

FABRICACIÓN DE ELEMENTOS ESCULTÓRICOS DE MORTERO A TRAVÉS DEL USO DE MOLDES IMPRESOS EN 3D

Mario Lozano Corona ¹, Joaquín Ignacio Salas Álvarez ², Elena Blanco Fernández ³, Laura Castañón Jano ⁴, Eva Cuesta Astorga ⁵

¹ Grupo de Investigación GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, mario.lozano@unican.es

² Grupo de Investigación GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, joaquin.salas@unican.es

³ Grupo de Investigación GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, elena.blanco@unican.es

⁴ Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación, Universidad de Cantabria, Santander, España, laura.castanon@unican.es

⁵ Grupo de Investigación GITECO, Universidad de Cantabria, Santander, España, eva.cuesta@unican.es

Resumen

El presente caso de estudio, enmarcado en el proyecto 3DTurbu, aborda la fabricación de arrecifes artificiales destinados a favorecer la colonización biológica y promover el buceo recreativo, incorporando un valor estético añadido. Para su ejecución, se emplean moldes poliméricos fabricados mediante impresión 3D por modelado por deposición fundida.

Las estructuras, de aproximadamente un metro de altura, se componen de dos partes diferenciadas: una base o pedestal diseñada para potenciar la atracción de vida marina y un elemento escultórico superior. Para ello, se seleccionaron una estela cántabra, una sirena y una representación de Neptuno cántabro.

El proceso de fabricación comprende la digitalización de las esculturas, la elección de parámetros técnicos más adecuados para el diseño e impresión de los moldes, el vertido del mortero con las dosificaciones establecidas y el tratamiento posterior de las superficies, con el fin de optimizar el acabado final.

Palabras Clave: Impresión 3D, Moldes, Patrimonio cultural, Arrecifes artificiales.

1 Introducción

El buceo recreativo se configura en la actualidad como un sector en clara expansión, impulsado tanto por el creciente interés social en el medio marino como por la diversificación de las actividades vinculadas al turismo costero. En este contexto, diversos casos a escala internacional ponen de manifiesto el papel que esta actividad puede desempeñar en la transición hacia modelos económicos más sostenibles [1].

A diferencia de otras actividades turísticas, permite a los ciudadanos interactuar directamente con los ecosistemas marinos, generando una mayor concienciación ambiental y favoreciendo comportamientos responsables.

Esta dimensión adquiere especial relevancia en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular el ODS 14 de las Naciones Unidas, «Vida submarina», orientado a la conservación y el uso sostenible de los océanos, mares y recursos marinos. El sector del buceo actúa como catalizador de iniciativas que integren conservación, sensibilización ambiental y desarrollo económico [1]. Se estima que su impacto económico total, considerando efectos directos e indirectos, se sitúa en un rango comprendido entre 8,5 y 20,4 mil millones de dólares anuales. Esta actividad moviliza además un volumen considerable de demanda turística, con entre 9 y 14 millones de practicantes de buceo marino, y contribuye al sostenimiento de hasta 124.000 puestos de trabajo a nivel mundial [2].

En las últimas décadas, el medio marino ha sufrido un proceso continuado de degradación, evidenciado por el aumento de la contaminación, la disminución de la biodiversidad, la alteración de hábitats, el incremento de la temperatura de los océanos y los impactos derivados del cambio climático. Lejos de estabilizarse, esta evolución negativa se ha intensificado en los últimos años, agravando el deterioro de unos ecosistemas cuya importancia ecológica y económica resulta incuestionable a escala global [3].

Los arrecifes artificiales son estructuras diseñadas para facilitar la recuperación de ecosistemas marinos degradados, consolidados como una herramienta de amplia aplicación, presentando gran diversidad en su forma, tamaño y materiales de construcción [4][5]

En lo que respecta a los materiales, el hormigón se ha consolidado como la opción predominante, considerado uno de los más adecuados debido a su elevada durabilidad, su capacidad de adaptación a geometrías y dimensiones [6]. Resulta fundamental que estos diseños se adapten de manera adecuada a las condiciones específicas del entorno marino en el que se implantan [7].

En los últimos años, la fabricación aditiva ha comenzado a consolidarse como una herramienta innovadora en la producción de piezas de mortero mediante la utilización de moldes poliméricos impresos en 3D. Esta tecnología se distingue por su capacidad para reproducir geometrías complejas [8] con un alto grado de precisión, lo que permite superar las limitaciones asociadas a los métodos de encofrado convencionales, paredes planas, lisas y verticales, permitiendo diseños curvos, angulados o escultóricos con gran fidelidad [9].

De esta manera, la combinación de mortero con moldes fabricados mediante impresión 3D se posiciona como una estrategia eficiente, versátil y sostenible para la construcción de elementos funcionales [10] [11].

Mayoritariamente, y en función de su número de usos, los moldes poliméricos fabricados mediante impresión 3D empleados para dar forma a piezas de mortero se clasifican en dos tipos principales: de un único uso y reutilizables. Los moldes de un único uso requieren una menor cantidad de material y presentan tiempos de impresión reducidos en comparación con los reutilizables; sin embargo, su aplicación está limitada a una sola ocasión, siendo necesario desecharlos tras su empleo [12] [13]. Por el contrario, los moldes reutilizables ofrecen la capacidad de producir varias piezas idénticas a lo largo de su vida útil, la cual depende de diversos factores relacionados con su fabricación, tales como el espesor de las paredes, el tipo de material empleado y los parámetros de impresión [14].

En el presente trabajo se emplean ambas tipologías de moldes poliméricos descritas previamente, seleccionando cada tipo en función de las necesidades específicas de fabricación de las piezas de mortero. Esta combinación permite optimizar el proceso constructivo, aprovechando las ventajas de los moldes de un único uso en piezas únicas o prototipos, al tiempo que se maximiza la eficiencia y la sostenibilidad mediante el uso de moldes reutilizables en la producción de elementos repetitivos.

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto 3DTURBU (Fomento del Turismo de Buceo con Arrecifes Artificiales 3D), cuyo objetivo general consiste en el diseño, fabricación mediante impresión 3D y posterior fondeo de arrecifes artificiales en la costa de Cantabria, con la finalidad de favorecer la colonización de especies marinas y promover el buceo recreativo.

En este contexto, el proyecto adopta un enfoque multidisciplinar que combina criterios ecológicos, constructivos y socioeconómicos. Asimismo, el proyecto contempla su fondeo en ubicaciones estratégicas de fácil acceso, favoreciendo así el desarrollo del buceo recreativo como actividad turística.

El presente trabajo describe el proceso llevado a cabo para la fabricación de tres arrecifes artificiales de aproximadamente un metro de altura, desarrollados para ser ubicados en la costa de Cantabria. Estas piezas son destinadas a favorecer la colonización biológica y promover el buceo recreativo, por lo que cuentan con un elemento principal con valor estético alto.

2 Metodología

Las estructuras realizadas, de aproximadamente un metro de altura, se componen de dos partes diferenciadas: una base o pedestal diseñada para potenciar la atracción de vida marina y un elemento escultórico, el cual es colocado en la parte superior.

2.1 Conceptualización y diseño de las estructuras

2.1.1 Criterios funcionales

Con el fin de cumplir el objetivo de favorecer la colonización biológica, las piezas diseñadas deben reunir condiciones adecuadas para funcionar como hábitat de diversas especies de fauna y flora marina.

Para ello, se plantearon geometrías que incorporaran cavidades internas, tales como agujeros y túneles, así como superficies de desarrollo suficiente que faciliten la adhesión y el asentamiento de organismos. Asimismo, atendiendo a criterios de adecuación dimensional y funcional, se optó por emplear como referencia tipologías de pedestal similares a los arrecifes artificiales desarrolladas en los proyectos 3DPare y Ebasar, utilizando los mismos moldes poliméricos impresos en 3D, los cuales tenían un tamaño de 800 mm de diámetro y 880 mm de altura.

2.1.2 Criterios estéticos y selección de motivos escultóricos

Las piezas desarrolladas incorporan un elemento escultórico como componente central. La selección de dichos elementos se ha realizado considerando el carácter marino del caso de estudio y su localización en la Comunidad Autónoma de Cantabria. En consecuencia, se han definido como motivos escultóricos una estela cántabra, una representación del Neptuno cántabro y una figura de sirena.

Entre ellos, se ha seleccionado la Estela Discoidea Gigante de Lombera (CE001124) para su disposición en la parte superior de una de las estructuras. Esta pieza, con un diámetro aproximado de 1,7 metros (Figura 1), se encuentra actualmente expuesta en el Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria. Las estelas cántabras, consideradas un elemento representativo del patrimonio regional Cántabro, se caracterizan por su configuración como discos de piedra tallada con decoración simbólica.



Figura 1. Estela Discoidea Gigante de Lombera (CE001124)

La segunda de las piezas seleccionadas corresponde al Neptuno de Pico Cueto o Neptuno Cántabro (CE001147). Se trata de una escultura que representa una figura humana desnuda de apariencia juvenil, sosteniendo en su mano izquierda un elemento de morfología similar a un delfín. La obra presenta una altura aproximada de 126 cm, está realizada en bronce y, al igual que la anterior, se encuentra conservada en el Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria.

En tercer lugar, se ha seleccionado la representación de una sirena, atendiendo a su tradicional asociación con el medio marino.

2.1.3 Criterios dimensionales

El dimensionamiento de las piezas a fabricar se estableció, atendiendo a las restricciones inherentes a los procesos de fabricación, manipulación y transporte.

Se estableció una limitación en altura total, incluyendo la base y el elemento escultórico, que no podrá superar los 1,30 metros y se fijó un peso máximo de 800 kg por unidad, condicionado por la capacidad operativa de la grúa de la embarcación encargada de las labores de fondeo. De forma complementaria, se estableció un peso mínimo de 500 kg, con el objetivo de mejorar la estabilidad de las piezas una vez instaladas en el lecho marino y minimizar posibles desplazamientos inducidos por las condiciones ambientales.

2.2 Digitalización de las geometrías

El equipo utilizado para llevar a cabo este trabajo de digitalización es el escáner 3D portátil multifunción EinScan pro HD de la compañía Shining 3D.

Se seleccionó un sistema de escaneo 3D basado en tecnología de luz estructurada, debido a su carácter no invasivo, alta resolución y capacidad para capturar detalles finos sin contacto físico. Este tipo de tecnología resulta adecuada para la documentación del patrimonio, ya que permite trabajar con superficies delicadas, reduciendo riesgos de deterioro.

El proceso de digitalización se realizó mediante un enfoque multiángulo, permitiendo capturar la máxima parte de geometría posible. Se realizan múltiples pasadas alrededor de cada pieza, variando la orientación para capturar zonas ocultas y minimizar oclusiones.

Como resultado del proceso de digitalización y del posterior tratamiento de datos, se obtienen mallas tridimensionales cerradas y topológicamente consistentes, con un nivel de detalle condicionado por la resolución de captura y las condiciones del entorno. La geometría final reproduce de forma precisa las características globales de la pieza, manteniendo un equilibrio adecuado entre densidad de malla y eficiencia computacional. En la Tabla 1 pueden apreciarse los principales parámetros de escaneo utilizados.

Tabla 1. Parámetros de escaneo utilizados

	Neptuno Cántabro	Estela de Lombera
Modo	Escaneo HD manual	Escaneo rápido portátil
Alineación	Por características	Por características
Resolución (mm)/ Fotogramas	0,6/ 816	1,4/2223
Número aproximado de puntos	40000	3 millones
Problemas encontrados	Dificultad del escáner para adquirir datos debido a su acabado metálico brillante, que provoca reflexiones indeseadas	Limitaciones de procesamiento debido a la elevada densidad de puntos generada, debida a su gran tamaño y emplear resoluciones altas
Solución	Calibración adecuada del sistema, ajuste de los parámetros de brillo y uso de una velocidad de escaneo reducida	Realizar el escaneo en modo rápido portátil y con resolución media

2.3. Diseño de moldes mediante fabricación aditiva

2.3.1 Tecnología e equipos de impresión (FDM)

La tecnología de fabricación aditiva empleada para la producción de los moldes corresponde al modelado por deposición fundida (FDM), un proceso basado en la extrusión de filamento polimérico fundido a través de una boquilla, mediante el cual el material se deposita de forma controlada capa a capa hasta conformar la geometría final de la pieza.

Para la ejecución de los trabajos de impresión 3D se utilizaron dos equipos con diferentes capacidades operativas. Por un lado, se empleó una impresora Artillery Sidewinder X1, con un volumen

de impresión de $300 \times 300 \times 400$ mm, destinada a la realización de ensayos y a la fabricación de elementos de menor tamaño. Por otro, para la producción de moldes de mayor escala, se utilizó una impresora de gran formato R3Dimensión Cube, con un volumen de trabajo de $1000 \times 1000 \times 1000$ mm, adecuada para la fabricación de componentes de dimensiones superiores.

Para la fabricación de los moldes se seleccionó el ácido poliláctico (PLA) como material, debido a su facilidad de impresión y a su idoneidad para la impresión de piezas o componentes con geometrías de elevada complejidad. De igual modo, la selección del PLA se apoya en la experiencia previa en la fabricación de moldes, por su origen a partir de recursos renovables y por presentar un coste ligeramente inferior al de otros materiales disponibles.

2.3.2 Diseño base/pedestal y elemento escultórico

Como se ha comentado anteriormente, para la fabricación de las bases se decidió utilizar los moldes utilizados para fabricar los 5 arrecifes artificiales del proyecto Ebasar (Figura 2). Esta decisión vino tomada por el adecuado tamaño que tenían en comparación con los requisitos de las obras a realizar en esta ocasión (dimensiones y peso) y por su compatibilidad con el entorno de la costa de Cantabria.



Figura 2. Moldes reutilizables y arrecifes fabricados

Estos moldes reutilizables estaban compuestos por cuatro paredes independientes y treinta y seis piezas, utilizadas para generar los túneles y agujeros, impresos en 3D en PLA, de 800 mm de diámetro y 880 mm de altura.

En el caso de la Estela Cántabra de Lombera, debido a su considerable volumen, se determinó que el empleo de tipologías de arrecife como las previamente descritas no resultaba adecuado como elemento de base. Esta decisión se fundamenta en la reducida superficie de contacto que existiría entre la base y la estela, lo que incrementaría el riesgo de fallo estructural, ya sea por rotura inducida por la acción hidrodinámica de las mareas o por inestabilidad global y por la pequeña área de apoyo sobre el fondo marino, en comparación con la superficie de la estela, lo cual podría producir el vuelco de la pieza.

En consecuencia, se optó por el diseño de un pedestal con una geometría alternativa, caracterizado por una menor altura y una mayor superficie de apoyo sobre el lecho marino, con el objetivo de mejorar la estabilidad del conjunto y reducir la probabilidad de vuelco.

El elemento finalmente adoptado consiste en un ortoedro de 0,35 m de altura, 0,90 m de anchura y 1,00 m de longitud. Para la fabricación de este pedestal, dada su geometría ortoédrica y la presencia de superficies planas, se consideró más adecuada la ejecución mediante encofrado de madera. Esta solución permite un control preciso de las dimensiones finales, así como una correcta definición de las caras, garantizando la calidad geométrica del elemento resultante.

2.3.3 Diseño e impresión del elemento escultórico

Para el diseño del elemento escultórico se empleó el software Geomagic Essentials 2. Mediante esta herramienta se llevó a cabo el procesamiento de las mallas obtenidas por escaneado, incluyendo operaciones de limpieza, corrección de irregularidades geométricas, relleno de discontinuidades, así como el

suavizado y la optimización de la malla. Estas actuaciones se orientaron a mejorar la calidad superficial del modelo, manteniendo en todo momento la fidelidad geométrica de la pieza original.

Una vez validada la consistencia de la malla, se procede a la generación de los moldes, los cuales son de un único uso. En primer lugar, se escala el modelo al tamaño correspondiente a la réplica deseada. Posteriormente, se define el molde mediante la aplicación de un desplazamiento (offset) de la superficie hacia el exterior, con el objetivo de preservar las dimensiones del volumen interno de la pieza.

El valor del offset determina el espesor del molde, el cual debe establecerse de manera específica en cada caso, en función de la geometría y altura de la pieza, así como de las condiciones particulares del proceso de moldeo.

Adicionalmente, en función de las particularidades de cada caso, puede resultar necesario incorporar geometrías auxiliares destinadas a optimizar el proceso de fabricación y ensamblaje. Entre estas se incluyen elementos para facilitar la unión entre piezas o entre secciones del molde, así como la integración de aberturas específicas que permitan el vertido del material, la evacuación del aire o la disposición de elementos de refuerzo, tales como barras, destinados a la correcta conexión y estabilidad del conjunto.

Dado que los moldes están destinados a la fabricación de una única unidad, se optó por soluciones de un solo uso y reducido espesor, con el objetivo de optimizar tanto el consumo de material como los tiempos de producción.

En el caso específico de la estela cántabra, se definió un espesor de molde de 4,8 milímetros, reproduce el grabado en ambas caras y ha sido generado a una escala del 45 % respecto al modelo de referencia. Esta elección se fundamenta en la geometría del modelo, con una altura de 0,75 m y un volumen aproximado de 69 dm³, considerándose suficiente a partir de ensayos previos realizados en condiciones similares. Durante la fase de vertido del mortero, el molde se dispondrá confinado mediante un relleno de arena, actuando a modo de soporte o cimbrado lateral, con el fin de limitar deformaciones y reducir el riesgo de fallo estructural del mismo. El proceso de llenado se realizará en posición vertical, desde la parte superior, a través de una abertura específicamente diseñada para este propósito.

El molde correspondiente al Neptuno Cántabro se diseñó para la fabricación de una pieza de 37 cm de altura, lo que supone un incremento cercano al 300 % respecto al modelo original. A partir de ensayos preliminares, se comprobó que el llenado completo de la cavidad del molde se garantiza disponiendo la pieza en orientación invertida, efectuando el vertido a través de la zona correspondiente a las plantas de los pies. Esta estrategia permite evitar la fabricación en múltiples secciones y la incorporación de aberturas adicionales para el vertido, lo que redundaría en una mejora del acabado superficial final. Asimismo, debido a la geometría de la pieza, fue necesaria la incorporación de estructuras de soporte durante el proceso de impresión del molde en la zona de los brazos.

Para la fabricación mediante impresión 3D del Neptuno Cántabro, se empleó una boquilla de 0,6 mm de diámetro y una altura de capa de 0,3 mm, parámetros que permiten un equilibrio adecuado entre resolución geométrica y tiempos de fabricación.

En el caso del molde de la sirena, este se generó a partir de un modelo no obtenido mediante escaneado; no obstante, el procedimiento de diseño seguido fue análogo al descrito previamente. Se adoptó un espesor de 2,4 mm para el molde, siendo la altura total de la pieza de 40 cm. Debido a la configuración geométrica, particularmente en la zona de la cola, con zonas planas mayoritariamente, y en el brazo superior, fue igualmente necesaria la incorporación de soportes durante el proceso de fabricación.

En estos casos se ha considerado un relleno del 100%, ya que los modelos introducidos en el laminador son del molde con el espesor deseado el cual está compuesto por paredes sólidas.

En la Tabla 2 se recogen algunos de los principales parámetros de impresión, incluyendo la cantidad de material empleado en cada caso, así como el tiempo requerido para completar la impresión.

Tabla 2. Parámetros de impresión utilizados

	Boquilla	Altura de Capa	Soportes	Cantidad (g)	Tiempo de impresión
Estela Cántabra	1,2	0,6	No	4120	1 días 10 horas
Neptuno Cántabro	0,6	0,3	Si	250	15 horas
Sirena	1,2	0,6	Si	745	12 horas

2.4 Fabricación de elementos

2.4.1 Dosificación de mortero

Para la fabricación de las piezas se emplearon dos dosificaciones diferentes de mortero (Tabla 3): un mortero con incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) y un mortero de alta resistencia, destinado a aquellos elementos con geometrías con partes más esbeltas o singulares, susceptibles de presentar un mayor riesgo de rotura.

El mortero de alta resistencia se utilizó en la fabricación del Neptuno Cántabro y la Sirena, con el objetivo de incrementar la capacidad resistente de estas piezas. Esta elección se justifica por la presencia de zonas con secciones reducidas, que podrían resultar especialmente vulnerables frente a acciones mecánicas, tales como impactos o esfuerzos concentrados. De este modo, se persigue garantizar la integridad estructural y la durabilidad de los elementos escultóricos.

El resto de los componentes fueron realizados con mortero con RCD. La selección de este material responde a criterios de sostenibilidad, al incorporar cemento con bajo contenido en clínker y áridos procedentes de hormigón reciclado, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental asociado al proceso constructivo.

Tabla 3. Dosificaciones de mortero utilizadas

Material	Mortero de alta resistencia	Mortero RCD
CEM I 42,5R	1,00	-
Caliza	2,00	-
CEM III/B 32,5	-	1,00
RCD [0-4] (H:14,08%)	-	2,67
Agua	0,40	0,74
S.P. MasterSure 950	0,01	0,01

Nota: Las proporciones indicadas son relaciones de masa estandarizadas con respecto a una unidad de cemento.

2.4.2 Comprobación de dimensiones y peso final

Como puede apreciarse en la Tabla 4, se verifica que todas las configuraciones desarrolladas cumplen con los criterios dimensionales y de peso previamente establecidos, asegurando que las masas estimadas

se ajustan al rango operativo fijado, garantizando tanto la viabilidad de fabricación y transporte como la adecuada estabilidad en condiciones de servicio.

Tabla 4. Parámetros de impresión utilizados

	Volumen (m ³)	Tipo de mortero/ Densidad (kg/ m ³)	Altura (m)	Peso (kg)	Altura total (m)	Peso total (kg)
Pedestal (estela)	0,315	RCD/2050	0,75	645,75	1,10	787,20
Estela Cántabra	0,069	RCD/2050	0,35	141,45		
Arrecife (Neptuno)	0,307	RCD/2050	0,88	629,35	1,25	631,68
Neptuno Cántabro	0,00097	Alta resistencia/2400	0,37	2,33		
Arrecife (sirena)	0,265	RCD/2050	0,64	543,25	1,04	567,11
Sirena	0,00994	Alta resistencia/2400	0,40	23,86		

2.4.3 Proceso de vertido y curado

La fabricación de las piezas correspondientes al Neptuno Cántabro (Figura 3) y la Sirena se llevó a cabo mediante un proceso en dos etapas diferenciadas. En primer lugar, se ejecutaron los elementos escultóricos y, posteriormente, se procedió a la conformación de las bases.

Con el objetivo de permitir el correcto anclaje de las esculturas en las bases, se dispuso un suplemento plástico en la parte inferior del molde para ganar cierta altura y permitir el embebido parcial de las figuras en el mortero de las bases, favoreciendo la estabilidad del conjunto.

Asimismo, los elementos escultóricos fueron reforzados mediante la incorporación de varias barras de fibra de vidrio, de diámetro 8 mm, con el fin de mejorar tanto la resistencia mecánica de las piezas como la calidad de la unión entre las esculturas y sus respectivas bases. Dichas barras se colocaron durante el proceso de moldeo, dejando una longitud libre sobresaliente en la zona de contacto con la base. De este modo, en la fase de ejecución de las bases, las esculturas se posicionan introduciendo los extremos libres de las barras en el mortero fresco, generando una conexión con mayor adherencia.



Figura 3. Proceso de fabricación de las esculturas

El vertido del mortero se realizó con las piezas dispuestas en posición vertical invertida, rodeadas por un lecho de arena que actuó como sistema de cimbrado, contribuyendo a la reducción de tensiones sobre el molde durante el llenado. Este proceso se completó mediante operaciones de varillado cada 5 cm, empleando una barra de pequeño diámetro, con el propósito de garantizar la adecuada compactación del material y la eliminación de oquedades, asegurando así el llenado completo de la cavidad del molde.

El mortero empleado, de alta resistencia, presentó un comportamiento fluido y una adecuada trabajabilidad, lo que facilitó su puesta en obra. Transcurridos siete días desde el vertido, se procedió al desmoldeo de las esculturas. Para esta operación se emplearon herramientas de corte y conformado, tales como multiherramienta rotativa, pistola de calor y soldador de estaño, con el fin de seccionar y reblandecer el material polimérico del molde sin comprometer la integridad de las piezas obtenidas.

Para la fabricación de las bases se empleó el molde correspondiente al proyecto Ebasar, procediéndose al vertido del mortero formulado con residuos de construcción y demolición (RCD). El llenado del molde se realizó de forma progresiva hasta alcanzar la cota de diseño en cada caso.

En el caso del Neptuno Cántabro, el relleno se efectuó hasta la altura máxima del molde. Por el contrario, para la Sirena el vertido se limitó a una altura de 64 cm. En ambos casos, durante el estado fresco del mortero, se introdujo la parte inferior de las esculturas, previamente dotadas de barras de fibra, con el objetivo de garantizar su integración con la base.

Con el fin de controlar la profundidad de embebido y evitar desplazamientos indeseados debidos al peso propio de las piezas, se implementaron sistemas auxiliares de sujeción durante el fraguado, soporte de laboratorio y cabrestante, lo que permitió fijar la posición de las esculturas hasta la adquisición de rigidez suficiente por parte del mortero.

La fabricación de la tercera pieza se llevó a cabo en una única etapa de hormigonado (Figura 4). Para ello, se encofraron de manera conjunta el pedestal y la estela, ejecutando el vertido de forma continua con el objetivo de evitar la formación de una junta fría en la zona de unión, considerada el punto más crítico desde el punto de vista estructural.

Con carácter previo, se realizó un análisis estructural para evaluar la capacidad resistente de dicha unión en el supuesto de ejecución en dos fases. En particular, se estudió el comportamiento de la estela ante situaciones de sollicitación desfavorable. Los resultados obtenidos indicaron que la sección sería capaz de resistir las sollicitaciones incluso en presencia de una junta fría. No obstante, atendiendo a criterios de seguridad y durabilidad, se optó por la ejecución monolítica del conjunto mediante un único proceso de vertido. Adicionalmente, al igual que en las piezas anteriores, se incorporaron barras de refuerzo de fibra de vidrio con el fin de mejorar la capacidad resistente global, en este caso de diámetro 12 mm. Este refuerzo resulta especialmente relevante frente a acciones horizontales, como el empuje directo de corrientes marinas sobre la estela, contribuyendo a incrementar su rigidez y comportamiento estructural en servicio.

Para la fabricación del pedestal se empleó un encofrado de madera, en cuyo interior se dispusieron cuatro elementos destinados a generar cavidades longitudinales tipo túnel. Estos huecos se materializaron mediante tubos de cartón rellenos de arena. Adicionalmente, se dispusieron dos varillas roscadas de 14 mm de diámetro en la parte inferior del pedestal, con el fin de permitir la instalación de cáncamos para las operaciones de izado y manipulación de la estructura de mortero.

El procedimiento de encofrado se inició con el llenado del encofrado correspondiente al pedestal hasta alcanzar su cota superior. Una vez completada esta fase, se instaló una tapa superior de madera (con una abertura en la posición de la estela), que permitió la correcta fijación del molde de la estela y la continuidad del proceso de hormigonado hasta alcanzar la altura total del conjunto, fijada en 1,10 m.

Dicha tapa superior fue anclada mediante tornillería al encofrado inferior y reforzada adicionalmente con elementos auxiliares de madera, tales como tableros y tacos, con el fin de garantizar la estabilidad del sistema frente a las presiones ejercidas por el mortero en estado fresco y el peso de la arena que utilizada. El molde de la estela se sujetó a la base y se aseguró mediante dos eslingas, evitando así posibles desplazamientos o levantamientos debidos al empuje hidrostático del material durante el vertido, así como la aparición de fugas en la interfaz entre ambos encofrados.

Con el objetivo de minimizar deformaciones indeseadas y reducir el riesgo de fallo del molde, se dispuso un sistema de cimbrado mediante arena. Este sistema consistió en el relleno simultáneo y controlado del nivel de mortero en el interior del encofrado y del nivel de arena en el exterior, proporcionando un confinamiento equilibrado de presiones. Para contener la arena se empleó un encofrado modular perimetral, que permitió su correcta disposición y estabilidad durante todo el proceso constructivo.



Figura 4. Fabricación de la estela cántabra

El proceso de desencofrado se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento descrito en los casos anteriores, empleando técnicas y herramientas análogas con el fin de preservar la integridad geométrica y la calidad superficial de las piezas durante su extracción del molde.

Las piezas obtenidas presentan un acabado estético satisfactorio y una baja incidencia de defectos. No obstante, se observan de forma puntual pequeñas oquedades superficiales, del orden de 2 mm, atribuibles a la presencia de microburbujas de aire adheridas a la superficie del molde durante el vertido. Asimismo, se identifican ligeras marcas correspondientes a las líneas de capa propias del proceso de fabricación de los moldes poliméricos. Estas imperfecciones, de carácter superficial, no comprometen el comportamiento mecánico ni la funcionalidad de los elementos fabricados.

2.4 Tratamiento superficial

Con el objetivo de minimizar las marcas derivadas de la altura de capa de los moldes poliméricos empleados, eliminar oquedades superficiales asociadas a la presencia de microburbujas y corregir otros posibles defectos de acabado, se aplicó un tratamiento superficial final sobre las esculturas.

El tratamiento se aplicó exclusivamente sobre las esculturas, excluyendo los pedestales, mediante un sistema anti-biofouling. Este consiste en una imprimación de color blanco, reduciendo la adherencia de organismos marinos (flora y fauna). Por el contrario, las zonas destinadas a la generación de biotopos, localizadas en las bases de las esculturas, no fueron tratadas, con el fin de preservar su funcionalidad ecológica.

3 Resultados

El resultado final del proceso desarrollado son tres piezas de mortero de gran formato, con alturas comprendidas entre 1,10 y 1,25 m y masas que oscilan entre 567 y 787 kg (Figura 5). Cada elemento está constituido por una base diseñada para favorecer la atracción y el asentamiento de vida marina, sobre la cual se dispone una escultura con un marcado carácter visual y temática relacionada con el mar y/o Cantabria, orientada a potenciar el interés para actividades de buceo recreativo. El fondeo de las tres piezas se llevó a cabo en una zona próxima a la costa, dentro de la Bahía de Santander, concretamente en el área comprendida entre la isla de la Torre y la isla de la Horadada.



Figura 5. Resultado final y fondeo

4 Conclusiones

El procedimiento de fabricación adoptado ha permitido obtener piezas con un elevado grado de complejidad geométrica y una notable fidelidad respecto a los modelos digitales de partida. El empleo de moldes poliméricos fabricados mediante técnicas de impresión 3D ha posibilitado la reproducción precisa de geometrías complejas y detalles de difícil ejecución mediante métodos tradicionales. Esta estrategia ha permitido, además, la materialización de las esculturas en mortero, reduciendo costes y plazos de ejecución en comparación con soluciones basadas en procesos artesanales.

En relación con el acabado superficial, las piezas presentan, en términos generales, un resultado satisfactorio, con una baja incidencia de defectos. Las imperfecciones detectadas se limitan principalmente a la presencia puntual de micro oquedades asociadas a burbujas de aire y a las marcas derivadas de las capas inherentes del proceso de fabricación de los moldes. Estas irregularidades, de carácter superficial, pueden ser corregidas o atenuadas mediante tratamientos posteriores en caso necesario.

Desde el punto de vista constructivo, el proceso ha demostrado ser viable tanto técnica como operativamente. La secuencia de fabricación, estructurada en fases claramente definidas de moldeo, vertido y ensamblaje, permite un adecuado control de la ejecución. Adicionalmente, la incorporación de refuerzos de fibra de vidrio, sistemas auxiliares de sujeción durante el fraguado y técnicas de cimbrado mediante arena ha contribuido a garantizar la estabilidad del conjunto y la correcta consolidación del material.

El uso de moldes impresos en 3D presenta ventajas significativas frente a los sistemas tradicionales de encofrado, especialmente en términos de libertad en cuanto a forma, personalización geométrica y optimización de los tiempos de fabricación de geometrías complejas. No obstante, se identifican ciertas limitaciones, tanto técnicas como económicas, entre las que destacan el acceso a equipos de impresión de gran formato, su coste asociado y las restricciones inherentes al propio proceso, como la resolución por capas, que influye directamente en el acabado final de las piezas.

5 Agradecimientos

Los autores desean agradecer a las siguientes empresas su contribución: Candesa, por suministrar el árido calizo; Master Builders Solutions, por suministrar el superplastificante y FibraTec, por suministrar la fibra de vidrio, y al Museo de Prehistoria y Arqueología de Cantabria por facilitar el acceso a las piezas y permitir la realización de los escaneos empleados en este estudio.

6 Financiación

Este estudio forma parte del programa ThinkInAzul, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y por la Comunidad Autónoma de Cantabria, además del proyecto “Tecnologías 3D aplicadas a la conservación del

patrimonio cultural (3DinHerit)", con referencia PID2023-147803OB-I00 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

7 Referencias

- [1] M.J. Forrest, F. Favoretto, Z.A. Nisa, O. Aburto-Oropeza, A deeper dive into the blue economy: the role of the diving sector in conservation and sustainable development goals, *Front. Mar. Sci.* 10 (2023). <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1212790>.
- [2] A. Schuhbauer, F. Favoretto, T. Wang, O. Aburto-Oropeza, E. Sala, K.D. Millage, R.B. Cabral, U.R. Sumaila, A. Hsu, S. Lucrezi, M.N. Tighsazzadeh, M. Plascencia de La Cruz, A.M. Cisneros-Montemayor, Global economic impact of scuba dive tourism, *Cell Reports Sustainability* 2 (2025) 100435. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2025.100435>.
- [3] D.J. Pondella, J.T. Claisse, C.M. Williams, Theory, practice, and design criteria for utilizing artificial reefs to increase production of marine fishes, *Front. Mar. Sci.* 9 (2022). <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.983253>.
- [4] O. Ly, A.I. Yoris-Nobile, N. Sebaibi, E. Blanco-Fernandez, M. Boutouil, D. Castro-Fresno, A.E. Hall, R.J.H. Herbert, W. Deboucha, B. Reis, J.N. Franco, M. Teresa Borges, I. Sousa-Pinto, P. van der Linden, R. Stafford, Optimisation of 3D printed concrete for artificial reefs: Biofouling and mechanical analysis, *Constr. Build. Mater.* 272 (2021) 121649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121649>.
- [5] A. Becker, M.D. Taylor, M.B. Lowry, Monitoring of reef associated and pelagic fish communities on Australia's first purpose built offshore artificial reef, *ICES Journal of Marine Science* 74 (2017) 277–285. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsw133>.
- [6] B. Vivier, J.-C. Dauvin, M. Navon, A.-M. Rusig, I. Mussio, F. Orvain, M. Boutouil, P. Claquin, Marine artificial reefs, a meta-analysis of their design, objectives and effectiveness, *Glob. Ecol. Conserv.* 27 (2021) e01538. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01538>.
- [7] I. Valenzuela Matus, J. Góis, P. Vaz-Pires, J. Lino Alves, Coral Propagation in Substrates Obtained Through Additive Manufacturing: Influence of Mortar Formulations on Seawater Parameters, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 12 (2024) 13721–13740. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c01276>.
- [8] M. Rauch, J. Piedra Dorado, J.-Y. Hascoet, G. Ruckert, A Novel Method for Additive Manufacturing of Complex Shape Curved Parts by Using Variable Height Layers, *Journal of Machine Engineering* (2021). <https://doi.org/10.36897/jme/138820>.
- [9] T. Gil-Lopez, A. Amirfiroozkoohi, M. Valiente-Lopez, A. Verdu-Vazquez, The Impact of 3D Printing on Mortar Strength and Flexibility: A Comparative Analysis of Conventional and Additive Manufacturing Techniques, *Materials* 19 (2026) 212. <https://doi.org/10.3390/ma19010212>.
- [10] X. Chen, Y. Wang, X. Zhu, W. Sheng, L.Y. Chan, Design and construction of high-performance surface textures for precast concrete pavements: A flexible formwork and 3D printing assisted texturing method, *Case Studies in Construction Materials* 22 (2025) e04576. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04576>.
- [11] N. Emami, 3D Printing Plastic Molds for Repeatable Casting of Mortarless Topological Interlocking Assemblies, *Nexus Netw. J.* 27 (2025) 27–49. <https://doi.org/10.1007/S00004-024-00791-Y/TABLES/2>.
- [12] L. Gebhard, J. Burger, J. Mata-Falcón, E. Lloret Fritschi, F. Gramazio, M. Kohler, W. Kaufmann, Towards efficient concrete structures with ultra-thin 3D printed formwork: exploring reinforcement strategies and optimisation, *Virtual Phys. Prototyp.* 17 (2022) 599–616. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2041873>.
- [13] J. Burger, E. Lloret-Fritschi, N. Taha, F. Scotto, T. Demoulin, J. Mata-Falcón, F. Gramazio, M. Kohler, R.J. Flatt, Design and Fabrication of a Non-standard, Structural Concrete Column Using Eggshell: Ultra-Thin, 3D Printed Formwork, in: 2020: pp. 1104–1115. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_105.
- [14] N. Emami, Additive Manufacturing of TPU and Hybrid TPU-PLA Formwork for Custom Repetitive Precast Concrete, *Journal of Architectural Engineering* 30 (2024). <https://doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1764>.