



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



FABRICACIÓN DE ARRECIFES ARTIFICIALES CON MORTEROS SOSTENIBLES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Trabajo realizado por:

Darío Prieto Quintana

Dirigido:

Elena Blanco Fernández

Titulación:

Grado en Ingeniería Civil

Santander, junio de 2020

TRABAJO FIN DE GRADO



Agradecimientos

Mediante estas líneas, me gustaría agradecer, a mi familia, amigos y compañeros todo el apoyo que me han dado para poder seguir adelante.

Agradecer, a mi madre, a mi padre, a mi hermana y a mis perros: Atila, Motas y Firulais, por todo lo que han hecho y por toda su confianza que tenían en mí, aun cuando yo en varios momentos no la tenía.

A mis amigos y amigas por su incondicional apoyo y consejos en estos años. Gracias Lucía, Alejandro, Celia, Tania y Beatriz.

Agradecer también, al grupo GITECO (Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción), de la Universidad de Cantabria y al proyecto de investigación 3DPARE y al equipo de impresión de arrecifes artificiales en la UC, por la posibilidad de realizar este estudio y ahondar más en la impresión 3D. En especial, quiero dar las gracias a mi tutora Elena Blanco Fernández, a Daniel Castro Fresno, Adrián Isidro Yoris Nóbile, Sara Alonso Cañón, Carlos Real Gutiérrez y Carlos José Slebi Acevedo por toda la ayuda, consejos y documentación que me han aportado.

También agradecer a todas las personas que he conocido, porque gracias a ellos soy yo.



RESUMEN

Título: Fabricación de arrecifes artificiales con morteros sostenibles mediante impresión 3D.

Mención: Transportes y Servicios Urbanos.

Autor: Darío Prieto Quintana.

Directora: Elena Blanco Fernández.

Convocatoria: Junio de 2020.

Palabras clave: Arrecifes artificiales, impresión 3D de morteros, extrusión, binder-jetting, prefabricados, análisis de costes, análisis multicriterio.

El presente trabajo se centra en la fabricación de arrecifes artificiales mediante la tecnología de impresión 3D con morteros sostenibles. Debido a la contaminación de los mares y océanos, se está acelerando la pérdida de flora y fauna marina así como la destrucción de los corales. Con el objetivo de tratar de paliar esta pérdida y recuperar la biodiversidad, se ha considerado que la tecnología de impresión 3D puede ser una metodología prometedora de cara a poder fabricar formas caprichosas que, a la postre, pueda mimetizar de alguna manera arrecifes naturales. La tecnología de impresión 3D de morteros aglutina a su vez distintas técnicas, equipos y personal, que influyen en la complejidad de las formas resultantes, pero también en los costes y en el tiempo de impresión. Por tanto, se considera relevante el realizar una comparativa entre técnicas de impresión y compararlas a su vez con la técnica de la prefabricación.

El objetivo de este TFG es realizar una comparativa en cuanto a costes, complejidad de formas y tiempo de impresión de la fabricación de arrecifes artificiales empleando distintas técnicas de impresión 3D y comparándolas con la técnica del prefabricado mediante un encofrado también fabricado mediante impresión 3D.

Para ello, se ha comenzado realizando una búsqueda bibliográfica de los antecedentes en impresión en 3D así como de posibles opciones de impresión que en un futuro podrán ser empleadas. Además, se ha mencionado las diferentes empresas que realizan arrecifes.

Actualmente, las limitaciones en la impresión 3D son diversas. Sin el empleo de materiales auxiliares que permitan simular un relleno, es complejo realizar formas distintas a paredes verticales. Además, dependiendo del modelo de impresora, algunos métodos no están del todo automatizados y, por ello, requieren la presencia de bastante personal.



Con todo ello, se han realizado 4 análisis multicriterio que permiten obtener la forma de impresión que sea la óptima en cada caso. Los criterios analizados han sido: coste de fabricación (salvo personal), tiempo, complejidad de la forma y coste del personal. Para ello se ha realizado una encuesta que se ha enviado a expertos y con las ponderaciones de cada parámetro se ha procedido a emplear 2 métodos y plantear 4 rankings que nos permitan obtener la mejor alternativa en cada estudio.

Finalmente, a modo de conclusión se valorará el empleo de las alternativas estudiadas en función del número de arrecifes que se desee fabricar, así como posibles mejoras de cara a mejorar su automatización. Asimismo, se plantean diversos retos tecnológicos que se podrán abordar en un futuro tales como el desarrollar una impresora multimaterial con varios extrusores, la inclusión de armaduras de forma automatizada y el poder fabricar estructuras de grandes dimensiones, pudiendo competir en costes y plazos con técnicas tradicionales.



ABSTRACT

Title: Artificial reefs 3D printing with sustainable mortars.

Major: Transports and Urban Services.

Author: Darío Prieto Quintana.

Mentor: Elena Blanco Fernández.

Call: June 2020.

Key Words: Artificial reefs, mortar 3D printing, extrusion, binder-jetting, formwork, costs analysis, multi-criteria analysis.

This paper focuses on the artificial reefs 3D printing with sustainable mortars. Due to the pollution of oceans and seas, the loss of marine flora and fauna along with coral destruction is accelerating. In order to palliate this loss and recover biodiversity, 3D printing technology has been considered as a promising methodology to construct whimsical shapes that could eventually imitate natural reefs in some way. Likewise, mortar 3D printing technology agglutinates different techniques, equipment and staff, which have an effect not only on the complexity of the resulting shapes, but also on the printing costs and time. Thus, it is relevant to perform a comparison among printing techniques and, in turn, to compare them with the prefabrication technique.

The aim of this end of the year project is to perform a comparison regarding costs, complexity shapes and printing time of the artificial reefs 3D printing techniques, and comparing them with the prefabricated technique by means of a formwork also constructed with 3D printing.

For that purpose, a bibliographic research has been performed, as to gather background information on 3D printing and of possible printing options, which could be applied in the forthcoming years. Furthermore, different corporations who work in reef construction have been mentioned.

Nowadays, 3D printing limitations are diverse. Without the use of auxiliary material which allows to simulate a filling, it is complex to perform shapes different from vertical walls. Moreover, depending on the printer model, some methods are not fully automated and, for this reason, they require the attendance of lots of staff.



Thus, 4 multi-criteria analyses, which allow to obtain the optimal printing shape in each case, has been conducted. The criteria analysed were: the cost of construction (except staff); the time; the shape complexity, and the cost of staff. For that, a survey has been conducted and sent to professionals and, with the weightings of each parameter, one has proceeded to use two methods and to suggest four rankings which allow to obtain the best alternative in each study.

Finally, the paper concludes valuing the use of the alternatives which were studied according to the number of reefs which will be constructed, together with the possible improvements with a view to improving their automation. Besides, several technological challenges, which could be addressed in the future, are raised: for instance, developing a multi-material printer with several extruders; including steel frames by automated means and succeeding in constructing large-sized structures, being able to compete with traditional techniques in costs and meeting deadlines.

ÍNDICE

Agradecimientos	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	4
Apartado 1: Introducción y objetivo.....	15
Apartado 2: Estado del arte.....	16
2.1. Empleando la técnica de extrusión	17
2.1.1 Impresión mediante brazo robótico.....	17
2.1.2 Impresión mediante impresora delta.....	21
2.1.3 Impresión mediante impresora cartesiana.....	27
2.1.4 Impresión mediante impresora cilíndrica	29
2.1.5 Impresión mediante impresora polar.....	31
2.1.6 Impresión mediante impresora sustentada por cables.....	34
2.2 Empleando la técnica binder-jetting.....	35
2.2.1 Impresión mediante impresora cartesiana modelo ‘D-Shape’	35
Apartado 3: Costes de fabricación de arrecifes artificiales mediante impresión 3D	38
3.1 Impresión mediante brazo robótico	39
3.2 Impresión mediante impresora delta	39
3.3 Impresión mediante impresora cartesiana	40
3.4 Impresión mediante impresora cilíndrica	40
3.5. Impresión mediante impresora ‘D-Shape’	41
Apartado 4: Fabricación de arrecifes artificiales mediante encofrado impreso en 3D	42
4.1. Comparativa del coste del encofrado frente al diámetro del cordón de impresión.....	49
4.2. Comparativa del coste de fabricación de un arrecife mediante impresión en 3D frente al empleo de un encofrado impreso en 3D.....	51
Apartado 5: Fabricación de arrecifes artificiales mediante el moldeo por inyección.....	55
Apartado 6: Análisis Multicriterio.....	56
Apartado 7: Conclusiones	63
Bibliografía	64
Anejo 1: Cálculos realizados para la obtención de los costes de fabricación de arrecifes artificiales mediante impresión 3D.....	66
Análisis mediante impresión 3D	66
Empleando impresora con brazo robótico	67
Empleando impresora delta.....	68
Empleando impresora cartesiana.....	69



Empleando impresora cilíndrica	70
Empleando impresora 'D-Shape'	71
Análisis mediante encofrado impreso en 3D.....	72
Anejo 2: Cálculos realizados para la obtención del análisis multicriterio	74
Análisis mediante el método TOPSIS	74
Análisis mediante el método WASPAS	77
Anejo 3: Arrecifes artificiales convertidos en arte.....	80
Encuesta: Selección de importancia entre 4 criterios	83

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Brazo robot imprimiendo una pieza de plástico en 3D. Fuente: www.3ders.org	17
Ilustración 2: Brazo robótico estirado completamente. Fuente: http://www.studioseed.net/blog/software-blog/bim-software/la-era-3d/	17
Ilustración 3: Arrecife de coral de la empresa 'XtreeE'. Las dimensiones aproximadas son 1,5 x 1,5 x 1,5 m. Fuente: xtreee.eu	18
Ilustración 4: Brazo robótico ABB. Fuente: https://new.abb.com/news/es/detail/25164/avances-en-el-diseno-y-la-fabricacion-de-productos-gracias-a-la-impresion-3d	19
Ilustración 5: Mezcladora Mac-Edil DM-15. Fuente: https://www.mac-edil.com/prodotti/mescolatori/impastatore_dm15/impastatore_dm15.jpg	20
Ilustración 6: Bomba alimentadora. Fuente: http://www.streackertractor.com	20
Ilustración 7: Ejemplo de un robot tipo delta. Fuente: https://info.vinssa.com/robot-paralelo-adept-quattro-s800h	21
Ilustración 8: Ejemplo de una Impresora delta básica. Fuente: https://lamejorimpresora3d.com/impresoras-3d/anet-a4	21
Ilustración 9: Impresora 3D Tipo delta, modelo WASP 3MT. Fuente: https://noumena.io/wasp-3mt/	22
Ilustración 10: Impresión en 3D de un arrecife artificial, en la zona de agujeros intermedios, mediante la impresora tipo delta modelo 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	23
Ilustración 11: Impresión en 3D de un arrecife artificial, en la zona de agujeros superiores, mediante la impresora tipo delta modelo 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	24
Ilustración 12: Arrecife artificial de hormigón finalizado por impresión 3D mediante la impresora tipo delta modelo 'WASP 3MT', en la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	24
Ilustración 13: Arrecife artificial impreso en 3D mediante la impresora tipo delta 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Modelo Random Big - Cement Limestone. Figura 1. Fuente: Propia.....	25
Ilustración 14: Arrecife artificial impreso en 3D mediante la impresora tipo delta 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Modelo: Random Big - Cement Limestone. Figura 2. Fuente: Propia.....	25
Ilustración 15: Impresora 3D tipo delta, modelo 'BigDelta 12m'. Fuente: https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/	26
Ilustración 16: Vista en planta de la impresora 3D tipo delta, modelo 'BigDelta 12m'. Fuente: https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/	26
Ilustración 17: Fotografía de la tolva correspondiente a la impresora 3D 'BigDelta 12m'. Fuente: https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/	26
Ilustración 18: Impresora cartesiana. Fuente: https://www.pccomponentes.com/anet-a8-impresora-3d-escritorio-diy-auto-montaje	27



Ilustración 19: 3 ejes cartesianos interpolados más un eje rotativo sincronizado con el extrusor. Fuente: interempresas.net	27
Ilustración 20: Impresora cartesiana 'The Box Large' de la empresa BLB Industries. Fuente: https://blbindustries.se/the-box-large-2/	28
Ilustración 21: Esquema de movimientos permitidos por las impresoras 3D Cilíndricas, los ejes Y, Z y θ . Fuente: butic.es	29
Ilustración 22: Impresora 3D tipo cilíndrica, modelo 'Crane Wasp' con su diámetro máximo de impresión dibujado en planta. Fuente: https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/	30
Ilustración 23: Adición de 2 impresoras 3D tipo cilíndricas, modelo 'Crane WASP', con sus diámetros máximos posibles de impresión dibujados en planta. Fuente: https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/	30
Ilustración 24: Impresora 3D Polar con una pieza impresa en plástico. Fuente: http://tecnoimpre3d.com/alta/	31
Ilustración 25: Esquema de movimientos permitidos por las impresoras 3D Polares, los ejes r, Z y θ . Fuente: https://alejandro-anv.blogspot.com/2017/03/construyendo-una-impresora-3d-2eleccion.html	31
Ilustración 26: Impresora Theta con 4 cabezales y estructura paralelepípedica. Fuente: https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/	32
Ilustración 27: Detalle de la impresora 3D 'Theta' del eje θ . Fuente: https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/	33
Ilustración 28: Detalle de la impresora 3D 'Theta' del eje r. Fuente: https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/	33
Ilustración 29: Detalle de la impresora 3D 'Theta' del eje Z. Fuente: https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/	33
Ilustración 30: Esquema de una impresora sustentada por cables y poleas. Fuente: butic.es	34
Ilustración 31: Imagen de una impresora sustentada por cables. Fuente: fundaciocim.org	34
Ilustración 32: Impresora 3D cartesiana modelo 'D-Shape' empleando la tecnología 'binder-jetting' Fuente: https://d-shape.com/what-is-it/	36
Ilustración 33: Arrecife artificial impreso en 3D mediante impresora tipo cartesiana modelo 'D-Shape'. Hecho por la empresa Boskalis. Fuente: https://scubadiverlife.com/can-3d-printed-reefs-offer-relief-for-marine-life/	36
Ilustración 34: Ascensor Cermax-600. Fuente: https://www.duijndam-machines.com/es/maquinas/2477/cermax-600k-ascensor/	36
Ilustración 35: Tolva. Fuente: http://acfindustry.com/producto/tolvas/	37
Ilustración 36: Gráfico que muestra los costes de fabricación de un arrecife artificial. Fuente: Propia.	38
Ilustración 37: Ficha técnica del filamento 'Ecogenius PLA'. Fuente: https://www.wasp3d.es/treed-filaments-ecogenius-pla/	43
Ilustración 38: Ficha técnica del filamento 'Gonzales PLA'. Fuente: https://www.wasp3d.es/treed-filaments-gonzales-pla/	43



Ilustración 39: Molde completo impreso en 3D del modelo 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	46
Ilustración 40: Sección del molde correspondiente a una sola cara del arrecife 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	46
Ilustración 41: Sección del molde correspondiente a 2 caras del arrecife 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	47
Ilustración 42: Conjunto de toroides correspondientes al molde del arrecife 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.	47
Ilustración 43: Gráfico de comparación entre coste y diámetro del cordón de impresión del molde para arrecifes de tamaño pequeño. Fuente: Propia.....	49
Ilustración 44: Gráfico de comparación entre coste y diámetro del cordón de impresión del molde para arrecifes de tamaño grande. Fuente: Propia.	50
Ilustración 45: Gráfico que representa el coste de fabricación de varios arrecifes de tamaño pequeño en función de cada tipo de fabricación. Fuente: Propia.	52
Ilustración 46: Gráfico que representa el coste de fabricación de varios arrecifes de tamaño grande en función de cada tipo de fabricación. Fuente: Propia.	54
Ilustración 47: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.....	58
Ilustración 48: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.....	59
Ilustración 49: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.....	60
Ilustración 50: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.....	61
Ilustración 51: 26 Arrecifes artificiales con forma humana cogidos de la mano homenajeando a los esclavos que fueron lanzados al mar. Fuente: https://tataranietos.com/2013/09/17/la-evolucion-silenciosa/	81
Ilustración 52: 'La evolución silenciosa', conjunto de arrecifes artificiales con forma de personas. Se aprecia un submarinista a la derecha visitándolas. Fuente: https://tataranietos.com/2013/09/17/la-evolucion-silenciosa/	81
Ilustración 53: Arrecifes artificiales que representan una lancha motora y a un conjunto de personas en ella. Se observa a un submarinista al fondo. Fuente: Lanzalux.com.....	82
Ilustración 54: Arrecife artificial que representa a una mujer sosteniendo algo entre sus manos. Fuente: https://www.divecollegelanzarote.com	82
Ilustración 55: Arrecife artificial que representa a una mujer que camina mientras sostiene con su mano derecha un objeto que semeja ser un dispositivo tecnológico. Fuente: https://www.divecollegelanzarote.com	82

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Costes de fabricación mediante brazo robótico.....	39
Tabla 2: Costes de fabricación mediante impresora delta.....	39
Tabla 3: Costes de fabricación mediante impresora cartesiana.....	40
Tabla 4: Costes de fabricación mediante impresora cilíndrica.....	40
Tabla 5: Costes de fabricación mediante impresora 'D-Shape'.	41
Tabla 6: Tabla resumen de los costes de fabricación totales de un arrecife artificial mediante cada tipo de impresora.....	41
Tabla 7: Parámetros genéricos de configuración para el diseño del molde.....	45
Tabla 8: Parámetros concretos del molde del arrecife de tamaño pequeño.	45
Tabla 9: Parámetros concretos del molde del arrecife de tamaño grande.....	45
Tabla 10: Coste de fabricación del molde para un arrecife de tamaño pequeño. ...	48
Tabla 11: Coste de fabricación del molde para un arrecife de tamaño grande.....	48
Tabla 12: Coste de fabricación del molde del arrecife de tamaño pequeño en función diámetro del cordón de impresión.	49
Tabla 13: Coste de fabricación del molde del arrecife de tamaño grande en función diámetro del cordón de impresión.	50
Tabla 14: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño pequeño mediante el empleo de un molde impreso en 3D.....	51
Tabla 15: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño pequeño en función del número 'n' que se impriman.....	51
Tabla 16: Coste de fabricación de 'n' arrecifes de tamaño pequeño mediante el empleo de cada tipo.	52
Tabla 17: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño grande mediante el empleo de un molde impreso en 3D.....	53
Tabla 18: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño grande en función del número 'n' que se impriman.....	53
Tabla 19: Coste de fabricación de 'n' arrecifes de tamaño grande mediante el empleo de cada tipo.	53
Tabla 20: Ponderaciones promediadas otorgadas a cada criterio del análisis multicriterio.....	57
Tabla 21: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora. Tabla 1.....	58
Tabla 22: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora óptimo.	58
Tabla 23: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora.	59
Tabla 24: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora óptimo.	59



Tabla 25: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora.	60
Tabla 26: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora óptimo.	60
Tabla 27: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora.	61
Tabla 28: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora óptimo.	61
Tabla 29: Opciones óptimas de fabricación de arrecifes en cada análisis multicriterio.	62
Tabla 30: Opciones pésimas de fabricación de arrecifes en cada análisis multicriterio.	62
Tabla 31: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora. Tabla 2.	74
Tabla 32: Matriz de decisión normalizada empleando el método TOPSIS.	75
Tabla 33: Matriz de decisión normalizada ponderada y los valores de las soluciones ideales positivas y negativas de cada criterio.	75
Tabla 34: Distancia a las soluciones ideales positivas y negativas de cada método de impresión así como su suma y la cercanía relativa de cada alternativa a la solución ideal positiva.	76
Tabla 35: Cercanía relativa de cada alternativa a la solución ideal positiva y el ranking obtenido mediante el método TOPSIS.	76
Tabla 36: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora. Tabla 3.	77
Tabla 37: Matriz de decisión normalizada empleando el método WASPAS.	77
Tabla 38: Matriz de decisión normalizada mediante el modelo de suma empleando el método WASPAS.	78
Tabla 39: Puntuación de rendimiento de la matriz de decisión normalizada mediante el modelo de suma empleando el método WASPAS.	78
Tabla 40: Matriz de decisión normalizada mediante el modelo de potencia empleando el método WASPAS.	78
Tabla 41: Puntuación de rendimiento de la matriz de decisión normalizada mediante el modelo de potencia empleando el método WASPAS.	79
Tabla 42: Puntuación de rendimiento conjunta de cada alternativa.	79
Tabla 43: Puntuación de rendimiento conjunta de cada alternativa así como el ranking obtenido mediante el método WASPAS.	79



Apartado 1: Introducción y objetivo

La contaminación de los mares, el vertido de residuos tóxicos y el incremento de temperatura de los océanos está propiciando la pérdida de la flora y fauna marítima, en especial, está destruyendo los corales. Todo ello supone una pérdida de biodiversidad importantísima, dado que muchos animales marinos desarrollan su hábitat cerca de estos, bien porque se alimentan del plancton que crece en ellos o bien de los peces que habitan cerca de ellos. Se estima que la acidificación de los mares y la disminución del pH de los océanos causados por la absorción de dióxido de carbono han causado pérdidas de millones de dólares a la industria de ostras en los Estados Unidos Americanos. Se estima también que, para finales de siglo la pérdida de biodiversidad le costará a la economía mundial 1 trillón de dólares estadounidenses al año (1).

La pérdida de coral vivo es una realidad en las costas jamaicanas y caribeñas. En Jamaica el descenso fue superior al 70 % en arrecifes someros desde los años ochenta. En 1983, en Panamá, se registró la reducción drástica de casi un 100 % de un organismo arrecifal, el erizo negro "*Diadema antillarum*". Se redujo la presencia de 14.000 a menos de 1 sujeto por hectárea (2).

Los corales son organismos muy susceptibles al estrés y a las variaciones de temperatura. (3). Así se pueden dar períodos de blanqueamiento de corales, como el ocurrido en 2009/2010 durante los eventos de 'El Niño' en las costas brasileñas o como los ocurridos en otros años anteriores, como en el 2005 en las costas cubanas (4).

Dada la posibilidad de ocurrencia de blanqueamiento y deterioro de los corales en las costas de todo el mundo y su importancia para la existencia de diferentes hábitats marinos, urge la creación de nuevas medidas para frenar su deterioro y disminución.

A lo largo de los últimos años, numerosas compañías han investigado diferentes formas de incrementar la biodiversidad de las zonas afectadas. Para ello han diseñado diferentes arrecifes artificiales, con diferentes formas, tamaños y materiales.

Las impresoras 3D han jugado un papel clave en su diseño, debido a la facilidad de poder crear formas orgánicas sin tener que necesitar los clásicos encofrados de madera. Asimismo, la gran variedad de formas de obtener arrecifes artificiales es digna de ser estudiada. Es posible la impresión mediante un brazo robótico, mediante una impresora tipo delta, mediante una cartesiana, mediante una cilíndrica, mediante una de tipo polar o bien mediante la impresora 'D-Shape'.

Este trabajo se va a centrar en analizar las diferentes tipologías de impresión, en realizar una comparativa de costes, basándonos en un arrecife de tamaño grande y otro de tamaño pequeño, complejidad de formas y tiempo de impresión de diferentes técnicas empleadas. Asimismo, compararla con la técnica del prefabricado mediante un encofrado impreso en 3D y posteriormente realizar un análisis multicriterio para permitir valorar la opción óptima en cada caso.



Apartado 2: Estado del arte

En el presente capítulo se va a exponer las diferentes formas posibles de impresión en 3D conocidas hasta la actualidad. En un primer lugar se va a exponer las diferentes formas de imprimir objetos en 3D mediante un amplio abanico de formas posibles. Posteriormente, se va a realizar un análisis de 2 tipologías de impresión: extrusión y ‘binder-jetting’. Asimismo, se estudiará el empleo y funcionamiento de cada tipo de impresora y una empresa que se dedica parcial o completamente a la reproducción de arrecifes artificiales.

Diferentes formas de impresión:

- Binder-jetting o inyección mediante aglutinante: esta técnica comienza con la colocación de una primera capa de polvo a la cual se le añaden pequeñas gotas del agente aglutinante. El polvo se unifica y forma la primera capa de la pieza. Posteriormente, se aplica otra capa de material y otra distribución de gotas. Se repite hasta que la pieza está completamente formada. Las partes que no se hayan unificado se retirarán posteriormente. El material que no ha fraguado puede ser utilizado para piezas posteriores (5).
- Impresión por deposición fundida o FDM (posteriormente denominado por extrusión): consiste en depositar capas del material superpuestas entre sí para conseguir realizar un objeto hueco o relleno (6).
- Estereolitografía o SLA: se emplea un tanque de resina fotopolimérica y mediante un rayo láser UV dibuja la silueta de cada capa sobre la plataforma de la impresora, superponiéndolas hasta llegar a formar un objeto en 3D. Mediante esta técnica se puede llegar a conseguir una alta resolución entre diferentes capas (6).
- Procesamiento de luz digital o DLP: se asemeja a la impresión anteriormente citada, con la única diferencia que la fuente de luz ultravioleta es un proyector o foco LED, en vez de un rayo láser. Permitiendo así fabricar una capa mediante una sola pasada, reduciendo los tiempos de impresión (6).
- Sinterizado selectivo de polvo o SLS: se trata de sinterizar –fusionar pero sin llegar a fundir– un lecho de polímero en polvo. Frecuentemente utilizado para productos industriales (6).
- Fusión selectiva de láser o SLM: se considera un subtipo del método anterior, con la diferencia de que se llega a fundir las partículas del material (6).

2.1. Empleando la técnica de extrusión

2.1.1 Impresión mediante brazo robótico

Este modo de impresión requiere el empleo de un brazo robótico capaz de crear la pieza requerida con la ayuda de una bomba externa suministradora de material y un equipo de mezclado del material a utilizar. Dicho método ofrece la ventaja de poder realizar figuras de grandes dimensiones, dado que el brazo puede estirarse por completo, permite abarcar diámetros ligeramente superiores a los 8 metros y una altura máxima cercana a los 4 metros.



Ilustración 1: Brazo robot imprimiendo una pieza de plástico en 3D. Fuente: www.3ders.org



Ilustración 2: Brazo robótico estirado completamente. Fuente: <http://www.studioseed.net/blog/software-blog/bim-software/la-era-3d/>

Empresas, como por ejemplo 'XtreeE', emplean esta técnica con mucho éxito a la hora de imprimir las piezas.

La técnica empleada consiste en imprimir el arrecife de forma vertical, para que una vez alcanzada la altura deseada, se deje endurecer y finalmente se gire 90° respecto de la horizontal para que lo que era altura pase a ser ancho de la pieza. Para evitar que la estructura pueda volcar en el fondo marino, se le añade un pedestal de hormigón macizo de unos 30 centímetros de altura, que servirá de base.

El pedestal mencionado, se puede fabricar con un encofrado típico de madera en el que se bombee hormigón, se deje fraguar y posteriormente se le acople a la pieza impresa. Únicamente para esta parte, se realizará sin ayuda del brazo robótico porque es mucho más rápido este método de fabricación que la impresión en 3D, dado que el pedestal va a requerir una gran cantidad de hormigón y se podría tardar más de 4 horas en rellenarlo por impresión. Por lo cual, parece lógico pensar que se empiecen a imprimir a la vez los 2 por separado y se junten en algún momento determinado.

A continuación, en la fotografía, podemos observar las cavidades pasantes que presenta la pieza una vez ya finalizada. Debido al tipo de impresión, es complicado crear voladizos, huecos accesibles y demás estructuras orgánicas por el motivo de que el hormigón no endurece al instante como el plástico y por lo tanto, al colocarlo necesitamos una estructura que sirva de apoyo y que luego se pueda eliminar fácilmente.



Ilustración 3: Arrecife de coral de la empresa 'XtreeE'. Las dimensiones aproximadas son 1,5 x 1,5 x 1,5 m. Fuente: xtree.eu

Dado que no está completamente rellena la pieza, a excepción de las partes inferiores, se pueden obtener tiempos de impresión relativamente cortos incluso pudiendo llegar a emplear una bomba que suministre de forma automática el material, llegando así a necesitar a tan solo 2 personas para su elaboración.

De acuerdo a sus videos, a la hora de fabricar un arrecife, se nota la ausencia de personal para su elaboración empleando únicamente el brazo robótico de la empresa ABB y la mezcladora con bomba que permite la alimentación. Únicamente se ve a una persona midiendo el grosor de la mezcla extruida una vez depositada en la capa inferior puntualmente; además de 2 personas fabricando la mezcla (7) (8).



Ilustración 4: Brazo robótico ABB. Fuente: <https://new.abb.com/news/es/detail/25164/avances-en-el-diseno-y-la-fabricacion-de-productos-gracias-a-la-impresion-3d>

El brazo robótico que emplean corresponde al de la empresa ABB, el modelo es ‘IRB 8700’, al cual se le acopla a la cabeza una boquilla para permitir la extrusión del hormigón (9).

Como equipo auxiliar, emplean una mezcladora de la marca ‘Mac-Edil’ modelo ‘DM-15’ en la que se realiza el amasado de forma manual y posteriormente se lleva a través de una manguera hasta el brazo robot (10).



Ilustración 5: Mezcladora Mac-Edil DM-15. Fuente: https://www.mac-edil.com/prodotti/mescolatori/impastatore_dm15/impastatore_dm15.jpg

También, se emplea una bomba con la que se suministra el mortero de forma ininterrumpida a la boquilla extrusora.



Ilustración 6: Bomba alimentadora. Fuente: <http://www.stackertractor.com>

2.1.2 Impresión mediante impresora delta

Las impresoras del tipo delta están basadas en el robot delta, que cuentan con una cama de impresión, que generalmente se mantiene fija. El medio extrusor requiere el empleo de una boquilla para permitir la salida del material, consta de 3 brazos articulados que se deslizan hacia arriba y hacia abajo sobre unas guías verticales en una configuración triangular que corresponde a los ejes X-Y-Z. Dependiendo del lugar donde se posiciona cada brazo, se consigue reproducir el modelo en 3D deseado. Debido a la configuración de la máquina, se limita la altura máxima y el diámetro máximo de impresión (6) .



Ilustración 7: Ejemplo de un robot tipo delta. Fuente: <https://info.vinssa.com/robot-paralelo-adept-quattro-s800h>



Ilustración 8: Ejemplo de una Impresora delta básica. Fuente: <https://lamejorimpresora3d.com/impresoras-3d/anet-a4>

La Universidad de Cantabria (UC) está empleando una impresora correspondiente a esta categoría, concretamente el modelo ‘WASP 3MT’.



Ilustración 9: Impresora 3D Tipo delta, modelo WASP 3MT. Fuente: <https://noumena.io/wasp-3mt/>

Se ha llevado a cabo, la construcción de 36 arrecifes artificiales dentro del proyecto ‘3DPARE’ del que forman parte también la ‘Universidade de Oporto’, el ‘Instituto Português do Mar e da Atmosfera’, la ESITC de Caen y Bournemouth University.

Actualmente, la forma de impresión no está del todo automatizada, como caso concreto voy a tomar el que se ha llevado a cabo. Se emplea, como mínimo, a 3 personas para la elaboración de un único arrecife. No obstante, el número de personas puede elevarse a 5 en ciertos momentos del proceso.

Los arrecifes impresos poseen un cuerpo relleno de mortero además de contar con voladizos y estructuras internas huecas. Para su correcta impresión se requiere el empleo de la propia mezcla así como de arena para poder simular la altura necesaria para que el material se pueda depositar en la posición que le corresponde y cree correctamente los agujeros pasantes, huecos accesibles... Además, gracias a la colocación de arena, se consigue que la presión se pueda repartir uniformemente por toda la estructura sin tener pequeñas concentraciones puntuales de altas presiones, que puedan llegar a derrumbar ciertas partes de la pieza impresa.

Para que la mezcla llegue de forma paulatina, es necesario que 2 personas estén fabricando la mezcla de manera continua. Se tendrán en cuenta los momentos en los que la pieza no requiere de tanta mezcla para dejar la producción a un ritmo inferior, con el fin de que no se acumule material y pierda trabajabilidad la mezcla.

Dos personas serán necesarias para verter arena además de simular una capa de relleno con ésta. Debido a que necesitan proveerse de arena de forma constante y de manera ininterrumpida, este será el trabajo en el que no debe haber tiempos muertos.

La arena deberá situarse en la zona externa del arrecife para que, cuando la impresión llegue a una capa en la que necesite la arena para hacer de base, esta esté colocada de forma horizontal y lisa. Asimismo, estas personas pueden ir vertiendo la mezcla al arrecife a modo de relleno en las capas que así lo solicite la pieza.

Por último, una persona será la encargada de alimentar constantemente la tolva de la impresora 3D y de modificar los parámetros de la impresora en función del tipo de consistencia de la mezcla. Debido al modelo de impresora, formato de impresión y demás parámetros, el software del que se dispone actualmente no contempla la opción de hacer retroceder la impresión, solamente se puede parar y continuar o bien parar definitivamente la impresión. Todos estos motivos justifican la necesidad de una única persona para controlar la impresora y verter de forma constante la mezcla a la tolva. No obstante, esto no quita de que dicha persona ayude a verter arena y mezcla al arrecife, puesto que existen intervalos de tiempo en los que solamente se vierta material a la tolva y se rellene de arena y de mortero.



Ilustración 10: Impresión en 3D de un arrecife artificial, en la zona de agujeros intermedios, mediante la impresora tipo delta modelo 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.

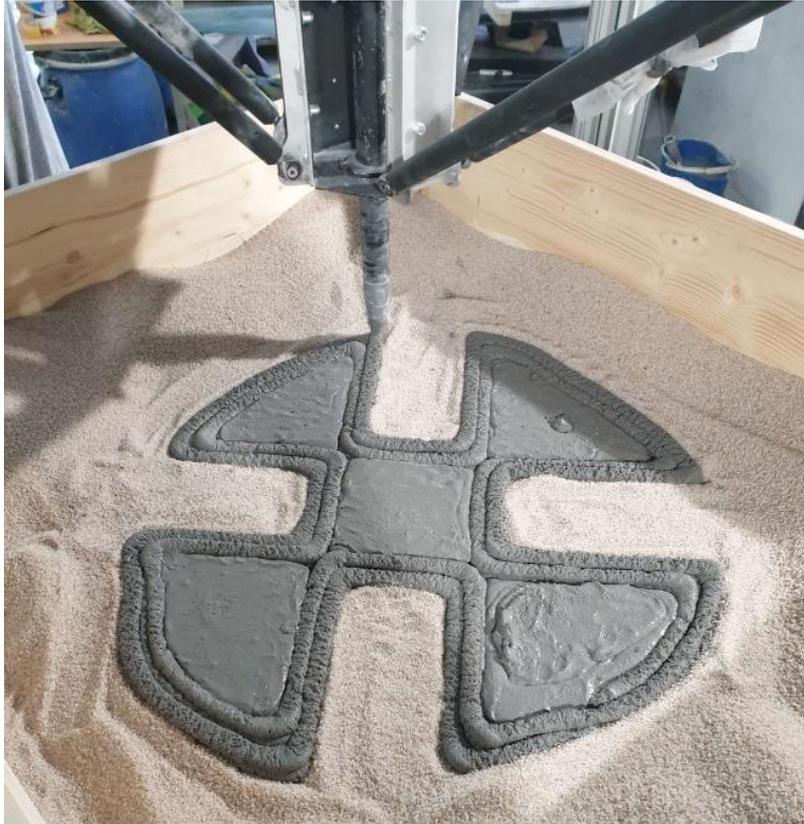


Ilustración 11: Impresión en 3D de un arrecife artificial, en la zona de agujeros superiores, mediante la impresora tipo delta modelo 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.



Ilustración 12: Arrecife artificial de hormigón finalizado por impresión 3D mediante la impresora tipo delta modelo 'WASP 3MT', en la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.



Ilustración 13: Arrecife artificial impreso en 3D mediante la impresora tipo delta 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Modelo Random Big - Cement Limestone. Figura 1. Fuente: Propia.



Ilustración 14: Arrecife artificial impreso en 3D mediante la impresora tipo delta 'WASP 3MT' en la Universidad de Cantabria. Modelo: Random Big - Cement Limestone. Figura 2. Fuente: Propia.

Otro modelo empleado de la impresora tipo delta, es la impresora 'BigDelta WASP 12m' que pertenece también a la empresa WASP. Es la impresora 3D más grande en el mundo que existe a día de hoy con unas dimensiones de 12 metros de alto y 7 metros de ancho. Todas las piezas de la impresora tienen un tamaño máximo de 3 metros para poder ser fácilmente transportadas y colocarlas formando diferentes módulos.

Esta impresora es capaz de imprimir piezas de mayores dimensiones, a diferencia del resto de impresoras de tamaño más convencional, por ello, el tamaño de estas piezas puede ser muy superior al metro y medio de altura.

Además, las primeras pruebas realizadas fueron estructuras autosustentables mediante materiales de origen natural como la arcilla o la tierra vegetal junto a paja. Afirman también la posibilidad de utilizar hormigón y geopolímeros, como sus impresoras más pequeñas (11) .



Ilustración 15: Impresora 3D tipo delta, modelo 'BigDelta 12m'. Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>



Ilustración 16: Vista en planta de la impresora 3D tipo delta, modelo 'BigDelta 12m'. Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>



Ilustración 17: Fotografía de la tolva correspondiente a la impresora 3D 'BigDelta 12m'. Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>

2.1.3 Impresión mediante impresora cartesiana

Las impresoras cartesianas son el tipo de impresión más común en el mercado por su versatilidad y su mayor precisión que otorgan. Su modo de impresión es gracias a un sistema de coordenadas dimensionales ortogonales, ejes X-Y-Z, que son utilizados para determinar la localización del cabezal de impresión. El movimiento en el eje Z se debe a la cama caliente, mientras que los otros 2 lo realiza el extrusor de material.

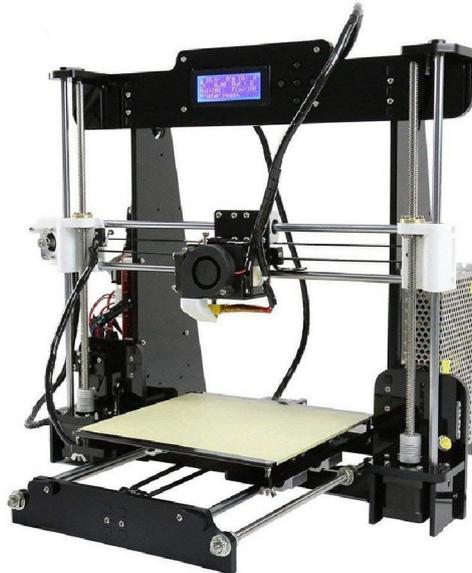


Ilustración 18: Impresora cartesiana. Fuente: <https://www.pccomponentes.com/anet-a8-impresora-3d-escritorio-diy-auto-montaje>

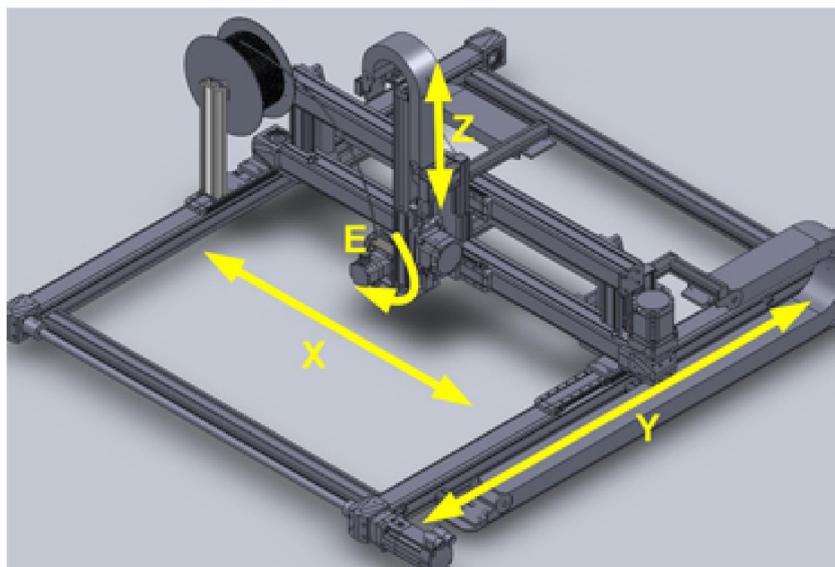


Ilustración 19: 3 ejes cartesianos interpolados más un eje rotativo sincronizado con el extrusor. Fuente: interempresas.net

Sin embargo, actualmente, no hay constancia de empresas que empleen este tipo de impresión.



Para los cálculos posteriores se va a considerar el empleo de la impresora cartesiana 'The Box Large' de la empresa BLB Industries, con los correspondientes cambios para poder imprimir morteros. Dicha impresora puede imprimir piezas con tamaño máximo de 2.000 x 2.000 x 1.500 mm, lo que permitiría fabricar arrecifes de diferente tamaño con un peso máximo de 1.000 kg.



Ilustración 20: Impresora cartesiana 'The Box Large' de la empresa BLB Industries. Fuente: <https://blbindustries.se/the-box-large-2/>

2.1.4 Impresión mediante impresora cilíndrica

Las impresoras 3D cilíndricas son impresoras que se asemejan a las grúas de obra por la dotación de ejes que poseen: 2 ejes lineales (Eje Y, Z) y un eje de rotación (Eje θ).

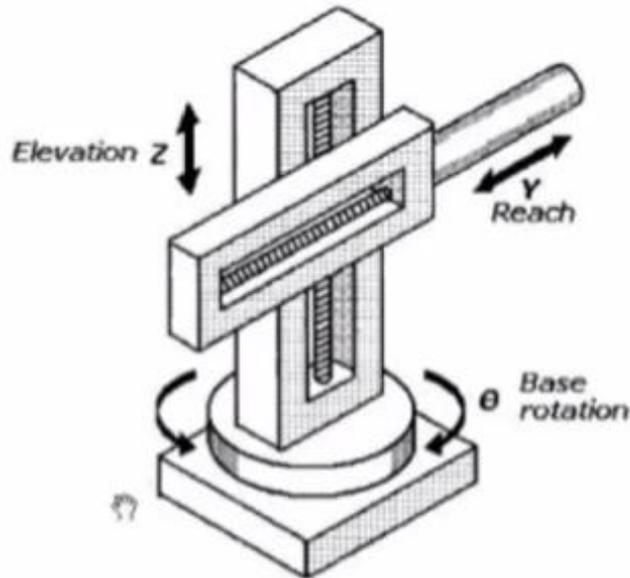


Ilustración 21: Esquema de movimientos permitidos por las impresoras 3D Cilíndricas, los ejes Y, Z y θ . Fuente: butic.es

Un modelo de impresora comercializada, por la empresa WASP, es la 'Crane WASP'. Con ella se puede imprimir piezas de un diámetro máximo de 6,60 metros y hasta una altura máxima de 3,00 metros. La configuración de la impresora es simple: 3 brazos unidos entre sí por el centro, del cual sale la impresora en sí. Con ello, es posible adicionar más impresoras para poder cubrir un área mayor como se verá en las ilustraciones posteriores (Ilustración 23) (12) .

Dado que en este momento no hay información acerca de su empleo en la fabricación de arrecifes artificiales, puede ser posible su implantación de una forma bastante sencilla, que sería cambiando la boquilla extrusora por una que sea resistente al mortero permitiendo crear arrecifes con unas dimensiones superiores frente a otros sistemas; con la limitación de la altura máxima anteriormente mencionada.

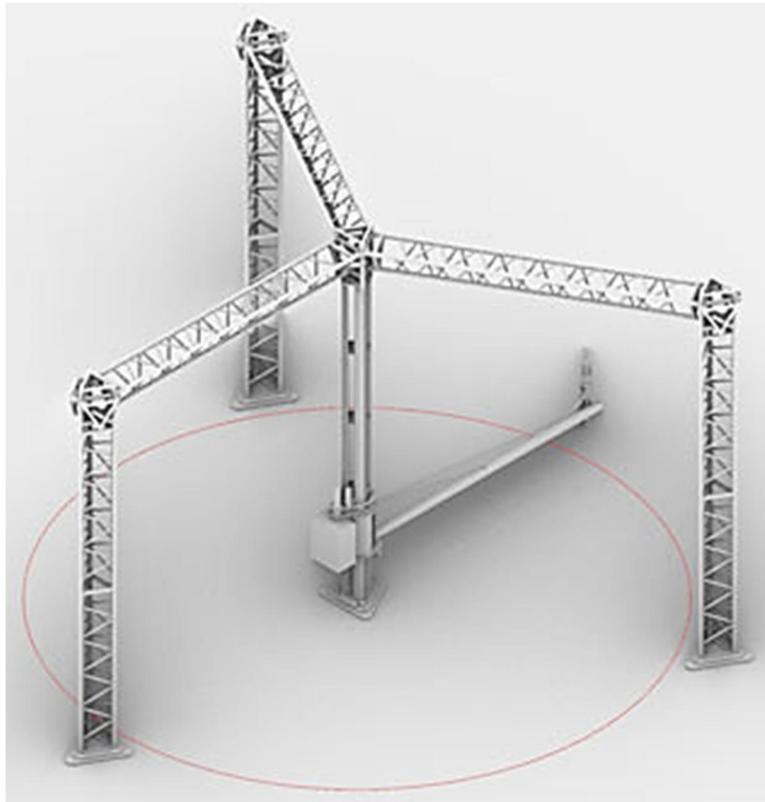


Ilustración 22: Impresora 3D tipo cilíndrica, modelo 'Crane Wasp' con su diámetro máximo de impresión dibujado en planta. Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>

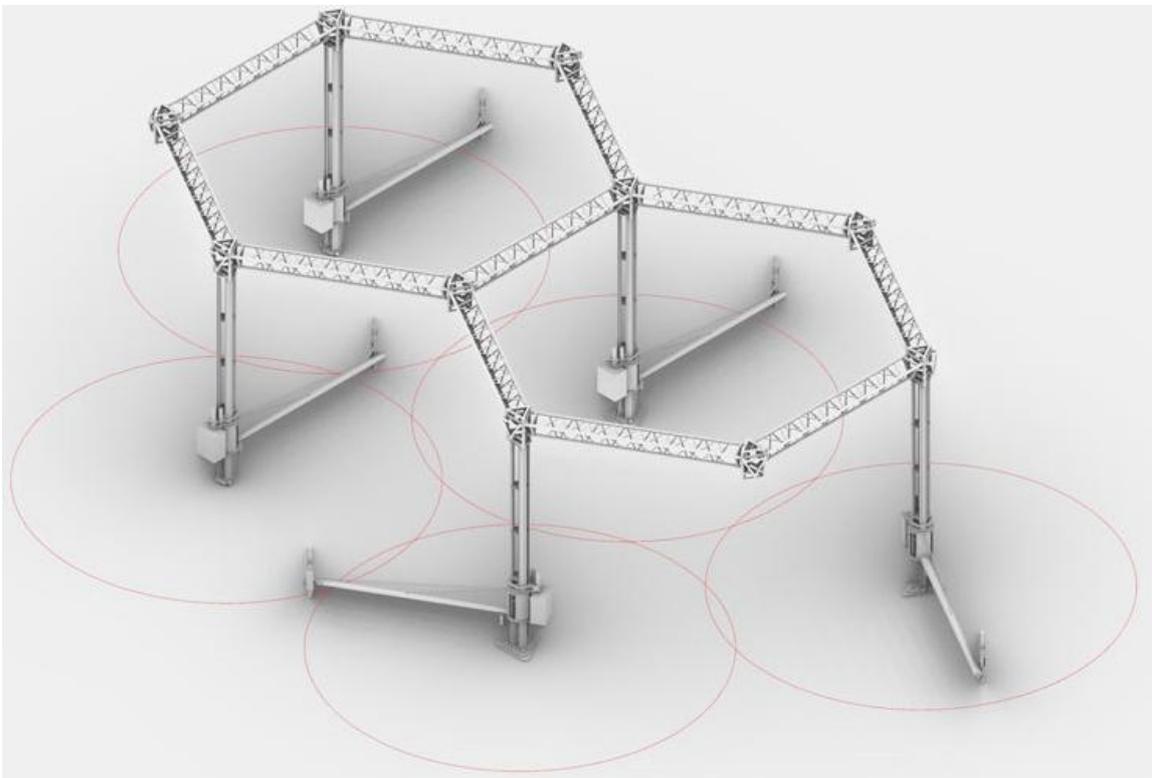


Ilustración 23: Adición de 2 impresoras 3D tipo cilíndricas, modelo 'Crane Wasp', con sus diámetros máximos posibles de impresión dibujados en planta. Fuente: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>

2.1.5 Impresión mediante impresora polar

Las impresoras 3D que emplean las coordenadas polares, son otro tipo de impresión mucho menos conocido que el resto. Emplean las coordenadas polares: r (distancia al origen), θ (ángulo respecto al eje OX) y Z. Utilizan una boquilla extrusora junto a un plato de extrusión circular capaz de rotar en un sentido o en 2. Este diseño hace que sea posible reducir a la mitad la distancia que la extrusora necesita para moverse.



Ilustración 24: Impresora 3D Polar con una pieza impresa en plástico. Fuente: <http://tecnoimpre3d.com/alta/>

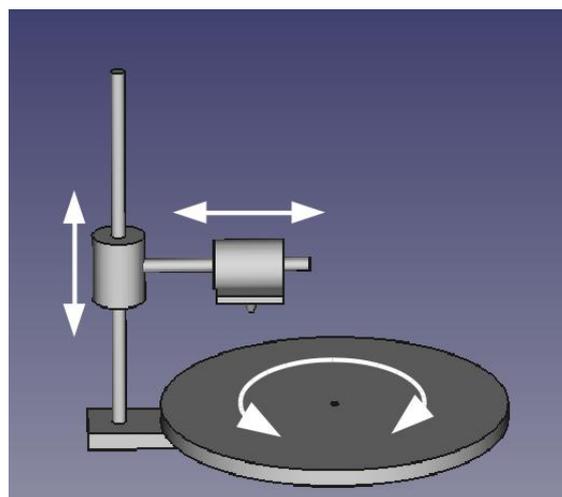


Ilustración 25: Esquema de movimientos permitidos por las impresoras 3D Polares, los ejes r , Z y θ . Fuente: <https://alejandro-anv.blogspot.com/2017/03/construyendo-una-impresora-3d-2eleccion.html>

En enero de 2013, un usuario de la plataforma RepRap con alias ‘unlimitedbacon’ presentó su impresora 3D polar para el concurso que realizaba el sitio web ‘Hackaday’, la cual llamó ‘Theta’. Realizó una mejora de la impresora 3D polar básica incorporando hasta 4 cabezales de extrusión aunque su idea inicial era encontrar una forma de imprimir con más de un cabezal o 2 (13).

Con el empleo de hasta 4 cabezales, se conseguiría emplear 4 materiales o colores diferentes, o bien realizar 4 piezas distintas a la vez. El propósito de esta impresora es imprimir en 3D figuras en plástico, dado que las dimensiones no están pensadas para realizar piezas de gran tamaño.

Su modelo conforma una base cuadrada en planta y un rectángulo visto desde el alzado.

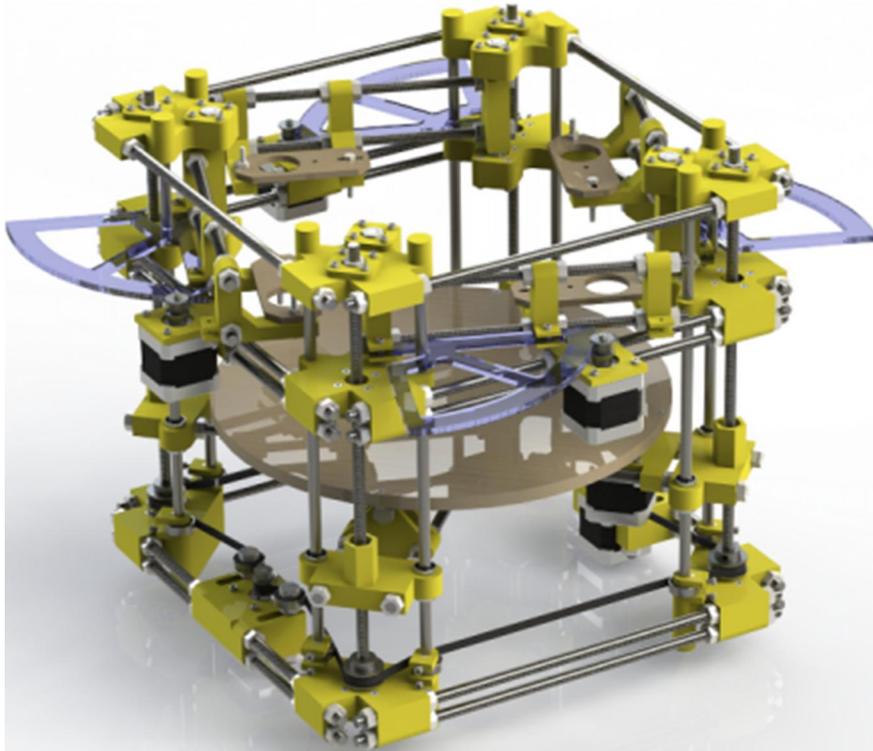


Ilustración 26: Impresora Theta con 4 cabezales y estructura paralelepípedica. Fuente: <https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/>

Si bien está pensado para imprimir plástico, las ventajas que presenta puede ser extrapolado a otros materiales como por ejemplo: la reducción de tiempo de impresión al dividir la pieza en más partes; la presencia de menos masa en movimiento, lo que conlleva a una mejor aceleración y velocidad de impresión así como un acabado más fino.

Al ser un prototipo, tampoco hay constancia del empleo de esta tipología de impresión en la actualidad. No obstante, se deja abierta la posibilidad a que en un futuro se pueda perfeccionar este modelo y se permita el empleo de otro tipo de materiales como el mortero.

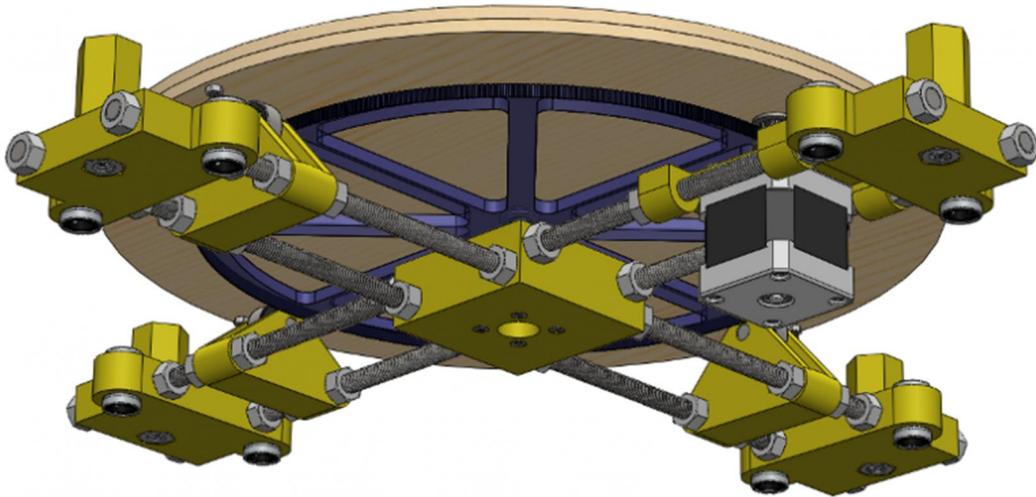


Ilustración 27: Detalle de la impresora 3D 'Theta' del eje θ . Fuente: <https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/>

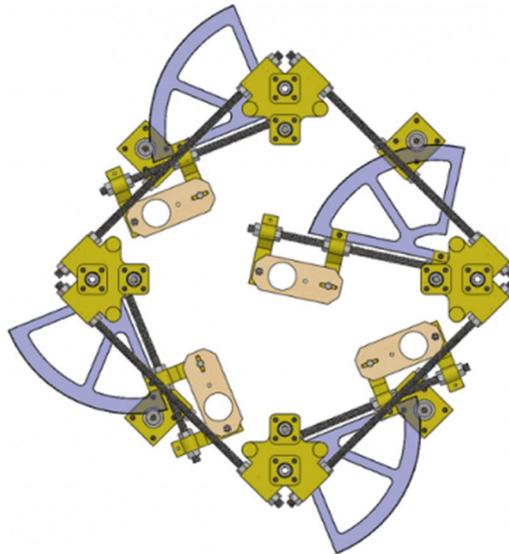


Ilustración 28: Detalle de la impresora 3D 'Theta' del eje r . Fuente: <https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/>

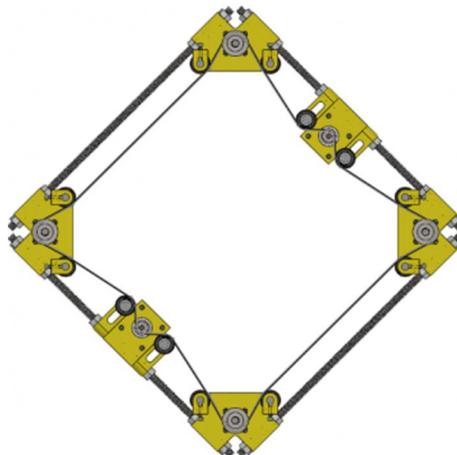


Ilustración 29: Detalle de la impresora 3D 'Theta' del eje Z . Fuente: <https://github.com/unlimitedbacon/Theta-Printer/>

2.1.6 Impresión mediante impresora sustentada por cables

Las impresoras sustentadas por varios cables, son el modelo más novedoso y menos convencional de impresión en 3D. Esta metodología permite abarcar superficies muy amplias y alcanzar alturas cercanas a los 2-3 metros. Para ello, emplea 8 cables que la permiten elevarse sobre la superficie y moverse en los ejes X, Y, Z; mediante el empleo de poleas. Su libertad de movimientos, se asemeja a las impresoras cartesianas.

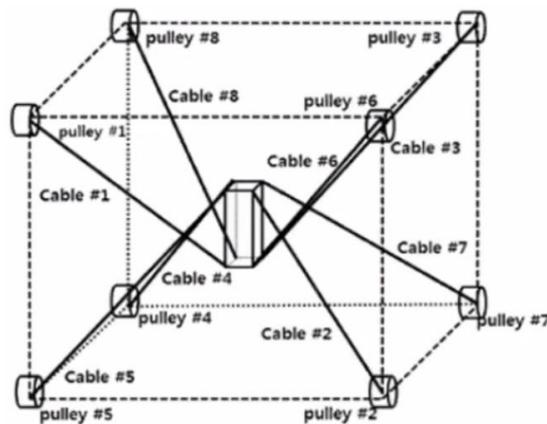


Ilustración 30: Esquema de una impresora sustentada por cables y poleas. Fuente: butic.es

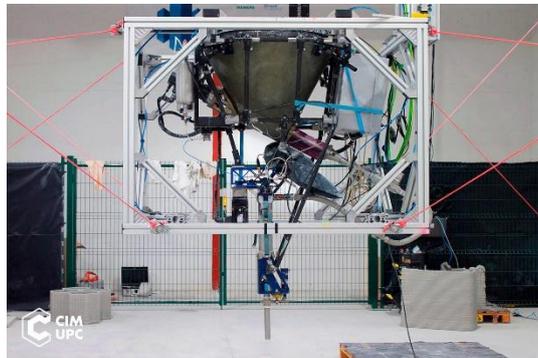


Ilustración 31: Imagen de una impresora sustentada por cables. Fuente: fundaciocim.org

Resulta llamativo ver el núcleo de la impresora flotando, pero gracias a su forma de sustentación, permite moverse sin peligro de caída o vuelco. Las ventajas de este diseño son el diseño simple que posee y la alta dinámica del sistema.

Al ser una tipología de impresión bastante reciente, apenas existe bibliografía relacionada con su empleo. Por ello, sería interesante explorar las opciones que nos podría ofrecer próximamente.



2.2 Empleando la técnica binder-jetting

2.2.1 Impresión mediante impresora cartesiana modelo 'D-Shape'

Como se mencionó al comienzo del presente apartado, la impresora cartesiana cuyo modelo es 'D-Shape' pertenece al grupo de impresoras que emplean la técnica binder-jetting.

'D-Shape' es capaz de crear arrecifes artificiales o materializar edificios o bloques de construcción. Visto desde el exterior, su forma se asemeja a una estructura con forma pórtica que soporta un marco periférico elevado a lo largo de 4 columnas. En el marco hay 2 pórticos, uno que distribuye y extiende el material y otro que expulsa las gotas con aglomerante mediante unas electroválvulas y con ello consigue que la estructura se sustente por sí misma durante el proceso de construcción y posteriormente, una vez finalizado todo el proceso.

El distribuidor de material emplea un motor permitiendo que se alimente del material granular desde el suelo, mientras que el cabezal de impresión es alimentado por un tanque y un sistema hidráulico. Además, un ordenador supervisa todas las operaciones. El proceso permite que pueda ser automática la impresión pero es necesaria la presencia de un operador y algún asistente. Así, pueden monitorear y comprobar visualmente el proceso, garantizando la calidad del proceso de fabricación y la eficiencia de la máquina (14).

Por ello, la tecnología de 'D-Shape' sería superior a los modos de construcción y fabricación tradicionales en los aspectos de calidad, tiempo, coste y seguridad (15).

Una empresa muy importante en este sector es 'Boskalis', compañía holandesa de dragado la cual construye arrecifes artificiales con arena dragada del lugar donde se colocarán posteriormente. En concreto, con arena de dolomita en combinación con un agente aglutinante marino.

La empresa tiene experiencia previa en arrecifes artificiales, en restauración de hábitats y en reubicar corales, como lo hicieron por ejemplo en Jamaica. Han estado trabajando en 2016 en un proyecto apoyado por la 'Fundación Príncipe Alberto II de Mónaco' con el objetivo de fabricar 6 arrecifes y sumergirlos en las costas próximas a Mónaco. Las dimensiones de cada arrecife fueron de 2 metros de diámetro, 1 metro de alto y un peso cercano a los 2.500 kg cuando estuvo seco (16).

Las primeras pruebas realizadas por 'Boskalis', fueron con cemento Sorel, un tipo de cemento no hidráulico, que debe su nombre a su creador, Frenchman Stanislas Sorel (17). El resultado de la inmersión no fue del todo concluyente, dado que se llegaban a descomponer con el paso del tiempo una vez sumergidos en el fondo del mar. Su composición es: 84% arena de dolomita y 16% óxido magnésico. Este tipo de cementos es apto para interiores pero no para exteriores (18).



Ilustración 32: Impresora 3D cartesiana modelo 'D-Shape' empleando la tecnología 'binder-jetting' Fuente: <https://d-shape.com/what-is-it/>



Ilustración 33: Arrecife artificial impreso en 3D mediante impresora tipo cartesiana modelo 'D-Shape'. Hecho por la empresa Boskalis. Fuente: <https://scubadiverlife.com/can-3d-printed-reefs-offer-relief-for-marine-life/>

Para lograr un flujo continuo de material, emplean como equipo auxiliar el ascensor 'Cermax 600', el cual consigue verter la arena hacia unas tolvas para posteriormente ser empleadas en el proceso de impresión.



Ilustración 34: Ascensor Cermax-600. Fuente: <https://www.duijndam-machines.com/es/maquinas/2477/cermax-600k-ascensor/>

El segundo equipo auxiliar, ya mencionado, son las tolvas en las que almacena el material y se distribuye de forma paulatina haciendo la función de embudo –por la forma que presenta la sección que converge–. La tolva que emplean es similar a la que aparece a continuación en la ilustración 35.



Ilustración 35: Tolva. Fuente: <http://acfindustry.com/producto/tolvas/>

Apartado 3: Costes de fabricación de arrecifes artificiales mediante impresión 3D

Mediante la impresión en 3D con morteros sostenibles es posible fabricar arrecifes de forma artificial. Debido a la gran variedad de tipologías de impresión, es posible realizar un análisis de costes con cada uno. Así, se ha valorado la posibilidad de fabricar arrecifes de pequeño tamaño (aproximadamente 800 x 800 x 770 mm) y de gran tamaño (aproximadamente 1.500 x 1.500 x 1.444 mm).

Para ello se van a tener en cuenta unos criterios generales de aplicación a los casos analizados.

El coste de elaboración de un arrecife artificial se considerará únicamente mediante el coste de fabricación. Ciertamente, podría incluirse el coste de transporte y coste de fondeo, pero no se podría considerar un valor único, dado que depende de las empresas correspondientes fijar una tarifa en función de la distancia y el número de piezas.

El coste de fabricación se subdivide en: coste del material, coste del material auxiliar, coste de personal y coste de la maquinaria. Éste último será la suma del coste de amortización y el coste por operación.

Para su posterior comparación, ciertas variables se han fijado para todas las modalidades con el mismo valor o mismo porcentaje de aplicación. Estas son: vida útil = 10 años; horas de empleo al año = 1.000; coste por cada persona trabajando = 10 €/h; coste de la luz = 0,4 €/h; coste de mantenimiento = 30 % del coste de amortización. Así, el coste de operación resulta ser la suma del coste de la luz y del coste de mantenimiento (se excluye el coste del personal).

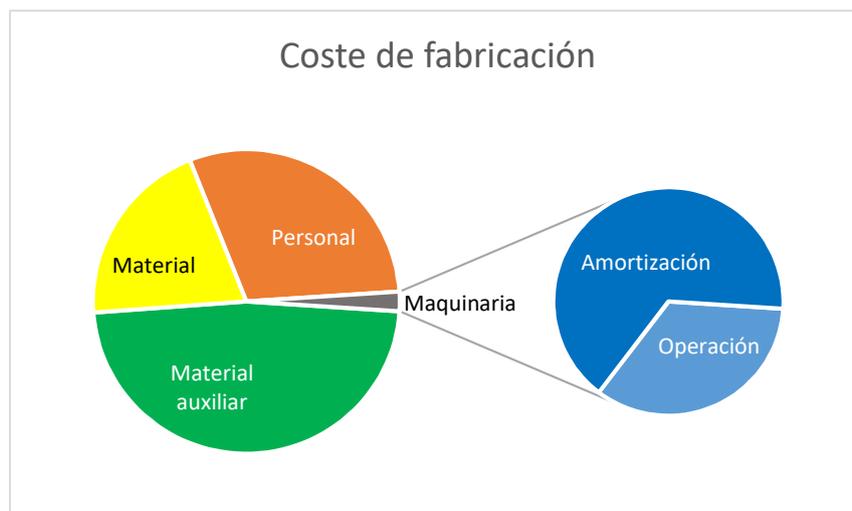


Ilustración 36: Gráfico que muestra los costes de fabricación de un arrecife artificial. Fuente: Propia.

En este análisis no se ha tenido en cuenta la impresión mediante las impresoras de tipo polar y sustentada por cables debido a la poca información existente en la actualidad.



3.1 Impresión mediante brazo robótico

Se ha tomado para el cálculo de la impresión mediante brazo robótico:

Coste de la impresora y de equipos auxiliares, considerando mezcladora y bomba alimentadora = 28.000 €.

	Arrecife pequeño	Arrecife grande
Coste del material	55,00 €	82,50 €
Coste del material auxiliar	180,00 €	405,00 €
Coste del personal	80,00 €	400,00 €
Coste de amortización	11,20 €	56,00 €
Coste de operación	4,96 €	24,80 €

Tabla 1: Costes de fabricación mediante brazo robótico.

Para un arrecife de tamaño pequeño se obtiene que el coste de fabricación empleando un brazo robot alcanza a: 331,16 €. (Tabla 1).

Y para el arrecife de tamaño grande alcanza a: 968,30 €.

3.2 Impresión mediante impresora delta

Para la impresión mediante impresoras 3D tipo delta, se ha considerado:

Coste de la impresora = 18.000 €. No se incluye ni mezcladora ni bomba alimentadora.

	Arrecife pequeño	Arrecife grande
Coste del material	25,41 €	127,05 €
Coste del material auxiliar	180,00 €	405,00 €
Coste del personal	320,00 €	1.880,00 €
Coste de amortización	14,40 €	84,60 €
Coste de operación	7,52 €	44,18 €

Tabla 2: Costes de fabricación mediante impresora delta.

Se obtiene que el coste de fabricación para un arrecife pequeño asciende a: 547,33 €. (Tabla 2).

Y el coste de fabricación de un arrecife grande es de: 2.540,83 €.

3.3 Impresión mediante impresora cartesiana

En el caso de impresión mediante impresoras 3D cartesianas, se ha tomado el siguiente valor:

Coste de la impresora y de equipos auxiliares, considerando mezcladora y bomba alimentadora = 65.000€

	Arrecife pequeño	Arrecife grande
Coste del material	55,00 €	82,50 €
Coste del material auxiliar	180,00 €	405,00 €
Coste del personal	160,00 €	400,00 €
Coste de amortización	52,00 €	130,00 €
Coste de operación	18,80 €	47,00 €

Tabla 3: Costes de fabricación mediante impresora cartesiana.

Por lo tanto, para un arrecife de tamaño pequeño se alcanza un coste de: 465,80 €. (Tabla 3).

Y para un arrecife de tamaño grande de: 1.064,50 €.

3.4 Impresión mediante impresora cilíndrica

Para la impresión mediante impresoras 3D del tipo cilíndrico, se ha considerado:

Coste de la impresora = 22.000 €. No se incluye ni mezcladora ni bomba alimentadora.

	Arrecife pequeño	Arrecife grande
Coste del material	25,41 €	127,05 €
Coste del material auxiliar	180,00 €	405,00 €
Coste del personal	160,00 €	940,00 €
Coste de amortización	17,60 €	103,40 €
Coste de operación	8,48 €	49,82 €

Tabla 4: Costes de fabricación mediante impresora cilíndrica.

Así, el coste de fabricación para un arrecife pequeño asciende a: 391,49 €. (Tabla 4).

Y el coste fabricación de un arrecife grande es de: 1.625,27 €.



3.5. Impresión mediante impresora ‘D-Shape’

Para la impresión mediante la técnica ‘binder-jetting’ que emplea la impresora ‘D-Shape’, se ha tomado:

Coste de la impresora y de equipos auxiliares, considerando el empleo de la tolva y del ascensor que proporciona material de forma constante = 254.000 €

	Arrecife pequeño	Arrecife grande
Coste del material	2.000,00 €	3.000,00 €
Coste del material auxiliar	180,00 €	405,00 €
Coste del personal	400,00 €	1.000,00 €
Coste de amortización	203,20 €	508,00 €
Coste de operación	64,16 €	160,40 €

Tabla 5: Costes de fabricación mediante impresora ‘D-Shape’.

Finalmente, se obtiene que el coste de fabricación de un arrecife de tamaño pequeño es de: 2.847,36 €. (Tabla 5).

Y para un arrecife de tamaño grande de: 5.073,40 €.

Por último, se muestra una tabla a modo de resumen (Tabla 6), para permitir una comparación de forma más visual.

Así pues, se ve que a la hora de fabricar un arrecife de tamaño pequeño, considerando única y exclusivamente el criterio de coste, la opción más económica sería mediante impresora cilíndrica, mientras que la menos económica sería mediante la ‘D-Shape’.

En cambio, analizando el arrecife artificial de tamaño grande, aquel cuyo coste es menor sería mediante la de tipo cartesiana y la menos económica es también mediante la impresora tipo ‘D-Shape’.

	Arrecife pequeño	Arrecife grande
Brazo robot	331,16 €	968,30 €
Delta	547,33 €	2.540,83 €
Cartesiana	465,80 €	1.064,50 €
Cilíndrica	391,49 €	1.625,27 €
D-Shape	2.847,36 €	5.073,40 €

Tabla 6: Tabla resumen de los costes de fabricación totales de un arrecife artificial mediante cada tipo de impresora.

Apartado 4: Fabricación de arrecifes artificiales mediante encofrado impreso en 3D

Para realizar un encofrado, es posible emplear una impresora 3D que imprima PLA reciclado y que pueda ser empleada en la reproducción de figuras que presenten formas más sinuosas.

El PLA o ácido poliláctico, es un material que se deriva de materias primas naturales y renovables, como puede ser el maíz, que pertenece a la familia de los poliésteres, siendo un polímero sintético. La glucosa que se extrae de las plantas a través del almidón se convierte en dextrosa mediante la adición de enzimas. Mientras es fermentado por microorganismos en ácido láctico, se convierte en polilactida. Como tal, el PLA puro se obtiene de materias primas renovables y no gracias a combustibles fósiles como es el ABS, usualmente empleado también en la impresión 3D de plástico.

El objetivo es, poder reproducir arrecifes artificiales de una forma más rápida y sencilla, que consista en tener el molde preparado con el desencofrante ya aplicado (mediante brocha, pincel o pulverizador) y posteriormente volcar el hormigón de forma constante mediante una bomba alimentadora. Al fraguar, se desmoldará y podrá volver a ser utilizado tras limpiar el desencofrante antiguo y volver a aplicar uno nuevo.

Gracias al empleo de PLA reciclado se contribuirá a reducir el impacto ambiental en la fabricación, dado que es posible obtenerlo de fuentes naturales como las plantas. Además de que puede ser, en un futuro, compostado, o bien, reciclado química o mecánicamente. No obstante, el reciclaje por compostaje presenta los impactos ambientales más altos, seguido por el reciclaje químico y por último el reciclaje mecánico. Esto se puede explicar de forma que los 2 tipos de reciclaje tienen un polímero reciclado como objetivo final, mientras que el compostaje no lo tiene, llevando a la necesidad de reemplazar el polímero, causando mayores impactos ambientales (19).

Un posible material puede ser el ‘Ecogenius PLA’ de la empresa ‘WASP 3D’. Este filamento tiene las mismas propiedades, densidad y módulo de Young, que el ‘Gonzales PLA’, otro material que no es reciclado y que puede ser empleado con altas velocidades de impresión.

Por ello, se podrá utilizar sin menguar las propiedades del encofrado. No obstante, será posible el empleo de algún elemento rigidizador que se coloque afuera del molde, con el objetivo de reforzarlo y que no se rompa al ejercer el hormigón presión contra él.



SUGGESTED PRINT SETS (1)			
Suggested print sets	unit	value	test method
extruder temp	°C	185-210	internal
plate temp	°C	cold to 80	internal
min. nozzle diameter	mm.	0,3	internal
fan	%	50-100	internal
print speed	mm/l°	60-80	internal
PROPERTY			
Physical			
Specific gravity	g/cm3	1.24	ASTM D792
Mechanical at 23°C / 50% rh			
Tensile modulus	MPa	65.5	ASTM D882
Thermal			
Melting point	°C	144	ASTM D3418
Vicat softening temp.	°C	55-60	ASTM D3418

Ilustración 37: Ficha técnica del filamento 'Ecogenius PLA'. Fuente: <https://www.wasp3d.es/treed-filaments-ecogenius-pla/>.

Suggested printing specs.	Value	Unit	Standard
Extruder Temperature	200° +/-10°	°C	Internal
Bed Temperature	cold to 80°	°C	Internal
Print speed	up to 200	mm/s	Internal
Fan	20-100	%	Internal
Minimum Nozzle Diameter	0,35	mm	Internal
Material Properties			
Density	1.24	g/cm³	ASTM D792
Tensile Modulus	65.5	MPa	ASTM D882
Vicat Point	55-60	°C	ASTM3418
Melting Point	144°	°C	ASTM D3418

Ilustración 38: Ficha técnica del filamento 'Gonzales PLA'. Fuente: <https://www.wasp3d.es/treed-filaments-gonzales-pla/>.

Se observa que, las únicas diferencias entre los filamentos son: la temperatura de extrusión, la velocidad de impresión (aunque como se mencionó antes, el filamento 'Gonzales PLA' es para impresiones de alta velocidad) y el porcentaje de empleo del ventilador de la impresora.



La densidad, módulo de Young, punta de Vicat, así como el punto de fusión que poseen son idénticos, por lo que a la hora de resistir cargas deberían comportarse igual los dos materiales.

Se ha estudiado la posibilidad de realizar un encofrado de madera circular para radios mayores de 1m, dado que es el límite mínimo con el que operan empresas como Peri, así como el empleo de encofrados con un espesor mayor a los típicos para poder abarcar los salientes de las piezas.

Se barajó también la posibilidad de utilizarlo en 2 piezas de la Universidad de Cantabria en las que sus protuberancias no son demasiado exageradas y se podrían adaptar a los encofrados de gran espesor si previamente se amoldan como pueda ser lijando los tableros según la ubicación de los salientes.

Finalmente se decidió no emplear este tipo de material para realizar los encofrados dado la alta complejidad de fabricación de los moldes y posterior desencofrado una vez fraguado.

Para poder manejar los moldes, se ha analizado el empleo de una impresora 3D de plástico de grandes dimensiones, con el objetivo de poder ser usada para fabricar un molde pequeño y otro molde más grande. Dicha impresora será la misma que se ha analizado anteriormente en el caso de la impresora cartesiana, 'The Box Large'. Como arrecife tipo se ha estudiado el modelo de la Universidad de Cantabria denominado 'Cubic Small', arrecife con forma cúbica cuyas protuberancias o salientes son de pequeño tamaño.

Empleando el software de impresión 'Cura Ultimaker 4.5' y con el modelo anteriormente mencionado, se ha podido estimar el tiempo y cantidad de material necesario para su impresión. Para todo ello, se han supuesto unos costes de impresión adicionales de los que marca el propio programa como son: coste de material auxiliar, coste de amortización y de operación.

El coste de material auxiliar se ha supuesto un 10 % del coste del material. También, el coste de la mano de obra será un 10 % del coste del material. El coste de coste de amortización se ha supuesto considerando una vida útil de la impresora de 20 años y un empleo medio de 1.000 horas anuales. Y finalmente el coste de operación (excluyendo personal) es la suma de un 30 % del coste de amortización + 0,4 € por cada hora de empleo. Es importante destacar que, para el cálculo realizado, el coste del material 'Ecogenius PLA' es el que figura en su página web (22,00 €/kg + IVA) y no se ha tenido en cuenta la posible reducción de coste al comprar cantidades más grandes que una sola bobina.

El modelo, se ha definido mediante 4 caras y un conjunto de toroides. Cada cara corresponde a una cuarta parte del cubo, que conforma una parte de la base, una cara del cubo y otra parte del techo. El conjunto de toroides es debido a la formación principal del modelo de impresión mediante mortero, el cual emplea los huecos que conforman dichos toroides. No obstante, para el diseño de este modelo no era posible eliminar los salientes por completo, por lo que se ha tratado de recortarlos lo máximo posible, sin embargo, los pequeños salientes no afectan para nada a su propósito final.



Para el diseño de los 2 moldes se han definido unos ajustes de impresión específicos para cada tamaño de molde pero 4 de ellos son idénticos, como se muestra en la Tabla 7:

Patrón de relleno	Triángulos
Velocidad de impresión	60 mm/s
Velocidad del ventilador	100 %
Temperatura de impresión	200 °C

Tabla 7: Parámetros genéricos de configuración para el diseño del molde.

Para el llamado arrecife pequeño, los ajustes concretos son los siguientes (Tabla 8):

Altura de capa	4 mm
Altura de capa inicial	3 mm
Ancho de línea	4 mm
Grosor de la pared	8 mm
Grosor superior	4 mm
Grosor inferior	4 mm
Capas superiores	5
Capas inferiores	5
Densidad de relleno	60 %
Grosor de la capa de relleno	4 mm
Tiempo de impresión	8 días, 14 horas y 16 minutos

Tabla 8: Parámetros concretos del molde del arrecife de tamaño pequeño.

Y para el arrecife grande, los ajustes fijados son (Tabla 9):

Altura de capa	8 mm
Altura de capa inicial	8 mm
Ancho de línea	8 mm
Grosor de la pared	16 mm
Grosor superior	8 mm
Grosor inferior	8 mm
Capas superiores	2
Capas inferiores	2
Densidad de relleno	50 %
Grosor de la capa de relleno	8 mm
Tiempo de impresión	41 días, 19 horas y 18 minutos

Tabla 9: Parámetros concretos del molde del arrecife de tamaño grande.

Las imágenes que se muestran a continuación corresponden al molde del arrecife artificial 'Cubic Small'.

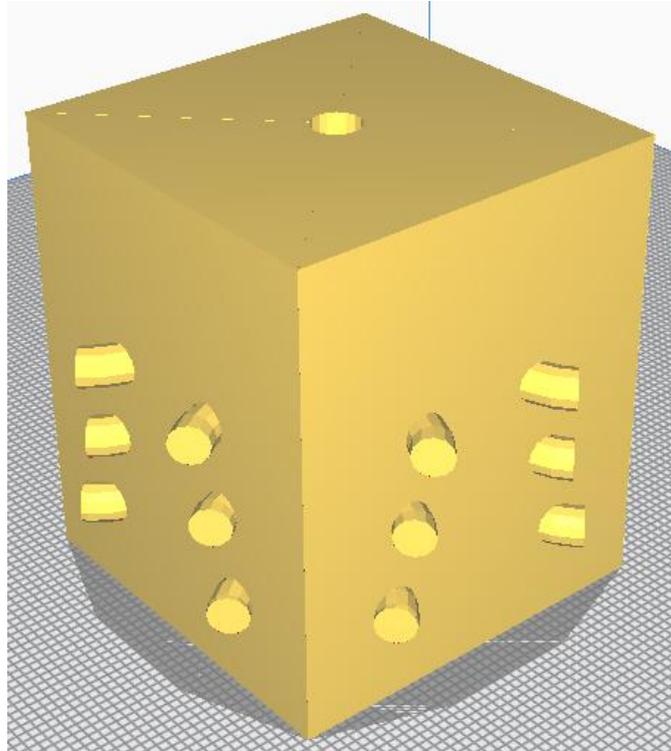


Ilustración 39: Molde completo impreso en 3D del modelo 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.

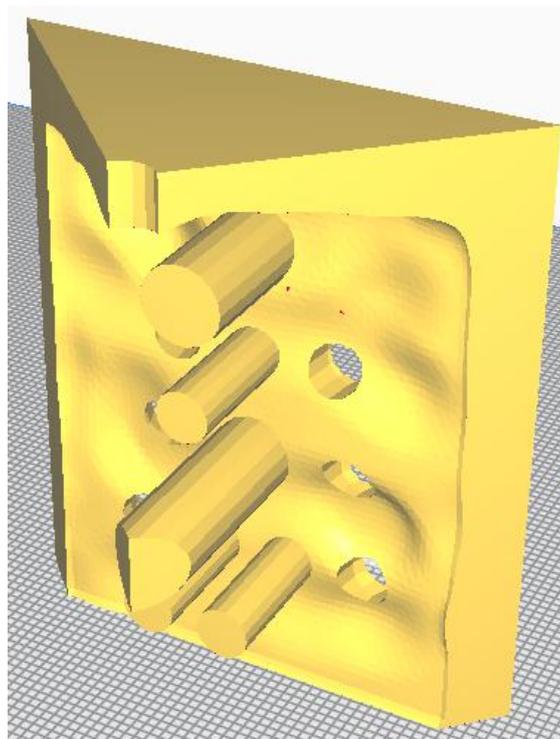


Ilustración 40: Sección del molde correspondiente a una sola cara del arrecife 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.

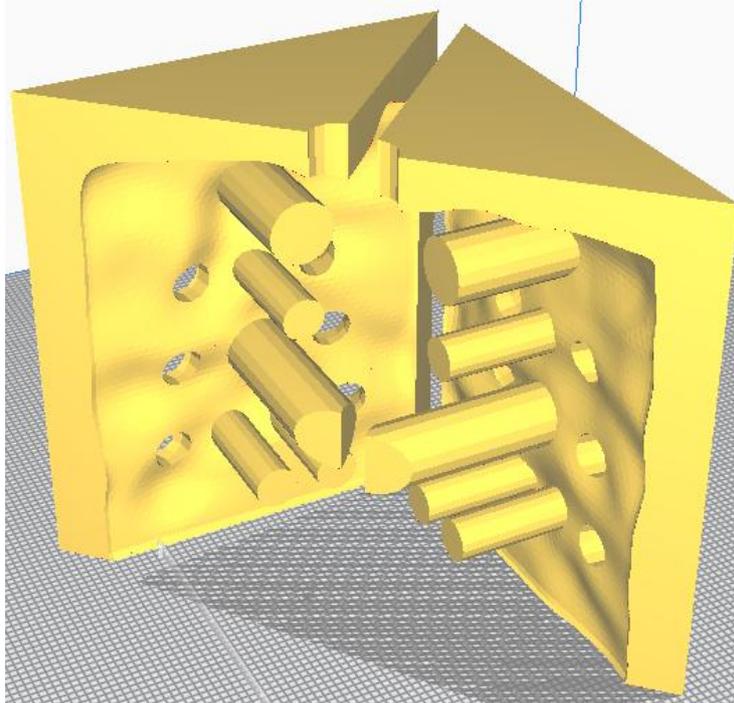


Ilustración 41: Sección del molde correspondiente a 2 caras del arrecife 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.

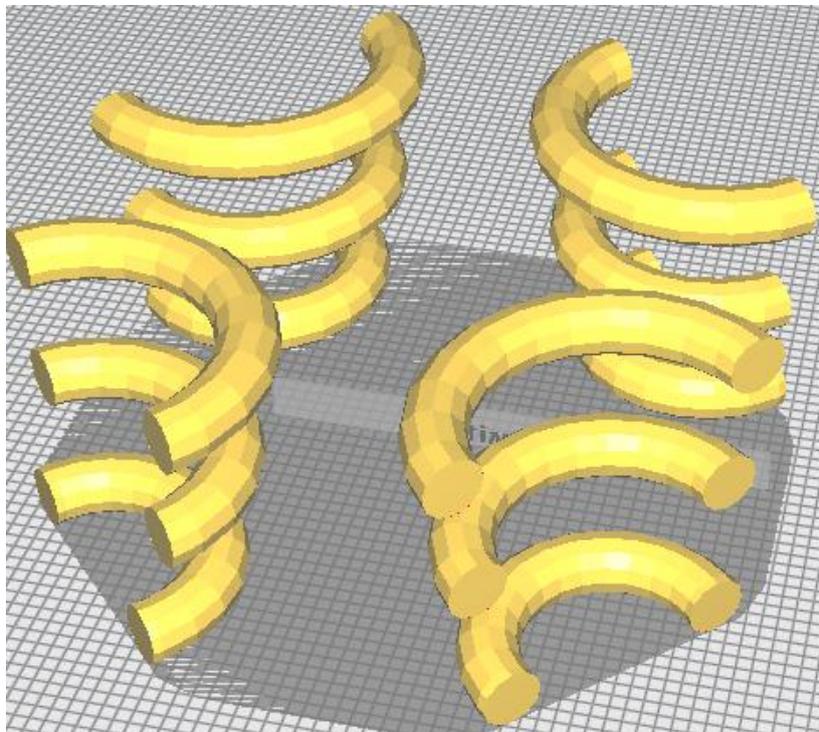


Ilustración 42: Conjunto de toroides correspondientes al molde del arrecife 'Cubic Small' de la Universidad de Cantabria. Fuente: Propia.



Para el modelo completo de dimensiones 800 x 800 x 770 mm el tiempo de impresión alcanza los 8 días, 14 horas y 16 minutos; con una cantidad de 127,100 kg de PLA necesario; además, el programa estima el coste de material que asciende a 3.801,78 €.

Calculando el coste total mediante las consideraciones anteriormente descritas, obtenemos que el coste de fabricación para un molde de un arrecife pequeño es de 4.892,60 € (Tabla 10).

Coste impresora	55.000,00 €
Coste material	3.394,79 €
Coste material auxiliar	339,48 €
Coste mano de obra	339,48 €
Coste amortización	566,50 €
Coste operación	252,35 €
COSTE DE FABRICACIÓN	4.892,60 €

Tabla 10: Coste de fabricación del molde para un arrecife de tamaño pequeño.

En cambio, para el modelo de dimensiones 1.500 x 1.500 x 1.444 mm el tiempo de impresión es de 41 días, 19 horas y 18 minutos; con una cantidad de 776,200 kg de PLA necesario y con un coste de material de 20.650,37 €. Y el coste de fabricación para un molde de un arrecife grande es de 28.767,37 € (Tabla 11).

Coste impresora	55.000,00 €
Coste material	20.650,37 €
Coste material auxiliar	2.065,04 €
Coste mano de obra	2.065,04 €
Coste amortización	2.758,25 €
Coste operación	1.228,68 €
COSTE DE FABRICACIÓN	28.767,37 €

Tabla 11: Coste de fabricación del molde para un arrecife de tamaño grande.

4.1. Comparativa del coste del encofrado frente al diámetro del cordón de impresión

Se ha realizado una comparación del coste del encofrado con diferentes diámetros de la boquilla de extrusión. Para ello, se ha seguido empleando el software de impresión 3D, Ultimaker Cura, para obtener el material necesario de impresión, el coste que supone el material y el tiempo de impresión requerido para el diseño del arrecife de tamaño pequeño y de tamaño grande.

Para que la comparativa sea útil, se han mantenido los parámetros anteriormente definidos a excepción del ancho de línea, altura de capa, altura de capa inicial y grosor de la pared, que se han definido todos iguales siendo dichos valores de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 16 mm. El coste, obtenido en euros, se ha definido de la misma forma que el análisis anterior.

Para el arrecife de tamaño pequeño (Tabla 12):

Ø del cordón (mm)	Coste (€)
1	6.843,14
2	4.591,04
4	4.892,60
6	5.150,73
8	5.435,06
10	5.633,21
12	6.116,41
16	6.348,19

Tabla 12: Coste de fabricación del molde del arrecife de tamaño pequeño en función diámetro del cordón de impresión.

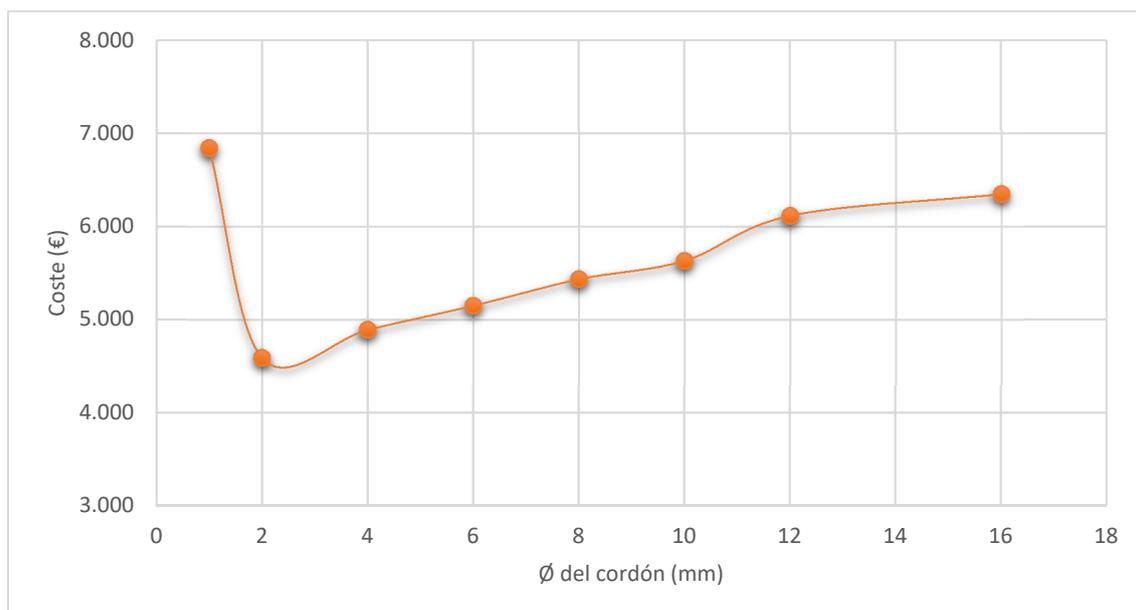


Ilustración 43: Gráfico de comparación entre coste y diámetro del cordón de impresión del molde para arrecifes de tamaño pequeño. Fuente: Propia.



Y para el arrecife de tamaño grande (tabla 13):

Ø del cordón (mm)	Coste (€)
1	35.209,81
2	28.604,83
4	28.767,37
6	30.386,81
8	31.413,85
10	32.573,41
12	33.531,01
16	35.508,76

Tabla 13: Coste de fabricación del molde del arrecife de tamaño grande en función diámetro del cordón de impresión.

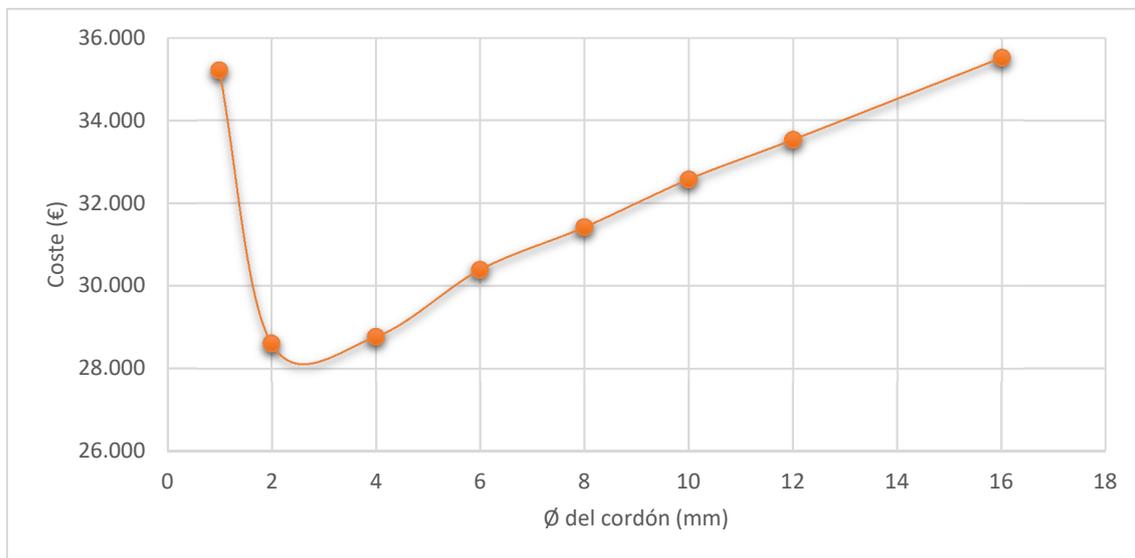


Ilustración 44: Gráfico de comparación entre coste y diámetro del cordón de impresión del molde para arrecifes de tamaño grande. Fuente: Propia.

A la vista de los resultados obtenidos y de forma más visual, gracias a las gráficas (ilustraciones 43 y 44), observamos que el coste más bajo corresponde al diámetro de 2 mm, seguido del diámetro de 4 mm. Además, las 2 gráficas presentan una forma similar siendo el mínimo coste: 2 mm de diámetro y los mayores costes se presentan en los casos más extremos: 1 y 16 mm.

Por ello, la elección de los moldes con el diámetro de 4mm puede resultar una opción más apropiada, dado que aporta mayor rigidez al conjunto, variable no analizada en la comparativa anterior, y no supone un incremento excesivo de coste respecto a los 2 mm de espesor.



4.2. Comparativa del coste de fabricación de un arrecife mediante impresión en 3D frente al empleo de un encofrado impreso en 3D

Se procede a realizar un análisis que permita comparar los costes de fabricación de un arrecife artificial realizado mediante cada uno de los métodos anteriormente descritos, y mediante el empleo del encofrado impreso en 3D. Se evaluará el empleo con un arrecife de tamaño pequeño y también con uno de tamaño grande.

Para el coste del material se va a tomar como referencia el de la impresión mediante impresora tipo delta. El vertido del mortero será el triple del coste del material, el vibrado representará un 80 % del material y el desencofrado será 2,4 veces el coste de dicho material.

Para el arrecife de tamaño pequeño los siguientes costes resultan ser (Tabla 14):

	Coste (€)
Material	25,00
Vertido del mortero	75,00
Vibrado	20,00
Desencofrado	60,00
Total	180,00

Tabla 14: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño pequeño mediante el empleo de un molde impreso en 3D.

Así, el coste intrínseco de fabricar un arrecife artificial de tamaño pequeño mediante esta técnica es de 180,00 €. Como el coste de fabricar el molde resultó ser de 4.892,60 €, el coste de fabricar ‘n’ arrecifes será de $4.892,60 + 180,00 \cdot n$ € (Tabla 15).

	Para n = 1	Para n = 10	Para n = 100
Coste (€) = $4.892,60 + 180,00 \cdot n$	5.072,60	6.692,60	22.892,60
Coste unitario (€/unidad)	5.072,60	669,26	228,93

Tabla 15: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño pequeño en función del número ‘n’ que se impriman.

Lógicamente, vemos como al aumentar el valor de ‘n’, el coste unitario de fabricación se reduce.

Realizando una tabla (Tabla 16) que permita ver el coste de fabricación (€) de los diferentes métodos estudiados en función del número ‘n’ de arrecifes fabricados, logramos llegar a alcanzar el valor para el cual los costes de emplear el encofrado son menores que por impresión 3D. Para ello se tendrá en cuenta los costes de: material, material auxiliar, personal, amortización y operación (excluyendo el coste del personal). Se remarcarán en negrita los costes para los cuales dejan de ser rentables la fabricación mediante la impresión en 3D.



N =	1	2	..	14	..	17	..	24	33
Brazo Robot	331,16	662,32		4.636,24		5.629,72		7.947,84	10.928,28
Delta	547,33	1.094,66		7.662,62		9.304,61		13.135,92	18.061,89
Cartesiana	465,80	931,60		6.521,20		7.918,60		11.179,20	15.371,40
Cilíndrica	391,49	782,98		5.480,86		6.655,33		9.395,76	12.919,17
D-Shape	2.847,36	5.694,72		39.863,04		48.405,12		68.336,64	93.962,88
Encofrado	5.072,60	5.252,60		7.412,60		7.952,60		9.212,60	10.832,60

Tabla 16: Coste de fabricación de 'n' arrecifes de tamaño pequeño mediante el empleo de cada tipo.

Así, para el método que emplea el brazo robot se igualan los costes para n = 33 arrecifes. Para el caso de la impresora tipo delta, el valor de n = 14 arrecifes. Para la impresora cartesiana, n = 17 arrecifes, y para la cilíndrica, n = 24 arrecifes. Para la 'D-Shape', se alcanza con tan solo fabricar n = 2 arrecifes.

A continuación, se proporciona una gráfica (Ilustración 45) que permita de forma más visual observar cuan rentable es la fabricación mediante cada método según el número de arrecifes que se pretenda realizar.

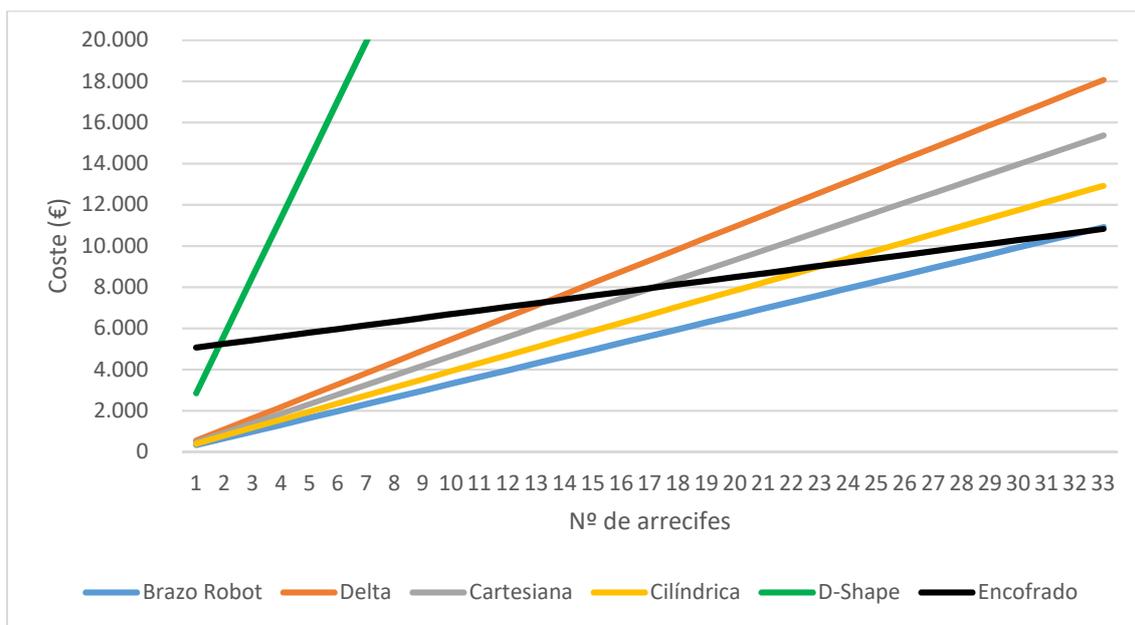


Ilustración 45: Gráfico que representa el coste de fabricación de varios arrecifes de tamaño pequeño en función de cada tipo de fabricación. Fuente: Propia.



En el caso del arrecife de tamaño grande, los costes son los siguientes (Tabla 17):

	Coste (€)
Material	127,05
Vertido del mortero	381,15
Vibrado	101,64
Desencofrado	304,92
Total	914,76

Tabla 17: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño grande mediante el empleo de un molde impreso en 3D.

Así, el coste de fabricar un arrecife artificial de tamaño grande mediante esta técnica es de 914,76 €. Como el coste de fabricar dicho molde resultó ser de 28.767,37€, el coste de fabricar ‘n’ arrecifes será pues de $28.767,37 + 914,76 \cdot n$ € (Tabla 18).

	Para n = 1	Para n = 10	Para n = 100
Coste (€) = $28.767,37 + 914,76 \cdot n$	29.682,13	37.914,97	120.243,37
Coste unitario (€/unidad)	29.682,13	3.791,50	1.202,44

Tabla 18: Coste de fabricación de un arrecife artificial de tamaño grande en función del número ‘n’ que se impriman

Realizando otra tabla (Tabla 19) que permita ver el coste de fabricación (€) de los diferentes métodos estudiados en función del número ‘n’ de arrecifes fabricados, logramos llegar a alcanzar el valor para el cual los costes de emplear el encofrado son menores que por impresión 3D.

N=	1	..	7	..	18	..	41	..	193	..	538
Brazo Robot	968,30		6.778,10		17.429,40		39.700,30		186.881,90		520.945,40
Delta	2.540,83		17.785,81		45.734,94		104.174,03		490.380,19		1.366.966,54
Cartesiana	1.064,50		7.451,50		19.161,00		43.644,50		205.448,50		572.701,00
Cilíndrica	1.625,27		11.376,89		29.254,86		66.636,07		313.677,11		874.395,26
D-Shape	5.073,40		35.513,80		91.321,20		208.009,40		979.166,20		2.729.489,20
Encofrado	29.682,13		35.170,69		45.233,05		66.272,53		205.316,05		520.908,25

Tabla 19: Coste de fabricación de ‘n’ arrecifes de tamaño grande mediante el empleo de cada tipo.

Así, para el caso de un arrecife de tamaño grande, el número de arrecifes para el cual se igualan los costes es más elevado que en el caso anterior. Para la impresora con brazo robot, se alcanza para $n = 538$ arrecifes. En el caso de la delta se alcanza para $n = 18$ arrecifes. Para la cartesiana, $n = 193$ arrecifes. Para la cilíndrica, $n = 41$ arrecifes. Y para la ‘D-Shape’, $n = 7$ arrecifes. Se observa, que puede llegar a ser complicado igualar los costes para la impresora cartesiana y, en especial, la que emplea el brazo robot.

Se muestra otra gráfica que en el caso de arrecifes de tamaño grande, permita ver de forma más visual cuándo se igualan los costes (Ilustración 46).

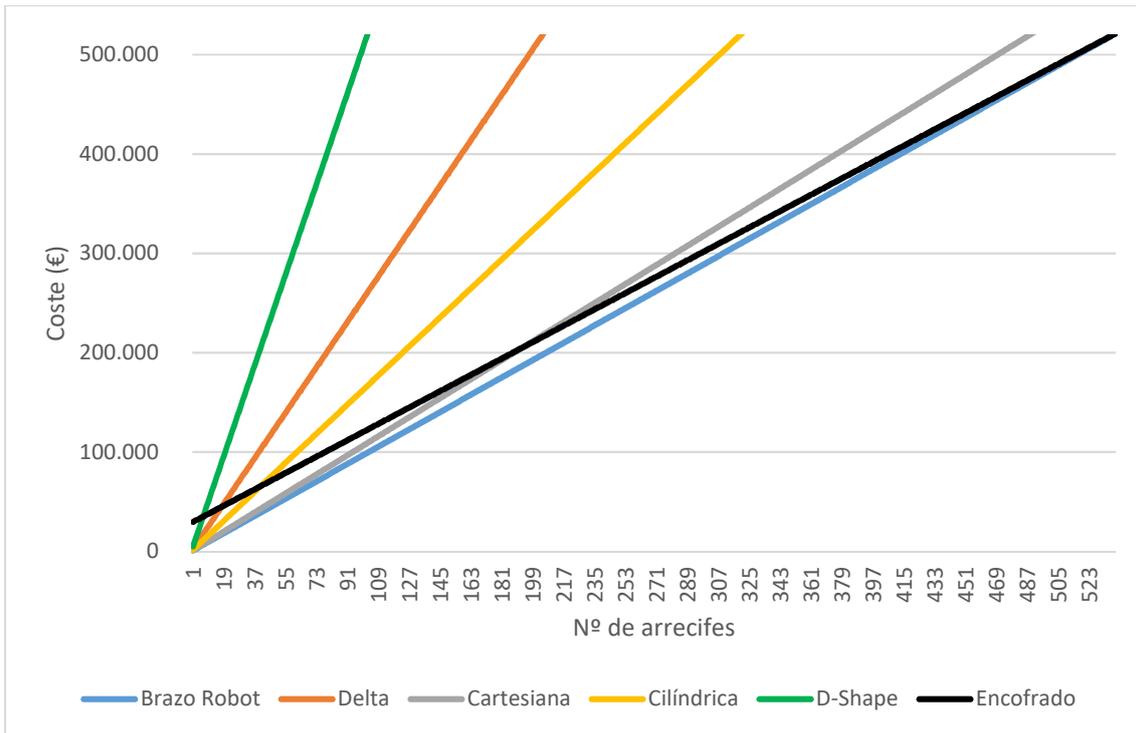


Ilustración 46: Gráfico que representa el coste de fabricación de varios arrecifes de tamaño grande en función de cada tipo de fabricación. Fuente: Propia.



Apartado 5: Fabricación de arrecifes artificiales mediante el moldeo por inyección

El moldeo por inyección es la forma de fabricación más adecuada para la creación de moldes piloto o producción bajo demanda. Su proceso se basa en un mecanismo que inyecta polímeros termoplásticos o termoendurecibles en una cavidad del molde antes de que solidifique y expulse la pieza del molde.

Dado que, las ventajas que presenta este proceso son: la diversidad en diseño y fabricación, y la rapidez a la hora de ser suministradas las piezas, se decidió incluirlo en este estudio para analizar su rentabilidad y posible empleo.

Con el objetivo de poder analizar y valorar su implementación se decidió consultar a 2 empresas capaces de realizar diferentes moldes que corresponden al arrecife ‘Cubic Small’ de la Universidad de Cantabria en tamaño pequeño y tamaño grande. Sin embargo, por parte de una empresa no hubo respuesta alguna a las peticiones realizadas y por parte de la otra empresa, no se lograron obtener los diseños debido a varios problemas técnicos ajenos.

No obstante, se deja abierta la posibilidad de que en un futuro, estas mismas empresas u otras nos ofrezcan sus presupuestos y se pueda proceder a realizar un análisis de costes (20) .



Apartado 6: Análisis Multicriterio

Con el objetivo de poder determinar el arrecife artificial óptimo, aquel que permita obtener un equilibrio entre coste de fabricación, tiempo, complejidad de forma y coste del personal, se realizará un análisis de criterio múltiple.

El análisis de criterio múltiple o evaluación multicriterio, es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación, el cual permite integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de diferentes individuos en un solo marco de análisis para dar una visión integral. Sus aplicaciones son muy variadas, empleándose con frecuencia en: los procesos de planificación y evaluación; análisis de diversas alternativas; definición y negociación de estrategias de intervención; discusión sobre el contenido de programas de recursos, etc. (21).

Los parámetros analizados son los siguientes:

- Coste de fabricación: se tiene como objetivo cuantificar el coste del material, del material auxiliar necesario, el coste de amortización y de operación (excepto el coste de personal, que será evaluado en un cuarto criterio independiente). Este criterio se mide en euros (€).
- Tiempo: se tiene como objetivo cuantificar el tiempo necesario de fabricación de un arrecife sin incluir el de los preparativos previos. Este criterio se cuantifica en horas (h).
- Complejidad de la forma: hace referencia a la forma que se puede realizar mediante cada método de impresión. Se valorará en una escala del 1 al 3 de la siguiente forma:
 - ✚ 1: Paredes verticales
 - ✚ 2: Formas complejas encofrables, mediante el empleo de un encofrado y un cimbrado de arena.
 - ✚ 3: Formas complejas no encofrables, capaz de sustentarse por sí misma.
- Coste del personal: se trata de cuantificar el coste que presenta cada tipo de impresión. Este criterio se mide en euros (€).

Otro posible criterio podría haber sido el nivel de resistencia del mortero. Dicho criterio evaluaría la correcta hidratación del mortero en el proceso de fabricación. Con la técnica de extrusión sí se garantiza una correcta hidratación y por tanto, una resistencia adecuada. En cambio, empleando la técnica del ‘binder-jetting’, es más complicado, pues al echar una gota de agua sobre una mezcla de mortero seco y no mezclar, es más difícil hacer que fragüe tan bien, por ello, se obtiene una resistencia deficiente por falta de un fraguado adecuado.

Los métodos empleados en este análisis se corresponden a TOPSIS y WASPAS.



El método TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) es uno de los modelos matemáticos más populares para determinar la solución óptima de un análisis multicriterio. Basado en el método de análisis originalmente desarrollado por Hwang y Yoon en 1981. El método TOPSIS se basa en el concepto de distancia de las alternativas propuestas a las soluciones ideales positivas y negativas. Siendo una solución ideal positiva una alternativa que maximiza las respuestas de beneficio y minimiza las de costo. Mientras que, una ideal negativa considera la solución menos preferida, dado que minimiza las respuestas de beneficio y maximiza las de costo. Por ello, la alternativa ideal será aquella que esté más cerca a la solución ideal positiva y más alejada de la solución ideal negativa (22) (23).

El método WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) obtiene las mejores alternativas en base a 2 procesos: ‘Weighted Sum Model’ (WSM) y el ‘Weighted Product Model’ (WPM). Combinando estos 2 procesos mediante un parámetro que balancea ambos, $\lambda \in [0,1]$. Si $\lambda = 1$, el ranking para elegir las mejores alternativas se basa en el WSM. Si $\lambda = 0$, el ranking se basa en el WPM. Si el valor de $\lambda \neq 0, 1$, se balancean ambos métodos. Para nuestro caso en concreto, el balanceo ha sido la media aritmética entre el ‘Weighted Sum Model’ y el ‘Weighted Product Model’ (24).

Para obtener la ponderación de los diferentes parámetros analizados, se recurrió a enviar una breve encuesta a expertos relacionados en el área para que diesen su valoración a cada parámetro, donde el 0 corresponde a una importancia nula y el 100 a una importancia máxima. La suma de los 4 parámetros debe ser igual a 100.

Los expertos seleccionados pertenecen al grupo de investigación de GITECO (Grupo de Investigación de Tecnología de la Construcción), del Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos, de la Universidad de Cantabria.

Las ponderaciones obtenidas promediadas son las que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 20):

Criterio	Ponderación
Coste de fabricación	0,325714
Tiempo	0,198571
Complejidad de forma	0,241429
Coste del personal	0,234286

Tabla 20: Ponderaciones promediadas otorgadas a cada criterio del análisis multicriterio.

Para ello, se ha analizado 4 posibilidades de impresión y ha dado lugar a establecer 4 análisis multicriterio y 4 rankings diferentes. Se ha subrayado en color verde la opción que resulta ser la óptima y en color rojo la que resulta ser la pésima.

Las opciones analizadas han sido: arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora; arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora; arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora; y arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora.



En el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora, los valores otorgados son (Tabla 21):

Ponderación criterio	0,325714	0,198571	0,241429	0,234286
	Coste de fabricación (€)	Tiempo (h)	Complejidad de la forma	Coste del personal (€)
Brazo robótico	251,16	4	1	80,00
Delta	227,33	8	2	320,00
Cartesiana	305,80	8	1	160,00
Cilíndrica	231,49	8	1	160,00
D-Shape	2.447,36	8	3	400,00

Tabla 21: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora. Tabla 1.

Y aplicando los procedimientos de TOPSIS y WASPAS, el ranking obtenido es el siguiente (Tabla 22):

	TOPSIS		WASPAS	
	Puntuación	Ranking	Puntuación	Ranking
Brazo robótico	0,725	1	0,775	1
Delta	0,703	2	0,608	2
Cartesiana	0,688	4	0,527	4
Cilíndrica	0,695	3	0,591	3
D-Shape	0,273	5	0,347	5

Tabla 22: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora óptimo.

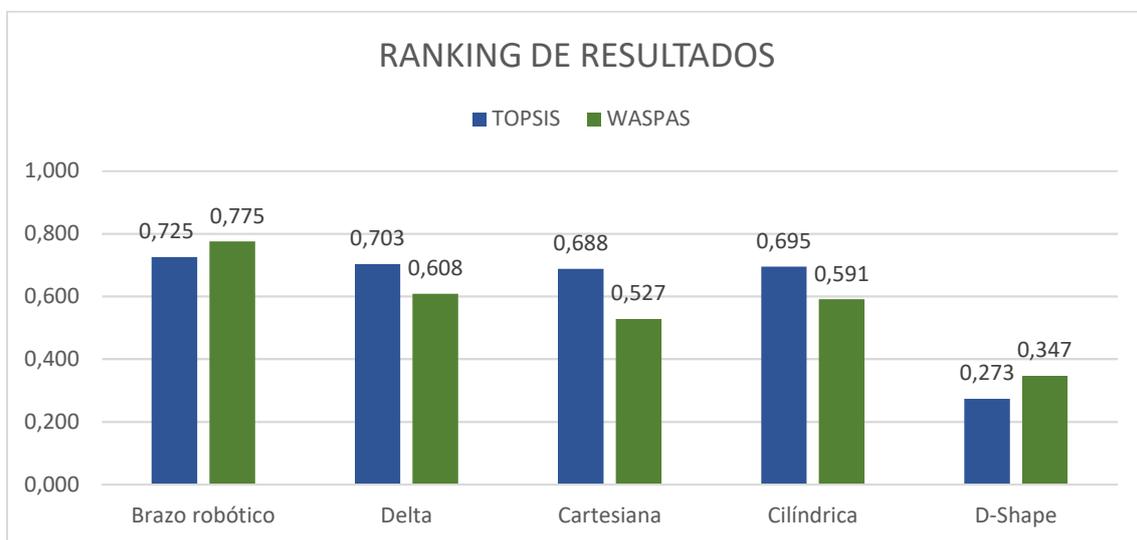


Ilustración 47: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.

Así, se obtiene que mediante ambos métodos, pese a arrojar valores diferentes presentan el mismo ranking. La impresión mediante brazo robótico resulta ser la mejor opción, puesto que obtiene la mayor puntuación. A continuación, siguen la impresora de tipo delta, la cilíndrica y la cartesiana. La peor opción resulta ser mediante la impresora ‘D-Shape’.



En el caso del arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora, los valores otorgados son (Tabla 23):

Ponderación criterio	0,325714	0,198571	0,241429	0,234286
	Coste de fabricación (€)	Tiempo (h)	Complejidad de la forma	Coste del personal (€)
Brazo robótico	251,16	4	1	80,00
Delta	237,73	8	1	160,00
Cartesiana	305,80	8	1	160,00
Cilíndrica	231,49	8	1	160,00
D-Shape	2.447,36	8	3	400,00

Tabla 23: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora.

Y aplicando los procedimientos de TOPSIS y WASPAS, el ranking obtenido es el siguiente (Tabla 24):

	TOPSIS		WASPAS	
	Puntuación	Ranking	Puntuación	Ranking
Brazo robótico	0,710	1	0,780	1
Delta	0,678	3	0,589	3
Cartesiana	0,671	4	0,531	4
Cilíndrica	0,678	2	0,595	2
D-Shape	0,289	5	0,348	5

Tabla 24: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora óptimo.

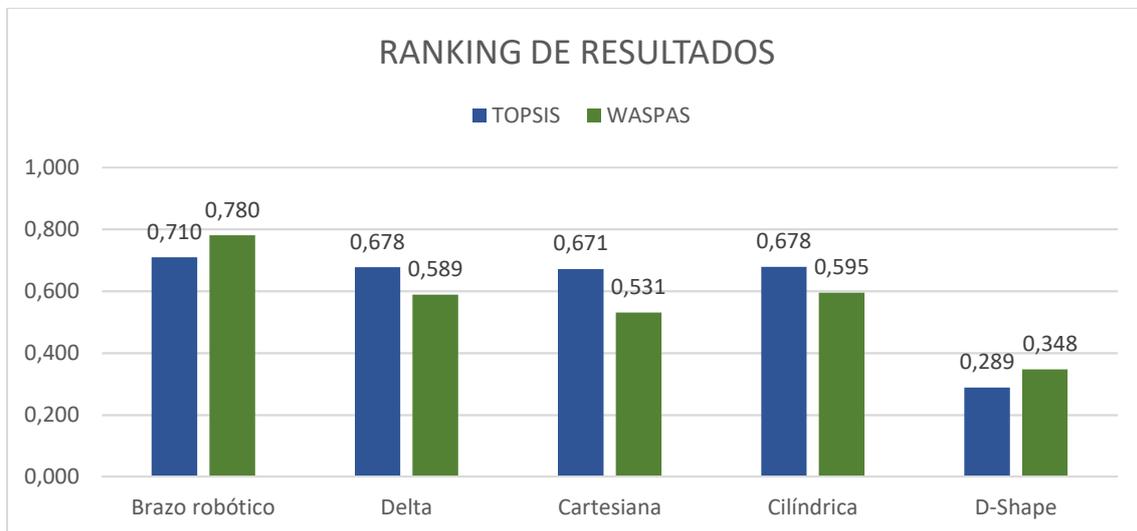


Ilustración 48: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño pequeño con bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.

En esta ocasión, el empleo de bomba alimentadora influye con el intercambio de posiciones entre la impresora delta y cilíndrica. Así, la primera opción sigue siendo la impresión mediante brazo robótico dado que obtiene la mayor puntuación. A continuación, la impresora de tipo cilíndrica, seguida de la tipo delta, y de la cartesiana. Y finalmente, la peor opción resulta ser la impresora de tipo ‘D-Shape’.



En el caso del arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora, los valores otorgados son (Tabla 25):

Ponderación criterio	0,325714	0,198571	0,241429	0,234286
	Coste de fabricación (€)	Tiempo (h)	Complejidad de la forma	Coste del personal (€)
Brazo robótico	568,30	20	1	400,00
Delta	660,83	47	2	1.880,00
Cartesiana	664,50	20	1	400,00
Cilíndrica	685,27	47	1	940,00
D-Shape	4.073,40	20	3	1.000,00

Tabla 25: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora.

Y aplicando los procedimientos de TOPSIS y WASPAS, el ranking obtenido es el siguiente (Tabla 26):

	TOPSIS		WASPAS	
	Puntuación	Ranking	Puntuación	Ranking
Brazo robótico	0,721	1	0,803	1
Delta	0,607	4	0,541	3
Cartesiana	0,717	2	0,760	2
Cilíndrica	0,646	3	0,517	4
D-Shape	0,376	5	0,502	5

Tabla 26: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora óptimo.

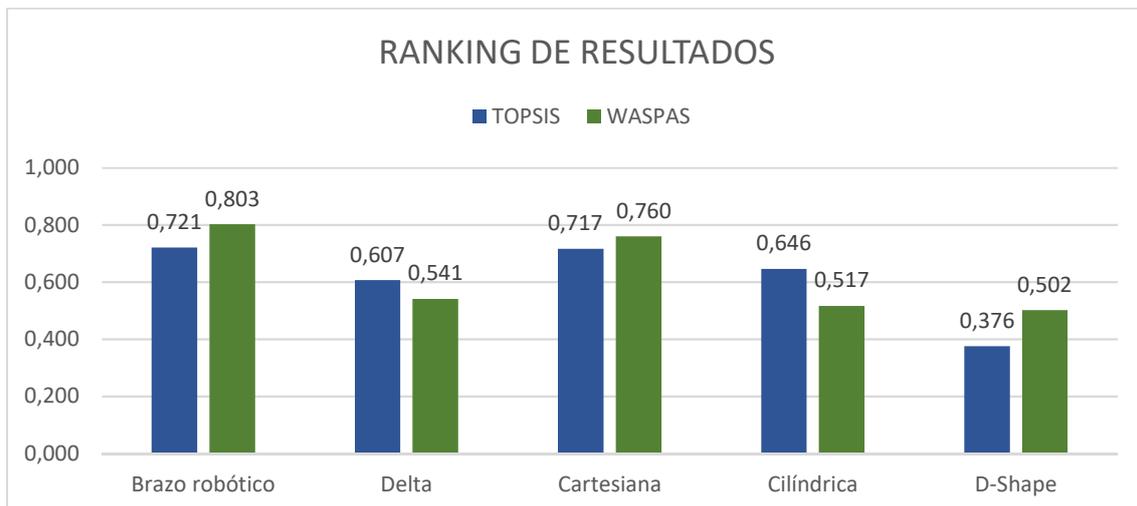


Ilustración 49: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.

En el caso del arrecife de tamaño grande sin bomba alimentadora, la opción óptima es mediante la impresora con brazo robótico. La segunda opción es mediante el empleo la impresora cartesiana. La tercera y cuarta opción se alternan entre la impresora de tipo delta y cilíndrica, dependiendo del método de análisis estudiado. Y la opción pésima es mediante la impresora ‘D-Shape’.



En el caso del arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora, los valores otorgados son (Tabla 27):

Ponderación criterio	0,325714	0,198571	0,241429	0,234286
	Coste de fabricación (€)	Tiempo (h)	Complejidad de la forma	Coste del personal (€)
Brazo robótico	568,30	20	1	400,00
Delta	721,93	47	1	940,00
Cartesiana	664,50	20	1	400,00
Cilíndrica	685,27	47	1	940,00
D-Shape	4.073,40	20	3	1.000,00

Tabla 27: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora.

Y aplicando los procedimientos de TOPSIS y WASPAS, el ranking obtenido es el siguiente (Tabla 28):

	TOPSIS		WASPAS	
	Puntuación	Ranking	Puntuación	Ranking
Brazo robótico	0,682	1	0,803	1
Delta	0,602	4	0,506	4
Cartesiana	0,677	2	0,760	2
Cilíndrica	0,605	3	0,517	3
D-Shape	0,353	5	0,502	5

Tabla 28: Ranking obtenido por cada metodología de análisis para obtener el arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora óptimo.

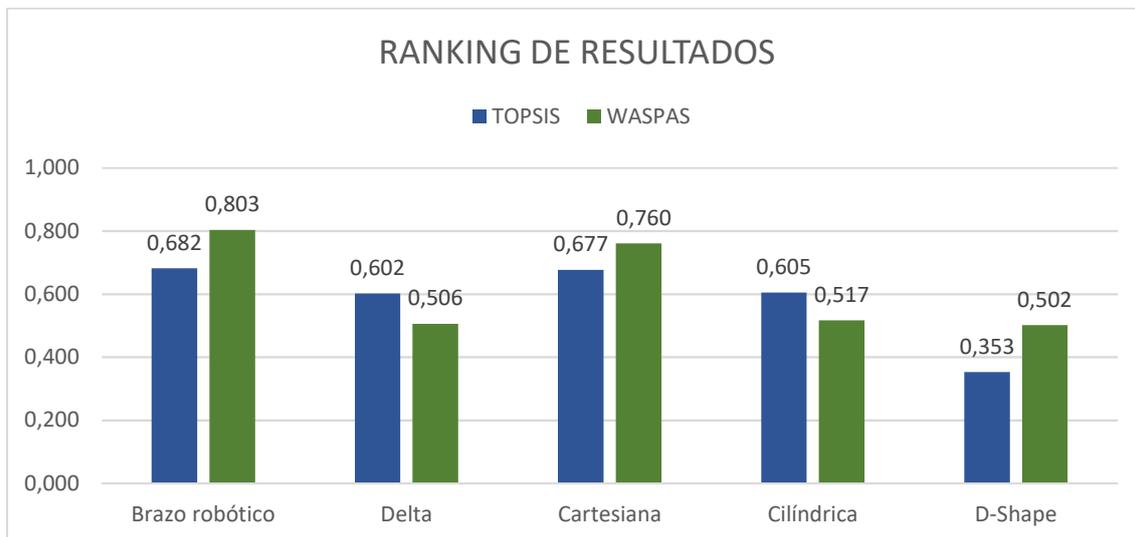


Ilustración 50: Puntuación obtenida para el arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora mediante cada tipología de impresión según cada metodología de análisis. Fuente: Propia.

Y para el caso del arrecife de tamaño grande con bomba alimentadora, la opción óptima es mediante la impresora con brazo robot. Seguido de, la impresora cartesiana, cilíndrica y delta. La opción pésima resulta ser mediante la impresora ‘D-Shape’.



Así, a modo de resumen, se han elaborado las siguientes tablas para poder ver de forma más clara y concisa la opción óptima y pésima de cada análisis multicriterio (Tablas 29 y 30).

Óptimo	MÉTODO	
	TOPSIS	WASPAS
Tamaño pequeño sin bomba	Brazo robótico	Brazo robótico
Tamaño pequeño con bomba	Brazo robótico	Brazo robótico
Tamaño grande sin bomba	Brazo robótico	Brazo robótico
Tamaño grande con bomba	Brazo robótico	Brazo robótico

Tabla 29: Opciones óptimas de fabricación de arrecifes en cada análisis multicriterio.

Pésimo	MÉTODO	
	TOPSIS	WASPAS
Tamaño pequeño sin bomba	D-Shape	D-Shape
Tamaño pequeño con bomba	D-Shape	D-Shape
Tamaño grande sin bomba	D-Shape	D-Shape
Tamaño grande con bomba	D-Shape	D-Shape

Tabla 30: Opciones pésimas de fabricación de arrecifes en cada análisis multicriterio.

Se observa que, la forma óptima de impresión para todos los aspectos es mediante la impresora que emplea el brazo robótico, independientemente del tamaño del arrecife analizado o si se emplea bomba alimentadora o no.

A su vez, la opción pésima resulta ser mediante la impresora ‘D-Shape’, indistintamente de si se emplea bomba alimentadora o no.

Finalmente, el empleo de una bomba alimentadora y mezcladora no tiene una gran influencia en la decisión de utilizar un método de impresión u otro diferente. Por ello, será útil su empleo si se quiere reducir el coste del personal y se quiere prescindir de las formas complejas encofrables.

Apartado 7: Conclusiones

Se han analizado distintas alternativas de impresión en las que su empleo está condicionado en el número de arrecifes que se tiene planteado reproducir. Con ello, este estudio servirá para poder analizar en un futuro diferentes opciones a la hora de decantarse por el empleo de una tipología o de otra. Así pues, para un número reducido de ellos, es recomendable optar la fabricación mediante impresión en 3D y en concreto empleando el brazo robótico, para fabricar los de tamaño pequeño o bien, de tamaño grande; dado que es la opción óptima. Sin lugar a dudas, se descarta el empleo de la impresora ‘D-Shape’ por resultar ser la pésima en todas las opciones analizadas.

No obstante, si se pretende fabricar un número de arrecifes artificiales más elevado, es significativo valorar la opción de poder emplear un molde, en especial, si se deciden fabricar los de tamaño pequeño, pues se consiguen igualar los costes con un número inferior a los arrecifes de tamaño grande. No por ello se descarta el empleo del molde en los arrecifes de tamaño grande, dado que si el número deseado es superior al que se igualan los costes, desde un punto de vista estrictamente económico, es más rentable su empleo.

Existen, además, varios retos tecnológicos que podrán ser abordados en un futuro:

- En la impresora 3D de tipo polar, se podría implementar en un futuro un incremento de sus dimensiones y su capacidad de soportar piezas durante la impresión para así poder imprimir arrecifes artificiales con morteros. Se deja abierta la posibilidad de analizar y estudiar su viabilidad próximamente.
- El empleo de más boquillas extrusoras a la vez, que puedan ser mediante el empleo de más brazos robóticos o incorporados ya en las impresoras, y que estén perfectamente coordinados y permitan repartirse las tareas así como emplear diferentes tipos de materiales. Se podría conseguir en un futuro que una impresora se encargue de imprimir el perímetro, el interior y que, vierta arena a modo de realizar un cimbrado. Además, si se potencia mediante el empleo de una mezcladora y una bomba suministradora de material, se podría reducir considerablemente el coste del personal y así automatizar más el proceso.
- El empleo de la impresión en 3D en estructuras de grandes dimensiones puede ser interesante e importante de cara al empleo en la construcción, así como en la colocación de armaduras que mejoren la automatización del proceso, en el aumento de la seguridad en la construcción y en evitar así riesgos a los trabajadores siempre que el coste por emplear dicha técnica sea viable.
- Existen numerosos proyectos ambiciosos relacionados con esta tecnología. En Dubái, por ejemplo, se pretende que para 2025 al menos el 25 % de cada edificio nuevo que se construya esté impreso en 3D para promover que los Emiratos Árabes Unidos sea líder en la tecnología 3D en el año 2030. Con ello, se pretende reducir la mano de obra en un 70 %, el tiempo en un 80 % y los costos en un 90 %.

Bibliografía

1. **Mohammed, Javeed Shaikh.** *Methods in Oceanography* 17. s.l. : Elsevier, 2016. p. 111.
2. **Ferreira, Jaime Garzón.** *Arrecifes coralinos: ¿Un tesoro camino a la extinción?* Santa Marta : s.n., 1997. p. 13.
3. *Coral bleaching in the Caramuanas reef (Todos os Santos Bay, Brazil) during the 2010 El Niño event.* **Miranda, Ricardo J., Cruz, Igor C.S., Leño, Zelinda M.A.N.** 2, Valparaíso : Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, abril 2013, Latin American Journal of Aquatic Research, Vol. 41, p. 352.
4. **Alcolado, Pedro M.** *Reporte de blanqueamiento de corales del Año 2005 en Cuba de la Red de Monitoreo Voluntario de Alerta Temprana de Arrecifes Coralinos.* 2007.
5. **3D Natives.** [Online] 23 marzo 2016. [Cited: 15 junio 2020.] <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/>.
6. **It Fabricación.** [Online] [Cited: 12 enero 2020.] <https://itfabricacion.com/las-tecnologias-de-impresion-3d/>.
7. **XtreeE.** [Online] 1 enero 2017. [Cited: 1 octubre 2020.] <https://xtreee.com/project/xreef/>.
8. **XtreeE, Sas.** [Online] 15 septiembre 2015. [Cited: 10 enero 2020.] <https://www.youtube.com/watch?v=PXImY6z1cKY>.
9. **ABB.** [Online] 10 junio 2019. [Cited: 11 enero 2020.] <https://new.abb.com/news/es/detail/25164/avances-en-el-diseno-y-la-fabricacion-de-productos-gracias-a-la-impresion-3d>.
10. **Mac Edil.** [Online] [Cited: 12 enero 2020.] http://www.mac-edil.com/prodotti/mescolatori/impastatore_dm15/mixer_dm15.html#.
11. **3DWASP.** [Online] [Cited: 15 enero 2020.] <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt/>.
12. **3DWASP.** [Online] [Cited: 20 enero 2020.] <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>.
13. **RepRap.** [Online] 21 enero 2013. [Cited: 20 enero 2020.] <https://reprap.org/forum/read.php?185,178379>.
14. **D-Shape.** [Online] [Cited: 16 enero 2020.] <https://d-shape.com/what-is-it/>.
15. **Neoteo.** [Online] [Cited: 15 junio 2020.] <https://www.neoteo.com/d-shape-una-enorme-impresora-3d/>.
16. **Boskalis.** [Online] [Cited: 16 enero 2020.] <https://boskalis.com/csr/cases/3d-printed-reefs.html>.
17. **S., Sorel.** *On a new magnesium cement.* s.l. : CR Acad, 1867. pp. 102–104.
18. **E. Riera, et al.** *Biofilm monitoring as a tool to assess the efficiency of artificial reefs as substrates: Toward 3D printed reefs.* Nice : Elsevier, 2018. pp. 230-237.



19. **Cosate de Andrade, Marina F., et al.** *Life Cycle Assessment of Poly(Lactic Acid) (PLA): Comparison Between Chemical Recycling, Mechanical Recycling and Composting*. New York : Springer Science+Business Media, 2016. p. 383.
20. **Protolabs.** [Online] [Cited: 20 mayo 2020.] <https://www.protolabs.es/servicios/moldeo-por-inyeccion/>.
21. **Slebi-Acevedo, Carlos J. et al.** *Multi-Response Optimization of Porous Asphalt Mixtures Reinforced with Aramid and Polyolefin Fibers Employing the CRITIC-TOPSIS Based on Taguchi Methodology*. Santander : s.n., 2019. pp. 5-6.
22. **Pallarés, Jaime Ruiz and Sanz, Jesús Muñuzuri.** *MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO ELECTRE Y TOPSIS APLICADOS A LA ELECCIÓN DE UN DISPOSITIVO MÓVIL* . Sevilla : s.n., 2015.
23. **Ceballos Martín, Blanca Alejandra.** *Modelos de Decisión Multi-Criterio en Entornos con Incertidumbre: Estudio comparativo y Aplicación*. Granada : Universidad de Granada, 2016. p. 27 y 28.
24. **Foundation, Dubai Future.** [Online] [Cited: 20 junio 2020.] <https://www.dubaifuture.gov.ae/our-initiatives/dubai-3d-printing-strategy/>.
25. **Museo Subacuático de Arte.** [Online] 2019. [Cited: 15 junio 2020.] <https://musamexico.org/es/>.
26. **Arte Sostenible.** [Online] 2020. [Cited: 15 junio 2020.] <https://www.artesostenible.org/la-evolucion-silenciosa/>.
27. **Hola.com.** [Online] 10 junio 2012. [Cited: 15 junio 2020.] <https://www.hola.com/viajes/2012081059944/museo-submarino-esculturas-cancun-mexico/>.
28. **Marine Insight.** [Online] 24 diciembre 2019. [Cited: 15 junio 2020.] <https://www.marineinsight.com/environment/the-silent-revolution-an-artificial-coral-reefs-with-a-difference/>.
29. **Underwater Sculpture.** [Online] [Cited: 15 junio 2020.] https://www.underwatersculpture.com/about/biography/?doing_wp_cron=1592919100.4622321128845214843750.
30. **Underwater Museum Lanzarote.** [Online] [Cited: 15 junio 2020.] <https://underwatermuseumlanzarote.com/es/>.
31. **Dive College Lanzarote.** [Online] [Cited: 15 junio 2020.] <https://www.divecollegelanzarote.com/es/museo-atlantico/>.
32. **Museo Subacuático de Arte.** [Online] 2019. [Cited: 10 junio 2020.] <https://musamexico.org/es/>.
33. **3DWASP.** [Online] [Cited: 15 mayo 2020.] <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>.

Anejo 1: Cálculos realizados para la obtención de los costes de fabricación de arrecifes artificiales mediante impresión 3D

En el presente anejo, se va a tratar de exponer los cálculos que se han elaborado para obtener los costes de fabricación de cada arrecife de tamaño pequeño y de tamaño grande según cada forma de impresión.

Análisis mediante impresión 3D

A continuación, se expone la forma en que se ha procedido a calcular los costes:

El coste de fabricación es la suma de los siguientes costes: material, material auxiliar, personal, amortización y operación (excluido mano de obra).

Así, el coste de amortización se calcula gracias a la siguiente expresión:

$$\text{Coste amortización} = \frac{\text{Coste de la impresora} + \text{equip. auxiliares (€)}}{\text{Vida útil (año)} \cdot \text{Horas de uso anuales} \left(\frac{h}{\text{año}}\right)} \cdot \text{horas empleadas (h)}$$

Y el coste de operación (excluido mano de obra) será la suma del coste de la luz y del coste de mantenimiento, como se expone a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Coste de operación} &= \text{Coste de la luz} + \text{Coste de mantenimiento} \\ &= 0,4 \frac{\text{€}}{h} \cdot \text{horas empleadas} + 30 \% \cdot \text{Coste amortización} \end{aligned}$$

Como se mencionó en el trabajo, se han definido ciertas variables de forma fija: vida útil = 10 años; horas de empleo al año = 1.000; coste horario por cada persona trabajando = 10 €/h; coste de la luz = 0,4 €/h; coste de mantenimiento = 30 % del coste de amortización.

Los costes de los materiales se han definido así:

- Cemento = 80 €/t.
- Arena = 10 €/t.
- Cenizas volantes = 70 €/t.
- Caolín = 150 €/t.
- Aditivos = 370 €/t.

Y los costes de los materiales auxiliares empleados son:

- Arena de cimbrado = 70 € (para arrecife pequeño) y 175 € (para arrecife grande).
- Cercos = 65 € (para arrecife pequeño) y 140 € (para arrecife grande).
- Palé + tapa = 45 € (para arrecife pequeño) y 90 € (para arrecife grande)



Empleando impresora con brazo robótico

En el caso del arrecife de tamaño pequeño:

- Coste del material: considerando el empleo de $0,5 \text{ m}^3$ de material y con una densidad media de $\gamma = 2,2 \text{ t/m}^3$, se obtiene un empleo de $1,1 \text{ t}$. Con un coste medio de la tonelada de 50 € , el coste del material es de $55,00 \text{ €}$.
- Coste del material auxiliar: sumando los 3 datos anteriormente dados, el coste es de $180,00 \text{ €}$.
- Coste del personal: resulta ser: $2 \text{ personas} \cdot 4 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 80,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: el coste de la impresora es de 23.000 € y de los equipos auxiliares analizados es de 5.000 € . Con lo cual, el coste de amortización es de: $\frac{28.000 \text{ €}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 4 \text{ h} = 11,20 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 4 \text{ h} + 30\% \cdot 11,20 \text{ €} = 4,96 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de $331,16 \text{ €}$.

Y para el caso del arrecife de tamaño grande:

- Coste del material: se ha considerado ahora, un incremento del 50% del material, con lo que el empleo de material es de $1,65 \text{ t}$, suponiendo la misma densidad, el coste es de $82,50 \text{ €}$.
- Coste del material auxiliar: sumando los datos para el caso de arrecife de tamaño grande, es de $405,00 \text{ €}$.
- Coste del personal: se necesitan ahora 20 horas de trabajo para obtener un arrecife de tamaño grande, por tanto: $2 \text{ personas} \cdot 20 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 400,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: se obtiene que: $\frac{28.000 \text{ €}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 20 \text{ h} = 56,00 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 20 \text{ h} + 30\% \cdot 56,00 \text{ €} = 24,80 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de $968,30 \text{ €}$.



Empleando impresora delta

Para el caso del arrecife de tamaño pequeño:

- Coste del material: con la dosificación empleada por la Universidad de Cantabria y el empleo de cada coste, el coste del material resulta ser de: 25,41 €.
- Coste del material auxiliar: se supone el mismo valor que la impresora con brazo robot, 180,00 €.
- Coste del personal: se obtiene que: $4 \text{ personas} \cdot 8 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 320,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: el coste de la impresora es de 16.000 € y el de los equipos auxiliares analizados es de 2.000 €. Con lo cual, el coste de amortización es de: $\frac{18.000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 8h = 14,40 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 8 h + 30 \% \cdot 14,40\text{€} = 7,52 \text{ €}$.

Finalmente, sumando todos los costes, resulta ser de 547,33 €.

Y para el caso del arrecife de tamaño grande:

- Coste del material: con la dosificación empleada por la Universidad de Cantabria para ese tamaño y el empleo de cada coste, el coste del material resulta ser de: 127,05 €
- Coste del material auxiliar: se ha considerado la misma cantidad que en la de tipo delta, 405,00 €.
- Coste del personal: se necesitan ahora 47 horas de trabajo para obtener un arrecife de tamaño grande, por tanto: $4 \text{ personas} \cdot 47 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 1.880,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: se obtiene que: $\frac{18.000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 47 h = 84,60 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 47 h + 30 \% \cdot 84,60 \text{ €} = 44,18 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 2.540,83 €.



Empleando impresora cartesiana

En el caso de la impresora cartesiana y el arrecife de tamaño pequeño:

- Coste del material: se considera el empleo de $0,5 \text{ m}^3$ de material con una densidad también de $\gamma = 2,2 \text{ t/m}^3$ y un coste medio de 50 €/t , el coste es de $55,00 \text{ €}$.
- Coste del material auxiliar: se ha considerado el mismo valor que para la impresora tipo delta, dado que emplean los mismos materiales, siendo el coste de $180,00 \text{ €}$.
- Coste del personal: resulta ser: $2 \text{ personas} \cdot 8 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 160,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: el coste de la impresora y equipos auxiliares agrupados es de 65.000 € . Con lo cual, el coste de amortización es de: $\frac{65000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 8 \text{ h} = 52,00 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 8 \text{ h} + 30\% \cdot 52,00\text{€} = 18,80 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de $465,80 \text{ €}$.

Y para el caso del arrecife de tamaño grande:

- Coste del material: se ha considerado ahora, un incremento del 50% del material (por el aumento de sus dimensiones), con lo que el empleo de material es de $1,65 \text{ t}$, suponiendo la misma densidad, el coste es de $82,50 \text{ €}$.
- Coste del material auxiliar: se ha considerado la misma cantidad, $405,00 \text{ €}$.
- Coste del personal: se necesitan ahora 20 horas de trabajo para obtener un arrecife de tamaño grande, por tanto: $2 \text{ personas} \cdot 20 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 400,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: se obtiene que: $\frac{56000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 20 \text{ h} = 130,00\text{€}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 20 \text{ h} + 30\% \cdot 130,00\text{€} = 47,00 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de $1.064,50 \text{ €}$.



Empleando impresora cilíndrica

En el caso del arrecife de tamaño pequeño:

- Coste del material: se considera el mismo valor que para la impresora tipo delta, siendo dicho coste de 25,41 €.
- Coste del material auxiliar: asimismo, se ha considerado el mismo valor que para la impresora tipo delta, 180,00 €.
- Coste del personal: resulta ser: $2 \text{ personas} \cdot 8 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 160,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: el coste de la impresora es de 20.000 € y los equipos auxiliares empleados de 2.000 €. Con lo cual, el coste de amortización es de: $\frac{22.000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 8\text{h} = 17,60 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 8 \text{ h} + 30\% \cdot 17,60\text{€} = 8,48 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 391,49 €.

Y para el caso del arrecife de tamaño grande:

- Coste del material: se considera el mismo valor que para la impresora tipo delta, siendo dicho coste de 127,05 €.
- Coste del material auxiliar: se ha considerado la misma cantidad, también, que en la de tipo delta, 405,00 €.
- Coste del personal: se necesitan ahora 47 horas de trabajo para obtener un arrecife de tamaño grande, por tanto: $2 \text{ personas} \cdot 47 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 940,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: se obtiene que: $\frac{22.000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 47 \text{ h} = 103,40 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 20 \text{ h} + 30\% \cdot 103,40\text{€} = 49,82 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 1.625,27 €.



Empleando impresora 'D-Shape'

Y finalmente, para el arrecife de tamaño pequeño:

- Coste del material: se ha estimado el coste de dragar el material, del empleo del cemento sorel y del agente aglutinante, siendo el total de 2.000,00 €
- Coste del material auxiliar: se ha considerado el mismo valor, 180,00 €.
- Coste del personal: resulta ser: $5 \text{ personas} \cdot 8 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 400,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: el coste de la impresora es de 250.000 € y los equipos auxiliares empleados de 4.000 €. Con lo cual, el coste de amortización es de: $\frac{250\,000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 8\text{h} = 203,20 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 8 \text{ h} + 30\% \cdot 203,20\text{€} = 64,16 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 2.847,36 €.

Y para el caso del arrecife de tamaño grande:

- Coste del material: el coste estimado total se ha incrementado un 50 % por el aumento de sus dimensiones, siendo dicho coste de 3.000,00 €.
- Coste del material auxiliar: se ha considerado la misma cantidad que en la de tipo delta, 405,00 €.
- Coste del personal: Se necesitan ahora 20 horas de trabajo para obtener un arrecife de tamaño grande, por tanto: $5 \text{ personas} \cdot 20 \frac{\text{horas empleadas}}{\text{persona}} \cdot 10 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 1.000,00 \text{ €}$.
- Coste de amortización: Se obtiene que: $\frac{250\,000\text{€}}{10 \text{ años} \cdot 1.000 \frac{\text{h}}{\text{año}}} \cdot 20 \text{ h} = 508,00 \text{ €}$.
- Coste de operación (excepto coste del personal): corresponde a la suma de: $0,4 \frac{\text{€}}{\text{h}} \cdot 20 \text{ h} + 30\% \cdot 508,00\text{€} = 160,40 \text{ €}$.

Sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 5.073,40 €.



Análisis mediante encofrado impreso en 3D

Se procede a explicar el procedimiento para calcular el coste de fabricar un encofrado impreso en 3D:

El coste de fabricación es la suma de los siguientes costes: material, material auxiliar, mano de obra, amortización y operación (excluido mano de obra).

El coste del material auxiliar es un 10 % del coste del material.

El coste de la mano de obra se ha supuesto igual a un 10 % del coste del material.

El coste de amortización se calcula gracias a la siguiente expresión:

$$\text{Coste amortización} = \frac{\text{Coste de la impresora} + \text{equip. auxiliares}(\text{€})}{\text{Vida útil (año)} \cdot \text{Horas de uso anuales} \left(\frac{h}{\text{año}}\right)} \cdot \text{horas empleadas (h)}$$

Y el coste de operación (excluido mano de obra) será la suma del coste de la luz y del coste de mantenimiento, como se expone a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Coste de operación} &= \text{Coste de la luz} + \text{Coste de mantenimiento} \\ &= 0,4 \frac{\text{€}}{h} \cdot \text{horas empleadas} + 30 \% \cdot \text{Coste amortización} \end{aligned}$$

Las siguientes variables fijadas son: vida útil = 20 años; horas de empleo al año = 1.000; coste horario por cada persona trabajando = 10 €/h; coste de la luz = 0,4 €/h; coste de mantenimiento = 30 % del coste de amortización.



Para el molde que sirve de arrecife de tamaño pequeño:

- Coste del material: se ha obtenido un valor de 3.394,79€.
- Coste del material auxiliar: supone ser el 10% del coste del material, 339,48€.
- Coste de la mano de obra: resulta ser el 10% del coste del material, 339,48€.
- Coste de amortización: el coste de la impresora y equipo auxiliares es de 55.000€.

$$\text{El coste de amortización es de: } \frac{5\ 500\text{€}}{20\ \text{años} \cdot 1.000\frac{h}{\text{año}}} \cdot 206\ h = 566,50\text{€}.$$

- Coste de operación (excluido mano de obra): corresponde a la suma de: $0,4\frac{\text{€}}{h} \cdot 206\ h + 30\% \cdot 566,50\text{€} = 252,35\text{€}.$

Así, pues, sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 4.892,60€.

Y para el molde que sirve de arrecife de tamaño grande:

- Coste del material: se ha obtenido un valor de 20.650,37€.
- Coste del material auxiliar: supone ser el 10% del coste del material, 2.065,04€.
- Coste de la mano de obra: resulta ser el 10% del coste del material, 2.065,04€.
- Coste de amortización: resulta ser: $\frac{5\ 500\text{€}}{20\ \text{años} \cdot 1.000\frac{h}{\text{año}}} \cdot 1.003\ h = 2.758,25\text{€}.$

- Coste de operación: corresponde a la suma de: $0,4\frac{\text{€}}{h} \cdot 1.003\ h + 30\% \cdot 2.758,25\text{€} = 1.228,68\text{€}.$

Así, pues, sumando todos los costes, se obtiene que el coste de fabricación es de 28.767,37€.

Anejo 2: Cálculos realizados para la obtención del análisis multicriterio

En el presente anejo, se procede a exponer los cálculos y las tablas obtenidas para la elaboración del análisis multicriterio mediante los métodos TOPSIS y WASPAS. Como caso concreto, corresponde al arrecife de tamaño pequeño sin mezcladora ni bomba alimentadora.

Análisis mediante el método TOPSIS

Paso 1: Se parte de la tabla siguiente, que muestran las alternativas, los criterios y las ponderaciones correspondientes:

Ponderación criterio	0,325714	0,198571	0,241429	0,234286
	Coste de fabricación (€)	Tiempo (h)	Complejidad de la forma	Coste del personal (€)
Brazo robótico	251,16	4	1	80,00
Delta	227,33	8	2	320,00
Cartesiana	305,80	8	1	160,00
Cilíndrica	231,49	8	1	160,00
D-Shape	2.447,36	8	3	400,00

Tabla 31: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora. Tabla 2.

Se procede a mostrar el proceso:

$$D = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2j} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \vdots & p_{ij} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mj} & \dots & p_{mn} \end{pmatrix}$$

Donde p_{ij} corresponde a la ejecución de alternativa 'i' respecto al criterio 'j'.

Paso 2: Se procede a normalizar la matriz de decisión:

$$r_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (p_{ij})^2}}, \quad i = 1,2,3 \dots m; \quad j = 1,2,3 \dots m$$

	Coste de fabricación	Tiempo	Complejidad de forma	Coste del personal
Brazo robótico	0,100452	0,242536	0,250000	0,141421
Delta	0,090922	0,485071	0,500000	0,565685
Cartesiana	0,122306	0,485071	0,250000	0,282843
Cilíndrica	0,092585	0,485071	0,250000	0,282843
D-Shape	0,978832	0,485071	0,750000	0,707107

Tabla 32: Matriz de decisión normalizada empleando el método TOPSIS.

Paso 3: Se calcula la matriz de decisión normalizada ponderada de la forma siguiente:

$$[v_{ij}] = [w_j \cdot r_{ij}]$$

Donde $[v_{ij}]$ corresponde a la matriz de decisión normalizada y w_j se refiere al peso del criterio 'j'. Además, se cumple que:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1.$$

Paso 4: Cálculo de la solución ideal positiva (PIS) y negativa (NIS).

La solución ideal positiva se determina de la siguiente forma:

$$V^+ = (v_1^+, v_2^+, v_3^+, \dots, v_n^+) = \{(\max v_{ij} | j \in I), (\min v_{ij} | j \in J)\}$$

La solución ideal negativa se determina de la siguiente forma:

$$V^- = (v_1^-, v_2^-, v_3^-, \dots, v_n^-) = \{(\min v_{ij} | j \in I), (\max v_{ij} | j \in J)\}$$

Donde I está relacionado con criterios beneficiosos y J con no beneficiosos.

	Coste de fabricación	Tiempo	Complejidad de forma	Coste del personal
Brazo robótico	0,032719	0,048161	0,060357	0,033133
Delta	0,029614	0,096321	0,120714	0,132532
Cartesiana	0,039837	0,096321	0,060357	0,066266
Cilíndrica	0,030156	0,096321	0,060357	0,066266
D-Shape	0,318820	0,096321	0,181071	0,165665
V⁺	0,029614	0,048161	0,181071	0,033133
V⁻	0,318820	0,096321	0,060357	0,165665

Tabla 33: Matriz de decisión normalizada ponderada y los valores de las soluciones ideales positivas y negativas de cada criterio.

Paso 5: Se determina la distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva y negativa de la siguiente forma:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}; \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}; \quad i = 1, 2, \dots, m$$



Paso 6: Se calcula la cercanía relativa de cada alternativa la solución ideal positiva;

$$C_c^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}; \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad 0 \leq C_c^* \leq 1$$

Donde C_c^* es el coeficiente de distancia relativa.

	Si +	Si -	Si+ + Si-	C_c^*
Brazo robótico	0,120754	0,318964	0,439718	0,725383
Delta	0,125867	0,297288	0,423156	0,702551
Cartesiana	0,134513	0,296161	0,430674	0,687669
Cilíndrica	0,134125	0,305298	0,439422	0,694770
D-Shape	0,321751	0,120714	0,442465	0,272822

Tabla 34: Distancia a las soluciones ideales positivas y negativas de cada método de impresión así como su suma y la cercanía relativa de cada alternativa a la solución ideal positiva.

Paso 7: Se establece el ranking con las diferentes alternativas y se selecciona la opción cuya C_c^* sea más próxima a 1.

	C_c^*	Ranking
Brazo robótico	0,725383	1
Delta	0,702551	2
Cartesiana	0,687669	4
Cilíndrica	0,694770	3
D-Shape	0,272822	5

Tabla 35: Cercanía relativa de cada alternativa a la solución ideal positiva y el ranking obtenido mediante el método TOPSIS.



Análisis mediante el método WASPAS

Paso 1: Se parte de la tabla siguiente, que muestra las alternativas, los criterios y las ponderaciones correspondientes:

Ponderación criterio	0,325714	0,198571	0,241429	0,234286
	Coste de fabricación (€)	Tiempo (h)	Complejidad de la forma	Coste del personal (€)
Brazo robótico	251,16	4	1	80,00
Delta	227,33	8	2	320,00
Cartesiana	305,80	8	1	160,00
Cilíndrica	231,49	8	1	160,00
D-Shape	2.447,36	8	3	400,00

Tabla 36: Valores otorgados en cada criterio y cada tipo de impresión para el caso del arrecife de tamaño pequeño sin bomba alimentadora. Tabla 3.

Se procede a mostrar el proceso:

$$D = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1j} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2j} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \vdots & p_{ij} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mj} & \dots & p_{mn} \end{pmatrix}$$

Donde p_{ij} corresponde a la ejecución de alternativa 'i' respecto al criterio 'j'.

Paso 2: Si el criterio es beneficioso se anota el valor máximo; si no es beneficioso se anota el valor mínimo.

Paso 3: Se procede a normalizar la matriz de decisión:

$$r_{ij} = \frac{p_{ij}}{\min(v_j | j \in I)} \quad \text{o} \quad r_{ij} = \frac{P_{ij}}{\max(v_j | j \in J)}$$

Donde I está relacionado con criterios beneficiosos y J con no beneficiosos.

	Coste de fabricación	Tiempo	Complejidad de forma	Coste del personal
Brazo robótico	0,905120	1,000000	0,333333	1,000000
Delta	1,000000	0,500000	0,666667	0,250000
Cartesiana	0,743394	0,500000	0,333333	0,500000
Cilíndrica	0,982029	0,500000	0,333333	0,500000
D-Shape	0,092888	0,500000	1,000000	0,200000

Tabla 37: Matriz de decisión normalizada empleando el método WASPAS.



Paso 4: Se halla en primer lugar, la matriz de decisión normalizada mediante el modelo de suma, de la siguiente forma:

$$[v_{ij}^1] = [w_j \cdot r_{ij}]$$

Donde $[v_{ij}^1]$ corresponde a la matriz de decisión normalizada y w_j se refiere al peso del criterio 'j'. Además, se cumple que:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1.$$

	Coste de fabricación	Tiempo	Complejidad de forma	Coste del personal
Brazo robótico	0,294811	0,198571	0,080476	0,234286
Delta	0,325714	0,099286	0,160952	0,058571
Cartesiana	0,242134	0,099286	0,080476	0,117143
Cilíndrica	0,319861	0,099286	0,080476	0,117143
D-Shape	0,030255	0,099286	0,241429	0,046857

Tabla 38: Matriz de decisión normalizada mediante el modelo de suma empleando el método WASPAS.

Paso 5: Por filas, se obtiene la puntuación de rendimiento (PS_i^1).

$$PS_i^1 = \sum_{i=1}^m r_{ij}$$

Puntuación de rendimiento	
Brazo robótico	0,808144
Delta	0,644524
Cartesiana	0,539039
Cilíndrica	0,616766
D-Shape	0,417826

Tabla 39: Puntuación de rendimiento de la matriz de decisión normalizada mediante el modelo de suma empleando el método WASPAS.

Paso 6: Se halla en segundo lugar la matriz de decisión normalizada mediante el modelo de potencia, de la siguiente forma:

$$[v_{ij}^2] = [w_j^{r_{ij}}]$$

Donde $[v_{ij}^2]$ corresponde a la matriz de decisión normalizada y w_j se refiere al peso del criterio 'j'. Se sigue cumpliendo que:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1.$$

	Coste de fabricación	Tiempo	Complejidad de forma	Coste del personal
Brazo robótico	0,968052	1,000000	0,767025	1,000000
Delta	1,000000	0,871413	0,906748	0,722680
Cartesiana	0,907934	0,871413	0,767025	0,850106
Cilíndrica	0,994111	0,871413	0,767025	0,850106
D-Shape	0,461158	0,871413	1,000000	0,685869

Tabla 40: Matriz de decisión normalizada mediante el modelo de potencia empleando el método WASPAS.



Paso 7: Por filas, se obtiene la puntuación de rendimiento (PS_i^2).

$$PS_i^2 = \prod_{i=1}^m r_{ij}$$

Puntuación de rendimiento	
Brazo robótico	0,742520
Delta	0,571027
Cartesiana	0,515894
Cilíndrica	0,564860
D-Shape	0,275623

Tabla 41: Puntuación de rendimiento de la matriz de decisión normalizada mediante el modelo de potencia empleando el método WASPAS.

Paso 8: Se calcula la puntuación de rendimiento conjunta de cada alternativa, que resulta ser la media aritmética de ambos valores (PS_i).

$$PS_i = \frac{PS_i^1 + PS_i^2}{2}$$

Puntuación de rendimiento conjunta	
Brazo robótico	0,775332
Delta	0,607775
Cartesiana	0,527467
Cilíndrica	0,590813
D-Shape	0,346724

Tabla 42: Puntuación de rendimiento conjunta de cada alternativa.

Paso 9: Se establece el ranking con las diferentes alternativas y se selecciona la opción, de forma jerárquica, cuyo PS sea más elevado (22) .

	Puntuación de rendimiento conjunta	Ranking
Brazo robótico	0,775332	1
Delta	0,607775	2
Cartesiana	0,527467	4
Cilíndrica	0,590813	3
D-Shape	0,346724	5

Tabla 43: Puntuación de rendimiento conjunta de cada alternativa así como el ranking obtenido mediante el método WASPAS.



Anejo 3: Arrecifes artificiales convertidos en arte

En este anejo se quiere hacer un breve comentario sobre el empleo de arrecifes artificiales como forma de expresión artística. Aparte de promover la recuperación medioambiental, es también posible hacer de ello un reclamo turístico y evitar el deterioro en otras zonas más susceptibles de perder especies marinas y biodiversidad.

El Museo Subacuático de Arte (MUSA) se ubica en el mar Caribe mexicano, en las aguas que rodean Cancún, Punta Nizuc e Isla Mujeres (estado mexicano de Quintana Roo). ‘La evolución silenciosa’ es la obra principal del museo, idea del artista Jason deCaires Taylor (26).

La creación de este museo, tiene el propósito de atraer el turismo de la zona y reducir el número de turistas que visitan los corales naturales, que son cerca de 750.000 al año (27), además de sensibilizar a los visitantes con su conservación. Con el objetivo de fomentar la regeneración de los arrecifes y aportar un atractivo estético, se decidió recrear a voluntarios de todo el mundo, aunque principalmente se trata de personas mexicanas, por ello, la obra está formada por 473 esculturas diferentes sumergidas unos 9 metros por debajo del nivel de mar, que ilustran acciones cotidianas, homenajes, etc. (28).

Las esculturas están fabricadas mediante fibra de vidrio y cemento con pH neutro, el cual promueve la regeneración de arrecifes (29).

Jason ganó gran popularidad en 2006 cuando creó el primer parque de esculturas submarinas del mundo en la costa oeste de Granada (Antillas Menores). Está catalogada como una de las 25 maravillas del mundo, premio otorgado por National Geographic (30).

Sigue construyendo más esculturas en diversos lugares del mundo y ha fundado el ‘Museo Atlántico Lanzarote’, el primero en el Atlántico, que se ubica en Playa Blanca, Lanzarote (31). Allí, ha sumergido más esculturas a una profundidad de unos 14 metros por debajo del nivel del mar, tales como barcos con personas ‘a bordo’ (haciendo referencia a la crisis de los refugiados), árboles, personas ensimismadas con productos tecnológicos... (32) (33).

Con ello, cada escultura tiene su propio mensaje que estará presente antes de que se oscurezcan a través del crecimiento de la vida marina.



Ilustración 51: 26 Arrecifes artificiales con forma humana cogidos de la mano homenajeando a los esclavos que fueron lanzados al mar. Fuente: <https://tataranietos.com/2013/09/17/la-evolucion-silenciosa/>



Ilustración 52: 'La evolución silenciosa', conjunto de arrecifes artificiales con forma de personas. Se aprecia un submarinista a la derecha visitándolas. Fuente: <https://tataranietos.com/2013/09/17/la-evolucion-silenciosa/>



Ilustración 53: Arrecifes artificiales que representan una lancha motora y a un conjunto de personas en ella. Se observa a un submarinista al fondo. Fuente: Lanzalux.com



Ilustración 54: Arrecife artificial que representa a una mujer sosteniendo algo entre sus manos. Fuente: <https://www.divecollegelanzarote.com>



Ilustración 55: Arrecife artificial que representa a una mujer que camina mientras sostiene con su mano derecha un objeto que semeja ser un dispositivo tecnológico. Fuente: <https://www.divecollegelanzarote.com>



Encuesta: Selección de importancia entre 4 criterios

Objetivo

Se desea averiguar qué criterios de entre los 4 siguientes resultan ser más importantes con el propósito de poder elegir de entre distintas formas de impresión 3D aquella que resulte ser la óptima. Así, con vuestras valoraciones conseguiré realizar un análisis multicriterio en mi Trabajo Final de Grado. Para ello, las formas de impresión estudiadas son 4:

- Mediante la técnica de extrusión:
 - ✚ Impresión mediante impresora tipo delta: Es como la que tenemos nosotros abajo. Se basa en el robot tipo delta.
 - ✚ Impresión mediante impresora cilíndrica: Son impresoras cuyos ejes de movimiento se asemejan a una grúa (movimiento en el eje Y-Z- θ) y permiten que se puedan acoplar más impresoras del mismo tipo a ella.
 - ✚ Impresión mediante Brazo Robot: Gracias al empleo de un brazo robot se pueden fabricar arrecifes artificiales con un diámetro que varía en función del tipo de brazo robot seleccionado (hay modelos más grandes, otro más pequeños...)
- Mediante la técnica de binder-jetting: Este tipo de impresión se sirve de los 2 pórticos que posee, uno que distribuye y extiende el material y otro que expulsa las gotas con aglomerante mediante unas electroválvulas y con ello consigue que la estructura se sustente por sí misma durante el proceso de construcción y una vez finalizado todo el proceso.
 - ✚ Impresión mediante impresora tipo 'D-Shape' (se basa en las de tipo cartesiano): Sus movimientos corresponden a los de un plano cartesiano con los ejes X-Y-Z. La impresora 'D-Shape' emplea dicha técnica.

Descripción de los criterios

- **Coste de fabricación:** Este criterio tiene como objetivo cuantificar el coste de fabricación de un arrecife artificial (€). Los valores que se tienen en cuenta son el coste del material, el coste del material auxiliar necesario, el coste de amortización de la impresora y el coste por operación (excepto el coste de personal, que será evaluado en un cuarto criterio independiente).
- **Tiempo:** Este criterio tiene como objetivo cuantificar el tiempo, en horas, que se necesita para fabricar un arrecife. Se considera únicamente el tiempo de fabricación intrínseco, no el de los preparativos previos.
- **Complejidad de forma:** Este criterio hace referencia a la forma que se puede realizar mediante cada método de impresión. Se valorará en una escala del 1 al 3 de la siguiente forma:
 - 1: paredes verticales
 - 2: formas complejas encofrables (mediante el empleo de un encofrado y un cimbrado de arena)
 - 3: formas complejas no encofrables (como lo realiza la impresora 'D-Shape')
- **Coste del personal:** Este criterio tiene como objetivo cuantificar el coste de personal necesario que presenta cada tipo de impresión (€). Actualmente hay tipos de impresión cuyo proceso apenas requiere la presencia del personal, con lo cual este coste se reduce; y otros en los que por diversos motivos se requiere la presencia de bastante personal, con lo cual este coste aumenta.



Encuesta para la valoración de los criterios

Indique el valor otorgado a cada parámetro en una escala del 0 al 100, donde el 0 es una importancia nula y el 100 una importancia máxima. La suma de los 4 criterios debe ser igual a 100.

Parámetro	Valor
Coste de fabricación	
Tiempo	
Complejidad de forma	
Coste del personal	