

SUSTAINABILITY ASSESSMENT OF CONCRETE, MORTARS AND HOT BITUMINOUS MIXTURES WITH REPLACEMENT OF CONVENTIONAL AGGREGATE BY MUSSEL SHELL

Bordello Malde, Lucía; De la Cruz López, M. Pilar; Del Caño Gochi, Alfredo; Cartelle Barros, Juan José
Universidade da Coruña

There are various bivalve-canning-producing countries generating large amounts of waste shell, and experimenting important environmental problems. Spain is one of them. Particularly, Galicia (NW Spain) is among the regions with the biggest production in the world. Bearing in mind the amount of generated waste, the essential problem in Galicia is the mussel shell. A potential solution is the valorization of the shell, turning the waste into a by-product that could be used as construction material. This paper presents five deterministic, MIVES-based models for assessing sustainability of five bound applications based in the total or partial replacement of conventional aggregate by mussel shell: structural mass concrete; cement, lime and mud mortars; and hot bituminous mixtures. Those models include the usual environmental, social, and economic fields. The results will help in the sustainable design of a wide variety of constructions.

Keywords: Sustainability; MIVES; Mussel shell; Structural mass concrete; Mortars; Hot bituminous mixtures.

EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE HORMIGONES, MORTEROS Y MEZCLAS BITUMINOSAS CON SUSTITUCIÓN DE ÁRIDO CONVENCIONAL POR CONCHA DE MEJILLÓN

Existen diversos países productores de conservas de bivalvos que generan grandes cantidades de residuo de concha, originando importantes problemas medioambientales. España es uno de ellos. En particular, Galicia está entre las regiones de mayor producción mundial y, teniendo en cuenta el volumen de residuo generado, el problema esencial en Galicia es la concha de mejillón. Una posible solución es valorizar la concha, transformando el residuo en un subproducto que pueda ser utilizado como material de construcción. En esta comunicación se presentan cinco modelos deterministas, basados en el método MIVES, para realizar evaluaciones de la sostenibilidad integral de cinco productos ligados, basados en la sustitución parcial o total del árido convencional por concha de mejillón: hormigones estructurales en masa, morteros de cemento, cal y barro, y mezclas bituminosas en caliente. Dichos modelos incluyen los habituales ámbitos medioambiental, social y económico de la sostenibilidad. Los resultados son de utilidad para el diseño sostenible de construcciones de muy diverso tipo.

Palabras clave: Sostenibilidad; MIVES; Concha de mejillón; Hormigón estructural en masa; Morteros; Mezclas bituminosas en caliente.

Correspondencia: M. Pilar de la Cruz López - pcruz@udc.es; Alfredo del Caño Gochi - alfredo@udc.es

Agradecimientos: Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto "Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción" (Cód. 00064742 / ITC-20133094), financiado por el CDTI dentro del programa FEDER Innterconecta, con la co-financiación de fondos europeos FEDER. Los autores agradecen sinceramente el apoyo de los profesores del Grupo de Construcción (GCons) de la Universidade da Coruña y de los profesionales de las empresas Extraco, Serumano y Galaicontrol. This work has been developed within the framework of the project "Valorización de las conchas de bivalvos gallegos en el ámbito de la construcción" (Valorization of Galician bivalve shell in the construction sector; Code 00064742 / ITC-20133094), funded by CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial) under the FEDER-Innterconecta Program, and co-financed with European Union ERDF funds. We wish to express our most sincere thanks to the professors of the Construction Group of the University of A Coruña (GCons) and the professionals of the firms Extraco, Serumano and Galaicontrol.

1. Introducción y Objetivos.

La industria conservera genera, en países como España, Chile o Corea del Sur, cantidades ingentes de conchas de bivalvo que son enviadas mayoritariamente a vertedero, generando un gran impacto ambiental. Además de la fertilización de suelos o la alimentación de determinados animales, una posible solución es su conversión en subproducto, mediante tratamiento térmico y triturado o molienda, para poder ser utilizado como árido en el sector de la construcción.

Existen bastantes estudios acerca de las posibles aplicaciones de materiales de desecho de este tipo, en el sector de la construcción. Casi todas ellas son ligadas, con el concurso de un conglomerante o ligante que, a su vez, casi siempre es el cemento. Así, por ejemplo, un número considerable de autores han estudiado las propiedades de hormigones y morteros de cemento, tanto en fresco como tras el endurecimiento, con sustituciones parciales de áridos de concha de ostra, bigaro y berberecho (Falade 1995, Yang y Leem 2005, Osarenwindá y Olusola 2006, Ballester et al. 2007, Yang et al. 2010, Muthusamy y Sabri 2012, Eo y Yi 2015, entre otros). Los resultados suelen ser siempre suficientemente buenos como para pensar que estos sub-productos deberían dejar de enviarse a vertedero, en términos absolutos. Con respecto al mejillón, más lajoso y teóricamente menos adecuado para este tipo de usos, los estudios realizados han ido más por el camino de la calcinación, para obtener carbonato de calcio que se puede usar, entre otras cosas, como filler (Barros et al. 2009). A su vez, en Galicia se ha usado el análisis de ciclo de vida para estudiar la sostenibilidad ambiental de dicha valorización (Iribarren 2010, Iribarren et al. 2010). No obstante, más recientemente, Carro et al. (2105) y González et al. (2015) han trabajado en la línea que aquí se analiza de empleo de áridos de concha de mejillón con tratamientos térmicos cortos y de baja temperatura, meramente orientados a eliminar la materia orgánica, que suponen un impacto medioambiental mucho menor que la calcinación, a gran distancia. Finalmente, apenas se han encontrado estudios relativos al uso de conchas de bivalvo como filler en las mezclas bituminosas en caliente (Arabani, Babamohammadi & Azarhoosh, 2015).

En todo caso, los estudios de valorización de conchas de bivalvo están esencialmente orientados al estudio de las propiedades mecánicas y químicas de los materiales a los que se incorpora. No existe investigación suficiente sobre el comportamiento de estos materiales con respecto a su sostenibilidad global, teniendo en cuenta no sólo los aspectos medioambientales, sino también los sociales y económicos (United Nations 1987, 1992).

Esta comunicación establece un análisis comparativo del nivel de sostenibilidad de diversas aplicaciones ligadas de áridos de concha de mejillón tratada: hormigones estructurales para su uso en masa, morteros de cemento, morteros de barro, morteros de cal y mezclas bituminosas en caliente. Se denominan ligadas porque se trata de aplicaciones en la cuales el material se mezcla con ligantes o conglomerantes (por contraposición a su uso sin dichos materiales, por ejemplo como capa de aislante térmico en la cual sólo hay un determinado material). La comparación se realiza, en todos los casos, entre el material convencional y otro en el cual el árido natural convencional se ve sustituido parcialmente por árido de concha de mejillón.

2. Metodología Empleada. Método MIVES con Análisis de Ciclo de Vida.

La metodología empleada se basa en el método MIVES (Modelo Integrado de Valor para una Evaluación Sostenible). Éste es una combinación de técnicas basadas en árboles de requerimientos (Figura 1), funciones de valor, y el Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process*: AHP), que se usa opcionalmente como ayuda para establecer los pesos

de los diferentes parámetros del modelo de evaluación de la sostenibilidad. Las funciones de valor permiten transformar a una misma unidad variables expresadas en diferentes unidades y escalas, para poder operar con ellas. Esa unidad adimensional se denomina valor o índice de satisfacción. Para las funciones de valor continuas se ha usado la Ecuación (1):

$$V_i = \frac{1 - e^{-m_i \left(\frac{P_i - P_{i,\min}}{n_i} \right)^{A_i}}}{1 - e^{-m_i \left(\frac{P_{i,\max} - P_{i,\min}}{n_i} \right)^{A_i}}} \quad (1)$$

Figura 1: Árbol de requerimientos para hormigones y morteros de cemento

REQ.	CRITERIOS	RIESGOS	INDICADORES			
AMBIENTAL (R1)	Uso de recursos (C1)	18,1%	Consumo de Recursos (K1)	40%	Consumo de agua (I1)	23,9%
				Consumo de áridos (I2)	40,3%	
			Consumo energético (K2)	60%	Consumo de aditivo (I3)	15,3%
				Consumo de cemento (I4)	20,5%	
	Vertidos(C2)	12,5%	Eutrofización (K3)	66,7%	Total Energía (I5)	33,3%
			Acidificación (K4)	33,3%	% Energía Renovable (I6)	66,7%
	Emisiones(C3)	36,3%	Calentamiento global (K5)	40%	Emisiones equivalentes de PO ₄ ²⁻ (I7)	100%
			Niebla de verano (K6)	16%	Emisiones eq. de SO ₂ (I8)	100%
			Reducción capa ozono (K7)	24%	Emisiones eq. de CO ₂ (I9)	100%
			Contaminación Acústica (K8)	12%	Emisiones eq. De C ₂ H ₄ (I10)	100%
			Olor (K9)	8%	Reducción capa ozono Pt (I11)	100%
	Ecosistemas (C4)	17,7%	Alteración de hábitats (K11)	100%	Emisiones sonoras (I12)	100%
	Gestión ambiental (C5)	1,8%	Certificaciones de las empresas productoras (K12)	100%	Olor (I13)	100%
	Uso del suelo (C6)	4,5%	Uso del suelo (K13)	100%	Alteración de hábitats (I14)	100%
Residuos (C7)	9,1%	Generación de RSU (K14)	65%	Certificaciones ISO9000, ISO14000, EMAS (I15)	100%	
		Consumo de residuos (K15)	35%	Superficie afectada (I16)	100%	
ECON. (R2)	Costes (C8)	80%	Costes directos (K16)	100%	Cantidad generada de RSU (I17)	100%
	Distribución de valor (C9)	20%	Influencia de industrias de aporte (K17)	100%	Uso de materiales reciclados (I18)	100%
SOCIAL (R3)	Empleo y trabajadores (C10)	59%	Desempleo (K18)	59%	Precio de venta (I19)	100%
				Calidad del empleo (K19)	15%	Reducción en costes de producción de las conservas (I20)
			Siniestralidad (K20)	30%	Generación de empleo (I21)	70%
				Formación (K21)	5%	Fomento de la inclusión laboral de la mujer (I22)
			Ciudadanos (C11)	4%	Información e interés (K22)	30%
	Aceptación social del producto (K23)	70%				Nivel salarial (I24)
	Ausencia de legislación (K24)	70%			Medidas voluntarias de SyS adicionales a las reglamentarias (I25)	20%
	Legislación y normativa (C12)	4%	Innovación (K25)	100%	Accidentes laborales (I26)	80%
	Innovación (C13)	14%	Riqueza Local (K26)	100%	Formación de los trabajadores (I27)	100%
	Local (C14)	19%			Elaboración de página web pública de información sobre la obra (I28)	30%
				Declaración de la obra como de interés general por la Administración (I29)	70%	
				Aceptación social del producto (I30)	100%	
				Leyes, RD, Reglamentos, normas sobre productos (I31)	100%	
				Aplicación de resultados de proyectos de I+D+i (I32)	100%	
				Uso de productos locales (I33)	100%	

En dicha fórmula P_i es el valor que toma el indicador i para la alternativa de diseño bajo estudio. $P_{i,\min}$ y $P_{i,\max}$ son los valores mínimo y máximo que puede tomar P_i , asociados a índices de satisfacción mínimo y máximo (0 y 1). A_i , n_i , y m_i son parámetros cuya variación sirve para generar funciones de valor con diferentes geometrías (lineal, cóncava, convexa o en forma de S) que, a su vez, permiten considerar no linealidades en la evaluación. Esto permite establecer un mayor o menor nivel de exigencia para cada indicador. Finalmente, V_i es el valor o índice de satisfacción asociado a V_i , que toma valores entre 0 y 1. Las funciones de valor de las variables discretas tienen forma escalonada.

Por otro lado, el Índice de Sostenibilidad global se estima mediante la suma ponderada de los índices de satisfacción correspondientes a los diferentes indicadores, realizada de derecha a izquierda en base al árbol de requerimientos (Figura 1).

Aquí el método MIVES se combina con el de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) ambiental, económico y social, para generar los valores de entrada que toman los diferentes indicadores de los modelos aquí presentados (Figura 1).

El lector puede encontrar más detalle sobre el método MIVES en Gómez et al. (2012, en español), y sobre dicho método y su combinación con el ACV en de la Cruz et al. (2015, en inglés).

3. Modelos de Evaluación de la Sostenibilidad.

3.1. Introducción. Límites del Análisis de Ciclo de Vida.

Se han construido un total de cinco modelos de evaluación, con algunas partes en común, como se explicará más adelante. Todos ellos abarcan los tres pilares básicos de la sostenibilidad: el ambiental, el económico y el social. Se trata de modelos completos, en el sentido de que no solamente sirven para el propósito de las comparaciones que aquí se hacen, sino que también incluyen indicadores cuyo valor es el mismo para los dos productos comparados: el convencional y el basado en concha de mejillón. Con ello, a cambio de un mayor trabajo para generar los modelos, éstos son más útiles y versátiles, sirviendo para comparar otros productos en los cuales no se dé la situación que se acaba de aludir, de igualdad de valores para algunos parámetros. La ventaja es, por tanto, que con estos modelos se puede evaluar la sostenibilidad de cualquier solución constructiva ligada de un determinado tipo, haciendo pequeños cambios en el modelo. De hecho, todos los modelos realizados se basan en el primero que se realizó, concebido para comparar alternativas de hormigones estructurales.

Debe hacerse notar que la referida "completitud" no implica exhaustividad. Es ineficaz, e incluso imposible, establecer modelos con grandes listados de indicadores, muchos de los cuales apenas influyen sobre los resultados de aplicar el modelo. Por tanto, los modelos creados incluyen una selección de indicadores con una relevancia mínima para el propósito comparativo que nos ocupa. Además, desafortunadamente, en la actualidad no es posible estimar el valor de algunos indicadores, lo cual imposibilita su inclusión en modelos de este tipo. Ni la literatura científica, ni las bases de datos de ACV (EcoInvent, Ecobaudat, US EPA, entre otras), ni las empresas y asociaciones de fabricantes que se han consultado disponen de datos de todos los indicadores de los que la literatura habla, para los productos aquí comparados. De todas formas, los modelos creados son muy completos, más que la mayoría de los recogidos en la literatura sobre este asunto.

Debido a las limitaciones de extensión de este tipo de publicaciones resulta imposible incluir en esta comunicación todos los datos de los cinco modelos generados (árboles, parámetros de las funciones de valor, datos de entrada a los diferentes modelos). Por tanto, lo que se ha hecho es incluir los datos del modelo de hormigones, y los resultados de aplicación de los

cinco modelos para todos los materiales estudiados. Los árboles del resto de modelos son muy parecidos al de hormigones, ya que comparten casi todos sus indicadores. De hecho, como parece lógico, el árbol para morteros de cemento es el mismo que el de hormigones, y el resto de árboles son casi iguales, salvo en lo relacionado con el consumo de recursos. Por su parte, la mayoría de las funciones de valor tienen geometrías iguales o parecidas, aunque hay variaciones en cuanto a los valores mínimos y máximos del eje de abscisas ($P_{i,min}$ y $P_{i,max}$), por razones obvias, al tratarse de diferentes materiales.

En cuanto a los límites del ACV realizado, en este caso se ha abordado un análisis cuna a puerta, habitual en el caso de empresas que venden productos industriales. Para un árbol natural convencional lo habitual es considerar que la cuna es la cantera, en la cual se comienza a agredir al planeta mediante la ocupación y explotación extractiva de suelos naturales, por medio de maquinaria y explosivos. En el caso de la concha de mejillón la cuna se encuentra en el momento en que, en la empresa conservera, se separa la concha de las partes blandas a procesar y enlatar, generando lo que en la mayoría de los casos es un residuo que se llevará al vertedero. Ese residuo, por el contrario, se puede procesar y vender para su uso como sub-producto, en este caso en el sector de la construcción (Bordello et al. 2015).

A su vez, la puerta del ACV aquí realizado se sitúa en el momento en el que el árbol convencional o de bivalvo salen de las instalaciones de la empresa que los vende.

3.2. Árboles de Requerimientos.

La Figura 1 refleja el árbol usado para hormigones y morteros de cemento. Los indicadores de sostenibilidad se encuentran en el lado derecho de dicha figura. Las distintas ramas del árbol establecen agrupaciones de indicadores, siguiendo una clasificación clara. El árbol, al igual que el resto árboles usados, tiene cuatro niveles: requerimientos, criterios, riesgos e indicadores. Los requerimientos son los tres ámbitos o pilares de la sostenibilidad: el ambiental, el social y el económico.

El pilar ambiental (R1) incluye siete criterios: uso de recursos materiales y de energía (C1); vertidos (C2) y emisiones (C3) resultantes de los procesos de extracción y producción de materias primas, así como del proceso de fabricación; impacto sobre ecosistemas (C4); gestión ambiental (C5); uso del suelo (C6), referido a la superficie necesaria para realizar acopios; y uso de residuos (C7), entendido como balance entre generación y consumo de los mismos.

Por su parte, el pilar económico (R2) incluye indicadores de costes (C8) y distribución de valor (C9). Este último tiene en cuenta la reducción de costes que deben experimentar las empresas de conservas al reducir su volumen de residuos de concha de mejillón.

La literatura existente en materia de aspectos ambientales y económicos es abundante, pero no sucede lo mismo con la relativa al pilar social (R3), cuyo tratamiento suele ser el menos riguroso, debido a diversos aspectos entre los cuales se encuentran, en general, el menor tiempo transcurrido desde que se comenzó a analizar este tipo de aspectos; la dificultad de encontrar datos, a veces consecuencia de lo anterior, y otras veces del celo de las empresas; posible falta de concienciación y, en algún caso, falta de fundamentos metodológicos.

Los criterios sociales considerados son, por un lado, empleo y trabajadores (C10), que tiene en cuenta la creación de empleo, la inclusión laboral de la mujer, y la calidad de dicho empleo, en particular con respecto a nivel salarial, temporalidad, siniestralidad y formación. Se ha tenido también en cuenta un criterio de ausencia de normativa y legislación para el producto (C12), aspecto desfavorable para los materiales que incorporan concha de mejillón. Por otro lado, se han incorporado algunos indicadores sociales establecidos en el

Anexo 13 de la Instrucción española de Hormigón Estructural EHE-08 (Aguado et al. 2012) incluyendo, por un lado, un criterio (Ciudadanos: C11) relacionado con la información al ciudadano, el interés general de la obra para la sociedad, y la aceptación social del producto; por otro, un criterio sobre aplicación de resultados de proyectos de I+D+i (Innovación: C13). El último criterio (C14) tiene que ver con el uso local de los productos (C14).

3.3. Establecimiento de Pesos y Funciones de Valor.

Cada indicador y cada rama del árbol están ponderados según su importancia (peso) con respecto a los demás indicadores o ramas dentro de una determinada rama del árbol. Por su parte, los indicadores tienen asignadas funciones de valor para el propósito ya comentado más arriba. Tanto las ponderaciones como las funciones de valor se han realizado por consenso de un grupo de expertos, usando AHP cuando se ha considerado necesario (muchas variables en un mismo ramal del árbol, diferencias de opinión). Tanto para pesos como para funciones de valor se ha tenido en cuenta lo aportado por la muy escasa literatura existente sobre el tema, y se han realizado razonamientos de ayuda en el establecimiento de pesos y funciones de valor. La Figura 1 incluye los pesos usados en el árbol de hormigones y morteros de cemento, y las tablas 1 y 2 los diferentes parámetros de las funciones de valor para el modelo de hormigones (que no son exactamente iguales que los del modelo de morteros de cemento).

Tabla 1: Modelo de hormigón en masa estructural. Parámetros para las FV continuas.

Indicador	Parámetros					Características	
	X_{max}	X_{min}	P	K	C	Geometría	Tendencia
Consumo agua	110	220	1	0.01	121	Lineal	D
Consumo áridos	1,000	2,300	1	0.01	2,170	Lineal	D
Consumo aditivo	3.5	10.5	1	0.01	9.8	Lineal	D
Consumo cemento	200	500	1	0.01	470	Lineal	D
Total Energía	2,000	4,500	2	0.7	2,750	Cóncava	D
Energía Renovable	100	0	2.84	0.5	50	Forma S	C
Fosfatos eq.	20	7,000	3	0.5	3,150	Forma S	D
SO ₂ eq.	2,000	6,000	3	0.5	2,040	Forma S	D
CO ₂ eq.	200	800	3	0.52	276	Forma S	D
Destr. capa ozono	4E-3	25	3.22	0.47	10	Forma S	D
RSU	0	10	3	0.5	3.6	Forma S	D
Materiales reciclados	100	0	1	0.5	3	Convexa	C
Precio venta	55	150	4	0.91	55.4	Forma S	D
Empleo	1	0.2	1.97	0.86	0.31	Forma S	C
Temporalidad	0	100	3.99	0.27	45	Forma S	D

Nota: C = creciente y D = decreciente.

3.4. Valores de Entrada a los Modelos.

Los valores de los indicadores medioambientales se han estimado en base a lo recogido en publicaciones científicas, bases de datos de ACV (BUNBR 2015, Ecoinvent 2015), y Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) (EPD Norway 2015, entre otros). Para los indicadores sociales la cosa ha resultado mucho más difícil. A pesar de ello, el Ministerio de Industria, Energía y Turismo dispone de informes sectoriales con información útil. Las tablas input-output, la Encuesta sobre Innovación en las Empresas realizada por el INE, o la información generada por la Central de Balances del Banco de España, han aportado también información de utilidad. Los aspectos económicos han sido menos problemáticos, al existir bases de datos de precios que aportan información suficiente para los propósitos de la comparación a realizar. (Fundación ITEGa 2015, ITeC 2015, por ejemplo). Por último, la parte de datos relativa a la concha de mejillón se ha basado en los trabajos de Bordello et al. (2015). Los datos empleados en los modelos han sido revisados por un grupo de expertos. En la Tabla 3 se incluyen las unidades de medida y los valores que toman los indicadores del modelo de hormigones, para cada alternativa (convencional y con concha mejillón). Estos valores de entrada son los más frecuentes en las fuentes consultadas y, en consecuencia, los índices de sostenibilidad obtenidos pueden considerarse como valores modales.

Tabla 2: Modelo de hormigón en masa estructural. Parámetros para las FV discretas.

Indicador	Valores						Características
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	Tendencia
Emisiones sonoras	1	0.8	0.6	0.2	0	X	D
Olor	1	0.5	0	X	X	X	D
Alteración hábitats	1	0.5	0	X	X	X	D
ISO 9000, 14000, EMAS	0	0.7	1	X	X	X	C
Superficie acopio vertido	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	C
Costes conserveras	0	0.2	0.5	1	X	X	C
Inclusión laboral mujer	0	0.5	1	X	X	X	C
Nivel salarial	0	0.6	1	X	X	X	C
Medidas seguridad	0	0.6	1	X	X	X	C
Accidentes	0	0.5	1	X	X	X	C
Formación trabajadores	0	0.5	1	X	X	X	C
Página web pública	1	0	X	X	X	X	D
Obra interés general	1	0	X	X	X	X	D
Aceptación social	0	0.5	1	X	X	X	C
Leyes, RD, reglamentos	0	0.6	1	X	X	X	C
Métodos innovadores	0	1	X	X	X	X	C
Materiales locales	0	0.15	0.5	0.8	1	X	C

Nota: El nº de respuestas no coincide para todos los indicadores, variando entre 2 y 6. Se han considerado 6 respuestas genéricas (V1, V2, V3, V4, V5 y V6), asociadas a respuestas concretas.

Tabla 3: Valores de entrada al modelo de hormigón en masa estructural.

Indicador	Unidades/Posibles respuestas	Alternativas	
		HM30 Convencional	HM30 Biovalvo 12.5%
Consumo agua	l/m ³ (numérico)	175.62	175.62
Consumo áridos	kg/m ³ (numérico)	1,872	1,640.7
Consumo aditivo	kg/m ³ (numérico)	7.024	7.024
Consumo cemento	kg/m ³ (numérico)	351.2	351.2
Total Energía	MJ/m ³ (numérico)	2,769.26	2,850.68
Energía Renovable	% (numérico)	42.2	42.4
Fosfatos eq.	Kg-eq PO ₄ ³⁻ /m ³ (numérico)	120	392.37
SO ₂ eq.	kg-eq SO ₂ /m ³ (numérico)	2,630	2,879.14
CO ₂ eq.	Kg-eq CO ₂ /m ³ (numérico)	347.91	403.25
Destrucción capa ozono	Kg CFC/m ³ (numérico)	4.71	7.9
Emisiones sonoras	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V3	V3
Olor	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V1	V2
Alteración hábitats	V1: Muy bajo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto. V5: Muy Alto	V3	V2
ISO 9000. 14000. EMAS	V1: Sin las básicas. V2: Básicas. V3: Básicas+EMAS	V2	V2
Superficie acopio vertido	V1: Sin. V2: Menor 10%. V3: Menor 20%. V4: Menor 40%. V5: Menor 60%. V6: Mayor 60%	V1	V3
RSU	kg/m ³ (numérico)	3.6	3.6
Materiales reciclados	% (numérico)	0	12.5
Precio venta	€/m ³ (numérico)	73.69	75.9
Costes conserveras	V1: Nulo. V2: Bajo. V3: Medio. V4: Alto	V1	V2
Empleo	Personas/€ (numérico)	0.61	0.64
Inclusión laboral mujer	V1: Sin. V2: Iniciat./Col.. V3: Iniciat./Col./Plan Estratégico	V1	V2
Temporalidad	%(Temporales/Indef.) (numérico)	70	70
Nivel salarial	V1: Salario Mínimo. V2: Medio. V3: Alto	V2	V2
Medidas seguridad	V1: Sin. V2: Algunas. V3: Abundantes	V1	V1
Accidentes	V1: Bajo. V2: Medio. V3: Alto	V2	V2
Formación trabajadores	V1: Menor 10 h/año. V2: 12-20 h/año. V3: Mayor 20 h/año	V2	V2
Página web pública	V1: Si. V2: No	V2	V2
Obra interés general	V1: Si. V2: No	V1	V1

Aceptación social	V1: Baja. V2: Media. V3: Alta	V1	V2
Leyes. RD. reglamentos	V1: Ausencia. V2: Poca. V3: Mucha	V3	V1
Métodos innovadores	V1: No. V2: Si	V1	V1
Materiales locales	V1: 0-10%. V2: 10-30%. V3: 30-50%. V4: 50-80%. V5: Muy 80-100%	V1	V2

Nota. Iniciat.: iniciativas. Col.: colaboraciones. Indef.: indefinidos.

4. Resultados y Discusión.

4.1. Hormigones en Masa.

Se ha comparado un hormigón estructural en masa HM30 con uno en el cual se mantiene la misma dosificación, y se realiza una sustitución parcial de árido convencional por árido de concha de mejillón. La dosificación del HM30 convencional es de 360Kg/m³ de cemento, 180 Kg/m³ de agua, 5.04 Kg/m³ de aditivo superplastificante, 1,161.66 Kg/m³ de arena, 563.86 Kg/m³ de gravilla y 206.83 Kg/m³ de gravilla gruesa (áridos de machaqueo). La alternativa, que vamos a denominar HM30-12.5CM, tiene una sustitución en volumen del 12.5% (12.5% en arena y 12.5% en gravilla). La unidad funcional es la tonelada de hormigón en masa.

Aplicando el modelo aquí presentado, el Índice de Sostenibilidad global (ISg) del HM30 resulta ser de 0.54, y el del HM30-12.5CM de 0.60, muy ligeramente por encima. Separadamente por pilares de la sostenibilidad, el HM30-12.5CM supera claramente al HM30 en el ámbito social, debido principalmente a la consideración de los efectos sobre las conserveras (sector local y con empleo femenino mayoritario), la aplicación de resultados de proyectos de I+D+i, y la aceptación social que suelen tener los productos eco-amistosos (siendo este producto más eco-amistoso que el convencional). La diferencia entre los índices ambientales parciales, aunque favorable para el HM30, es muy reducida. El ligero aumento de los impactos ambientales que provoca el tratamiento térmico de la concha de bivalvo casi se compensa con los efectos beneficiosos de su consumo, evitando la retirada a vertedero. El pilar económico presenta también muy pequeñas diferencias a favor del HM30. El porcentaje de sustitución es muy reducido (12.5%), por lo cual los indicadores económicos apenas varían.

4.2. Morteros de Cemento.

En este caso la alternativa convencional es un mortero de cemento para revestimiento exterior monocapa, con una dosificación de 357.17 Kg/m³ de cemento, 346.42 Kg/m³ de agua, y 1,508.2 Kg/m³ de arena. El otro mortero tiene la misma dosificación, sustituyendo el 50% en volumen de la arena por arena de concha de mejillón. La unidad funcional en este caso es el Kg de mortero seco. Aplicando el modelo creado por los autores, el ISg del mortero convencional es de 0.40, y el del mortero con concha de mejillón de 0.42, ligerísimamente por encima. Separadamente, por pilares de la sostenibilidad, sucede algo parecido a lo comentado para los hormigones en masa, si bien en este caso las diferencias en los ámbitos ambiental y económico ya no son tan reducidas como antes, a causa del incremento en la sustitución (50% frente al 12.5%).

4.3. Morteros de Cal.

Aquí el material convencional es un mortero de cal para revestimiento monocapa exterior, con una dosificación de 263.03 Kg/m³ de cal, 449.67 Kg/m³ de agua, y 1,237.58 Kg/m³ de arena. El otro mortero tiene la misma dosificación, sustituyendo el 50% en volumen de la arena por arena de concha de mejillón. La unidad funcional es, de nuevo, el Kg de mortero

seco. En este caso el ISg del mortero convencional es de 0.48, y el del mortero con concha de mejillón de 0.51, muy poco por encima, aunque con una diferencia un poco mayor que en el caso de los morteros de cemento. La razón esencial de ello es que, aunque cemento y cal tienen emisiones similares, la cantidad de cal empleada es menor que la cantidad de cemento. Separadamente, por pilares de la sostenibilidad, sucede algo parecido a lo comentado para los morteros de cemento.

4.4. Morteros de Barro.

Ahora el material convencional es un mortero de barro, en base a arcilla, arena y agua, con una dosificación de 180.41 Kg/m³ de caolín y arcilla caolínica, 363.10 Kg/m³ de agua, y 1,500.54 Kg/m³ de arena. El mortero alternativo tiene la misma dosificación reemplazando, una vez más, el 50% en volumen de la arena por arena de concha de mejillón. La unidad funcional es, una vez más, el kg de mortero seco. El ISg resultante para el mortero convencional es de 0.52, y el del mortero con concha de mejillón de 0.58, algo por encima. Separadamente, por pilares de la sostenibilidad, el mortero convencional tiene una sostenibilidad ambiental mayor que el de concha de mejillón, debido a un consumo energético y a unas emisiones contaminantes mucho menores, al no suponer la arcilla emisiones relevantes; esto, por otro lado, lleva a una pequeña mejoría con respecto a los morteros de cal. En el requerimiento económico los valores son similares. Finalmente, con respecto a la dimensión social, la alternativa con concha de mejillón queda mejor clasificada debido a las mismas razones ya comentadas para los hormigones en masa en el epígrafe 4.1.

4.4 Mezclas Bituminosas en Caliente.

El último material convencional abordado es una mezcla bituminosa en caliente (MBC) AC16 SURF 50/70 D (D-12), en el cual se sustituye todo filler calizo por filler de concha mejillón. Las MBCs están formadas principalmente por áridos y un ligante, que en este caso es un betún asfáltico de penetración. Suelen tener contenidos de filler muy bajos, del orden del 4% al 8% sobre el peso de la mezcla, siendo del orden del 4% para el tipo de mezclas como la aquí analizada. La unidad funcional es la tonelada de MBC. El ISg de la MBC convencional es de 0.28, y el de la alternativa con concha de mejillón de 0.35, un poco por encima. Por mucho que la sustitución sea del 100%, las diferencias no pueden ser muy altas, debido el escaso contenido en filler de una MBC. Por requerimientos, en el pilar ambiental el material con concha de bivalvo obtiene peores resultados que el convencional, principalmente debido a las altas emisiones asociadas a la fabricación de filler con concha de mejillón. La concha de mejillón, a pesar de ser lajosa, tiene mucha dureza y una resistencia al desgaste muy elevada, lo que lleva a una molienda muy exigente en consumo energético, y sus correspondientes emisiones, para conseguir la granulometría requerida. En el ámbito económico las diferencias son reducidas, a favor de la alternativa con concha de mejillón. En cuanto al pilar social, esta última alternativa es ampliamente ventajosa, por razones análogas a las ya comentadas para los modelos anteriores.

6. Conclusiones

Se han presentado aquí los resultados de un análisis comparativo de cinco materiales convencionales basados en el uso de ligantes o conglomerantes, con otros en los cuales el árido natural se sustituye total o parcialmente por árido de concha de mejillón. La valorización de la concha de mejillón requiere un procesado más exigente que el necesario para la obtención de áridos convencionales. Esto hace que el consumo de energía y emisiones de contaminantes sean mayores, y tanto más si se trata de obtener filler de este tipo de material. Sin embargo, si se tienen también en cuenta otros indicadores, como los relacionados con el uso del suelo, alteración de hábitats y uso de residuos, el material de

concha de mejillón rebaja la diferencia en su contra, o incluso llega a resultar ventajoso frente a los correspondientes materiales convencionales.

De todas formas, el concepto de desarrollo sostenible debe abarcar no solo aspectos relacionados con el medioambiente, sino también aspectos económicos y sociales (Declaración de Río: vida productiva y saludable; United Nations 1987, 1992). En esta línea, la sostenibilidad social de los nuevos materiales aumenta con respecto a la de los convencionales. Esto se debe fundamentalmente a la consideración de aspectos relacionados con determinados aspectos de las empresas conserveras (sector local y con empleo femenino mayoritario), a la aplicación de resultados de proyectos de I+D+i, y a la aceptación social esperada para las soluciones con concha de mejillón, frente a las convencionales, de la misma forma que sucede con otros productos eco-amigables, procedentes total o parcialmente de reciclaje.

La dimensión económica depende directamente de la cantidad de material sustituida por árido con concha de mejillón, y de los precios de los materiales. El precio de la concha de mejillón tratada, en cualquiera de sus modalidades, es más elevado que el coste del árido convencional. Esta es la razón por la que, en algunos casos, el efecto del ahorro en los costes de gestión de residuos por parte de las conserveras se ve atenuado por el mayor precio de los productos con concha de mejillón.

En todo caso, los índices de sostenibilidad son siempre bajos o muy bajos, debido a la exigencia de los modelos creados, pero en su conjunto, teniendo en cuenta todos los indicadores ambientales, sociales y económicos, el balance es siempre ventajoso para el material con reciclado de concha de mejillón, aunque a veces las diferencias son muy bajas, y en algún caso resultan irrelevantes. En todo caso, los autores consideran que, por lo pronto, y al margen de análisis posteriores más profundos y detallados, los resultados son suficientemente buenos como para pensar que este sub-producto debería dejar de enviarse a vertedero, aunque habrá que emplearlo en aquellas aplicaciones en las que las diferencias de sostenibilidad sean más importantes.

7. Referencias

- Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Gómez, D., & Josa, A. (2012). Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code. *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, 138(2), 268-276.
- Arabani, M., Babamohammadi, S., & Azarhoosh, A.R. (2015). Experimental investigation of seashells used as filler in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(6), 502-509.
- Ballester, P., Mármol, I., Morales, J., & Sánchez, L. (2007). Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars. *Cement and concrete research*, 37(4), 559-564.
- Barros, M.C., Bello, P.M., Bao, M., & Torrado, J.J. (2009). From waste to commodity: transforming shells into high purity calcium carbonate. *Journal of Cleaner Production*, 17(3), 400-407.
- Bordello L., de la Cruz M.P., & del Caño A. (2015). Valorization of mussel shell for its use as an aggregate in unbound applications: life-cycle sustainability indicators. *19th International Congress on Project Management and Engineering (02-009-1/02-009-11)*, organizado por AEIPRO-IPMA (Asociación Española de Ingeniería de Proyectos – International Project Management Association) y celebrado en Granada (España) del 15 al 17 de julio de 2015.

- BUNBR (2015). Ökobaudat. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BUNBR; Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Construcción y Seguridad Nuclear; Alemania). Base de datos para la evaluación del ciclo de vida de materiales de construcción. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.oekobaudat.de/>
- Carro, D., González B., Martínez, C., Martínez, F., Seara, S., Rodríguez R. (2015). Desing and properties of mortar with seashells fine aggregates. *ICBBM 2015 - First International Conference on Bio-based Building Materials* (289-294). Clermont Ferrand, France, June 2015. ISBN: 978-2-35158-154-4.
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., & Cartelle J.J. (2015). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part I: the MIVES – Monte Carlo method. In M.S. García-Cascales, J.M. Sánchez-Lozano, A.D. Masegosa, & C. Cruz-Corona (Eds), *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency* (Chapter 4, pp. 69-106). USA: IGI-Global.
- Ecoinvent (2015). Asociación sin ánimo de lucro creada por la ETH (Escuela Politécnica Federal de Zúrich) y el Gobierno Federal Suizo (Ecoinvent). The ecoinvent Database. Base de datos para la evaluación del ciclo de vida. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.ecoinvent.org/database/database.html>
- Eo, S., & Yi, S. (2015). Effect of oyster shell as an aggregate replacement on the characteristics of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67(15), 833-842.
- EPD Norway (2015). Fundación noruega creada por la Confederación de Empresas Noruegas y la Federación Noruega de Industrias de la Construcción (EPD Norway). The ecoinvent Database. Base de datos con Declaraciones Ambientales de Producto. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.epd-norge.no>.
- Falade, F. (1995). An investigation of periwinkle shells as coarse aggregate in concrete. *Building and Environment*, 30(4),573-577.
- Fundación ITEGa (2015). Fundación Instituto Tecnológico de Galicia. Base de Precios Oficial de la Construcción de Galicia. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://www.presupuesta.com>.
- González B., Carro, D., Martínez, F., Martínez, C., & Seara, S. (2015). Effects of seashell aggregates in concrete properties. *ICBBM 2015 - First International Conference on Bio-based Building Materials* (376-382). Clermont Ferrand, France, June 2015. ISBN: 978-2-35158-154-4.
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M. P., & Josa, A. (2012). Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos - El método MIVES. En A. Aguado (Ed.), *Sostenibilidad y Construcción* (pp. 385-411). Madrid, España: Asociación Científico-Técnica del Hormigón.
- Iribarren, D. (2010). Life Cycle Assessment of mussel and turbot aquaculture. Application and insights. Doctoral Thesis. Available in: <http://dspace.usc.es/handle/10347/2812>.
- Iribarren, D., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2010). Implementing by-product management into the Life Cycle Assessment of the mussel sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1219-1230.
- ITeC (2015). Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Base de Precios BEDEC. Consultado por última vez en enero de 2015. Disponible en línea en: <http://itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>.

- Muthusamy, K., & Sabri, N.A. (2012). Cockle shell: A potential partial coarse aggregate replacement concrete. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 1(4), 260-267.
- Osarenmwinda, J.O., & Awaro, A.O. (2009). The potential use of periwinkle shell as coarse aggregate for concrete. *Advanced Materials Research*, 62-64, 39-43, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.62-64.39.
- United Nations (1987) *Our Common Future (Brundtland Report)*. United Nations World Commission on Environment and Development (WCED). Disponible en línea en: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>.
- United Nations (1992). *Rio Declaration on Environment and Development*. Río de Janeiro, Brasil: United Nations Conference on Environment and Development (UNCED).
- Yang, E., Kim, M., Park, H., & Yi, S. (2010). Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 758-765.
- Yang, E., Yi, S., & Leem, Y. (2005). Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties. *Cement and Concrete Research*, 35(11), 2175-2182.