaturas, destacan dos picos a temperaturas aproximadas de 302 °C y 500 °C. Esto correspondería con la presencia significativa de compuestos orgánicos específicos cuando se alcanzan sus temperaturas de sublimación. A una temperatura más alta, entre 670 °C y 800 °C se produce la reacción principal, que es la descarbonatación de carbonato de calcio. En este rango de temperatura las pérdidas de masa son más de 40%. En el caso de carbonato de calcio con 100% de pureza, el cálculo estequiométrico predice una pérdida de masa en el rango de temperatura de este último de 43,9%. Por lo tanto, esto confirma la pureza del material; si no se realiza cálculos estequiométricos, esta pérdida de CO₂ indica una pureza superior al 91%, lo cual concuerda con los resultados de fluorescencia.

Otro aspecto digno de mención son las diferencias entre las muestras de filler y las de arena. En primer lugar, en el filler, se produce una mayor pérdida de masa hasta los 300°C, esto se debe 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, esto es razonable y corresponde a una menor dureza de este mineral, lo cual conduce a que tenga una mayor presencia en la fracción más blanda y que por tanto, está más presente en el material inferior a 0,063 mm.

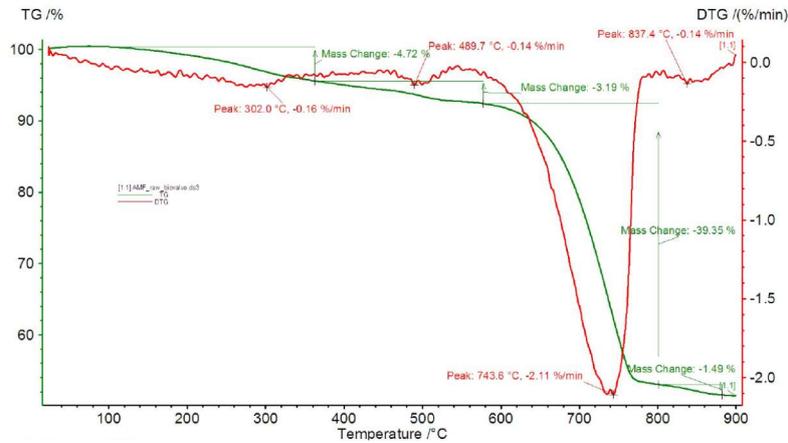


Figura 18. Resultado del análisis termogravimétrico de la AMF.

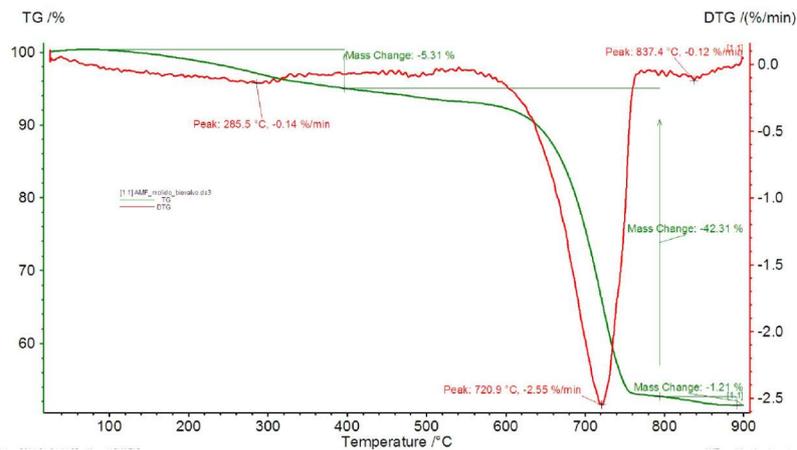


Figura 19. Resultado del análisis termogravimétrico de la AMF tras su molienda.

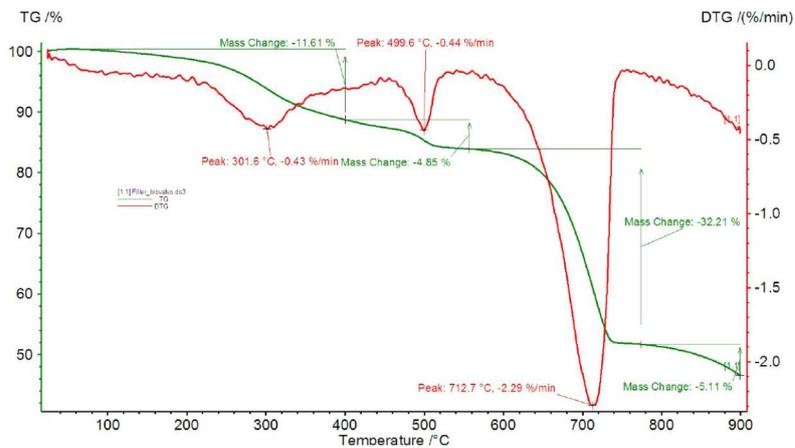


Figura 20. Resultado del análisis termogravimétrico de filler de AMF (menor de 0,063 mm).

Nota (para todas las gráficas): En verde, curva de pérdida de masa, en rojo, balance energético, consiste en una reacción endotérmica con picos a diferentes temperaturas.

3.2.4. Lixiviación

Se generan grandes cantidades de residuos en las obras de construcción, en primer lugar, por el proceso de construcción y en segundo lugar, al final de la vida útil de los edificios o estructuras cuando el material de construcción se convierte en residuo. Por lo tanto, en el caso de nuevos materiales, debe tenerse en cuenta el tipo de residuos que generarán cuando su ciclo de vida finaliza. En este sentido, las regulaciones de la UE en los vertederos de residuos clasifica estos residuos en tres categorías según su riesgo ambiental: residuos inertes, residuos no peligrosos y residuos peligrosos. El daño potencial más alto producido por los residuos es la contaminación del agua dulce con los efluentes. Por lo tanto, parece imperativo establecer el nivel de riesgo de los residuos de los áridos de concha de mejillón. Esta amenaza se evalúa por medio de ensayos de lixiviación donde se diluye una muestra del material en una relación de 01:10 de agua. Después de esto, el eluyente se analiza y se miden los contaminantes potenciales.

Se realizó el ensayo de lixiviación de acuerdo con UNE-EN 12457/4, por triplicado por muestra. La cuantificación de las concentraciones de los elementos en los lixiviados se ha ejecutado utilizando las técnicas de cromatografía líquida de alta presión, o High performance liquid chromatography (HPLC) y espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). En la Tabla 9 se muestran las cantidades lixiviados de cada muestra, expresado en mg por kg de material contaminante liberado. También se presentan los límites asignados en la Decisión 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos. Los límites presentados corresponden a la categoría de residuo inerte.

Tabla 9. Resultados de lixiviación de las muestras de árido de concha de mejillón y su referencia a la Decisión 2003/33/CE de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos.

	MUESTRA				Decisión del Consejo CE 2003/33/CE
	AMF	AMG	GM	CE	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

Los resultados de lixiviación de las muestras de concha de mejillón muestran que la concha entera (CE) se puede clasificar directamente como residuo inerte. Sin embargo, las muestras de concha triturada en forma de gravilla o arena no cumplen totalmente el límite de residuo inerte. El incumplimiento se produce en todos los casos en los cloruros y en el caso de la AMF también en los sulfatos. Cabe señalar que las limitaciones para residuo no peligros en el caso de sulfatos son de 20000 mg/kg y en los cloruros de 15000 mg/kg. Por tanto, las muestras de AMF, AMG y GM no entrarían en el límite para residuo inerte y se clasificarían como residuo no peligroso. Sin embargo, cabe destacar que la muestra de concha entera sí cumpliría los requisitos de residuo inerte.

3.3. Diseño de las mezclas

Se estudiaron dos tipos de hormigones: un hormigón de (HL) y un hormigón en masa estructural (HM). Ambos fueron diseñados con altos valores de asiento (consistencias fluida y líquida) con el fin de utilizar los mayores porcentajes de sustitución de áridos de concha de mejillón posible, con la previsión de que la incorporación de los áridos de mejillón reduce la trabajabilidad de las mezclas.

Hormigón de limpieza

Se utilizó como referencia para el diseño, un hormigón (no estructural) de limpieza (HL), con una relación agua / cemento de 0,75 y un contenido de cemento de 225 kg / m³. A continuación, se realizaron tres series de hormigones con sustitución de árido natural por árido de mejillón: una serie sustituyendo solo la arena (HL AM), otra serie con sólo el reemplazo de la gravilla (HL GM), y la tercera serie con sustitución de arena y gravilla conjuntamente (HL A+G).

Por lo tanto, en la primera serie, el árido natural (AN) es sustituido por arena de conchas de mejillón (AM) utilizando cuatro tasas de sustitución de 25%, 50%, 75% y 100% (en volumen). En la segunda, el árido grueso natural (GN (4-16) y GN (10-20)) fue sustituido por la gravilla de concha de mejillón (MG) utilizando los siguientes tipos sustituciones: 25%, 50% y 67%. Estos porcentajes de sustitución son 37,5%, 74,9% y 100% cuando se calculan en función de la fracción equivalente (GN (4-16)). En la última serie, se reemplazaron conjuntamente la arena y la gravilla. Se utilizaron porcentajes del 5% (5% de AM y 5% de GM) y de 12,5% (12,5% de AM y 12,5% de GM).

Para cada tipo de hormigón se realizó una amasada de 50 litros, con la que se obtuvieron 7 probetas cilíndricas de 15x30 cm y 10 cúbicas de 10x10x10 cm.

Se empleó el método de Bolomey para el ajuste de las dosificaciones del hormigón patrón (Tabla 10). La cantidad de aditivo se ajustó para obtener en el hormigón patrón una consistencia fluida o líquida (valor del asiento entre 16 y 20 cm). El agua de amasado se corrigió específicamente para cada uno de los hormigones, calculada en función de la humedad y absorción (humedad efectiva) de las diferentes fracciones de los áridos. La Tabla 11 reúne todos los hormigones fabricados.

Hormigón en masa estructural

La dosificación del hormigón en masa estructural (HM30) garantiza el comportamiento en un ambiente Q_b, correspondiente a elementos en contacto con agua de mar (bloques para diques) y válida para cimentaciones. Fue diseñado con el objetivo de alcanzar una resistencia a la compresión de 30 MPa y se partió de una relación a/c = 0.50 y 260 kg/m³ de cemento. Los porcentajes de sustitución seleccionados correspondieron, como en el hormigón de limpieza, al 25%, 50% y 65% de la fracción fina o arena (HM30 AM), y al 25%, 50% y 65% (HM30 GM) de la fracción gruesa. De modo análogo al hormigón de limpieza, se diseñaron también dos mezclas en las que se utilizó de forma conjunta la arena y la gravilla de mejillón (A+G). Los porcentajes de sustitución para estas mezclas fueron los mismos que en el hormigón de limpieza, 5% y 12,5%.

El porcentaje de sustitución máximo del 65% se estableció con el objetivo de no rebasar el máximo contenido de sulfatos permitido en la EHE (1%) en los áridos que se empleen en la fabricación de

hormigón. En efecto, la grava de mejillón, la arena de mejillón gruesa y la arena de mejillón fina contienen, respectivamente, el 1.5%; 1.6% y 1.3% de sulfatos, lo que en valor medio supone un 1.5%. Como el árido convencional está exento de este compuesto, se garantiza no rebasar el máximo de compuestos totales de azufre permitido por la EHE si el contenido máximo de árido de mejillón no supera el 68%.

También en este caso se dosificaron las mezclas patrón de acuerdo el método de Bolomey (Tabla 10), corrigiendo el agua a añadir en función de la humedad y absorción de los áridos, y ajustando igualmente la cantidad de aditivo para lograr un hormigón patrón de consistencia fluida o líquida (valor del asiento entre 10 y 15 cm). Los hormigones estructurales con áridos de mejillón se obtuvieron mediante la sustitución del árido natural por volumen en los porcentajes de sustitución antes mencionados. La Tabla 11 resume los hormigones finalmente fabricados. Se refleja también en la misma tabla el contenido de materia orgánica de cada hormigón debido a la utilización de árido concha de mejillón.

Para cada tipo de hormigón se realizó una amasada de 65 litros, con la que se obtuvieron 7 probetas cilíndricas de 15x30 cm y 10 cúbicas de 10x10x10 cm, dos probetas cilíndricas de 15x15 cm y dos probetas prismáticas de 10x10x40 cm.

Todos los materiales se almacenaron en el laboratorio y se prepararon las amasadas el día anterior. Las condiciones del acopio supusieron que la humedad de los materiales era nula. El procedimiento de amasado (Figura 21) de todos los hormigones fue exactamente el mismo.



Se introducen en la amasadora el árido fino. Se pone en marcha durante 30s.



Sin parar la amasadora se añade agua hasta saturación del árido al 80%. Se mezcla durante 30s



Se introducen en la amasadora los áridos gruesos. Se pone en marcha de nuevo durante 60s.



Se para la amasadora y se introduce el cemento. Se pone en marcha de nuevo durante 60s.



Sin parar la amasadora se añade el agua de amasado. Se mezcla durante 1 min.



Sin parar la amasadora se añade el aditivo. Se mezcla durante 1 min.

Figura 21. Proceso de amasado de los hormigones.

Tabla 10. Dosificación de hormigones patrón de limpieza y en masa estructural.

Materiales	Hormigón de limpieza (HL)		Hormigón en masa (HM 30)	
	Volumen (dm ³)	Peso (kg)	Volumen (dm ³)	Peso (kg)
Agua	168.75	168.75	180.00	180.00
Cemento	72.58	225.00	116.13	360.00
AN	495.30	1322.46	435.08	1161.66
GN	192.45	502.30	216.04	563.86
GNG	95.92	255.14	77.76	206.83
TOTAL	1025.00	2473.64	1025.00	2472.35

Tabla 11. Hormigones fabricados.

Hormigones	%AN	%AM	%(GN/Grueso)	%(GM/Grueso)	%Materia orgánica
HM30 patrón	100	0	100	0	0
HM30 AM 25%	75	25	100	0	0.19
HM30 AM 50%	50	50	100	0	0.38
HM30 AM 65%	35	65	100	0	0.49
HM30 GM 25%	100	0	75	25	0.02
HM30 GM 50%	100	0	50	50	0.04
HM30 GM 65%	100	0	35	65	0.06
HM30 A+G 5%	95	5	95	5	0.04
HM30 A+G 12.5%	87.5	12.5	87.5	12.5	0.21
HL patrón	100	0	100	0	0
HL AM 25%	75	25	100	0	0.24
HL AM 50%	50	50	100	0	0.48
HL AM 75%	25	75	100	0	0.73
HL AM 100%	0	100	100	0	0.97
HL GM 25%	100	0	75	25	0.02
HL GM 50%	100	0	50	50	0.04
HL GM 67%	100	0	33.3	66.7	0.05
HL A+G 5%	95	5	95	5	0.05
HL A+G 12.5%	87.5	12.5	87.5	12.5	0.26

4

Programa experimental



4. Programa experimental

Como se indicó en el punto 3.3, para la fabricación de los diferentes hormigones se realizaron amasadas de 50 litros con los que se llenaron 7 probetas cilíndricas de 15x 30cm y 12 cúbicas de 10x10x10cm (Figura 22), para el hormigón de limpieza. En el caso del hormigón en masa estructural se realizaron amasadas de 65 litros, con la que se obtuvieron 7 probetas cilíndricas de 15x30 cm, otras 2 cilíndricas de 15x15cm, 12 cúbicas de 10x10x10 cm y 2 prismáticas de 40x10x10cm (Figura 22). Los ensayos realizados para cada tipo de hormigón se relacionan en la Tabla 12.



Figura 22. Moldes para la elaboración de probetas de hormigón de limpieza y hormigón en masa estructural respectivamente.

Tabla 12. Probetas realizadas para hormigones limpieza y masa.

Tipo	Litros	P.cilínd. 15x30cm	P.cilínd. 15x15cm	P.cúbicas 10x10x10cm	P.prism. 40x10x10cm	Ensayos fresco	Ensayos endurecido
HM 30	65	7	2	12	2	Densidad, consistencia, tiempo abierto trabajabilidad	Densidad, absorción, R. compresión, tracción, módulos, permeabilidad agua, pérdida peso
HL	50	7	0	12	0	Densidad, consistencia, tiempo abierto trabajabilidad	Densidad, absorción Resistencia compresión, tracción, módulos,

4.1. Estado fresco

Densidad y consistencia

En estado fresco, se determinó la consistencia y densidad de cada tipo de hormigón. Esta última, se obtuvo una vez llenados los moldes de las probetas siguiendo las pautas de la norma UNE-EN: 12350-6.



Figura 23. Vibrado y enrasado del hormigón en los moldes.

En cuanto a la consistencia, se midió inmediatamente después de cada amasada a través del asiento en cono de Abrams, de acuerdo a la norma UNE-EN: 12350-2.



Figura 24. Medida de la consistencia mediante cono de Abrams.

Tiempo abierto de trabajabilidad

En estado fresco, también se determina la influencia que tiene el contenido de áridos de mejillón en el tiempo de fraguado del mortero debido a su contenido en material orgánica. El tiempo abierto de trabajabilidad se obtuvo en un dispositivo específico provisto de un punzón que empuja la muestra fresca hasta que la fuerza ejercida excede de 15 N, en acuerdo a la norma UNE EN 1015-9. Este ensayo se realizó sobre morteros, para poder comprobar la influencia de los áridos de mejillón sobre las pastas de cemento. Para ello se diseñó un mortero patrón (MCO) de dosificación 1: 4 (cemento: arena en volumen) y una relación agua/cemento igual a 1 (en peso). Sobre este mortero patrón se han diseñado otros cuatro a los que se les sustituyó la arena convencional por arena de

concha de mejillón en porcentajes de 25%, 50%, 75% y 100% en volumen, obteniendo las siguientes tipologías respectivamente: MC25, MC50, MC75 y MC100.



Figura 25. Probeta de ensayo del tiempo abierto de trabajabilidad sobre mortero de cemento con sustitución del 25% de la arena natural por arena de mejillón.

4.2. Estado endurecido

Densidad

En estado endurecido del hormigón, se realizaron ensayos a 28 días para la obtención de la densidad de los diferentes hormigones de estudio, empleando para ello probetas cúbicas de 10x10x10 cm.



Figura 26. Pesado de probetas de hormigón, cálculo densidades.

Absorción

Se realiza el ensayo de durabilidad de acuerdo a la norma UNE 83980 donde se determinó la absorción de agua la densidad y la porosidad accesible al agua de las diferentes muestras de hormigones estudiadas. Para este ensayo se utilizaron tres probetas cúbicas de 10x10x10cm de cada tipo diferente de hormigón.



Figura 27. Inmersión probetas cúbicas en agua, ensayo absorción.

Resistencias mecánicas

Para la caracterización del hormigón endurecido se realizaron ensayos a compresión a edades de 3, 7, 28 y 90 días sobre probetas cúbicas de 10x10x10cm, también se realizan ensayos de compresión y ensayos de tracción indirecta (brasileño) a 28 días sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm. Los ensayos de compresión se realizaron de acuerdo a la norma UNE-EN 12390-3, y los de tracción indirecta según la UNE EN 12390-6. También se realizaron ensayos de módulo de elasticidad longitudinal y transversal a 28 días sobre las probetas cilíndricas, de acuerdo a la normativa UNE EN 12390-13.

PRENSA SERVO-HIDRÁULICA

Las prensas hidráulicas son equipos fundamentales para la determinación de la resistencia a compresión y tracción de hormigones y morteros

- Grandes capacidades de carga (200 toneladas)
- Sistema de control mediante lazo cerrado
- Sistema de adquisición de datos
- Con extensómetros y dispositivos para la obtención de deformaciones
- Apta para ensayos de fatiga

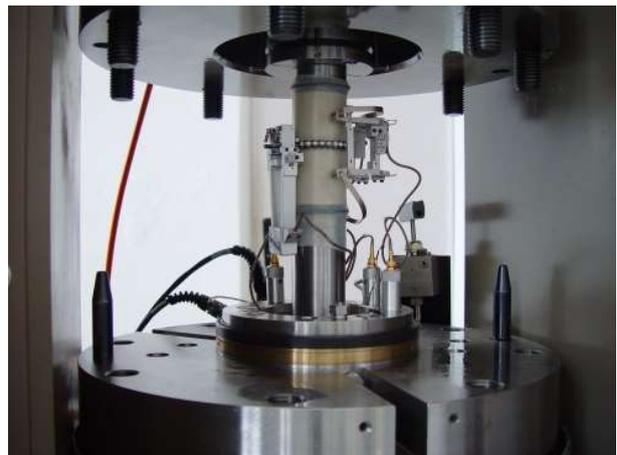




Figura 28. Ensayos de resistencia mecánica.

Permeabilidad al agua

Con el fin de caracterizar la durabilidad del hormigón estructural, se llevó a cabo el ensayo de permeabilidad al agua en probetas cilíndricas de 15x15cm según UNE 83310. Una vez sometidas al ensayo se rompen a tracción y se evalúa el grado de penetración de agua en cada una de las probetas resultantes.

EQUIPO DE PENETRACIÓN DE AGUA

Este equipo se utiliza para medir el frente de penetración de agua en un hormigón o mortero, determinando de este modo su permeabilidad

- Presión de agua regulable
- Numerosos puestos de ensayo
- Posibilidad de ensayo en dos caras simultáneas
- Construcción en acero inoxidable y en elementos protegidos frente a la corrosión





Figura 29. Ensayo de permeabilidad al agua. Probetas resultantes del ensayo a tracción una vez sometidas a agua a presión.

Pérdida de peso

Se ha realizado un control de la pérdida de peso en función del tiempo sobre probetas prismáticas de 40x10x10cm como una manera de estimar la retracción del hormigón. Las probetas se acopian de forma que se garantice la circulación del aire por todo el espacio perimetral, colocándolas sobre una superficie no continua para disminuir el rozamiento.



Figura 30. Probetas de hormigón endurecido acopiadas para el control por pérdida de peso.

5

Resultados y discusión



5. Resultados y discusión

5.1. Microestructura del hormigón con áridos de mejillón

La Figura 31 muestra una sección de una probeta de hormigón con árido de mejillón ensayada a rotura a compresión. En ella se puede ver la mayoría de los efectos de los áridos de concha de mejillón en la microestructura del hormigón. En primer lugar, se detecta una tendencia específica en la orientación de los áridos de mejillón dentro de la matriz del hormigón, ya que tienden a colocarse perpendicular a la dirección de vibración. Por lo tanto, la mayor parte del árido grueso de concha de mejillón muestra una orientación horizontal en la masa del hormigón.

En segundo lugar, la porosidad tiene una fuerte presencia en toda la masa del hormigón con una distribución aparentemente uniforme.

Sin embargo, el efecto más destacado es la deficiente adherencia pasta-árido alrededor de la concha de mejillón. Este fenómeno es especialmente notorio cuando el árido de mejillón es de mayor tamaño. También hay que señalar que dicha deficiencia se produce predominantemente en la parte interior de las conchas, contra la capa de nácar. Esto es probablemente debido a la quitina, que tiene mayor presencia en esta capa (53) que, como otros polímeros orgánicos disminuye la fuerza de tracción de los compuestos inorgánicos (54).

Además, se llevó a cabo un análisis complementario por MEB en algunas muestras extraídas de hormigón estructural con áridos de concha de mejillón (Figura 32), donde se puede observar una clara diferencia en la unión pasta-árido a cada lado de la concha. La zona de contacto de la pasta con la parte exterior de la concha (periostraco) muestra algunas pequeñas grietas y una gran presencia de porosidad. Sin embargo, la zona de contacto con la capa interna de la concha (capa de nácar) presenta una absoluta falta de unión, por una alta porosidad en forma de cavidades.

La falta de adhesión entre pasta-árido y el aumento de la porosidad, sin duda, son las razones que más afectan a las propiedades del hormigón, especialmente a las propiedades mecánicas.

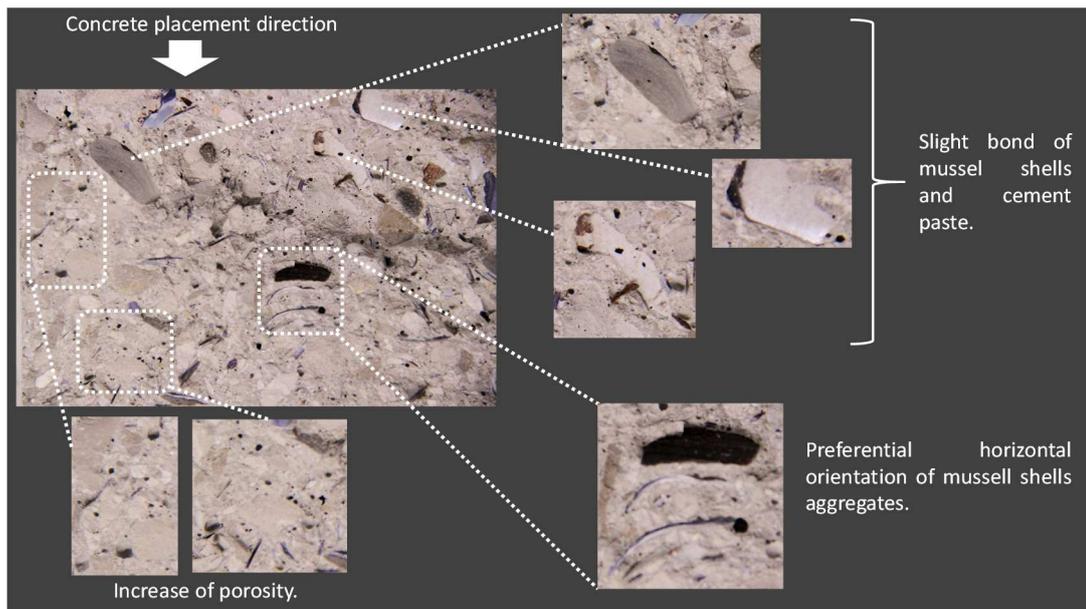


Figura 31. Sección de una muestra de hormigón (HM30 A+G12,5%) rota por ensayo a compresión

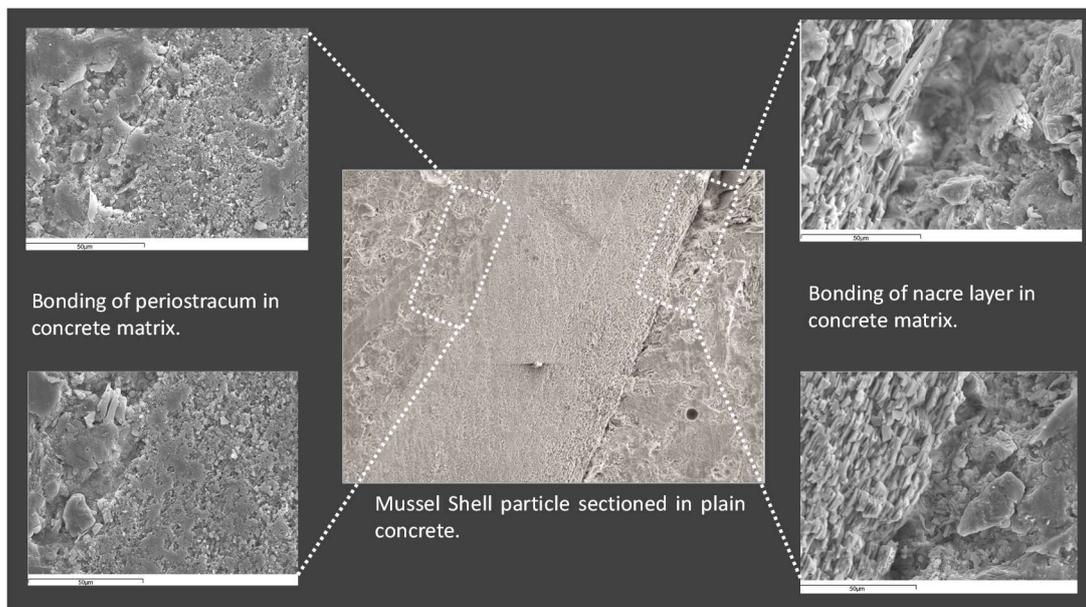


Figura 32. Observación por MEB de la microestructura del hormigón en masa (HM30 A+G 12,5%)

5.2. Consistencia, absorción y densidad en fresco y endurecido

Como fue mencionado en el punto 5.1.1., se diseñaron hormigones patrón de consistencias fluidas o líquidas con la intención de que se diese cabida a porcentajes de sustitución por áridos de mejillón lo más elevados posibles. La Tabla 13 muestra el valor del cono obtenido en función del porcentaje de árido de mejillón utilizado. Como era de esperar, un aumento en el porcentaje de árido de mejillón empleado supone un aumento en la demanda de agua (los áridos de mejillón presentan una forma lajosa que implica necesariamente una mayor demanda de agua), lo que supone una

disminución en el valor del asiento que crece con el porcentaje de árido empleado. Se ha observado, igualmente, que la incorporación de gravilla de mejillón tiene un efecto más notable sobre la consistencia que la incorporación de arena de mejillón.

Con el ensayo de la consistencia ya se han podido descartar algunas de las dosificaciones, en concreto los hormigones HM30 AM 65%, HM30 GM 90,1%, HL GM 74,9% y HL GM 100% no se pudieron colocar y el HM30 GM 69,3% se colocó con muchas dificultades.



Figura 33. Hormigones descartados por consistencia.

Tabla 13. Consistencia, densidad en estado fresco y endurecido.

Hormigones	Arena natural	Arena mejillón	Grueso/ Gravilla naturales	Grueso/ Gravilla mejillón	Consistencia (cm)	Densidad fresco (kg/l)	Densidad endurecido (kg/l)	
HM 30	HM30 patrón 0%	100	0	100/100	0/0	20	2,36	2,30
	HM30 AM 25%	75	25	100/100	0/0	22	2,37	2,35
	HM30 AM 50%	50	50	100/100	0/0	18	2,20	2,22
	HM30 AM 65%	35	65	100/100	0/0	No se coloca		
	HM30 GM34,6%	100	0	75/65.4	25/34.6	16	2,22	2,21
	HM30 GM69,3%	100	0	50/30.7	50/69.3	0	2,49	2,34
	HM30 GM90.1%	100	0	35/9.9	65/90.1	No se coloca		
	HM30 A+G 5%	95	5	95	5	21	2,32	2,56
	HM30 A+G 12.5%	87.5	12.5	87.5	12.5	22	2,24	2,22
	HL	HL patrón 0%	100	0	100/100	0/0	5	2,12
HL AM 25%		75	25	100/100	0/0	12	2,34	2,29
HL AM 50% R		50	50	100/100	0/0	11	2,22	2,15
HL AM 75%		25	75	100/100	0/0	7	2,00	2,08
HL AM 100%		0	100	100/100	0/0	1	2,08	2,07
HL GM37,5%		100	0	75/62.5	25/37.5	1	2,16	2,12
HL GM74.9%		100	0	50/25.1	50/74.9	No se coloca		
HL GM100%		100	0	33.3/0	66.7/100	No se coloca		
HL A+G 5%		95	5	95	5	12	2,21	2,25
HL A+G 12.5%		87.5	12.5	87.5	12.5	7	2,18	2,14

La Figura 34 muestra los valores de asiento obtenidos en función del porcentaje total concha de mejillón utilizado. Como era de esperar, un aumento de este porcentaje conduce a un aumento en la demanda de agua (debido a la forma lajosa del árido de mejillón), resultando en una disminución en el asiento. Además, la presencia de sustancias orgánicas también aumenta viscosidad de la pasta, lo que conduce a una reducción en la liquidez de la mezcla (55).

La disminución crece con el porcentaje de árido utilizado. Además, se puede observar que el uso de gravilla de mejillón tiene más influencia en la consistencia que el uso de la arena. Los hormigones con porcentajes de 5% y 12,5% de arena de concha de mejillón y gravilla muestran consistencias muy similares a la del hormigón de referencia.

Estos resultados aconsejan descartar algunas de las dosificaciones, las denominadas, HM30 AM 65%, HM30 GM 65%, HL GM 50% y HL GM 67% debido a que fue imposible su colocación en los moldes de ensayo. El hormigón HM30 GM 50% aunque tuvo un valor de asiento muy bajo y su colocación fue muy difícil, finalmente se decidió no descartarlo.

La densidad en estado fresco y endurecido tiende a ser más baja cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de áridos de mejillón (Figura 35, Figura 36). Tanto la forma de las partículas así como el

contenido de materia orgánica provocan que quede aire ocluido en el hormigón (Figura 37). La forma debido a las partículas lajasas y la materia orgánica (ya que consiste en un hidrato de carbono atrapado dentro de la concha - polisacárido carboxilado y sulfatado), que, al igual que los aireantes (hidrocarburos sulfonados) actúan como tensioactivos que estabilizan las burbujas de aire en el hormigón (17) (56) (57) (58). Además, como la AM tiene una mayor superficie específica que la GM, también tiene un mayor contenido en materia orgánica, por lo que la disminución de la densidad es mayor cuando se utiliza arena que cuando se utiliza grava.

Por último se ha observado que, en general, el uso de árido de concha de mejillón disminuye la capacidad de absorción de agua del hormigón (Figura 38). Esta disminución es mayor cuanto mayor es el porcentaje de árido concha de mejillón utilizado. La orientación preferente de las partículas de mejillón de forma plana actúa como una barrera a la penetración de agua, como se ha observado en el ensayo de permeabilidad al agua (ver punto Permeabilidad al agua).

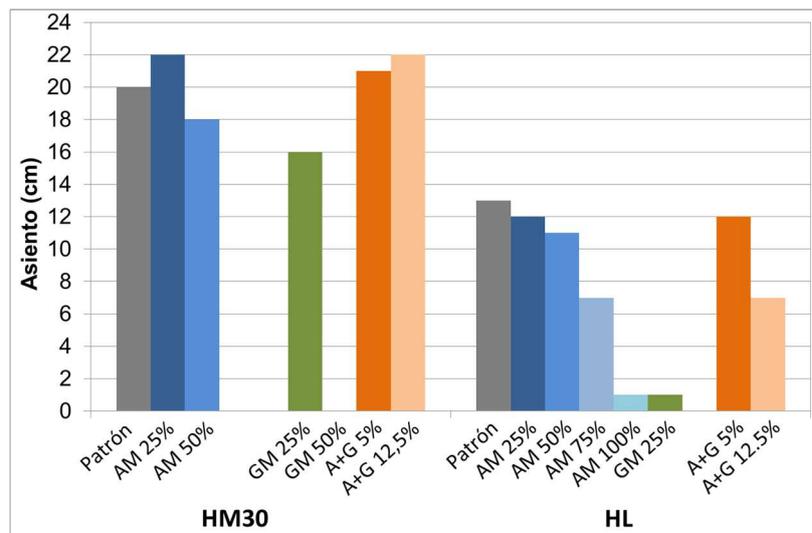


Figura 34. Consistencia. Valor del asiento en cono (cm).

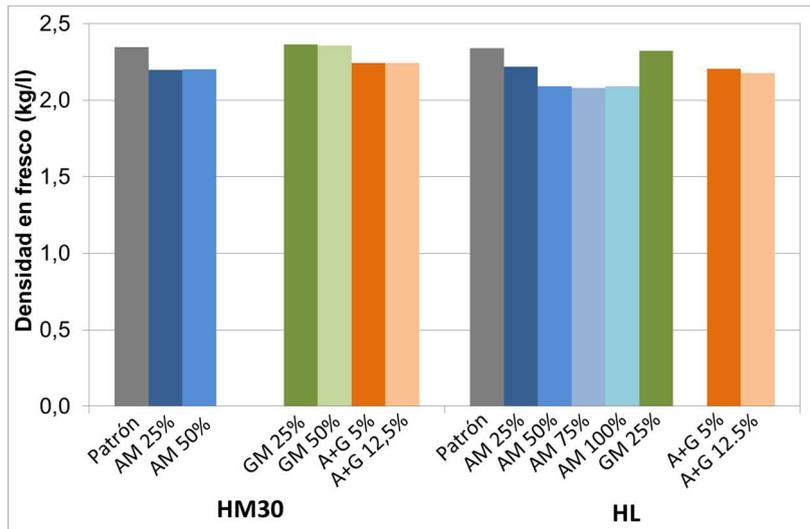


Figura 35. Densidad en estado fresco.

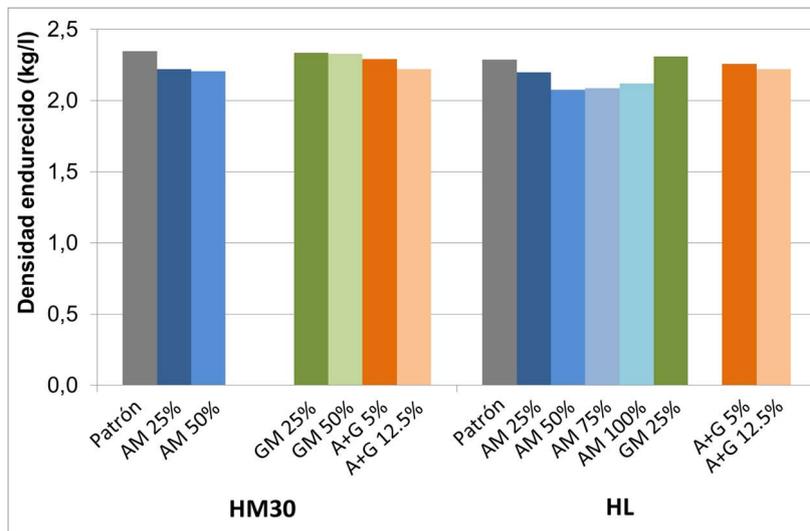


Figura 36. Densidad en estado endurecido.

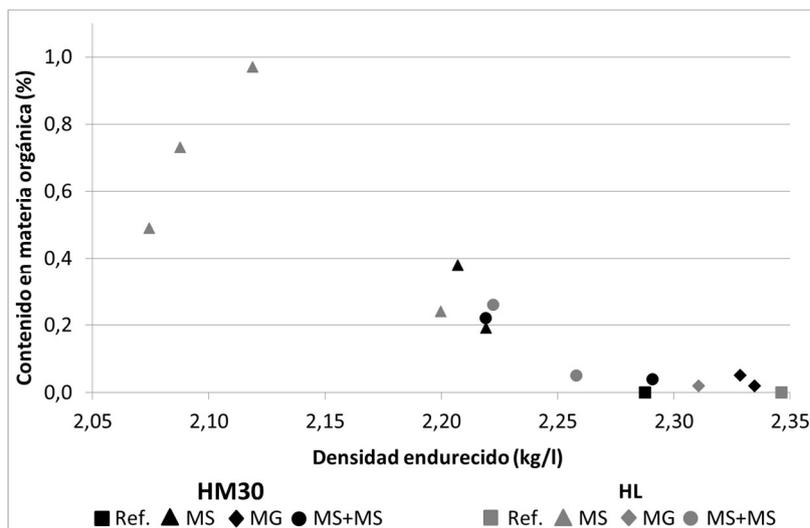


Figura 37. Relación entre densidad y materia orgánica.

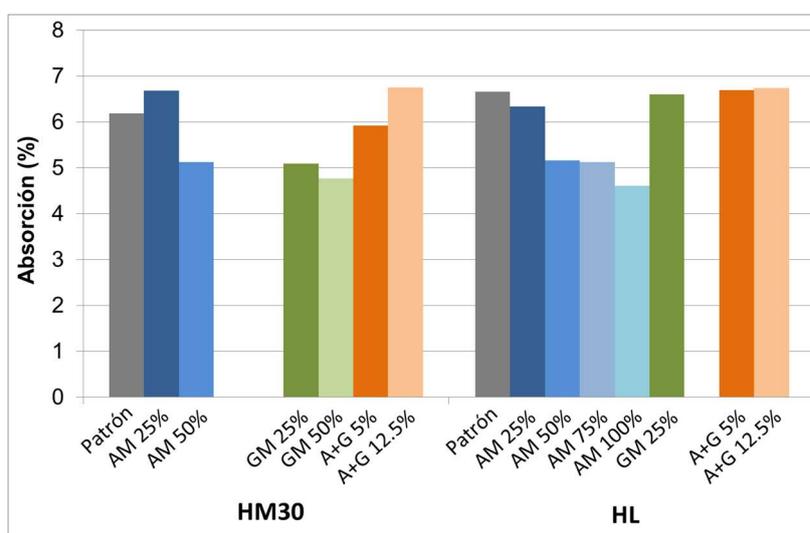


Figura 38. Absorción.

5.3. Tiempo abierto de trabajabilidad

El tiempo abierto de trabajabilidad está relacionado con el tiempo de fraguado de las pastas de cemento: un aumento en el tiempo de trabajabilidad indica un retraso en el tiempo de fraguado.

Los resultados (Figura 39) muestran un aumento del tiempo de trabajabilidad con el aumento del porcentaje de sustitución de arena natural por arena de mejillón, que coincide con los resultados de otros autores (32) (14) (28) (56).

Esto es debido a la presencia de materia orgánica, medida de acuerdo a la norma UNE 103 204: 93, y también debido a la presencia de polisacáridos, como la quitina, en la microestructura de las

conchas de mejillón. Como ya se ha señalado, la quitina es un polisacárido natural que puede actuar de una manera similar a la celulosa aumentando el tiempo de fraguado en mezclas cementosas (54).

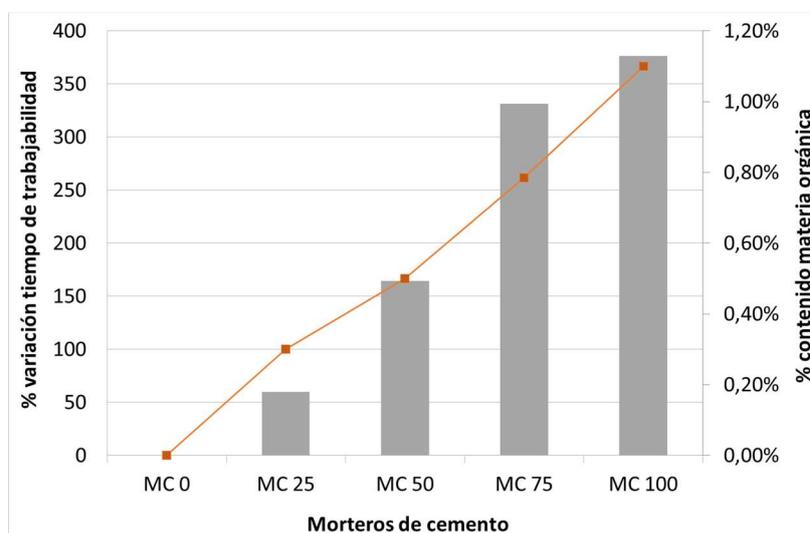


Figura 39. Variación del tiempo de trabajabilidad de los morteros de cemento con respecto a su contenido en material orgánica.

5.4. Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión disminuye significativamente a medida que aumenta el porcentaje de áridos con concha de mejillón (Figura 40 y Figura 41).

En cuanto al hormigón estructural, se ha observado que tanto el uso de la arena como de gravilla de mejillón disminuye la resistencia a la compresión de una manera similar. Sin embargo, en algunos casos, la disminución causada por el uso de arena es ligeramente mayor que la causada por la adición de gravilla, así que mientras la resistencia a compresión HM30 AM 25% disminuye en un 37,5%, la caída registrada por el HM30 GM 25% fue del 23%.

Las características principales que influyen en la disminución de la resistencia a compresión, observadas en este trabajo y que coinciden con otros autores (9), las características principales son esencialmente los tres puntos siguientes.

La arena de concha de mejillón tiene una elevada absorción de agua: AMF y AMG muestran un 186% y un 115% de absorción de agua mayor que la arena natural, respectivamente. Como se ha explicado en el apartado 3.3, se corrigió el agua de amasado, añadiendo agua extra, para compensar la capacidad de absorción de los áridos de mejillón. Sin embargo, la distribución heterogénea del total del agua de amasado en la matriz del hormigón podría haber debilitado la adherencia de la pasta de cemento y las partículas de árido, como ya se ha observado con otros

áridos (reciclados o ligeros) que también presentan una elevada capacidad de absorción de agua (59).

Una vez más, la forma plana y lajosa de los áridos de mejillón, especialmente el de la gravilla de mejillón, actúa como una barrera para el agua de exudación, lo que aumenta la relación agua-cemento sobre todo en la cara inferior de la concha. Esto empeora la adherencia (pasta-árido) (Figura 32) y por lo tanto la resistencia del hormigón.

La presencia de sustancias orgánicas (materia orgánica y también polímeros orgánicos) conduce también a una disminución en la adherencia pasta-árido y a un aumento en la porosidad, que afecta sin duda la resistencia del hormigón (13).

Además, cuando los ratios de sustitución aumentan hasta el 50%, las pérdidas de resistencia alcanzan un 41,5% cuando se sustituye la arena y un 48,1% en el caso de la gravilla. Cuando se analizan los resultados obtenidos en los hormigones HM30 A +G 5% y HM30 A +MG 12.5% se puede observar que ambos alcanzaron las resistencias a compresión objetivo de 30 MPa.

En cuanto al hormigón de limpieza, se puede concluir que la incorporación tanto de arena de cómo de gravilla de mejillón disminuye la resistencia a compresión en la misma medida. De esta manera, el hormigón HL AM 25% muestra una disminución en la resistencia a compresión del 27%, y su correspondiente HL GM 25% disminuye la misma en un 24%. En algunos casos, una vez más se observa que las tasas de sustitución superiores al 25% no son recomendables, ya que conducen a una resistencia a compresión por debajo del mínimo especificado para un hormigón de limpieza, no estructural, (15 MPa). Los porcentajes de sustitución del 75% y 100% con arena de mejillón han proporcionado hormigones con una resistencia a compresión menor de 10 MPa a los 28 días.

Estos resultados indican que los porcentajes de sustitución de más de 25% no se deben utilizar, ya que provocan en los hormigones grandes caídas de resistencia, que en ningún caso podrían ser compensadas con modificaciones en la dosificación.

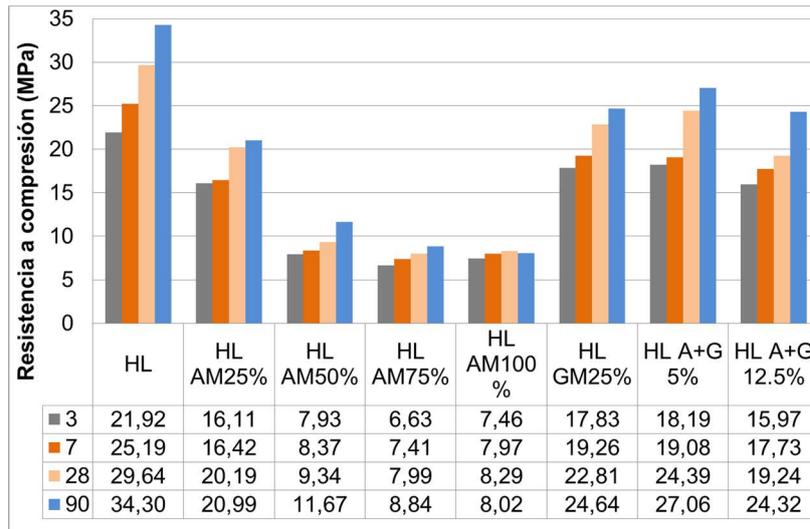


Figura 40. Resistencia a compresión a 3, 7, 28 y 90 días. Hormigones de limpieza.

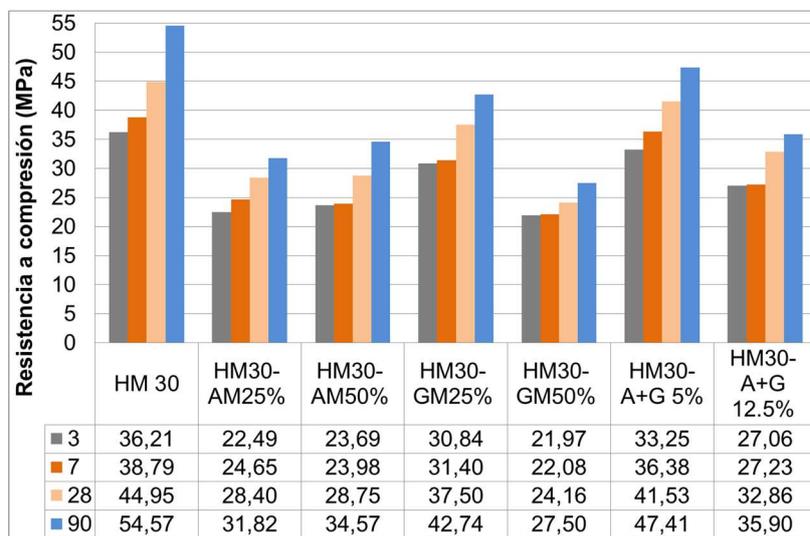


Figura 41. Resistencia a compresión a 3, 7, 28 y 90 días. Hormigones en masa estructural.

5.5. Resistencia a tracción

Los valores de la resistencia a la tracción (método Brasileño) se recogen en la Figura 42. De nuevo, el uso de áridos de concha de mejillón disminuye esta propiedad. En este caso, en el hormigón estructural, el uso de árido de concha de mejillón conduce a una de alrededor del 10%, independientemente del porcentaje o fracción (arena o gravilla) incorporado. Sin embargo, cuando se analizan los hormigones de limpieza, se puede observar que cuando la arena natural se sustituye por arena concha de mejillón las disminuciones son, en general, mucho más notables que cuando se utiliza grava mejillón, y siempre por encima de 25%.

Se ha observado que la influencia del árido concha de mejillón en la resistencia a tracción es muy similar a la de la resistencia a compresión. Una vez más, se podría decir que la capacidad de

absorción, la forma lajosa y el contenido en materia orgánica del árido de mejillón podrían ser las responsables de este efecto.

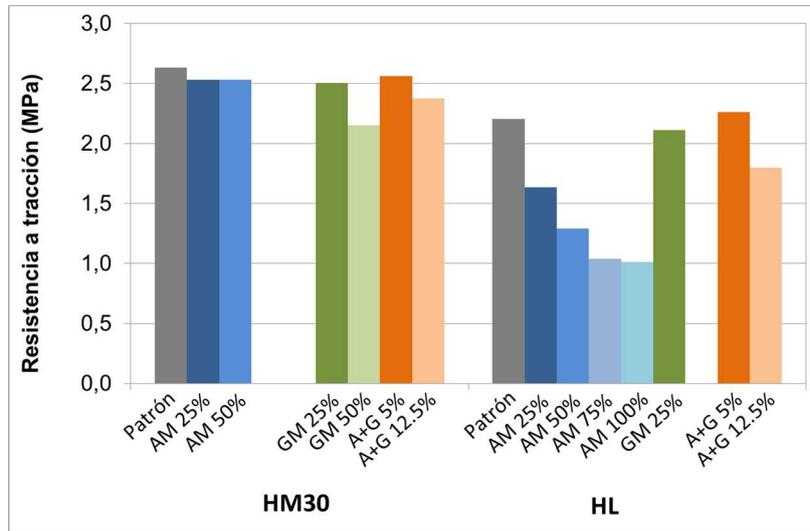


Figura 42. Resistencia a tracción

5.6. Módulos de elasticidad

En la Figura 43 se muestran los valores del módulo de elasticidad longitudinal para los diferentes hormigones fabricados. Se ha observado que el valor del mismo disminuye significativamente con la incorporación de árido de concha de mejillón. Como se vio en los valores del ensayo de resistencia compresión, las tasas de sustitución de menos del 25% mantienen desviaciones del patrón inferiores al 25%. Con tasas de sustitución del 50% o 100% esta disminución crece al 50%. Los valores del módulo de deformación transversal muestran el mismo comportamiento (Figura 44)

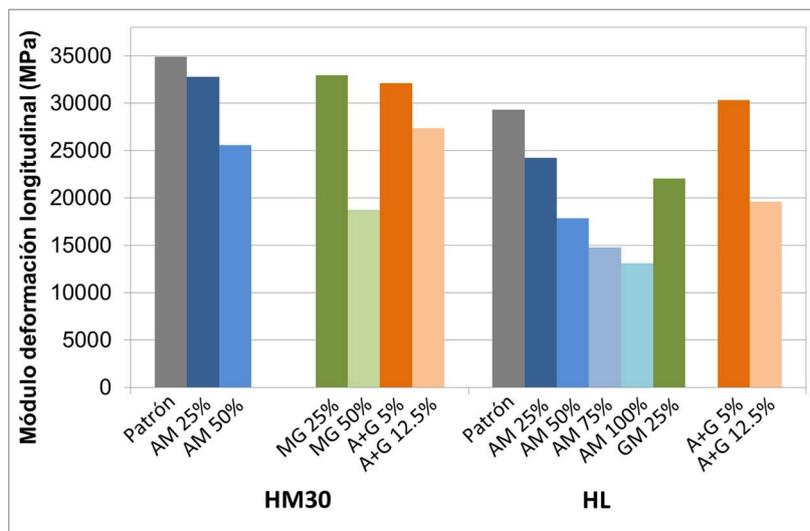


Figura 43. Módulo de deformación longitudinal.

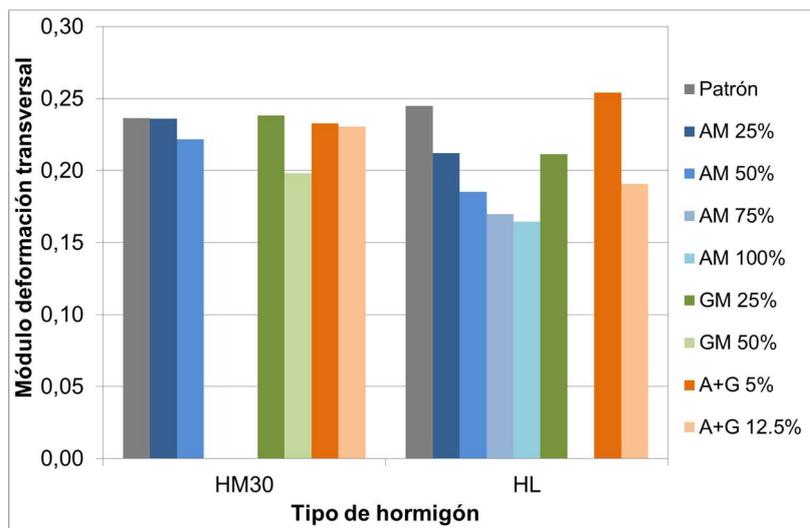


Figura 44. Módulo de deformación transversal.

5.7. Permeabilidad al agua

Los valores máximos de penetración de agua se muestran en la Tabla 14. Estos resultados indican que la permeabilidad del agua disminuye con el contenido de árido concha de mejillón, especialmente cuando se utiliza grava mejillón. En efecto, la penetración de agua en el hormigón patrón fue de 2,8 cm, mientras que es cero cuando se analiza el HM30-GM 50%. Por último, los hormigones con arena y gravilla de mejillón mostraron una permeabilidad al agua de tan sólo 1 cm.

Son varios los estudios que coinciden en la misma mejora en el comportamiento de permeabilidad al agua de hormigones con áridos de conchas marinas (14) (16) (17) (23). Esto se debe principalmente a la forma lajosa y alargada de las partículas de árido de mejillón, que tienden a una orientación horizontal preferencial actuando como una barrera a la penetración de agua, como ya se ha observado en la microestructura (5.1).

Tabla 14. Permeabilidad al agua.

Permeabilidad	HM30 patrón	HM30-AM 25%	HM30 -AM 50%	HM30-GM 25%	HM30-GM 50%	HM30-A+G 5%	HM30-A+G 12.5%
Penetración máxima (cm)	2.83	2.23	1.25	0.95	0.00	0.98	1.10

5.8. Pérdida de peso

El uso de arena de conchas de mejillón aumenta la pérdida de peso, incluso en porcentajes de sustitución pequeños (HM30 AM25%). Sin embargo, parece que el uso de gravilla de mejillón no afecta a esta propiedad, por lo que tanto el HM30 GM25% y el HM30 GM50% muestran pérdidas similares a los obtenidos con el hormigón patrón. Finalmente, el HM30 A+G 5% y el HM30 A+G

12.5% mostraron valores de pérdida de peso situados entre los dos grupos, siendo los valores del A+G 5% algo más bajos que los del A+G 12,5%.

Los resultados registrados en este estudio apoyan los recogidos por Kuo (28) que relaciona la retracción con la alta absorción de agua de los áridos de conchas marinas. Cuanto mayor es el contenido de AMF mayor es la pérdida de peso en el hormigón. Esto es debido al hecho de que el agua es retenida en los poros del hormigón con concha de mejillón que se evapora más lentamente con el tiempo, lo que aumenta la pérdida de peso más tarde, alcanzando mayores valores que en el hormigón patrón.

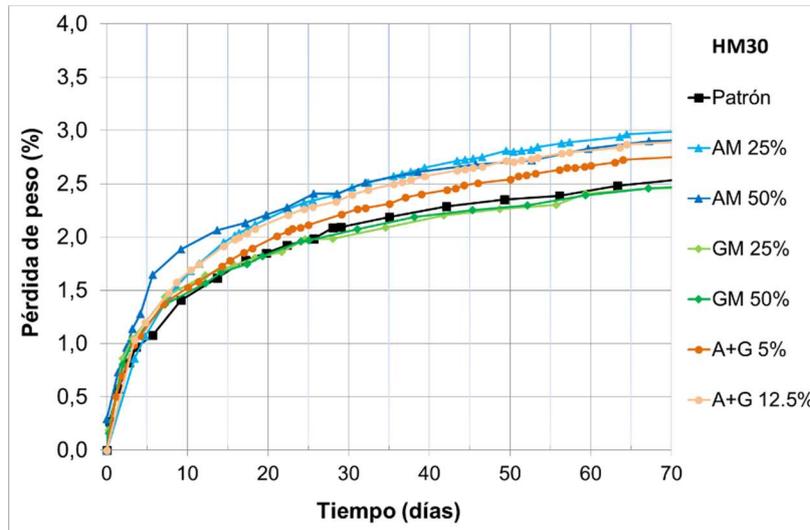
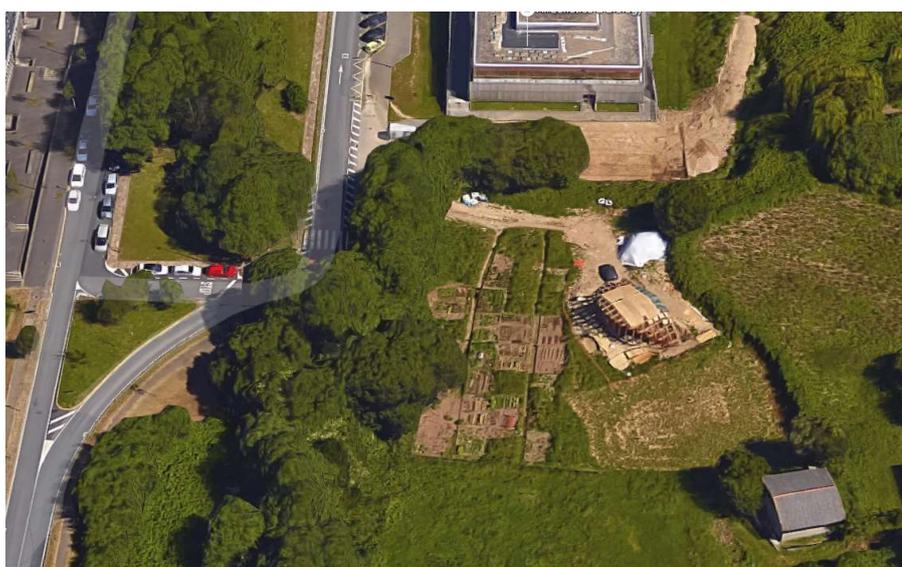


Figura 45. Porcentajes de la pérdida de peso de los distintos hormigones a lo largo del tiempo.

6

**Aplicación en edificio
experimental:
Módulo Biovalvo**





Morteros cal barro cemento mixtos fibras
 cáñamo **hormigón** en masa
 bioconstrucción áridos fino grueso filler
 calizo granítico cantera gravilla grava arena
 granulometría resistencia a compresión a
 flexión módulos **arcilla** elástico tracción
 conchas permeabilidad Galaicontrol
 capilaridad fratasado CDTI apomazado pulido
 campus Ferrol manos capas estructura
 reciproca forma **orgánica** cimentación
 zapata corrida pies derechos estructura
 investigación cola libre de **tablero OSB**
 formaldehído materiales naturales fibras
 mejillón ostra **biovalvo mejillón**
 consorcio de empresas Extraco financiación
 Innterconecta cubierta aislamiento
térmico acústico lámina impermeable
 epdm **bioclimática** orientación solar sur
 Obrabio Casadobe -oeste parcela huertas urbanas
gcons escuela de caminos canales y puertos
 grupo de dirección de proyectos A Coruña UDC
 Elviña mejillón **conchas**
 Serumano morteros áridos naturales

Obra **EDIFICIO EXPERIMENTAL – MÓDULO BIOVALVO**

Lugar **CAMPUS DE ELVIÑA S/N. - AYUNTAMIENTO DE A CORUÑA.**

Promotor **CONSORCIO Proyecto BIOVALVO (Extraco, Galiaccontrol, Serumano)**

Financiado por **CENTRO DESARROLLO TECNOLÓGICO INDUSTRIAL (CDTI)**

Proyecto y D.O. **CASADOBE ARQUITECTURA**

Constructora **OBRABIO SL**

Fecha **2014-2015**

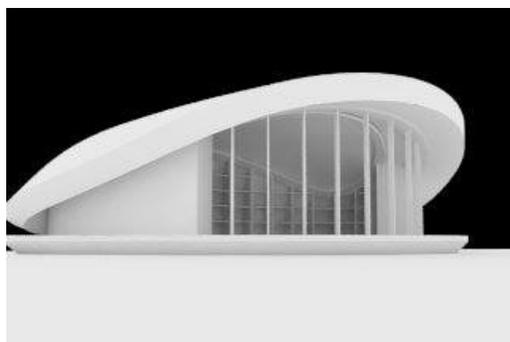
6. Aplicación en edificio experimental: Módulo Biovalvo

6.1. Introducción

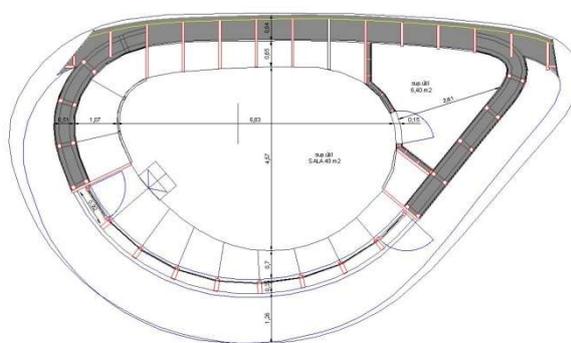
La construcción de un pequeño edificio experimental es uno de los objetivos principales del proyecto Biovalvo. De esta manera se quiso poner en práctica todos los materiales estudiados en laboratorio mediante un prototipo de aplicación in situ: Módulo Biovalvo. En el trabajo recogido por Jorge Eirín (60) se puede ver el seguimiento de obra de todo el edificio.

El módulo experimental Biovalvo se encuentra en una parcela anexa a las huertas urbanas universitarias en el Campus Elviña (UDC). El diseño del edificio se realizó para que la construcción tenga un consumo casi nulo de energía según el estándar Passivhaus, además se han aplicado criterios de bioconstrucción. Por lógica pareció que también el aspecto del módulo tenía que ser reflejo y emblema del proyecto, por lo que su forma se asemeja tanto en planta como en volumen a la concha de un mejillón.

En este edificio se diseñaron dos hormigones para formar parte de la cimentación y solera del mismo. Estos hormigones son monitorizados a lo largo del tiempo para valorar su idoneidad técnica. La cimentación del módulo la configura una zapata corrida, a donde se transmite la carga de la cubierta a través de los muros. La zapata corrida conforma el perímetro del edificio.



Vista 3D del módulo desde fachada sur. La forma se asemeja a un bivalvo abierto.



Planta del edificio experimental.

Figura 46. Diseño del Módulo Biovalvo.

6.2. Módulo. Hormigones

Los hormigones (de limpieza y en masa) usados en el módulo se fabricaron en central. El árido de mejillón fue su ministrado directamente a la central de hormigonado desde la empresa gestora¹ de este subproducto. Para la ejecución de los hormigones de la zapata corrida: hormigón de limpieza

¹ ABONOMAR, S.L. gestor autorizado por la Xunta de Galicia para el reciclaje de conchas marinas.

y hormigón en masa, se realizaron pruebas previas en laboratorio, debido a que los áridos utilizados varían con respecto a los caracterizados en los estudios anteriores.



Encofrado de zapata corrida



Vertido de hormigón de limpieza



Extendido y vibrado del hormigón de limpieza



Curado del hormigón de limpieza. Colocación de tubos para instalaciones.



Vertido y extendido del hormigón en masa de la zapata corrida.



Vibrado del hormigón en masa con áridos de mejillón.



Curado del hormigón. Inicio del desencofrado y movimiento de tierras perimetral.

Figura 47. Proceso constructivo de la cimentación del Módulo Biovalvo.

Los hormigones elegidos para ser utilizados en la cimentación fueron: HL A+G 12,5% y HM30 A+G 12,5%.

Para la fabricación de los hormigones de limpieza y masa estructural se empleó el mismo cemento que para los hormigones anteriores CEM II/A-M (V-L) 42.5R. Los áridos de mejillón utilizados fueron de una partida traída especialmente para la obra. Se sacaron las humedades de cada árido para el ajuste de humedad en la dosificación. El árido es granítico de una cantera procedente de Vigo, Pontevedra. Se suministraron los siguientes áridos:

- Arena granítica 0-5 mm
- Gravilla granítica 5-11 mm
- Grava granítica 11-22 mm

Previamente al ajuste de la dosificación se procedió a constatar que la granulometría del nuevo árido natural compone una curva similar al árido natural anteriormente empleado. Se cogen diferentes muestras de los áridos y se hace el ensayo granulométrico para conocer la curva del nuevo árido. Como se puede comprobar en la gráfica (Figura 48), no es necesario hacer una composición de la arena para hacer coincidir la curva de esta con la del anterior árido natural. El árido natural se utiliza tal cual como es suministrado.

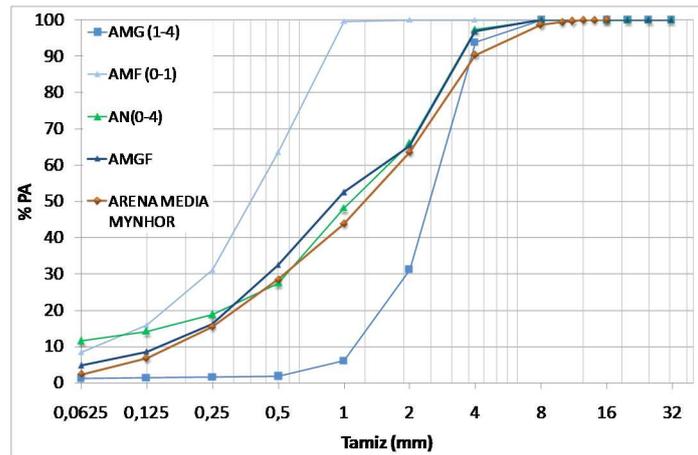


Figura 48. Granulometría de las arenas.

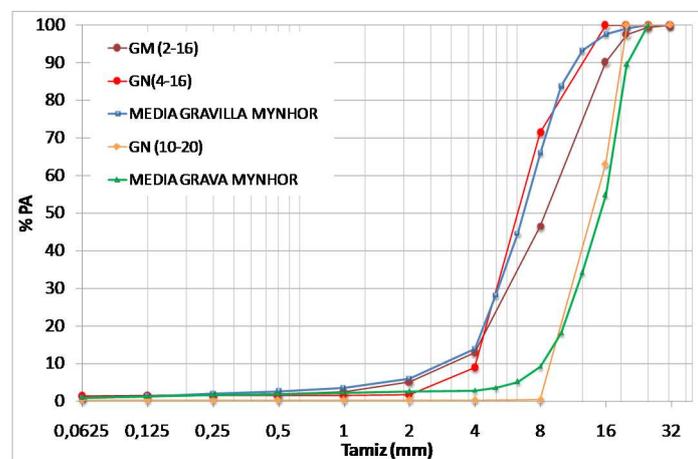


Figura 49. Granulometría de las gravillas y gravas.

El aditivo plastificante utilizado para la obra fue el de la casa BASF, tipo POZZOLITH 314N, un aditivo de nueva generación con el que la central de hormigonado tenía dilatada experiencia.

Para evitar la retracción se usaron fibras de polipropileno en todos los hormigones colocados en obra, con una dosificación de 0,60 kg/m³ en todos los casos.

El uso de áridos de diferentes características, así como el uso de un aditivo diferente, obligó a reajustar las dosificaciones.

Los hormigones diseñados para colocar en el módulo experimental fueron probados previamente en el laboratorio. Las dosificaciones de estos y los finalmente colocados tuvieron pequeñas variaciones de dosificación debido fundamentalmente a la humedad de los áridos llevados a la central de hormigonado. En la Figura 50 se muestran las diferentes dosificaciones de los hormigones (HL y HM30 A+G12,5%) realizados en los estudios iniciales con los áridos naturales calizos, y los hormigones, de limpieza (HL A+G12,5%) y en masa estructural (HM30 A+G12,5%),

tanto para los ensayos previos de laboratorio como para los ejecutados en central y colocados en obra con los áridos graníticos.

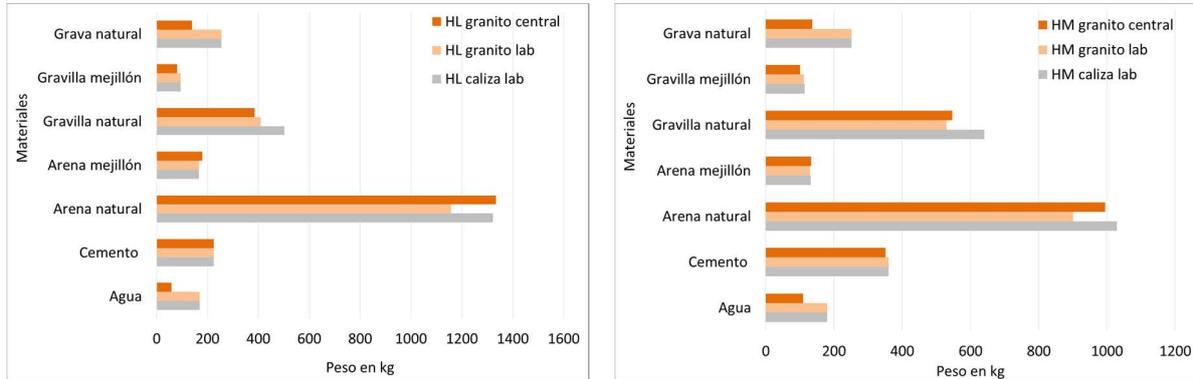


Figura 50. Dosificaciones (en peso con humedad).

6.3. Hormigones usados en la cimentación

De forma general se puede decir que el comportamiento de los hormigones utilizados en la cimentación del módulo experimental fue similar al estudiado en el laboratorio, tanto en los estudios previos usando áridos naturales calizos como en los que se usaron áridos graníticos. Se repiten las tendencias mostradas en los ensayos del estudio, pero con dispersiones en los valores alcanzados debido a los cambios en la dosificación. Además las humedades de los áridos de central no se pudieron medir con exactitud, lo que produjo un menoscabo de las resistencias a compresión de los hormigones fabricados por la central para obra, con respecto a los hormigones fabricados en laboratorio. Además de la tipología del árido, la diferencia en el contenido de humedad, se estima que también influyó en estos valores el volumen total ejecutado, ya que en laboratorio los ensayos se realizaron sobre amasadas de 50 y 65 litros para el de limpieza y en masa respectivamente, mientras que en obra se colocaron 2 m³ para el de limpieza y 9 m³ para el hormigón en masa. En cualquier caso, las propiedades de todos los hormigones fabricados en obra cumplen con los requerimientos de proyecto.

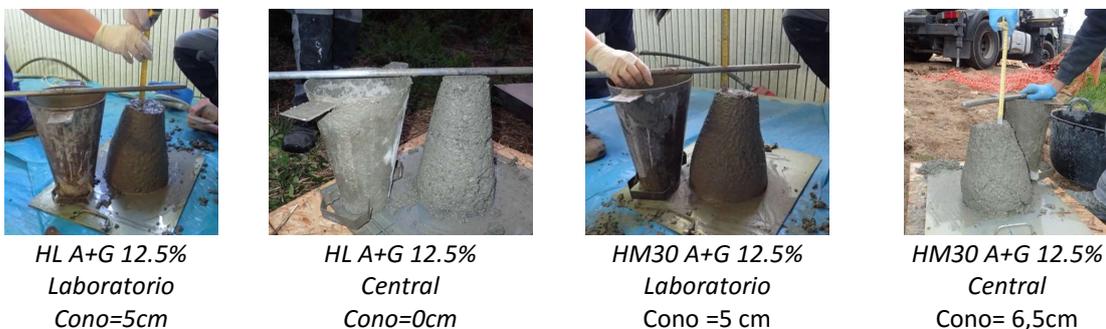


Figura 51. Consistencia de los hormigones elaborados en laboratorio y en Central, para el módulo Biovalvo.

En cuanto a la consistencia de los hormigones, la diferencia más notoria se observa en los hormigones en masa, dando valores de asiento bajos en las dosificaciones con áridos graníticos. Las densidades tanto en fresco como en endurecido muestran valores similares para todas las dosificaciones. En cambio los valores de absorción muestran un aumento de la misma para ambos hormigones preparados en central, siendo las dosificaciones de laboratorio más homogéneas en este punto.

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión muestran claramente valores más bajos en las probetas con áridos graníticos. Se evidencia así que los cambios de dosificación para los áridos graníticos con respecto a los calizos sufren caídas de resistencia, manteniéndose unos valores aproximados de los graníticos tanto en laboratorio como en central, en ambos hormigones. Estas diferencias radican fundamentalmente en el poco control de la humedad de los áridos que se tuvo para realizar la dosificación de central, y las características de los áridos graníticos con respecto a los calizos.

Tabla 15. Propiedades de los hormigones elaborados en laboratorio y en Central, para el módulo Biovalvo.

	HL A+G12,5% árido calizo	HL A+G12,5% granito lab.	HL A+G12,5% granito central	HM30 A+G12,5% árido calizo	HM30 A+G12,5% granito lab.	HM30 A+G12,5% granito central
Asiento (cm)	7	5	0	22	5	6,5
Densidad fresco (g/cm ³)	2,18	2,08	2,21	2,24	2,27	2,20
Densidad end. (g/cm ³)	2,14	2,28	2,28	2,22	2,29	2,25
Absorción (%)	6,7	6,33	8,09	6,7	7,05	8,23
R. Compresión 28d (MPa)	19,24	11,72	12,98	32,86	24,98	23,94
R. Tracción 28d (MPa)	1,70	1,25	1,43	2,40	2,10	2,76

7

Conclusiones y futuras líneas



7. Conclusiones y futuras líneas

En este proyecto se ha estudiado el uso de la concha de mejillón como árido fino y grueso para la fabricación de hormigones. Se diseñaron un hormigón de limpieza (HL) y un hormigón en masa estructural (HM30). Los áridos convencionales fueron sustituidos parcialmente por conchas de mejillón. Inicialmente, cada fracción (fina o gruesa) fue sustituida por separado utilizando cuatro porcentajes de sustitución (25%, 50%, 75% y 100%). Por último, se eligieron dos porcentajes inferiores (5% y el 12,5%) para sustituir tanto las fracciones fina y gruesa conjuntamente. Se determinaron las principales propiedades de los áridos de concha de mejillón y se caracterizaron todos los hormigones (un total de 19 combinaciones diferentes). De esta manera se puede concluir en lo siguiente:

- Las conchas de mejillón tienen una composición de CaCO_3 calcita con una menor cantidad de aragonita, trazas de vaterita, diferentes proteínas de la matriz y quitina, que se encuentran embebidas en tres capas diferentes. La capa externa es la periostraco, que se compone principalmente de una proteína llamada conchiolina (conchin). La capa intermedia se compone de prismas de calcita paralelos entre sí, y la capa interior, conocida como nácar, se compone de aragonita laminar cuya estructura se asemeja a la del ladrillo y mortero. Por otra parte, el nácar concha de mejillón es también alta en la quitina.
- El tratamiento térmico (135 °C 32') de las conchas garantiza una segura manipulación ya que elimina todas las bacterias e implica un bajo consumo de energía. Con este tratamiento, los resultados de lixiviación conducen a la clasificación de la concha entera como un material inerte, y todas las fracciones trituradas como material no peligroso (debido al cloruro y el contenido de sulfato).
- Las principales características de la concha de mejillón que afectan a las propiedades del hormigón cuando se utilizan como áridos son, su forma plana y lajosa y especialmente la presencia de materia orgánica, no sólo la medida según UNE 103 204: 93, sino también debido a la presencia de polímeros orgánicos tales como la quitina en su composición molecular.
- La forma plana y lajosa de la concha de mejillón conduce a un aumento en la demanda de agua, lo que resulta en una disminución de los valores del asiento, es decir, aumenta la consistencia de la mezcla de hormigón. La forma lajosa también afecta a la adherencia pasta-árido debido al hecho de que el agua de exudación interna es atrapada debajo de partículas de la concha, aumentando la porosidad y disminuyendo de las propiedades

mecánicas de hormigón (resistencias y módulos elásticos). Finalmente, se ha visto que las partículas planas adoptan una orientación horizontal que actúa como una barrera a la penetración del agua, reduciendo así la capacidad de absorción de agua del hormigón y la permeabilidad al agua, especialmente cuando se utiliza gravilla de mejillón.

- La presencia de sustancias orgánicas (materia orgánica y también polímeros orgánicos) conduce a una disminución en la adherencia pasta-árido (disminuyendo las propiedades mecánicas), un aumento de la porosidad, y afecta el proceso de hidratación. También retarda el fraguado y aumenta la viscosidad de la pasta, lo que conduce a un aumento en la consistencia de la mezcla. Por lo tanto, la fluidez se ve afectada negativamente. Estos efectos son mayores cuando se usan fracciones finas (arena) que en fracciones gruesas (gravilla) debido a la alta superficie específica de las partículas de la arena.

De forma que, se puede afirmar que las conchas de mejillón procesadas térmicamente a 135°C durante 30 minutos se pueden utilizar como áridos para el hormigón en masa. Los porcentajes de sustitución de hasta 25% de los áridos naturales por árido de concha de mejillón (arena o gravilla) y hasta 12,5% (ambos de arena y gravilla juntas) son adecuados para el hormigón estructural y hormigón de limpieza.

En cuanto a las futuras líneas se puede afirmar, que la prefabricación es la dirección que está tomando en la actualidad el uso de los diferentes materiales construcción, facilitando la ejecución, disminuyendo el espacio de acopio y los tiempos de obra. Por tanto la proyección que se plantea para el uso del árido de mejillón en hormigones o pastas se dirige hacia los elementos prefabricados.

Se marca un camino interesante en la aplicación de hormigones o morteros predosificados, en los que la adaptación de los tratamientos de las conchas suponga menor impacto ambiental, y también se puedan adaptar las granulometrías para las diferentes dosificaciones según el uso. Además de predosificados, se estima que las venideras líneas de trabajo podrían estar en la incorporación de los áridos de mejillón en elementos prefabricados tales como ladrillos, bloques, tableros, paneles o elementos de protección de cubiertas o cierre, e incluso en elementos para el diseño interior. Es importante además, de cara a continuar las reducciones de los consumos de CO₂ y la contaminación ambiental en la construcción, iniciar investigaciones hacia predosificados o elementos prefabricados utilizando pastas en las que el ligante pueda ser de origen natural como la cal aérea, la cal hidráulica, y la arcilla.

8

Bibliografía



8. Bibliografía

1. REGULATION (EC) No 1069/2009 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. 21 October 2009. Laying down health rules as regards animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing Regulation (EC) No 1774/2002 (Animal by-products Regulation).
2. Heinonen, Kari. *Monterey Bay Aquarium, Seafood Watch*. Monterey : Farmed Mussels, 2014.
3. Figueiras, F.G., Labarta, U., Fernández-Reiriz, M.J. *Coastal upwelling, primary production and mussel growth in the Rías Baixas of Galicia*. s.l. : Hydrobiología 484, 2002. págs. 121-131.
4. Labarta, U., Fernández-Reiriz, M.J., Pérez-Camacho, A., Pérez-Corbacho, E. *Bateiros. mar, mejillón. Una Perspectiva Bioeconómica (Serie Estudios Sectoriales)*. s.l. : Fundación Caixa Galicia, 2004.
5. Yoon Gil-Lim, Kim Byung-Tak. *Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell*. Ansan City, South Korea : Elsevier,, 2003.
6. *Structural and Textural of Marine Mollusc Shell*. Siriprom, W., y otros. Thailand : Trans Tech publications, Switzerland, 2012, Advanced Materials Research, Vol. 506, págs. 363-366.
7. (ITeC), Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. *Guía General de Buenas Prácticas Ambientales para el Jefe de Obra*. s.l. : ITeC, 2006.
8. Ecología y Desarrollo. <http://ecodes.org/> - Impactos ambientales. <http://ecodes.org/archivo/proyectos/archivo-ecodes/pages/areas/vivienda/impacto.html>. [En línea]
9. Falade, F. *An Investigation of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete*. Great Britain : Elsevier Science, Building and Environment, 1995. págs. 573-577.
10. Adegoke, A.P. Adewuyi & T. *Exploratory study of periwinkles shells as coarse aggregates in concrete works*. Hitachi, Japan & Ogbomoso, Nigeria : Asian Research Publishing Network, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008. pág. 6. Vol. 3.

11. Osarenmwinda, J.O. Awaro & A.O. *The potential use of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete*. Benin City, Nigeria : Trans Tech Publications, Advanced Materials Research, 2009. págs. 39-43.
12. I.A.Olufemi, H. Manasseh. *Suitability of periwinkle shell as partial replacement for river gravel in concrete*. Makurdi Benue State, Nigeria : Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2009. págs. 59-66.
13. *Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers*. D.H. Nguyen, Mohamed Boutouil, Nassim sebaibi, Lydia Leleyter, Fabienne Baraud. 49, Epron, France : Elsevier, 2013, Construction and Building Materials, págs. 151-160.
14. Yang Eun-IK, Yi Seong-Tae, Leem Young-Moon. *Effect of oyster shell substituted form fine aggregate on concrete characteristics: Part1.Fundamental properties*. South Korea : Elsevier, Cement and Concrete Research, 2005. págs. 2175-2182. Vol. 35.
15. Kelley, Kristy Noel. *Use of recycled oyster shells as aggregate for pervious concrete*. Florida, EEUU : University of Florida, 2009. Master Thesis.
16. Yang Eun-Ik, Kim Myung-Yu, Park Hae-Geun, Yi Seong-Tae. *Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete*. South Korea : Elsevier, Construction and Building Materials, 2010. págs. 758-765.
17. *Sea shells used as partial aggregate replacement in concrete*. Richardson, A.E. y Fuller, T. Newcastle upon Tyne, UK : Emerald Insight, 2013, Stuctural Survey, págs. 347-354.
18. *Cockle shell as an alternative construction material for artificial reef*. Sahari, Faridah and Aniza Mijan, Nurul. Sarawak, Malaysia : s.n., 2011.
19. K. Sabri, Muthusamy & N.A. *Cockle Shell: A potencial partial coarse aggregate replacement in concrete*. Pahang, Malaysia : International Journal of Science, Environment and Technology, 2012. págs. 260-267. Vol. 1.
20. Sugiyama, M. *The compressive strength of concrete containing tile chips, chrushed scallop chells, or crushed roofing tiles*. Japan : Hokkai Gakuen University, 2004, págs. 165-172.
21. Barnaby, Claire. *Industy, An investigation into the reuse of organic waste produced by the New Zealand Mussel*. Auckand, New Zealand : Master of Applied Science, Auckand University of Technology, 2004.

22. *Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells*. Héctor Cuadrado-Rica, Nassim Sebaibi, Mohamed Boutouil, Bertrand Boudart. Cherbourg-Octeville, France : RILEM, 2015, Materials and Structures. DOI 10.1617/s11527-015-0613-7.
23. *Cockle shell ash replacement for cement and filler in concrete*. Hazurina Othman, Nor, y otros. Malaysia : Universiti Teknologi Malaysia, 2013, Masaysian Journal of Civil EGINEERING, págs. 201-211.
24. Nguyen, Dang Hang, y otros. *The use of seahsell by-products in pervious concrete pavers*. Caen, France : International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 2013. Vol. 7. 11.
25. *Oyster shell as substitute for aggregate in mortar*. Yoon, Hyunsuk, y otros. Seoul, Korea : s.n., 2004, International Solid Waste Assosiation, págs. 158-170.
26. *Structure and property characterization of oyster shell cementing material*. Zhong, Bin-Yang, y otros. Fujian, China : National Natural Science Foundation of China, 2012, Chinese Journal Structural Chemicals, Vol. 31, págs. 85-92.
27. *Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar*. Wang, Her-Yung, y otros. Taiwan : Elsevier, 2013, págs. 5352-537.
28. *Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells*. Wen-Ten Kuo, Her-Yung Wang, Chun-Ya Shu, De-Sin Su. Taiwan, China : Elsevier, 2013, Construction and Building Materials, pp. 128-133.
29. *The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar*. Safi. Argelia : s.n., 2015.
30. Rodríguez Álvaro, Roberto y Seara Paz, Sindy. *Morteros para revestimiento con árido procedente de concha de mejillón*. A Coruña : Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, 2014.
31. *Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars*. Ballester. Spain : s.n., 2007.
32. *Utilization of greound waste seashells in cement mortars for masonry and plastering*. Lertwattananuruk, Pusit, Makul, Natt y Siripattararavat, Chalothom. 2012, Journal of Environmental Management, págs. 133-141.
33. *Feasibility of using sea shells ash as admixtures for concrete*. Etuk, B., Etuk, I. y Asuquo. Nigeria : s.n., 2012, Journal of Environmental Science and Engineering.

34. *Properties of cement-based bricks with oyster shells ash*. Gengying, Xiaoyang y Chen. Hong Kong, China : s.n., 2015, Journal of Cleaner Production.
35. *Prediction early age compressive strength of OPC-based geopolymers with different alkali activators and seashells powder by gene expression programming*. Nazari y Safarnejad. Iran : s.n., 2012, Ceramics International.
36. *Feasibility of pulverized oyster shell as a cementing material*. Liang y Wang. Taiwan, China : s.n., 2013, Advances in Materials Science and Engineering.
37. *Estimating unconfined compressive strenght of cockle shell-cement-sand mixtures using soft computing methodologies*. Motamedi. Malasia : s.n., 2015, Engineering Structures.
38. *Provingsrapport: Muslingeskaller nr.1,2, 3*. Teknologisk Institut. Taastrup : (Rapport nr. 01001, 01002, 01003), 2001.
39. *Laboratorieforsog: Kapillar stighojde (hc)*. Geoteknisk Institut. Lyngby : forsog, 2001.
40. Munch-Andersen, Jorgen y Moller Andersen, Birte. *Halmhuse, udformning og materialeegenskaber*. Horsholm : SBI forlag, By og Byg Resultater, 2004. no. 033.
41. Aagaard, Peter y Moller, Soren. *Muslingeskaller som byggemateriale - en vejledning*. s.l. : Ingeniorhojskolen i Aarhus, 2007.
42. Fredso Logistik. <http://www.fredsoelogistik.dk/vi-udforer/muslingeskaller>. [En línea] 26 de julio de 2016.
43. *Mezclas de zahorras naturales y concha de mejillón para firmes de vías forestales*. Carnero López, Matías, y otros. Badajoz : s.n., 8-10 julio de 2009. XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos .
44. *Heavy metal retention in copper mine soil treted with mussel shells: Batch and column experiments*. Ramírez-Pérez y Paradelo. Lugo, Spain : s.n., 2013, Journal of Hazardous Materials.
45. *Effects of mussel shell addition on the chemical and biological properties of a Cambisol*. Paz-Ferreiro y Baez-Bernal. Spain : s.n., 2012, Chemosphere.
46. *Effects of oyster shell on soil chemical and biological properties and cabbage productivity as a liming materials*. Lee, Chang-Hoon. Republic of Korea : s.n., 2008, Waste Management.
47. *Effect of bitumen emulsion and sea shell powder in the unconfined compressive strenght of black cotton soil*. Jayaganes. India : s.n., 2012, International Journal of Engineering.

48. *The use of solid residues derived from different industrial activities to obtain calcium silicates for use as insulating construction materials.* Felipe Sesé, M., Eliche Quesada, D. y Corpas Iglesias, F. s.l. : Ceram Int., 2011. págs. 3019-3028.
49. *Shell microstructures of mussels (Bivalvia Mytilidae Bathymodiolinae) from deep-sea chemosynthetic sites: Do they have a phylogenetic significance?* Génio L., Cunha MR., Grahame J. Little CTS. 2014, Deep Sea Res Part I Oceanogr Res , págs. 86-103.
50. *Exploring aberrant bivalve shell ultrastructure and geochemistry as proxies for past sea water acidification.* Hahn, S. et al. 2014, Sedimentology, Vol. 61, págs. 1625-1658.
51. *Marine bivalve shell geochemistry and ultrastructure from modern low pH environments: environmental effect versus experimental bias. .* Hahn, S. et al. 2011, Biogeoscience, págs. 1897-1914.
52. *Reuse of waste shells as a SO₂/NO_X removal sorbent.* Jung, J., y otros. s.l. : In Tech, 2007, Material Recycling- Trends and Perspectives. , págs. 301-322.
53. *Cristalization of calcium carbonate salts beta-chitin scaffold.* Fallini, G, Fermani, S y Ripamonti, A. s.l. : J. Inorg Biochem, 2002.
54. *Structural characterization of phosphorylated chitosan and their applications as efective additives of calcium phosphate cements.* Wang, X, y otros. s.l. : Biomaterials, 2001, págs. 2247-2255.
55. *Effect of the addition of chitosan ethers on the fresh state properties of cement mortars.* Lasheras Zubiate, M., y otros. 2012, Cement Concrete Composition, Vol. 34, págs. 964-973.
56. *Mechanisms of air entrainment in concrete.* Du, L. y Folliard, K.J. 2005, Cement and Concrete Research, págs. 1463-1471.
57. *The organic matrix of the oyster shell.* Simkiss, K. 1965, Comparative Biochemistry an Physiology, págs. 427-435.
58. *Insights into the composition, morphology and formation of the calcareous shell of the serpulid Hydroides dianthus.* Tanur, A.E. 2010, Journal of Structural Biology, págs. 145-160.
59. *Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate.* Belén González-Fonteboa, Fernando Martínez-Abella, Manuel F.Herrador, Sindy Seara-Paz. A Coruña, Spain : Elsevier, 2012, Construction and Building Materials, págs. 111-116.

60. Eirín Magariños, Jorge Narciso, Seara Paz, Sindy y Pérez Ordóñez, Juan Luis. *Control de ejecución de un módulo experimental empleando material procedente de concha de mejillón*. A Coruña : Universidade da Coruña - Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, 2015.
61. *Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering*. Pusit Lertwattanakul, Natt Makul, Chalothorn Siripattarapivat. Thailand : s.n., 2012, Journal of Environmental Management, Vol. 111, págs. 133-141.
62. *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.
63. *Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell*. Gil-Lim Yoon, Byung-Tak Kim, Baek-Oon Kim, Sang-Hun Han. Korea : s.n., 2003, Waste Management, Vol. 23, págs. 825-834.
64. *The use of solid residues derived from different industrial activities to obtain calcium silicates for use as insulating construction materials*. Felipe-Sesé. Jaén, Spain : s.n., 2011, Ceramics International.

9

Anexo: Publicaciones



9. Anexo: publicaciones

Este trabajo dio lugar a dos comunicaciones a congresos internacionales. Una de las comunicaciones fue seleccionada para ser publicada en una revista científica (actualmente en estado de revisión).

Comunicaciones:

- EFFECTS OF SEASHELL AGGREGATES IN CONCRETE PROPERTIES. González-Fonteboa, Belén; Carro-López, Diego; Martínez-Abella, Fernando; Martínez-García, Carolina; Seara-Paz, Sindy. 1st International Conference of Bio-based Building Materials (ICBBM 2015), Clermont-Ferrand (France), 22-24 June 2015.
- HORMIGONES DE LIMPIEZA Y EN MASA CON ÁRIDOS PROCEDENTES DE CONCHA DE BIVALVO, CONPAT 2015. González-Fonteboa, Belén; Carro-López, Diego; Martínez-Abella, Fernando; Martínez-García, Carolina; Seara-Paz, Sindy. Lisboa (Portugal), 8 - 10 Septiembre 2015.

Publicación científica:

- PERFORMANCE OF MUSSEL SHELL AS AGGREGATE IN PLAIN CONCRETE. Martínez-García, Carolina; González-Fonteboa, Belén; Martínez-Abella, Fernando; Carro-López, Diego, A Coruña, España. Construction and Building Materials, Elsevier, 2016.

10. Contenido del CD

MartinezGarcia_Carolina_TFG_2016_01de2.pdf

MartinezGarcia_Carolina_TFG_2016_Anexo_02de2.pdf