

# CORAL 3D: PROYECTO DE APRENDIZAJE ENFOCADO A LA RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DE HÁBITATS CORALINOS DE LA REGIÓN DE MURCIA MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D Y EL EMPLEO DE RESIDUOS DEL SECTOR DEL MÁRMOL

## Acción 2. Fuente de verificación FV2.1. Informe descriptivo y técnico del material desarrollado



Asociación Empresarial Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales

Departamento de Construcción Sostenible e Industria 4.0

**CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol.**

*Realizado con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*



**Las opiniones y documentación aportadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad del autor o autores de los mismos, y no reflejan necesariamente los puntos de vista de las entidades que apoyan económicamente el proyecto.**



VICEPRESIDENCIA  
TERCERA DEL GOBIERNO  
MINISTERIO  
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA  
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



## ÍNDICE

1. Objetivos .....	1
2. Introducción .....	1
3. Descripción de los posibles materiales a emplear en la fabricación del arrecife artificial ...	2
3.1. Mezclas de lodos de mármol y hormigón .....	3
3.2. Mezclas para moldes de impresión 3D .....	4
3.3. Bloques de mármol o piedra caliza .....	6
4. Elección del material a utilizar: bloques de mármol o piedra caliza .....	6
5. Referencias .....	9

## 1. Objetivos

El objetivo de este informe es determinar el material que se empleará para la fabricación del arrecife artificial a base de residuos del sector del mármol o roca caliza, teniendo en cuenta las distintas técnicas de impresión 3D que podrían emplearse para su elaboración: mezclas de lodos procedentes de residuos de la industria del mármol con fabricación aditiva, mezclas empleando moldes y bloques de mármol o piedra caliza para utilizar máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC).

## 2. Introducción

El fondo marino es uno de los ambientes más corrosivos, hecho que limita enormemente los materiales a usar a la hora de implantar un arrecife artificial. Para el análisis de los materiales, se han consultado varios convenios relacionados con la legislación de los arrecifes artificiales: *London Convention Protocol/UNEP* (Spieler et al., 2001)(London Convention and Protocol/UNEP, 2009) , *OSPAR Commission* (OSPAR Commission, 2013), *Mediterranean Action Plan* (UNED & MAP, 2005) y la *Guía metodológica para la instalación de arrecifes artificiales* del Ministerio de Medio Ambiente (Gobierno de España) (Ministerio de Medio Ambiente de España, 2008).

De modo general, en la fabricación de arrecifes artificiales habría que tener en cuenta una serie de pautas:

- Los materiales deben ser inertes con tal de evitar la presencia y bioacumulación de contaminantes en el medio acuático y sus organismos. Además, es fundamental porque los materiales afectarán directamente a la colonización de los arrecifes artificiales, sobre todo por los organismos bentónicos. Una mala elección puede hacerlos inhabitables.
- Para arrecifes destinados a colonización por biota, algunos de los aspectos más importantes son la rugosidad y la posibilidad de formar cavidades en el material, superficies muy planas no resultarán efectivas.
- Los materiales deben ser resistentes a las condiciones fisicoquímicas del medio marino. Para ello, se recomienda que el peso del arrecife artificial sea, al menos, el doble de la gravedad específica del agua marina. Alternativamente, también se puede anclar la estructura al fondo.
- El material debe tener una vida media de 30 años.
- El coste-efectividad y el transporte de los materiales.

De modo específico, para los corales hay que tener en cuenta:

- Qué especie de coral es el objetivo del proyecto y qué hábitat se busca crear.

*Leptopsammia pruvoti*, la especie objetivo de CORAL3D, se asienta de forma natural en sustrato rocoso umbrío, a la entrada de cuevas o salientes sombreados, pues es sensible a los factores lumínicos. Por ello, es importante que la composición del material permita un diseño con cavidades y zonas menos iluminadas, para que especies como esta puedan proliferar. Esto también es igualmente para proteger a los pólipos la depredación o fuertes corrientes, pues se pueden producir desprendimientos de colonias (Spieler et al., 2001).

- Alta composición en carbonato cálcico.

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. *Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico*

Ciertas revisiones científicas, postulan que las composiciones con alto porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  son las más beneficiosas para el asentamiento de los corales de esqueleto carbonatado, siempre y cuando se tenga en cuenta la rugosidad del material (Spieler et al., 2001).

Por tanto, a la hora de seleccionar la composición del sustrato, se optará siempre por materiales que tengan alto porcentaje en este compuesto, lo cual es fácil de conseguir empleando residuos de la industria del mármol y de roca caliza, pues tienen, también, una altísima cantidad de  $\text{CaCO}_3$

### 3. Descripción de los posibles materiales a emplear en la fabricación del arrecife artificial

Para realizar estructuras de arrecifes artificiales son muchos los materiales que se pueden utilizar, tanto naturales (madera, concha, roca) como artificiales (hormigón, fibra de vidrio, ceniza, materiales reciclados, embarcaciones,...) (Fabi et al., 2015). Concretamente, para la restauración de corales se han hecho estudios con materiales diversos que han corroborado su efectividad (Blakeway et al., 2013; Burt et al., 2009; Fisher & Barron, 2019; Hoog Antink et al., 2018; Ierra et al., 2016; Silva et al., 2016).

En cuanto al uso del mármol como material para la creación de arrecifes artificiales, no hay tanta bibliografía publicada. Se han realizado algunos trabajos como el estudio de asentamiento de coral rojo (*Corallium rubrum*) en azulejos de mármol, concluyendo que este material es muy adecuado en las zonas de estudio (Áreas Marinas Protegidas de Calafuria–Livorno, Elba e Islas Medes) (Bramanti et al., 2007). Existen otro trabajo que trata sobre el recubrimiento de estatuas de mármol por esponjas en Capri y Atenas (Calcinai et al., 2019) en el cual también se obtuvieron resultados exitosos.

Antes de trabajar con un material, es necesario conocer el objetivo del proyecto, pues ello determinará su éxito y que cumpla sus propósitos. En este caso, el objetivo principal es la restauración de un hábitat de corales y su proliferación. Por lo que es esencial que el material con el que se va a trabajar tenga unas propiedades semejantes al del arrecife rocoso natural, y, además, tiene que ser moldeable y fácilmente manipulable (Sladescu, de Bérigny, & Hill, 2017). Otro aspecto importante es que sea inocuo, como se ha mencionado anteriormente, pues los corales son organismos muy sensibles a la contaminación.

Tal y como se expresa en el marco lógico, para el desarrollo de CORAL3D se van a utilizar residuos procedentes de la extracción de la industria del mármol, bien sean bloques de piedra o lodos con mezcla de hormigón.

Como se ha mencionado anteriormente, la selección de los materiales va a depender de la técnica seleccionada, por lo que tendremos en cuenta que, para cada una de las metodologías contempladas, necesitaríamos las siguientes composiciones:

- 1) Fabricación aditiva: mezcla de lodos de mármol y hormigón para crear una estructura con impresión 3D.
- 2) Fabricación de moldes con impresora 3D: fabricación de moldes con material resistente y mezcla de lodos de mármol y hormigón para ser rellenos.
- 3) Máquina CNC con corte de hilo o con chorro de agua: bloque de mármol o piedra caliza entero para ser moldeado.

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico

### 3.1. Mezclas de lodos de mármol y hormigón

Las mezclas con lodos de mármol y hormigón ofrecen distintas posibilidades. El hormigón en sí es un material altamente compatible con el ambiente marino y ofrece la posibilidad de desarrollar unidades prefabricadas, además, provee de una superficie adecuada para el asentamiento de organismos incrustantes (Fabi et al., 2015). Por otra parte, tiene una alta durabilidad, estabilidad, densidad, es económico y permite la creación de un diseño específico (Spieler et al., 2001).

Existen entidades, como Reef Ball™ (Reef Ball Foundation, 2019), que fabrican arrecifes artificiales empleando la fabricación aditiva, sin necesidad de impresión 3D. De hecho, poseen distintas mezclas de hormigón patentadas para utilizar en la creación de arrecifes artificiales. Por otra parte, muchos de los trabajos publicados utilizan mezclas de esta empresa para la fabricación de sus arrecifes (Ierra et al., 2016; Ortiz-Prosper et al., 2001). Otras empresas trabajan con sus propias mezclas o siguen otras recetas de fabricación (Blakeway et al., 2013; Burt et al., 2009; Lam, 2003; Salinas-de-León et al., 2011).



Figura 1. Estructura diseñada por Stanford Development Company (SDC) y Reef Ball Foundation para la restauración de arrecifes coralinos. Se instalaron alrededor de la Isla de Maiden © Reef Ball Foundation. Fuente: <https://www.ser-rrc.org/project/antigua-maiden-island-total-reef-restoration/>

También existen ejemplos a lo largo del mundo de combinación de este tipo de mezclas con impresión 3D para la creación de arrecife artificiales. Entre los muchos ejemplos, se puede mencionar a SeaBoost junto con XtreeE, los cuales emplearon una mezcla de hormigón para fabricar un novedoso arrecife artificial (Figura 2).



Figura 2. Fabricación 3D utilizando cemento depositado en capas para la construcción de un arrecife artificial.  
Fuente: <http://www.xtreee.eu/project-rexcor-artificial-reef/>

En España, también tenemos ejemplos de esta técnica de impresión 3D y fabricación aditiva como el desarrollado por el proyecto 3DPARE llevado a cabo por la Universidad de Cantabria (Figura 3).



Figura 3. Proceso de elaboración de arrecife artificial con fabricación aditiva con impresión 3D del proyecto 3DPARE llevado a cabo por la Universidad de Cantabria (España). ©3DPARE. Fuente: <https://www.giteco.unican.es/proyectos/3dpare/index.html>

### 3.2. Mezclas para moldes de impresión 3D

Para la fabricación de moldes con tecnología 3D, se pueden utilizar distintos materiales. Lo más tradicional es el uso de plásticos o acero, pero existen otras tecnologías que emplean capas de fotopolímeros líquidos que se endurecen instantáneamente, resinas foto radiactivas y resinas resistentes a altas temperaturas (IA Manufacturing, 2019) (Figura 4).

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico



Figura 4. Moldes de inyección para la fabricación de piezas: Fuente: <https://impresiontresde.com/moldes-de-inyeccion-impresion-3d/>

Los moldes pueden utilizarse para hacer arrecifes de tipo “modular” como el desarrollado por Reef Desing Lab en el proyecto MARS (Figura 5).



Figura 5. Arrecife modular creado mediante el uso de moldes elaborados con impresión 3D y relleno de cerámica.

Sin embargo, con esta opción hay que considerar que los rellenos de componentes que puedan resultar perjudiciales para el medio marino deben ser descartados. Se ha estudiado el potencial de lixiviar sustancias tóxicas, ácidos/bases y similares que tienen ciertos materiales empleados para arrecifes artificiales y lo perjudiciales que pueden ser para el asentamiento de la vida marina (Ministerio de Medio Ambiente de España, 2008).

### 3.3. Bloques de mármol o piedra caliza

Para la impresión con máquina CNC se utilizarían bloques de mármol extraídos de canteras donde se realiza su explotación. Estos bloques serían descartados en la industria por diferentes razones (tamaño no deseado, imperfecciones, roturas, etc.), pero podrían utilizarse para la creación del arrecife artificial reaprovechando así su uso.

El mármol es una roca metamórfica compacta formada a partir de rocas calizas que, sometidas a elevadas temperaturas y presiones, alcanzan un alto grado de cristalización. El componente básico del mármol es el carbonato cálcico, cuyo contenido supera el 90%; los demás componentes pueden ser wollastonita, grafito, clorita, talco, mica, cuarzo, piritita, corindón, granate o zirconita, entre otros muchos. Su dureza en la escala de Mohs es 3-4 y su densidad de 2,6 a 2,8 g/cm<sup>3</sup> variable en función de los agregados y proporción que la componen. Todas estas características lo hacen un material estable, denso, de alta durabilidad y compatible con los organismos marinos por tratarse de una roca natural.

## 4. Elección del material a utilizar: bloques de mármol o piedra caliza

Una vez analizados los posibles materiales a emplear, se ha optado por usar directamente los bloques completos de mármol.

Pese a que tanto los bloques de piedra como el combinado de lodos con hormigón son buenas opciones para la fabricación de arrecifes artificiales, el uso de mezclas añade el inconveniente de la adición de aditivos que suelen utilizarse para la compactación, añadir densidad, modificar su pH, etc. De hecho, esto último es muy importante, pues algunas de las mezclas de hormigón estándar que se utilizan pueden impedir el asentamiento de corales por tener un pH inadecuado (Ministerio de Medio Ambiente de España, 2008). Por tanto, creemos que escoger los bloques de mármol es la opción más natural, menos contaminante y, además, aporta la ventaja de que no se necesitan aditivos, compactaciones,...

Teniendo en cuenta el diseño que se le va a dar al arrecife artificial, los bloques de mármol aportan una textura rugosa, permiten la creación de un sustrato orientado verticalmente (aspecto muy importante para una restauración efectiva) y la creación de oquedades naturales en la roca (que parece ser de preferencia para muchas especies de corales con tal de evitar la depredación) (Spieler et al., 2001). Además, por su peso y densidad ofrecen estabilidad a la estructura, a la misma vez que permiten la inserción de algún tipo de anclaje para su fijación al fondo.

Para llevar a cabo la elección del bloque de mármol adecuado para conferir un diseño de arrecife artificial, se siguieron varios criterios:

- Dimensiones del bloque y peso.
- Estabilidad del bloque.
- Textura del bloque.
- Presencia de fallas, roturas, etc.
- Potencialidad para la impresión del diseño.

Como ya se ha comentado anteriormente, la industria de la explotación de la piedra natural produce muchos residuos, y las canteras de roca caliza poseen numerosos bloques de descarte

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. *Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico*

que son acumulados, sin tener otra función, en las canteras. La elección de uno de estos residuos fue el objetivo del proyecto CORAL3D. Para ello, el equipo técnico del proyecto se desplazó a dos empresas del noroeste murciano, en el que se evaluaron distintos bloques (Figura 6, 7, 8 y 9).



Figura 6. Bloques de piedra caliza residuales de la explotación de una cantera de noroeste murciano (Mármoles M<sup>o</sup> José Miñarro).



Figura 7. Bloques de piedra caliza residuales de la explotación de una cantera de noroeste murciano (Transforstone S.L.).

También se visitó una cantera de piedra caliza en Moratalla, también en el noroeste murciano (Figura 8), que poseía numerosos bloques con residuos.



Figura 8. Cantera de piedra caliza en Moratalla Alba (Murcia).

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico

Algunos de los bloques evaluados atendiendo a los criterios de selección anteriormente mencionados pueden verse en la Figura 9.



Figura 9. Distintos bloques evaluados para la construcción del arrecife artificial.

Finalmente, se optó por la elección de un bloque de piedra caliza residual de la cantera, pues cumplía con las características buscadas para la fabricación del arrecife. El bloque seleccionado (Figura 10) tenía unas dimensiones de 2'30 x 1'65 x 1'80 m y un peso aproximado de 6 t.



Figura 10. Bloque de roca caliza seleccionado para el proyecto.

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico

## 5. Referencias

- Blakeway, D., Byers, M., Stoddart, J., & Rossendell, J. (2013). Coral Colonisation of an Artificial Reef in a Turbid Nearshore Environment, Dampier Harbour, Western Australia. *PLoS ONE*, 8(9), 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075281>
- Bramanti, L., Rossi, S., Tsounis, G., Gili, J. M., & Santangelo, G. (2007). Settlement and early survival of red coral on artificial substrates in different geographic areas: Some clues for demography and restoration. *Hydrobiologia*, 580(1), 219-224. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0452-1>
- Burt, J. A., Bartholomew, A., Bauman, A. G., Saif, A., & Sale, P. F. (2009). Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 373(1), 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2009.03.009>
- Calcinai, B., Perasso, C. S., Petriaggi, B. D., & Ricci, S. (2019). Endolithic and epilithic sponges of archaeological marble statues recovered in the Blue Grotto, Capri (Italy) and in the Antikythera shipwreck (Greece). *Facies*, 65(2), 21.
- Fabi, G., Scarcella, G., Spagnolo, A., Bortone, S. A., Charbonnel, E., Goutayer, J. J., Haddad, N., Altan, L., & Trommelen, M. (2015). *Practical Guidelines for Artificial Reefs in the Mediterranean and Black Sea* (96.<sup>a</sup> ed.). Studies and Reviews. <http://www.fao.org/3/a-i4879e.pdf>
- Fisher, L. V., & Barron, A. R. (2019). The recycling and reuse of steelmaking slags — A review. En *Resources, Conservation and Recycling* (pp. 244-255). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.010>
- Hoog Antink, M. M., Röpke, L., Bartels, J., Soltmann, C., Kunzmann, A., Rezwan, K., & Kroll, S. (2018). Porous ceramics with tailored pore size and morphology as substrates for coral larval settlement. *Ceramics International*, 44(14), 16561-16571. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.078>
- IA Manufacturing. (2019). *Moldes de inyección con impresión 3D*. <https://impresiontresde.com/moldes-de-inyeccion-impresion-3d/>
- Ierra, C. I. D. E. L. A. T., Bedoya-gutiérrez, M. A., Iván, J., Correa-herrera, T., & Correa-rendón, J. D. (2016). Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 40, 55-63. <https://doi.org/10.15446/rbct.n40.55818>
- Lam, K. K. Y. (2003). Coral recruitment onto an experimental pulverised fuel ash-concrete artificial reef. *Marine Pollution Bulletin*, 46(5), 642-653. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00482-4](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00482-4)
- London Convention and Protocol/ UNEP. (2009). London Convention and Protocol/ UNEP. Guidelines for the Placement of Artificial Reefs. En *UNEP Regional Seas Reports and Studies* (Vol. 187). International Maritime Organization. [https://doi.org/10.1016/S0002-9394\(25\)90831-8](https://doi.org/10.1016/S0002-9394(25)90831-8)
- Ministerio de Medio Ambiente de España. (2008). *Guía metodológica para la instalación de arrecifes artificiales* (Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica de Medio Ambiente (ed.)).

CORAL 3D: Proyecto de aprendizaje enfocado a la restauración y conservación de hábitats coralinos de la Región de Murcia mediante tecnologías de impresión 3D y el empleo de residuos del sector del mármol. *Con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y el Reto Demográfico*

- Ortiz-Prosper, A. L., Bowden-Kerby, A., Ruiz, H., Tirado, O., Cabán, A., Sanchez, G., & Crespo, J. C. (2001). Planting small massive corals on small artificial concrete reefs or dead coral heads. *Bulletin of Marine Science*, 69(2), 1047-1051.
- OSPAR Commission. (2013). *OSPAR Guidelines on Artificial Reefs in relation to Living Marine Resources* (Vols. 2013-03). [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/OSPAR\\_Artificial Reefs Guidelines\\_tcm30-157010.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/OSPAR_Artificial%20Reefs%20Guidelines_tcm30-157010.pdf)
- Reef Ball Foundation. (2019). *Concrete specifics*. <http://www.reefball.org/tm/tm/tm.htm>
- Salinas-de-León, P., Costales-Carrera, A., Zeljkovic, S., Smith, D. J., & Bell, J. J. (2011). Scleractinian settlement patterns to natural cleared reef substrata and artificial settlement panels on an Indonesian coral reef. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(1), 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.016>
- Silva, R., Mendoza, E., Mariño-Tapia, I., Martínez, M. L., & Escalante, E. (2016). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 467-471. [https://doi.org/https://doi.org/10.2112/SI57-094.1](https://doi.org/10.2112/SI57-094.1)
- Spieler, R. E., Gilliam, D. S., & Sherman, R. L. (2001). Artificial substrate and coral reef restoration: What do we need to know to know what we need. *Bulletin of Marine Science*, 69(2), 1013-1030.
- UNED, & MAP. (2005). *Guidelines for the placement at sea of matter for purpose other than the mere disposal (construction of artificial reefs)* (pp. 21-24).