

Biological and physicochemical evaluation of mortar as substrate for manufacturing artificial reef

Monica Andrea Bedoya-Gutiérrez^a, Jorge Iván Tobón^a, Tatiana Correa-Herrera^b
& Juan Diego Correa-Rendón^b

^a Grupo del Cemento y Materiales de Construcción CEMATCO. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. mabedoya@unal.edu.co, jitobon@unal.edu.co

^b Grupo de Estudios Oceánicos, Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia. tatianacorrea@unat.edu.co, jdiego.correa@udea.edu.co

Received: February 19th, 2016. Received in revised form: April 22th, 2016. Accepted: June 3th, 2016

Abstract

Due to several deterioration of coral reefs around the world, has increased the need to rehabilitate marine environments. Artificial reefs have been proposed as a tool for conservation of these ecosystems. As part of an initiative to develop modules forming artificial reefs made of ecological concrete for the conservation of the biodiversity in the Colombian Caribbean; this work constitutes a starting point. During eleven months two trapezoidal plates were submerged near to Isla Palma, Colombian Caribbean; plates were fabricated in concrete with portland cement and the aggregates were replaced by ceramic waste. After biological and physicochemical evaluations of the material exposed to marine environment was concluded that this is a favorable substrate for the coral reefs, and the plates were colonized by more than 30% of its surface by marine organisms, their structure found internally stable, and there were no adverse effects on marine biota near the test site.

Keywords: Ecological mortars; artificial reefs; waste resource; use of waste; conservation.

Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales

Resumen

Debido al deterioro de los arrecifes de coral en todo el mundo ha aumentado la necesidad de rehabilitar los entornos marinos. Los arrecifes artificiales se han propuesto como una herramienta para la conservación de estos ecosistemas. Durante once meses se sumergieron dos placas en forma trapezoidal, en Bajo Grande (Isla Palma), Caribe Colombiano. Esto se realizó como parte de una iniciativa para desarrollar módulos formadores de arrecifes artificiales. Se fabricó un mortero ecológico donde se reemplaza el uso de agregados naturales por residuos cerámicos. Las placas expuestas al medio marino fueron colonizadas por organismos en un 30% de su superficie aproximadamente, la estructura interna de las muestras se mantuvo estable y no se apreciaron efectos adversos sobre la biota marina cercana al lugar de prueba. Después de hacer evaluaciones biológicas y fisicoquímicas del material expuesto se concluyó que éste constituye un sustrato favorable para el desarrollo de los arrecifes artificiales.

Palabras clave: Mortero ecológico; arrecifes artificiales; aprovechamiento de residuos; conservación.

1. Introducción

Los arrecifes de coral son el hábitat de una cuarta parte de todas las especies marinas y son uno de los ecosistemas más diversos de todo el mundo, [1,2]. Son esenciales para proteger las costas de la acción erosiva de las olas y tormentas, además son cruciales para la preservación de otros ecosistemas como las praderas marinas y los manglares, [3]. Son el suministro de

aproximadamente el 5% de las pesquerías mundiales, y son la fuente de alimentación, subsistencia e ingresos de muchas poblaciones en desarrollo [4,5].

Estos ecosistemas se ven afectados por el calentamiento de las aguas superficiales que conducen al blanqueamiento del arrecife [6,7]. En algunas regiones como el Caribe, las pérdidas de coral se han estimado hasta en un 80% y además de los factores climáticos, se suma a su deterioro los

How to cite: Bedoya-Gutiérrez, M.A., Tobón, J.I., Correa-Herrera, T. & Correa-Rendón, J.D., Evaluación biológica y fisicoquímica de un mortero como sustrato para la fabricación de arrecifes artificiales. Boletín de Ciencias de la Tierra, (40), 55-63, 2016.

impactos causados por otros tipos de estrés como la pesca excesiva, la sedimentación y la contaminación que aumenta la acidificación del agua de mar [8].

Los Arrecifes Artificiales (AA) son estructuras creadas por el hombre principalmente para incrementar la producción natural de los recursos biológicos, con el fin de proporcionar refugio adicional para peces, cambiar su abundancia local, mejorar la pesca, disminuir la presión sobre los arrecifes existentes y restaurar el sustrato buscando el asentamiento y colonización de comunidades de invertebrados y algas en estos sustratos [9,10].

Existen diferentes técnicas para la creación de AA, desde cascos de botes sumergidos hasta estructuras hechas en llantas, todas estas estructuras se instalan buscando mejorar la protección costera y la conservación de los recursos vivos.

Los AA para la conservación, los cuales en su mayoría son fabricados en concreto, tienen menor volumen en comparación a el de los arrecifes de protección y por lo tanto no están provistos de refuerzo, evitando los daños causados por la degradación del acero con la penetración ion cloruro, de esta forma se asegura que la superficie y la estructura proporcione refugio a las especies marinas y sirva como sustrato artificial para el nuevo hábitat, [9].

En general, una gran parte de las investigaciones sobre AA coinciden en sus apreciaciones acerca de la eficiencia de estos para crear nuevos hábitats con fines pesqueros, áreas de reserva, mitigación ambiental e investigación. Sin embargo, la polémica acerca de la función y beneficio de los arrecifes sigue existiendo debido al poco tiempo que se estudian estos hábitats, lo que no permite conocer su desarrollo e impacto en el medio [6,10-12]. Así las cosas es posible que por estas mismas razones no se haya abordado en profundidad cómo los materiales utilizados para la construcción de AA pueden influir en el desarrollo del hábitat de formación de organismos bentónicos.

Diferentes tipos de materiales han sido utilizados en el reclutamiento coralino y el desarrollo temprano de la comunidad bentónica en arrecifes artificiales, su selección varía de acuerdo con el propósito final de creación del AA, en varios casos el concreto es el material predominante por su durabilidad, disponibilidad y características que permiten dar forma y estabilidad a las estructuras formadoras de arrecifes [16].

La durabilidad es el requisito principal para la calidad del concreto y otros materiales asociados como los morteros, y más aún, si estos están expuestos a ambientes marinos agresivos. En este sentido se busca refinar la permeabilidad y la porosidad de la matriz, lo que a su vez mejora su resistencia a la penetración de sulfatos y otras sustancias químicas agresivas provenientes del agua de mar. Para este propósito, se utilizan en los concretos y morteros agregados no convencionales de tipos industriales resistentes y estables con diferentes gradaciones buscando materiales más compactos. [17,18].

Buscando mejorar la durabilidad de un mortero para fabricar arrecifes artificiales, el desarrollo de este trabajo ha contemplado el uso de un agregado no convencional subproducto de la industria cerámica, el cual es químicamente estable y de baja porosidad, promoviendo al mismo tiempo un mortero más sostenible en comparación con los morteros tradicionales [19,20,21]. La selección de un mortero con agregados de tamaño inferior a los usados

comúnmente, permite proyectar estructuras esbeltas de menor peso mejorando su trabajabilidad al momento de la instalación; así mismo, la textura que confieren este tipo de agregados a la superficie del material mejora la rugosidad del mismo, condición clave para una adecuada relación área expuesta versus colonización [22].

1.1. Área de estudio

La inmersión de los módulos de AA se realizó en un área de bajos coralinos de las Islas de San Bernardo cerca del Corregimiento de Berrugas (Municipio de San Onofre) ubicado en la parte norte del Golfo de Morrosquillo.

Se eligió este lugar para la realización de la prueba ya que el Golfo de Morrosquillo tiene una ubicación estratégica que le ha dado con el tiempo condiciones ideales para actividades portuarias, turísticas y pesqueras e importancia en términos económicos y servicios territoriales, ya que esta zona fue confirmada como el principal puerto petrolero de Colombia para las próximas décadas. [23].

El Golfo se encuentra rodeado de manglares, sistemas estuarinos y ciénagas, y en las áreas adyacentes existen arrecifes coralinos y pastos marinos [24,25]. En esta zona las actividades de pesca tradicionalmente se realizan sin ningún tipo de control, conformando una de las principales amenazas sobre este recurso, utilizando métodos de pesca ilegales y perjudiciales para el ambiente, que generalmente no discriminan los peces por su tamaño e importancia económica, [26]. Debido a las afectaciones que el ecosistema marino de esta zona ha experimentado, proyectar el desarrollo de una propuesta de arrecifes artificiales es pertinente.

2. Materiales

Se utilizó cemento portland gris tipo I procedente de la cementera Argos S.A ya que está ampliamente disponible en la zona, lo cual es un factor clave al momento de implementación de una propuesta de Arrecifes Artificiales donde intervengan comunidades del área.

Los agregados utilizados fueron residuos de cerámica de platos (tipo biscocho) procedente de Locería Colombiana Corona S.A., los cuales tienen una microestructura estable debido al proceso de cocción a alta temperatura, además de su composición a partir de arcillas caoliniticas y feldespatos.

3. Métodos

3.1. Fabricación de las muestras

Se fabricaron dos placas trapezoidales de mortero con rotura de loza denominadas A y B teniendo en cuenta los procedimientos descritos en la norma ASTM C109 para la elaboración de morteros, la formulación se presenta en la Tabla 1. Los agregados fueron reemplazados en su totalidad por residuos cerámicos para evitar el uso de agregados naturales y demostrar la eficiencia del uso de materiales alternos [27].

Tabla 1.
Composición de los morteros para las placas A y B.

| | Materias Primas | Masa % |
|-------------------|-----------------|--------|
| Mortero de placas | Cemento UG | 30 |
| | Rotura de loza | 70 |
| | Rel. a/c | 0,5 |

Fuente: Propia

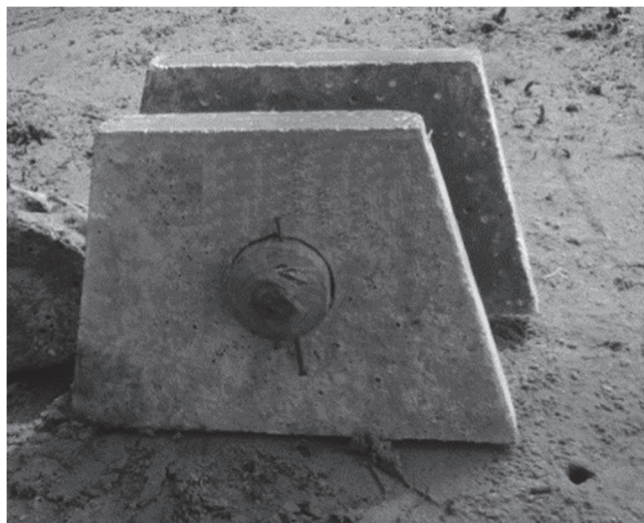


Figura 1. Montaje inicial de las placas A y B
Fuente: Propia

Las placas fueron fabricadas con una perforación central, que se utilizó posteriormente para brindarle estabilidad vertical al montaje en el fondo marino a través de un accesorio de madera (Fig. 1).

3.2. Reducción del tamaño de los agregados y granulometría

Se variaron los tamaños de grano de la loza cerámica en cada placa para observar la influencia de las diferentes distribuciones en las texturas finales de las muestras, ésta condición podría afectar la posterior colonización en el medio marino, adicional una distribución granulométrica con diferentes tamaños de grano en la fabricación de morteros determina el uso de cantidades menores de cemento portland ya que mejora la relación de pasta agregados generando una matriz visiblemente más compacta.

La Fig. 2 presenta la distribución granulométrica de los áridos usados para las dos placas. Se observa que la granulometría de la Placa B contempla el uso de 7 tamaños de grano distribuidos desde 4,76 mm (malla 4) hasta tamaños de 0,149 mm (malla 200), mientras que la distribución de granos para la Placa A se compone por 4 tamaños de partícula desde 4,76 mm (malla 4) hasta 0,6 mm (malla 30).

En general diferentes autores han reportado que la distribución granulométrica realizada con agregados alternativos no siempre se encuentra inscrita dentro de los rangos convencionales correspondientes para agregado natural debido

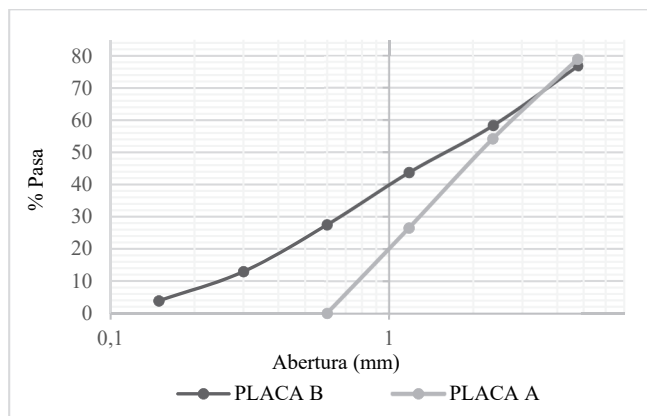


Figura 2. Distribución granulométrica de los agregados usados para las placas A y B.
Fuente: Propia

Tabla 2.
Porcentajes de absorción

| Propiedad | Materias Primas |
|----------------------------|-----------------|
| Densidad nominal | 1,82 |
| Densidad aparente seca | 1,76 |
| Densidad aparente Saturada | 1,79 |
| % Absorción | 1,87 |

Fuente: Propia

al origen de ambos, pero es posible el desarrollo de aplicaciones para elementos específicos [28,29], en este caso con los diferentes tipos de tamaño de grano obtenidos a partir de la trituración se espera que los aspectos de colonización y resistencia se vean afectados para cada placa.

3.3. Absorción

Debido a que los agregados de rotura de loza son más porosos, y normalmente menos densos, que los agregados convencionales por su composición y procesamiento, se realizó el ensayo de absorción para estos según la NTC 1776 y se evaluó su densidad, los resultados se presentan en la Tabla 2.

Con el porcentaje de absorción obtenido de 1,87% se realizó una pre saturación del agregado de rotura de loza para mejorar su manejabilidad en la mezcla y evitar modificar el agua de amasado del cemento.

3.4. Inmersión y extracción de las muestras

Las placas se sumergieron durante 11 meses sobre un bajo de arena rodeado por corales. El sitio de inmersión fue el Bajo Grande entre la isla Boquerón y la Isla de Palma, en las coordenadas geográficas 9° 44' 14,63" N y 75° 43' 44,53" W.

3.5. Evaluación fisicoquímica de las placas

3.5.1. Cambios dimensionales y observación directa

Una vez retirados los epibiontes (Figura 3), se hicieron mediciones de las muestras para evaluar posibles cambios de

volumen del material. Por medio de un pie de rey se tomaron las dimensiones longitudinales y de espesor de cada placa. Luego se fragmentó cada placa en cuatro partes usando una cortadora de disco diamantado, se examinó su estructura interna por medio de inspección binocular y se realizó registro fotográfico para establecer diferencias entre éstas y las superficies expuestas al medio marino.

3.5.2. Cambios internos en el material

Para definir las afectaciones causadas por el agua de mar sobre las placas expuestas, se extrajeron secciones para analizar su pH y la lixiviación de los componentes hidratados. La fenolftaleína es un indicador colorimétrico del cambio del pH, al teñir la superficie de las muestras con esta sustancia es posible identificar variaciones en los pH superiores a 7 a través del aumento de intensidad del color violeta exhibido por la muestra tras la aplicación de dicho reactivo.

Para obtener esta medida, se extrajeron 3 secciones de cada placa y se aplicó fenolftaleína en dichas superficies para identificar los cambios de pH con escalas indicadoras de color las cuales contienen valores numéricos de pH (RILEM CPC-18).

3.5.3. Resistencia a la compresión según la NTC 220 (modificado)

Este ensayo se realizó como medida del desempeño mecánico del mortero con el que se elaboraron las placas expuestas. Para obtener muestras de las placas de mortero de rotura expuesto al medio marino se extrajeron con cortadora de disco secciones cúbicas de cada placa, estas secciones fueron falladas en una máquina de ensayos de compresión marca controls 50-C7022 Sercomp 7.

3.6. Evaluación de la colonización biológica

Se midió el área cubierta por organismos sésiles mediante la superposición de láminas de acetato donde se delinearon grillas con celdas de 1 cm². Algunos elementos de la epibiota se retiraron mediante el uso de bisturí y fueron fijados para su posterior análisis taxonómico mediante la ayuda de guías especializadas. Con la ayuda del programa BioDiversity Pro se calcularon algunos índices de diversidad de las comunidades de epibiontes que colonizó las placas, para analizar variaciones entre ellas.

4. Resultados

4.1. Aspectos fisicoquímicos de las muestras de mortero

4.1.1. Observación a simple vista

De esta manera se identificaron diferencias en la estructura interna de poros para cada placa. En las secciones analizadas de la placa A, se evidenció la aparición de conjuntos milimétricos de poros no interconectados, ubicados alrededor de los áridos de mayor tamaño. Respecto

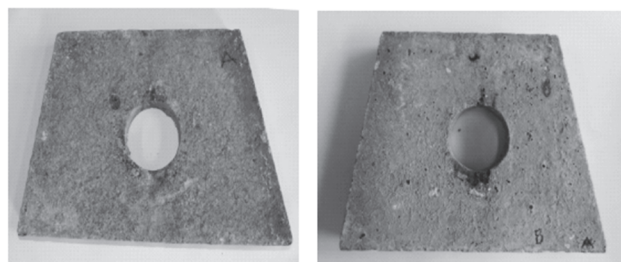


Figura 3. Placa A y B después de retirar los microorganismos de colonización

Fuente: Propia

a la placa B, se observaron distribuciones uniformes de poros más finos entre la pasta y los agregados y una adecuada adherencia entre estos componentes, esto se podría asociar a la presencia de agregados más finos. No se observan conjuntos de poros sectorizados a diferencia de las secciones observadas de la placa A, de hecho los poros existentes se localizan individualmente y presentan diámetros inferiores a un milímetro.

4.1.2. Cambios dimensionales

Después de tomar las medidas correspondientes de ambas placas, se registraron cambios dimensionales volumétricos debido a la colonización de especies.

Como se observa en la Tabla 3, la placa A presenta una diferencia de 0,12 cm de disminución en la base mayor debido a la manipulación en su inmersión y emersión, por otra parte se encuentran expansiones por colonización en la base menor y en la altura de 0,28 y 0,42 cm respectivamente. En total se presentó una expansión volumétrica de la placa del 2,8% después de su colonización. En la placa B se observaron expansiones en la base mayor, menor y la altura de la muestra con valores de 0,01; 0,13 y 0,20 cm respectivamente. En total para esta placa se presentó una expansión volumétrica de la placa del 1,4% después de su exposición al medio marino.

En este caso el fenómeno de expansión para ambas placas se ha desarrollado debido a la colonización de microorganismos marinos, los cuales se ven atraídos por la presencia de carbonato e hidróxido de calcio disponibles en las placas de mortero, los cuales utilizan para sus procesos metabólicos como lo ha expuesto Burt, 2006 [16].

Por otra parte se ha reportado que los fenómenos de expansión en los morteros expuestos a ambientes agresivos

Tabla 3.
Cambios dimensionales en las placas A y B.

| Muestra | Placa | Base mayor | Base menor | Alto | Ancho | Volumen |
|---------------|-------|------------|------------|------|-------|---------|
| Sin colonizar | A | 29,27 | 20,82 | 18,2 | 2,9 | 1261,81 |
| | B | 27,25 | 15,8 | 19,8 | 3,2 | 1379,11 |
| Colonizada | A | 29,15 | 21,1 | 18,6 | 2,9 | 1297,11 |
| | B | 27,26 | 18,63 | 20 | 3,2 | 1398,42 |
| Expansión (%) | A | | | 2,8 | | |
| | B | | | 1,4 | | |

Fuente: Propia

como el agua de mar pueden estar relacionados con ataques por sulfatos [30], sin embargo después de la evaluación del pH interno y la resistencia mecánica de los morteros expuestos es posible atribuir dicho fenómeno en mayor medida a la colonización de los microorganismos marinos como se explicara en los siguientes capítulos.

4.1.3. Lixiviación de Ca

Después de la aplicación de la fenolftaleína en las secciones internas de las placas A y B, se observó una coloración uniforme en tono violeta al interior de las mismas, lo que indica que el pH del mortero se mantuvo básico, con valores convencionales entre doce y catorce, evidenciando que no se presenta el fenómeno de lixiviación de los productos hidratados de la pasta (Figura 4-a).

En cambio, las áreas superficiales expuestas directamente al medio marino, no presentaron cambios de tono tras la aplicación del reactivo (Figura 4-b). Esto sugiere una tendencia de disminución del pH hacia un rango neutro, con valores alrededor de siete, además se observa la presencia de una capa delgada de colonización que protege el interior del mortero.

El cambio de pH no superó el milímetro de profundidad, por lo tanto las placas se mantuvieron con un nivel altamente alcalino en su interior, lo que indica que los componentes internos del material se conservan estables, y no hay una disolución de los productos cementantes responsables de la unión de la pasta.

4.1.4. Resistencia a la compresión

Para evaluar la resistencia a compresión de los morteros expuestos al medio marino, se extrajeron cubos de 30*30 mm de cada placa con la ayuda de una cortadora de disco, en la Fig. 5 y Tabla 4, se observa el resultado de las resistencias de cuatro muestras extraídas de cada placa. En promedio se presenta un valor de 40,2 MPa para la placa B y 32,5 MPa para la placa A con una desviación estándar de 3,6 y 3,7 respectivamente.

El productor local de cemento portland destinado para uso general informa que las resistencias a 28 días para un mortero convencional fabricado con este tipo de cemento deben estar alrededor de los 26,1 MPa, sin embargo los morteros con los que se fabricaron las placas presentan una diferencia superior especialmente para la placa B con un valor de 40,02 MPa, dichas diferencias en la resistencia pueden ser atribuibles a los agregados usados.

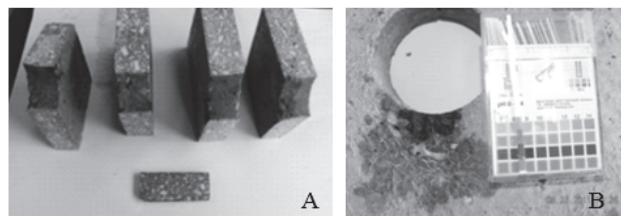


Figura 4. Variación del color tras aplicación de fenolftaleína. Fuente: Propia

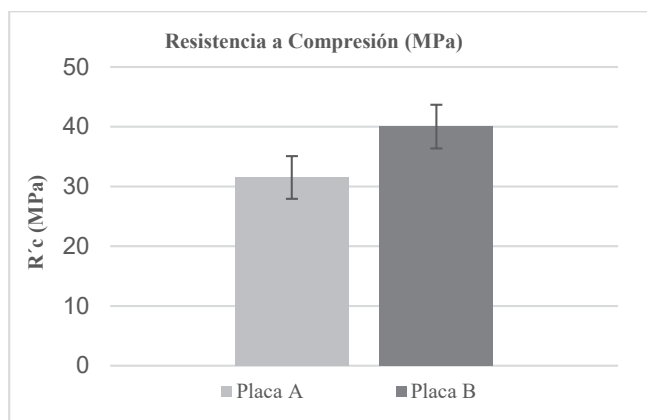


Figura 5. Resistencia a compresión. Pacas A y B después de 11 meses de exposición. Fuente: Propia

Adicional a esto, es posible que en las muestras fabricadas con residuos de loza se de una interacción química mucho mayor entre los agregados y la pasta cementante, ya que estos presentan mayores porosidades respecto a los agregados convencionales lo que podría estar generando una mayor área de contacto con la pasta favoreciendo y mejorando la interface matriz - agregado como se ha informado por otros autores [21,31]. También se observaron diferencias entre las resistencias a compresión de ambas placas debido principalmente a la granulometría de los elementos, ya que la placa B contenía una mayor distribución de agregado y por ende una menor porosidad en comparación a la placa A.

4.2. Colonización biológica

Se encontraron organismos pertenecientes a 25 taxones marinos, 21 de ellos corresponden a epibiota de tipo sésil. Los organismos sésiles estuvieron compuestos principalmente por algas de Chlorophyta y Rodophyta (Fig. 6). Entre los animales se destacaron los Annelida (Polychaeta). Otros organismos hallados sobre las placas fueron esponjas (Porifera) y anémonas (Cnidaria). Entre los organismos móviles se hallaron cuatro taxones, siendo más abundantes los cangrejos grápsidos (Tabla 6).

Tabla 6. Organismos móviles hallados sobre las placas.

| Organismo | Cangrejo | Pez |
|------------|-----------------|----------------|
| Phyllum | Arthropoda | Chordata |
| Clase | Malacostraca | Osteictios |
| Orden | Decapoda | Actinoptergios |
| Familia | Grapsidae | Indeterminada |
| Individuos | 4 | 1 |
| Organismo | Estrella de mar | Microcrustaceo |
| Phyllum | Echinodermata | Arthropoda |
| Clase | Ophiuroidea | Malacostraca |
| Orden | Indeterminado | Amphipoda |
| Familia | Indeterminada | Gammaridae |
| Individuos | 1 | 1 |

Fuente: Propia

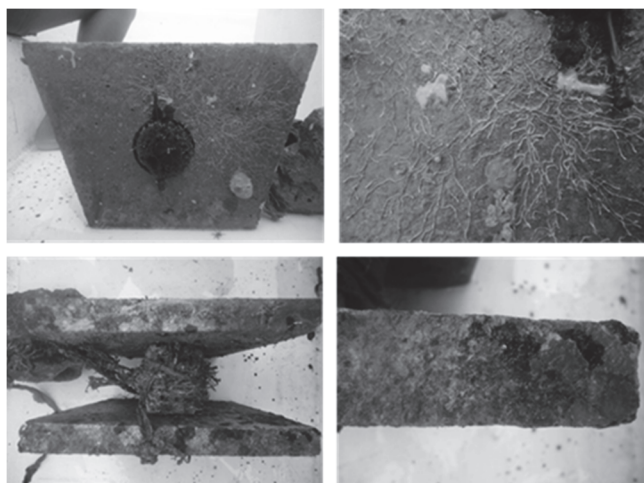


Figura 6. Estado de colonización biológica de las placas al momento de la emersión.

Fuente: Propia

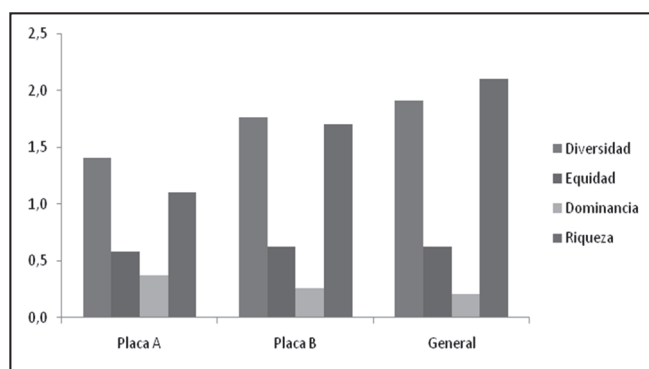


Figura 7. Características de la diversidad de la epibiota que colonizó las placas A y B.

Fuente: Propia

Tabla 7.

Área total (cm²) de las placas de prueba, área colonizada y porcentaje de colonización.

| Placa | Área Total (cm) | Área Colonizada (cm) | Colonización (%) |
|-------|-----------------|----------------------|------------------|
| A | 1201,5 | 450 | 37,5 |
| B | 1134,2 | 411,5 | 36,6 |
| Total | 2335,7 | 861,5 | 74,1 |

Fuente: Propia

Se encontró una diversidad total de 1,9 aunque la placa B (1,8) fue más diversa que la A (1,4) lo que está acorde con la distribución de la riqueza de especies, mientras que esta última presentó mayor dominancia. (Fig. 7).

Toda la estructura presentó un 71,1% de su superficie colonizada, la placa A presentó mayor área colonizada con 450 cm² en comparación con la placa B con 411,5 cm² (Tabla 7).

Los organismos sésiles que cubrieron la mayor extensión de las placas fueron algas de Chlorophyta y Rodophyta aportando más del 80% de la superficie cubierta sobre las placas, como se especifica por los autores, [18].

5. Discusión de resultados

La riqueza de organismos que colonizaron las placas de mortero fué alta, se hallaron siete especies en común entre estos sustratos artificiales. Se encontraron organismos pertenecientes a 25 taxones marinos, 21 de ellos corresponden a epibiota de tipo sésil. Los organismos sésiles que cubrieron la mayor extensión de las placas fueron algas Chlorophyta y Rodophyta aportando más del 80% de la superficie cubierta sobre las placas.

Entre los animales colonizadores se destacaron los anélidos (Polychaeta), las esponjas (Porifera), las anémonas (Cnidaria) y los cangrejos de la familia Grapsidae; la mayoría de estos organismos requieren Ca para sus procesos metabólicos y formación de esqueletos calcáreos y toman este nutriente de la lixiviación de la pasta de mortero.

Lo anterior está en concordancia con lo descrito por Anderson y Burt (2009), quienes encuentran que la naturaleza física y química de la superficie de un sustrato, incluyendo la presencia de compuestos disueltos de calcio puede inducir al establecimiento de microorganismos marinos. Explican además, que el cambio de alcalinidad en la superficie de los morteros se da debido a la solubilidad y migración de hidróxido de calcio, lo cual mejora el establecimiento de organismos ya que estos requieren Ca para sus procesos metabólicos.

En particular la placa A presentó mayor diversidad y riqueza de especie en comparación con la placa B lo que podría atribuirse en principio a una mayor porosidad en la placa A responsable de una mayor expansión y colonización, estas diferencias se dieron a pesar de que la distancia entre ambas placas fué de 15 cm y ambas estuvieran bajo las mismas condiciones ambientales.

A pesar de lo anterior en el modelo de biofouling propuesto por Wahl (1989) se discute que las primeras fases de colonización son similares en los sustratos duros, debido a que las condiciones físico-químicas del ambiente marino son estables para las especies pioneras, por lo tanto se requeriría más tiempo de monitoreo para establecer diferencias contundentes.

Respecto a las resistencias mecánicas de las muestras expuestas en medio marino, las cuales se registraron entre 30 y 40 MPa aún cuando las muestras fueron sometidas a las condiciones agresivas del medio, estos son valores de resistencia muy buenos comparados con los que se pueden alcanzar con un cemento Portland tipo I y agregados convencionales.

Así mismo, la relación agua cemento desempeñó un papel fundamental en la generación de una matriz consolidada para la pasta de ambas placas, lo que permitió que el mortero conservara condiciones alcalinas y estables ya que después de 11 meses de exposición, el interior de las muestras conservó un pH alcalino con valores de 12 y 13, lo que asegura la estabilidad del material durante un tiempo de servicio mayor.

En este sentido y después de medir los cambios de pH en el interior y el exterior del mortero, se observó una tendencia a la disminución del pH superficial de las placas para alcanzar

un equilibrio con el pH marino, dicho cambio también se puede estar dando debido a la disolución de los productos hidratados causado por la acción de microorganismos que aprovechan el calcio para sus procesos metabólicos [17,32,33].

El cambio del pH en la superficie está directamente relacionado con la pérdida de iones Ca^{2+} , esto es atribuible no solo a la lixiviación del Ca^{2+} sino también a la formación de carbonatos de calcio, oxalatos y citratos de calcio según lo informado por diferentes autores (Monteny et al., 2000; Bertron, Duchesne, & Escadeillas, 2005).

Al poner lo anterior en contexto, varios autores han establecido una relación entre la resistencia y la durabilidad por lo que se podría afirmar que el material propuesto cumpliría ambas condiciones para la aplicación requerida en arrecifes artificiales, sin embargo hasta este punto no se han evaluado a profundidad factores como el avance del biodeterioro y la degradación de la estructura por la colonización de los microorganismos y cómo esto afectaría la microestructura del mortero.

Un posible escenario se daría tras finalizar la fase de establecimiento coralino; el deterioro se estabilizaría debido a la abundancia de organismos que cubrirían el área expuesta susceptible de ser colonizada, lo que a su vez protegería la estructura e impediría el avance del biodeterioro, sumado a esto la formación y precipitación de nuevas fases más estables podrían evitar dicho fenómeno, ya que la formación de citratos, oxalatos de calcio, yeso, etringita entre otros se dan debido a que el material requiere regresar a su estado más estable o de mínima energía, lo que podría aportar al sellado de la estructura [34].

A pesar de las diferencias de distribución granulométrica en la placa A y B, y teniendo en cuenta que en los resultados de colonización no se presentaron diferencias notorias o una tendencia significativa en este fenómeno, se concluye que el mortero sirve como sustrato artificial para la colonización de microorganismos marinos, sin embargo es necesario estudiar los fenómenos biológicos como la sucesión en las primeras etapas de inmersión de este tipo de sustratos y los fenómenos de durabilidad que puedan afectar a este material.

6. Conclusiones y recomendaciones

Las placas ubicadas sobre el lecho marino fueron colonizadas en más de un 30% en su superficie y durante 11 meses no se apreciaron efectos adversos sobre la biota marina cercana al lugar de prueba por lo tanto el mortero empleado constituye un sustrato favorable para la colonización de organismos marinos. Desde este punto de vista es posible sugerir morteros fabricados con agregados alternativos como los residuos de loza con la mayor cantidad de tamaños de grano posible para aumentar la resistencia a compresión como se demostró con el mortero fabricado para la placa B.

Las muestras colonizadas están conformadas por una mezcla de agua/material cementante y agregados de rotura que promueven un mortero de buena resistencia, debido a su adherencia entre partículas y comportamiento estable frente a los agentes agresores del agua de mar, lo cual permite proyectar que aún cuando el ataque continúe por un periodo

mayor de tiempo este tipo de morteros tendrían la capacidad de atender este requerimiento, factor determinante para la estabilidad de estructuras como los arrecifes artificiales.

Respecto al tipo de estructura para evaluar este tipo de mezclas en campo se recomienda fabricar módulos articulados estables que permitan la implementación de otros materiales y dosificaciones alternativas para evaluar su comportamiento en diferentes edades de exposición.

Cabe resaltar que el uso de este tipo de espesores permite proyectar estructuras más esbeltas, con mayor área superficial fabricadas con secciones delgadas y articuladas donde el acero de refuerzo no es fundamental para la estructura interna, por lo tanto factores como la corrosión o la penetración ion cloruro no se han abordado en esta investigación la cual se ha enfocado en el desempeño de un mortero alternativo fabricado con roturas de loza.

Respecto a las condiciones previas para la preparación de mezclas que contienen agregados no convencionales como la rotura de loza, es necesario prehumedecer estos con el agua que corresponde a su absorción para evitar incluir agua adicional en el sistema que podría afectar propiedades como la resistencia y durabilidad de los morteros fabricados.

Los agregados alternativos como la rotura de loza propuestos para la fabricación de mortero para su uso en la construcción de arrecifes artificiales cumplen con las condiciones de durabilidad y resistencia requeridas, y se ha revisado a lo largo de esta investigación que la influencia de la porosidad de los agregados de rotura de loza es clave para mejorar el desempeño mecánico y de durabilidad de la matriz cementante debido a su interacción con los productos de hidratación del cemento, y que este proceso favorece el establecimiento coralino.

Es posible que el proceso de colonización se concluya finalmente, dando como resultado un cubrimiento total del área susceptible de establecimiento y por lo tanto la estructura quede sellada y protegida a futuros ataques, en este sentido se recomienda el estudio de los mecanismos de deterioro y biodeterioro afecten después de este plazo el rendimiento de los morteros evaluados.

Este trabajo sirve como punto de partida para el estudio de la colonización de microorganismos en sustratos artificiales fabricados con materiales residuales, por lo tanto se recomienda para futuras investigaciones evaluar fenómenos como el deterioro resultante de la interacción con el agua de mar y el biodeterioro producto de la influencia de microorganismos, ambos en condiciones controladas de laboratorio donde sea posible mantener un control abiótico para definir tanto el efecto del medio como de los microorganismos.

En el mismo sentido, es recomendable realizar ensayos de durabilidad exponiendo las muestras de mortero a sulfatos para identificar los compuestos solubles que se pueden formar en el interior del mortero y que dan origen al crecimiento de cristales expansivos que pueden afectar la durabilidad de este tipo de materiales en el medio marino.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la comunidad de la Isla de Boquerón por su hospitalidad, a los compañeros del grupo

Amoralar por su acompañamiento en esta iniciativa y especialmente al Ingeniero Jairo Aguilar por su colaboración durante la realización de esta investigación. A los laboratorios de Construcción y de Química del Cemento de la Universidad Nacional de Colombia por permitirnos la realización de diferentes ensayos en sus instalaciones.

Bibliografía

- [1] Buddemeier, R., Kleypas, R.W. and Aronson, J.A., Coral reefs and global climate change: Potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems., *Pew Cent. Glob. Clim. Chang. Arlingt.*, 2004, 33 P.
- [2] Roberts, C.M., McClean, C.J., Veron, J.E., Hawkins, J.P., Allen, G.R., McAllister, D.E., Mittermeier, C.G., Schueler, F.W., Spalding, M., Wells, F., Vynne, C., Werner, T.B., Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs., *Science*, 295(5558), pp. 1280-1284, 2002. DOI: 10.1126/science.1067728.
- [3] Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B., Roughgarden, J., Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs., *Science*, 301(5635), pp. 929-933, 2003. DOI: 10.1126/science.1085046.
- [4] Whittingham, E., Campbell, J. and Townsley, P., Poverty and reefs: Volume 1: A global overview., *Intergov. Oceanogr. Comm. UNESCO, Paris, Fr.* [Online], 2003. Available at: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/resources/publications/>
- [5] Cesar, L.P.S. and Burke H.L., The economics of worldwide coral reef degradation., [Online], 2003. Available at: <http://pdf.wri.org/cesardegredationreport100203.pdf>
- [6] Ben, D.J.B., McNeil, I. and Matear, R.J., Coral reef calcification and climate change: The effect of ocean warming., *Geophys. Res. Lett.*, 31, 2004.
- [7] Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P.J., Hooten, A.J., Steneck, R.S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C.D., Sale, P.F., Edwards, A.J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C.M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R.H., Dubi, A. and Hatziozols, M.E., Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification., *Science* 318, pp. 1737-1742., 2007. DOI: 10.1126/science.1152509
- [8] Hughes, P., Fairhurst, D., Sherrington, I., Renevier, N., Morton, L. H.G., Robery, P.C. and Cunningham, L., Microscopic examination of a new mechanism for accelerated degradation of synthetic fibre reinforced marine concrete., *Constr. Build. Mater.*, 41, pp. 498-504, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.022
- [9] Seaman, W., Artificial habitats and the restoration of degraded marine ecosystems and fisheries., *Hydrobiologia*, 580(1), pp. 143-155, 2007. DOI: 10.1007/s10750-006-0457-9
- [10] Pears R.J. and Williams, D.M., Potential effects of artificial reefs on the Great Barrier Reef: Background paper, 60, pp. 1-33, 2005.
- [11] Whitmarsh, D., Santos, M.N., Ramos, J. and Monteiro, C.C., Marine habitat modification through artificial reefs off the Algarve (southern Portugal): An economic analysis of the fisheries and the prospects for management., *Ocean Coast. Manag.*, 51(6), pp. 463-468, 2008. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2008.04.004
- [12] Sutton, S.G. and Bushnell, S.L., Socio-economic aspects of artificial reefs: Considerations for the Great Barrier Reef Marine Park., *Ocean Coast. Manag.*, 50(10), pp. 829-846, 2007. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2007.01.003
- [13] Kaiser, M.J., The Louisiana artificial reef program., *Mar. Policy*, 30(6), pp. 605-623, 2006. DOI: 10.1016/j.marpol.2005.04.005
- [14] Lan, C.H. and Hsui, C.Y., The deployment of artificial reef ecosystem: Modelling, simulation and application., *Simul. Model. Pract. Theory*, 14(5), pp. 663-675, 2006. DOI: 10.1016/j.simpat.2005.10.011
- [15] Baine, M., Artificial reefs: A review of their design, application, management and performance., *Ocean Coast. Manag.*, 44(3-4), pp. 241-259, 2001. DOI: 10.1016/S0964-5691(01)00048-5
- [16] Burt, J., Bartholomew, A. and Bauman, A., Saif, A. and Sale, P.F., Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters., *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.*, 373(1), pp. 72-78, 2009. DOI: 10.1016/j.jembe.2009.03.009
- [17] Verdier, T., Coutand, M., Bertron, A. and Roques, C., A review of indoor microbial growth across building materials and sampling and analysis methods., *Build. Environ.*, 80, pp. 136-149, 2014. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.05.030
- [18] Bedoya, M.A., Tobón, J.I., Correa-Herrera, T. and Correa-Rendón, J.D., An opportunity for environmental conservation: evaluation of test material for construction of artificial reefs modules trainers made of ecological concrete., *Key Eng. Mater.*, 600, pp. 606-614, 2014. DOI: 10.4028
- [19] Corinaldesi, V. and Moriconi, G., Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete., *Constr. Build. Mater.*, 23(8), pp. 2869-2876, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004
- [20] Evangelista, L. and De Brito, J., Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates., *Cem. Concr. Compos.*, 32(1), pp. 9-4, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005
- [21] Yang, J., Du, Q. and Bao, Y., Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks., *Constr. Build. Mater.*, 25(4), pp. 1935-1945, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.063
- [22] Bertron, A., Understanding interactions between cementitious materials and microorganisms: A key to sustainable and safe concrete structures in various contexts., *Mater. Struct.*, pp. 1787-1806, 2014. DOI: 10.1617/s11527-014-0433-1
- [23] CIOH. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrológicas. Cartagena. Colombia, Caracterización oceanográfica y meteorológica del Golfo de Morrosquillo., 2000.
- [24] SEA, Monitoreo de biología pesquera en el Golfo de Morrosquillo. Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPEPETROL. Distrito Caño Limón-Coveñas, Sucre, Colombia., 2000.
- [25] Flórez, C. and Etter, A., Caracterización ecológica de las Islas Múcura y Tintipán, Archipiélago de San Bernardo, Colombia., *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 27(104), pp. 343-356, 2003.
- [26] L.S. and Mejia, A.A., Libro rojo de peces marinos de Colombia, 2002. Libr. Bogotá, Colombia., 2002.
- [27] Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, C. and Pereira, M. F., Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste., *Constr. Build. Mater.*, 86, pp. 178-188, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112
- [28] Moini, M., Flores I.V., Amirjanov, A. and Sobolev, K., The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete., *Constr. Build. Mater.*, 93, pp. 627-634, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.019
- [29] Shin, M., Kim, K., Gwon, S. and Cha, S., Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments., *Constr. Build. Mater.*, 69, pp. 167-176, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061
- [30] Collepardi, M., A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete., *Cem. Concr. Compos.*, 25(4-5) SPEC, pp. 401-407, 2003. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00080-X
- [31] Xiao, J., Li, W., Fan, Y. and Huang, X., An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011), *Constr. Build. Mater.*, 31, pp. 364-383, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074
- [32] Hughes, P., Fairhurst, D., Sherrington, I., Renevier, N., Morton, L. H.G., Robery, P.C. and Cunningham, L., Microscopic study into biodeterioration of marine concrete., *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 79, pp. 14-19, 2013. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.01.007
- [33] Yuan, H., Dangla, P., Chatellier, P. and Chaussadent, T., Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack., *Cem. Concr. Res.*, 53, pp. 267-277, 2013. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.002
- [34] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D. and Verstraete, W., Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete., *Cem. Concr. Res.*, 30, pp. 623-634, 2000.

M.A. Bedoya-Gutiérrez, recibió su título de Arquitecta Constructora en 2011 y como MSc. en Ingeniería de Materiales y Procesos en 2016, ambos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. Ha trabajado en proyectos de fabricación de materiales alternativos a partir de residuos urbanos, industriales y agroindustriales con énfasis en el desarrollo

de materiales sostenibles más amigables con el medio ambiente y que aporten a la conservación.

ORCID: 0000-0002-5604-776X

J.I. Tobón, recibió su título como Ing. Geólogo en 1992, como Esp. en Sistemas en 1996, como MSc. en Recursos Hidráulicos en 2003 y como Dr. en Ciencias y Tecnología de los Materiales en 2011; títulos otorgados por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia. Se desempeña como profesor titular Universidad Nacional de Colombia. Es director del grupo de investigación del cemento y materiales de construcción y asesor de empresas cementeras de la región. Sus contribuciones se han enfocado en química y mineralogía del cemento, cementos alternativos, nanotecnología y tecnología del concreto.

ORCID: 0000-0002-1451-1309:

T. Correa-Herrera, recibió su título como Ecóloga de Zonas Costeras en 2006 y como MSc. en Biología en 2012, actualmente desarrolla su Doctorado en Ciencias del Mar; todos estos estudios han sido realizados en la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Se desempeña como docente de biología en la seccional de Urabá de la misma Universidad. Sus aportes se han enfocado a la ictiología estuarina y marina.

ORCID: 0000-0001-8718-5818.

J.D. Correa-Rendón, recibió su título en Ecología de Zonas Costeras en 2006 y como MSc. en Biología en 2012, ambos título de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Se desempeña como docente en la misma Universidad en la Sede de Ciencias del Mar (Turbo) en asignaturas como limniología, oceanografía biológica, Biología, Hidrobiología y zoología de invertebrados. Se ha enfocado en proyectos de investigación relacionados con ecosistemas loticos, Ictiología, ecología marina y conservación.

ORCID: 0000-0002-4232-0438