

Revisión Bibliográfica Sobre El Uso De Arena Y Agua De Mar En La Construcción De Hormigón

Review Of The State Of The Art On The Use Of Sand And Sea Water In Concrete Construction

Autores

David León González¹, Hugo R. Wainshtok Rivas², Rene A. Puig Martínez³

¹Graduado de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE). ddleong79@gmail.com

²Profesor Titular del Departamento de Construcciones y Viales, Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE).
hugow@tesla.cujae.edu.cu

³Profesor Titular del Departamento de Construcciones y Viales, Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE).
rpuig@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

El consumo de grandes cantidades de arena de río y agua dulce en la producción de hormigón se ha convertido en el mundo en una de las principales preocupaciones medioambientales. Los recursos hídricos han ido disminuyendo aceleradamente, las cuencas superficiales y subterráneas se agotan, y contradictoriamente a ello, se necesita cada vez más su empleo en múltiples sectores de la sociedad. Algo similar ocurre con los áridos, además del daño medio ambiental que su extracción provoca, se van agotando las canteras, cada vez más alejadas de los centros de producción de hormigón. Desde finales del siglo XX e inicios del XXI, con el empleo de las barras y mallas de polímeros reforzados con fibras como refuerzo del hormigón, se han desarrollado a nivel mundial investigaciones dirigidas a evaluar la factibilidad del empleo del agua y arena de mar en la elaboración del hormigón como una alternativa viable de solución a estos problemas. El presente trabajo sintetiza de forma práctica los principales resultados de los estudios existentes sobre los efectos del uso de arena de mar y/o agua de mar como materias primas del hormigón sobre las propiedades del hormigón resultante, incluida laborabilidad, resistencia a corto y largo plazo y durabilidad. En el trabajo se evidencia que el hormigón elaborado con arena y/o agua de mar presenta una elevada resistencia a la compresión en edades tempranas entre 3 y 7 días, a los 28 días obtienen resistencias similares o inferiores al hormigón convencional.

Palabras claves: arena de mar, agua de mar, hormigón con agua de mar, hormigón con arena de mar

ABSTRACT

The consumption of large amounts of river sand and fresh water in the production of concrete has become one of the main environmental concerns in the world. Water resources have been declining rapidly, surface and underground basins are depleting, and contradictory to this, their use is increasingly needed in multiple sectors of society. Something similar happens with the aggregates, in addition to the environmental damage that their extraction causes, the quarries are running out, each time further away from the concrete production centers. Since the end of the 20th century and the beginning of the 21st, with the use of fiber-reinforced polymer bars and meshes as concrete reinforcement, research has been carried out worldwide aimed at evaluating the feasibility of using water and sea sand in the elaboration of concrete as a viable alternative solution to these problems. The present work synthesizes in a practical way the main results of the existing studies on the effects of the use of sea sand and/or sea water as concrete raw materials on the properties of the resulting concrete, including workability, short and long-term resistance, and durability. In the work it is evident that concrete made with sand and/or seawater have a high resistance to compression at an early age between 3 and 7 days, at 28 days they obtain resistance similar to or lower than conventional concrete.

Keywords: sea-sand, seawater, seawater concrete, sea-sand concrete (SSC)

Nota Editorial: Recibido: Mayo 2023 Aceptado: Agosto 2023

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la industria de la construcción utiliza 2000 millones de metros cúbicos de agua dulce al año en la producción de hormigones, valor estimado en un 12% del agua dulce disponible. De forma similar, esta industria consume más de 40 000 millones de toneladas de áridos provenientes de canteras o yacimientos cada año [1]. Cuba no está exenta de esta situación y en la actualidad toma mayor fuerza, pues se encuentra inmersa en un permanente y fuerte proceso inversionista de obras industriales, turísticas y sociales, que requieren del empleo de grandes volúmenes de agua dulce y áridos para la fabricación del hormigón armado.

En Cuba se produce un promedio de 2 691 000 toneladas de hormigón al año, cifra que consume unas 1 345,5 toneladas de agua dulce y siete millones de metros cúbicos de áridos, la mayoría producto de la trituración de la roca en canteras. Estas cifras tienden a incrementarse cada año [2].

Tanto el agua como los áridos empleados en el hormigón, son materiales cada vez más deficitarios. La extracción de arena de río como árido fino impacta negativamente en los ecosistemas fluviales; por otro lado, las fuentes superficiales y subterráneas de agua dulce disminuyen de forma exponencial debido a las consecuencias del ya reconocido cambio climático, lo que conlleva a una gran preocupación medioambiental a nivel mundial, sobre todo si se tiene en cuenta que el 97,5% del agua en la tierra se encuentra en los océanos y mares de agua salada, únicamente el restante 2,5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, 69% se encuentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y se encuentra en un estado sólido. El 30% del agua dulce mundial, se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos. Solo el 1% del agua dulce en el mundo, escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos y se depositan en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos. Esta es agua que se repone regularmente a través del ciclo hidrológico [3].

Si hasta hace algunos años, emplear agua y arena de mar para la producción del hormigón armado estaba totalmente vetado debido a la corrosión de las armaduras de acero y el deterioro en general que este fenómeno provoca en el hormigón, con la aparición a mediados del siglo XX de las barras y mallas de polímeros reforzados con fibras, pasó a ser una factibilidad muy prometedora. Comúnmente existía la creencia que el uso de agua de mar no era adecuado para la fabricación del hormigón estructural, sin embargo, Kaushik e Islam [4] encontraron una serie de estructuras a lo largo de las costas del sur de California y la Florida, todas construidas con hormigón de agua de mar, las cuales se pueden considerar como una evidencia intuitiva del posible uso de agua de mar en la mezcla de hormigón.

Las primeras experiencias en el uso de arena de mar desalinizada, como árido fino en el hormigón, se reportan en la década de 1960, en el Reino Unido. Ya en 1973, la arena de mar desalinizada también se convirtió en una de las principales fuentes de áridos finos en la producción de hormigón en Japón. De igual forma, desde la década de 1990, debido a la escasez y al aumento del precio de la arena de río en la China continental, muchas zonas costeras comenzaron a utilizar de los mares, arena desalinizada como áridos finos en hormigón para edificios y proyectos de infraestructura civil [1].

En el año 2016 se lleva a cabo un proyecto de investigación y desarrollo (SEACON) entre la Universidad de Miami (UM), el Politécnico de Milano (POLIMI) y la compañía Buzzi Unicem, entre otras prestigiosas organizaciones, bajo la dirección del reconocido investigador en ingeniería civil Antonio Nanni, dirigido fundamentalmente al uso del agua de mar, áridos contaminados con sal y refuerzo no corrosivo, en la elaboración de hormigones. El informe comprobó la viabilidad de producir hormigones seguros al mezclarlos con agua de mar y áridos con altos niveles de cloruro. La primera demostración de su investigación con la construcción de una alcantarilla abierta en Italia durante la última semana de noviembre de 2016, a lo largo de la autopista A1, cerca de la ciudad de Piacenza [5]. La segunda demostración fue la construcción del puente Halls River de cinco tramos en Homosassa Springs, Florida en el 2018 [6].

Como estado insular, Cuba es un país rodeado de mares. Muchas de las obras turísticas, de infraestructura, industriales e incluso viviendas, se construyen en la costa o lugares cercanos a ella, siendo posible acceder al agua y arena de mar para la producción del hormigón, sin entrar en contradicciones con las regulaciones medio ambientales tales como La ley de Protección del Medio Ambiente que establece las disposiciones generales para la protección de las playas y los recursos costeros; la resolución No.82/2013 del CITMA que instituye los estándares de calidad para la arena de las playas y la ley No. 91/2011, que establece los estándares de calidad para las aguas de las playas cubanas. En Cuba existen tres fuentes de extracción de arena de mar, dos ubicadas en el centro del país, al norte, y otra también ubicada al norte de Pinar del Río.

Las razones antes expuestas conducen a pensar en el empleo de agua y/o arena de mar en la producción del hormigón armado con barras de polímeros reforzados con fibras, siendo la primera vez que se acomete en el país este tipo de estudio. De tener resultados satisfactorios, representaría un ahorro considerable del agua dulce tan necesaria en otros campos de la sociedad y una alternativa al empleo de arena triturada para la construcción, lo cual constituye una opción más económica para el desarrollo de las construcciones futuras.

El presente trabajo propone recopilar y organizar información que se encuentra en la bibliografía internacional con el objetivo de identificar las principales propiedades de los hormigones elaborados con agua y/o arena de mar con vistas a sentar pautas para futuras investigaciones y su empleo en el país.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Arena de mar

La arena de mar generalmente utilizada en las construcciones es dragada de los puertos, esta es lavada y procesada para eliminar el contenido de iones de cloruro o las impurezas que afectan las propiedades de la mezcla. Tras el dragado del material, la arena está totalmente saturada, siendo su contenido de sal directamente proporcional al contenido de humedad. En el caso de la arena de mar dragada no lavada, el contenido típico de humedad es del 10% y contendrá un 0,3% de cloruro de sodio (NaCl), el cual puede afectar la mezcla [7]. Por lo general las arenas de mar utilizadas en los estudios son extraídas de lugares cercanos a la zona de experimentación, caracterizadas por la presencia en su composición de óxido de silicio (SiO_2), calcita (CaCO_3), óxido de sodio (Na_2O) y arcilla [8-13].

Agua de mar

El agua de mar, a diferencia del agua potable, contiene hasta 35 000 ppm (partes por millón) de sales disueltas, siendo el cloruro de sodio (NaCl) la sal predominante, la cual constituye alrededor del 88 % del peso de las sales. Su valor de pH varía entre 7,4 y 8,4 [14].

La literatura técnica consultada evidencia que la sal en el agua de mar no tiene efectos negativos significativos sobre las características del hormigón endurecido y, cuando se presentan problemas de durabilidad, se relacionan principalmente con la corrosión del acero de refuerzo, más que con el efecto sobre las propiedades del hormigón [15-18].

Sin embargo, no todas las aguas marinas son iguales, su salinidad varía según el mar, la zona y la profundidad, incluso la temperatura. En líneas generales, se puede afirmar que el agua de mar tiene una concentración de sales comprendida entre 35 y 45 gramos por litro (g/L) [19].

A diferencia del agua dulce, el contenido de cloruros del agua de mar puede ser perjudicial para las estructuras de hormigón armado, la reacción química entre los iones cloruro y los componentes del cemento puede provocar la formación de productos de corrosión, óxidos metálicos acelerando el proceso de corrosión del acero de refuerzo y por lo tanto debilitando la estructura.

Para poder apreciar la diferencia de salinidad existente en los mares, en la Tabla 1 se detalla la concentración media de sales estimada en varios de ellos.

Tabla 1: Contenido de sal en los mares [19]

Lugares	Cantidad de sal en g/L
Mar Rojo	42-46
Golfo Pérsico	40-44
Mar Mediterráneo	36-39
Mar Caribe	34-38
Océanos Índico	33-37
Océano Pacífico	33-36
Océano Atlántico	33-36

Es importante resaltar que el agua de mar no es simplemente una solución de sales y gases disueltos, sino que los organismos vivos del mar también ejercen una influencia sobre la composición de las aguas. Por ejemplo, los moluscos y los crustáceos extraen el calcio del agua marina para crear sus conchas y cuerpos, y las esponjas y algunos tipos de algas marinas eliminan el yodo del mar [19].

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGUA Y/O ARENA DE MAR

Existen pocas investigaciones alrededor del tema hasta la fecha y no se cuenta con criterios concluyentes debido a la diversidad de opiniones de los autores. Así mismo, debe destacarse que la mayoría de las investigaciones existentes se han centrado en evaluar el efecto de utilizar agua o arena de mar en la resistencia a compresión, la densidad y la porosidad del hormigón.

Resistencia a compresión

Las investigaciones realizadas hasta la fecha reflejan que los hormigones amasados con agua de mar tienen mayores resistencias a compresión, tracción, flexión y adherencia, que los hormigones amasados con agua dulce a edades tempranas entre 7 y 14 días, reportándose una disminución de la resistencia con el paso del tiempo [13, 16-18].

Estudios realizados por Wegian [14] muestran que el hormigón mezclado y curado con agua de mar mejora la resistencia a la compresión, evidenciando un aumento a los 7 y 14 días de 3–10 % y 1–4 % respectivamente, atribuye la menor resistencia del hormigón con agua de mar entre 28 y 90 días a una posible cristalización de la sal. Islam et al. [20] muestran que los hormigones fabricados con agua de mar y curados en un entorno de agua de mar refieren una pérdida de resistencia de alrededor del 10 % en comparación con el hormigón similar elaborado y curado con agua corriente. Concluyeron que los primeros aumentos de resistencia se debían básicamente al bloqueo de los poros por los productos de hidratación y que el deterioro de la resistencia podía deberse a la disolución de los compuestos ricos en cal y la formación de compuestos expansivos como consecuencia del ataque de cloruros y sulfatos del agua de mar. Por otro lado, Mohammed, et al. [21] atribuyen como razones probables de ganancia de resistencia en edades tempranas de exposición (28 días a 5 años), la hidratación continua del cemento en el hormigón y la deposición de etringita y sal de Friedel en los vacíos en el hormigón causados por el sulfato difundido y cloruro. Igualmente se observa que de los 10 a 20 años, no ocurre reducción significativa de la resistencia, fenómeno que atribuyen a la mejora de las microestructuras en la región externa de los especímenes, causada por la deposición de etringita, así como la sal de Friedel. En una investigación similar Hernández Pérez de Guereñu [15] concluye que el incremento de la resistencia del hormigón con agua de mar a edades tempranas puede deberse al hecho de que el empleo de esta produce un endurecido acelerado, obteniéndose valores de resistencia más elevados. Según refieren Hamada, et al. [17] como resultado de sus estudios, la mezcla de hormigón con agua de mar mejora la resistencia a la compresión hasta 91 días en comparación con la mezcla elaborada con agua del grifo y concluyen que la ganancia de resistencia del hormigón hasta 365 días no está influenciado por el tipo de agua de mezcla.

De manera similar y de forma paralela, se han venido desarrollando estudios dirigidos a evaluar la influencia del uso de la arena de mar en la elaboración de hormigones. La mayoría de los investigadores han estado de acuerdo en que la resistencia a la compresión a temprana edad del hormigón con arena de mar es ligeramente superior a la del hormigón ordinario [7, 22].

Limeira, et al. [23], llevan a cabo un estudio de hormigones elaborados con arena de mar dragada (Dredged Marine Sand, DMS). Los resultados mostraron que al reemplazar el árido fino de arena de piedra caliza triturada (fine aggregate, FA1 0/4 mm) por arena de mar dragada (DMS), disminuye la densidad del hormigón, lo cual atribuyen al hecho que el material DMS es más fino que el FA1 0/4 mm. El hormigón con DMS, arena de mar dragada, usando 35% de arena, en sustitución de FA1 (CC35%), obtuvo valores de porosidad de un 8,5%, inferior al hormigón patrón. Concluyen, además, que la sustitución mejora la resistencia a la compresión de los hormigones fabricados con ella. Sin embargo, Wegian [24], como resultado de su investigación, afirma que la influencia de los áridos finos en la resistencia a la compresión no es significativa cuando el volumen de pasta permanece constante y la arena está libre de polvo. En el experimento se detectó que luego de 7 días de curado húmedo, los hormigones CB50% (50% de DMS-B en sustitución de FA1) y CC50% (50% de DMS-C en sustitución de FA1) lograron resultados similares al hormigón patrón de referencia. La adición de hasta un 50% de DMS en sustitución de FA1 mejora la compactación de las mezclas, debido a un relleno del esqueleto granular por el material más fino. No obstante, después de 28 días de curado, todos los hormigones fabricados con incorporación paulatina de DMS (del 25% al 50%) superaban los resultados del hormigón patrón de referencia (RC). La evolución de la resistencia a la compresión en el periodo de 7 a 28 días reveló que los hormigones elaborados con el 25% y 35% de DMS-B y DMS-C presentaron un alto incremento en resistencia a la compresión, probablemente debido al agua adsorbida en la superficie del material DMS. De 7 a 28 días la mayor tasa de ganancia fue de 34% obtenida por el hormigón CC25%. Se observó, además, un aumento del módulo del 5% del hormigón de CC50% en sustitución de FA1 con respecto al RC, seguido de CB50%, CC35% y CB35%. También se apreció que el módulo del hormigón depende del volumen relativo y la rigidez del árido grueso, así como que la influencia de los áridos finos en edades tempranas del hormigón está íntimamente relacionada con la textura y forma de los áridos finos.

El contenido de conchas marinas en la arena de mar y su influencia en la elaboración del hormigón también ha sido motivo de estudio de investigadores. Las investigaciones [25-27] han demostrado que casi no tiene efecto sobre la resistencia a la compresión a los 28 días del hormigón elaborado con arena de mar. Sin embargo, se informó una pérdida significativa de resistencia a la compresión cuando el 50% del árido fino (arena) se reemplaza con partículas de concha marina [26].

Por otro lado, Yang, et al. [25] afirman que el módulo de elasticidad del hormigón disminuye con el aumento del contenido de conchas marinas, ya que el módulo de elasticidad de estas es menor que el módulo de elasticidad del árido fino. El estudio permitió observar una reducción de aproximadamente un 10 % cuando se sustituyó el árido fino por un 20 % de contenido de conchas en el hormigón. Además, debido a la menor resistencia a la fractura de las partículas de concha, la arena que contiene más partículas de concha tiene una resistencia al cortante ligeramente menor [27].

Porosidad y Absorción

Según algunas investigaciones realizadas [17, 28] el uso de agua de mar en la mezcla, aumenta ligeramente la densidad del hormigón y disminuye la porosidad y capacidad de absorción del mismo, lo cual atribuyen al contenido de sales en el agua. Hamada, et al. [17], demostraron que la resistencia a la compresión del hormigón, con escoria molida-granulada de alto horno (GGBS) mezclado con el agua de mar, en el intervalo de 365 días reduce su porosidad, en comparación con el elaborado con agua de grifo y GGBS, bajo cualquier régimen de curado. Según los autores, los resultados posiblemente se deben al proceso acelerado de la hidratación del hormigón mezclado con agua de mar, lo que densifica la estructura de poros y reduce el volumen de poros del hormigón. Sin embargo, estos resultados no pueden ser considerados concluyentes, Hernández Pérez de Guereñu [15] afirma que los hormigones fabricados con agua de mar alcanzan una capacidad de absorción superior a los hormigones fabricados con agua dulce, lo cual se atribuye al hecho de que tanto el inhibidor como los cloruros utilizados en el agua de mar aceleran el fraguado, produciendo una mayor porosidad en la pasta de cemento hidratada a lo largo del tiempo.

Por otro lado, los estudios realizados hasta la fecha [8, 9, 22, 29, 30] demuestran que el uso de arena de mar dragada (DMS) en la mezcla de hormigón en sustitución de arena natural mantiene o reduce los poros accesibles, la absorción y la profundidad de penetración del agua bajo presión, razón que atribuyen a la finura del material DMS con respecto a la arena natural. Así mismo, en los estudios realizados por Safi et al. [8], al evaluar la evolución de la porosidad y absorción de agua se evidencia que cuando se emplean conchas marinas trituradas como árido fino, la porosidad aumenta para las mezclas estudiadas.

4. DURABILIDAD DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGUA Y/O ARENA DE MAR

Para el hormigón elaborado con agua y/o arena de mar, la principal preocupación de durabilidad ha sido el contenido máximo permisible de iones cloruros (Cl) y la carbonatación del hormigón. Los estudios realizados hasta la fecha confirman que el agua de mar no afecta el proceso de carbonatación [31] y la fijación de los iones cloruro [32]. Un estudio realizado por Hernández Pérez de Guereñu [15] con especímenes de vigas de hormigón elaborado y curado con agua de mar, mostró baja penetración de cloruros en el interior de los especímenes, lo cual atribuye al hecho de que el contenido de cloruros del agua de curado es muy similar al porcentaje que tiene el agua marina empleado en la mezcla.

La durabilidad del hormigón con arena de mar ha sido más estudiada [9, 32, 33]. En un ambiente marino, se ha encontrado que el coeficiente de difusión de cloruros desde el ambiente exterior al hormigón con arena de mar, aumenta con el aumento de la relación agua/cemento [32].

Huiguang, et al. [32], demostraron que los hormigones que contienen arena de mar natural y desalada, son más resistente a la penetración de iones cloruros en comparación con el hormigón hecho con arena de río. La razón de ello, a decir de sus autores, radica en que la arena de mar natural o desalada tiene relativamente menor contenido de arcilla en comparación con la arena de río. Las partículas de arcilla adheridas a la superficie reducen la adherencia entre el cemento y el árido y en consecuencia, la permeabilidad del hormigón se ve afectada. Cao et al. [33] demostraron que la profundidad de carbonatación aumenta a medida que aumenta el tiempo y la resistencia del hormigón disminuye, concluyendo que el desarrollo de la profundidad de carbonatación del hormigón con arena de mar sigue el mismo comportamiento que el hormigón de arena de río. Sin embargo, Liu et al. [9] obtuvieron resultados contrarios, mostrando que la carbonatación del hormigón con arena de mar podría reducirse en un 20 – 50 % debido a los iones cloruros introducidos por la arena de mar en la mezcla.

En cuanto al contenido de conchas marinas en la arena de mar, Yang et al. [26] señalan que las partículas de conchas reducen la permeabilidad del hormigón y no tienen una influencia negativa en la carbonatación.

5. CORROSIÓN DEL REFUERZO

La cantidad inicial de cloruro debido al uso de agua y/o arena de mar en el hormigón puede causar el inicio de la corrosión de las barras de acero cuando su concentración está por encima de un umbral establecido, aproximadamente en el orden $3,35 \text{ kg/m}^3$. Este proceso se ve favorecido, además, por el aumento de la carbonatación del hormigón, la cual puede provocar un aumento de la concentración de iones cloruro libres en la mezcla Kaushik and Islam [4].

Para estudiar la corrosión del acero en hormigones elaborados con agua de mar, Mohammed, et al. [21] llevan a cabo un estudio mediante el cual expusieron especímenes experimentales a un ambiente de marea durante 15 años. Pasado ese tiempo pudieron concluir que la corrosión comenzó una vez que la concentración de cloruros sobre la barra de acero alcanza o supera el nivel umbral de cloruro, observándose que el uso de agua de mar en lugar de agua dulce conllevó a un mayor número de pozos de corrosión y mayores profundidades en las barras de acero.

Sin embargo, los resultados de Otsuki et al. [31] mostraron que la influencia del agua de mar en la mezcla sobre la corrosión del acero era insignificante, demostrando que después de 20 años de exposición, no se observó ninguna diferencia obvia en las profundidades de corrosión del acero entre el hormigón con agua de mar y el hormigón de agua dulce. También descubrió que la influencia negativa de los iones cloruros contenidos en el agua de mezcla disminuía con la edad. Igualmente, Xiao et al. [1] refiere, que Dempsey (1959) en sus investigaciones encontró que el acero en un hormigón denso elaborado con agua de mar experimentaba una corrosión insignificante.

Para el hormigón con arena de mar Liu, et al. [9] llevan a cabo una investigación sometiendo durante un año de servicio los especímenes estudiados a un ambiente marino. Transcurrido ese tiempo y después de aplicar el indicador, pudo apreciarse que toda la sección transversal de los mismos permaneció roja, lo que indicó que no se había producido carbonatación dentro del hormigón, sin embargo, no había rojo en la superficie, lo que revelaba que se había producido carbonatación en la superficie. A partir de estos resultados los autores concluyen que cuando se emplea arena de mar en el hormigón, los iones cloruro introducidos por la DMS pueden tener algunos efectos beneficiosos sobre la resistencia a la carbonatación de los hormigones y consecuentemente contribuyen a disminuir la corrosión del refuerzo. Por otro lado, Dias et al. [34] llevaron a cabo pruebas de corrosión acelerada, cambiando el contenido de iones cloruros en la arena de mar, y mostraron que la corrosión del refuerzo de acero se volvió significativa cuando la concentración de iones cloruros libres en la arena del mar alcanzó el 0,3%.

6. EMPLEO DE ADITIVOS Y/O ADICIONES EN HORMIGONES ELABORADOS CON AGUA Y/O ARENA DE MAR

Estudios más recientes han estado dirigidos a evaluar las propiedades del hormigón con agua y arena de mar [12, 13, 35-38]. Los mismos han demostrado que el uso combinado de agua de mar y arena de mar sin lavar, con sustituciones como cemento molido granulado de alto horno (GGBS), cenizas volantes (FA) y/o humo de sílice (SF) y la incorporación de nitrato de calcio (CN) aceleran la hidratación del aglutinante y las puzolanas, aumentando no solo la resistencia inicial sino también la resistencia a largo plazo del hormigón.

Montanari et al. [38], demostraron que el hormigón mezclado con agua de mar probablemente tenga concentraciones más altas de hidróxidos y álcalis. Estos resultados muestran, además, que el uso de cenizas volantes en la mezcla trae consigo una reducción del pH (entre 0,06 y 0,1 unidades) con respecto a la mezcla elaborada solo con agua de mar, obteniéndose valores más cercanos a los alcanzados en el hormigón convencional (figura 1).

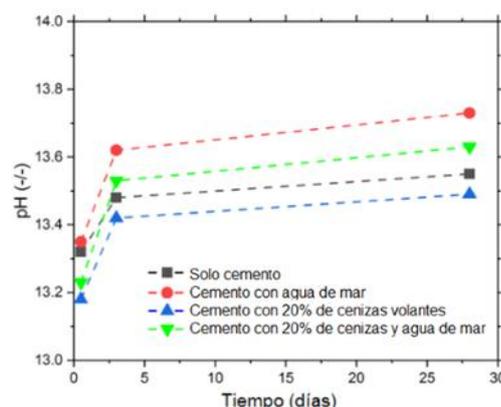


Figura 1: Evolución del pH en el hormigón [38]

Otsuki, et al. [31], analizaron muestras con diferentes proporciones de aglutinantes: BFS (escoria de alto horno) y FA (cenizas volantes) en sustitución del cemento portland ordinario (OPC). Como resultados de la investigación encontraron que la tasa de penetración de iones de cloruro del hormigón mezclado con agua de mar con BFS y FA fue menor que la de mezclado con agua del grifo debido al aumento del contenido inicial de cloruro en el agua de mar (figuras 2 y 3).

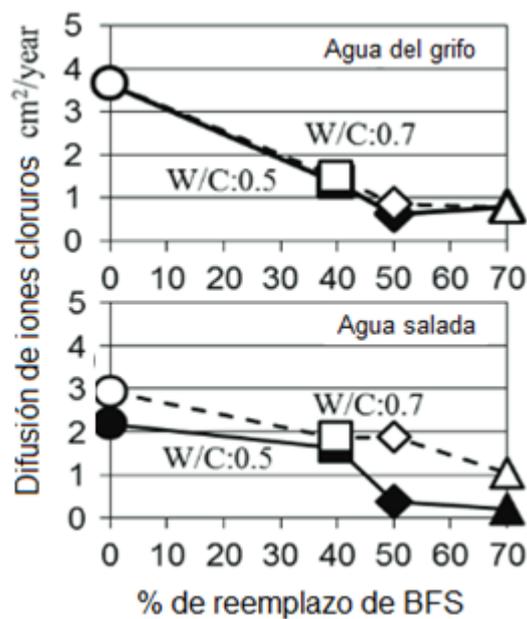


Figura 2: Tasa de penetración de cloruro en el concreto para diferentes proporciones de reemplazo de BFC [31]

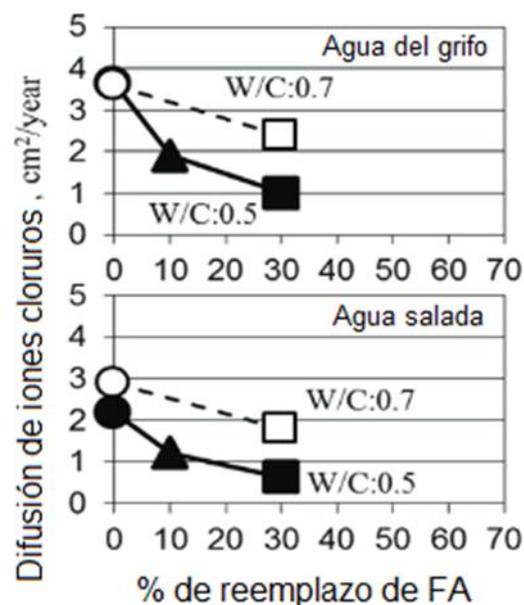


Figura 3: Tasa de penetración de cloruro en el concreto para diferentes proporciones de reemplazo de FA [31]

7. SOSTENIBILIDAD DEL HORMIGÓN ELABORADOS CON AGUA Y/O ARENA DE MAR

Con el paso de los años y el aumento de la población mundial, las demandas de infraestructura son cada vez mayores. Es por ello que satisfacer las mismas desde la industria de la construcción debe lograrse de manera sostenible para garantizar la longevidad de los recursos naturales. Dada la demanda de hormigón y las restricciones estipuladas, la arena y el agua dulce se consideran en los últimos años las dos materias primas más valiosas del siglo XXI [39].

La arena y la grava se suponen los materiales más extraídos del mundo. La gran demanda de arena ha llevado a prácticas ilegales de extracción incumpliendo las políticas ambientales [40]. Asimismo, según reporte de las Naciones Unidas (2019), Dhondy et al [41], indican que más del 40% de la población mundial enfrenta escasez de agua dulce. Es por ello que el uso de agua y/o arena de mar como alternativa en la construcción puede ayudar potencialmente a mejorar la calidad de vida en todo el mundo, al tiempo que proporciona una forma sostenible de mantener las fuentes de agua dulce para las generaciones futuras.

Los polímeros reforzados con fibras (PRF), material compuesto que comienza a usarse en la construcción desde la década de 1960, constituyen una alternativa viable para la implementación de arena y/o agua de mar en el hormigón, ya que proporcionan una durabilidad inherente a los proyectos de infraestructura. El refuerzo de PRF es un material de construcción ideal, que no se corroe por lo que permite reducir los recubrimientos y consecuentemente reducir las dimensiones de los elementos estructurales y con ello la cantidad de hormigón requerida. Además, el PRF es relativamente compatible con el alto contenido de cloruro presente en el hormigón con arena y/o agua de mar, por lo que la infraestructura marina construida con estos materiales no necesita ajustarse a límites estrictos de concentración crítica de cloruro [42]. El hormigón elaborado con arena y agua de mar en condiciones marinas puede proporcionar estructuras que pueden adaptarse a los cambios en el nivel del mar y las condiciones de exposición marina.

8. CONCLUSIONES



El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas sobre el uso de arena de mar y/o agua de mar como materia prima para el hormigón en reemplazo de la arena de río y el agua dulce permite arribar a las siguientes conclusiones:

- No existe un criterio único en cuanto a los efectos del empleo del agua y/o arena de mar en la fabricación del hormigón, evidenciándose contradicciones en las conclusiones expuestas por varios de los investigadores, lo cual puede atribuirse a la diferencia de composición de los materiales según su lugar de origen.
- Todos los estudios han demostrado que el hormigón elaborado con agua y/o arena de mar tiene una elevada resistencia a la compresión en un periodo de 7 días probablemente debido al rico contenido de cloruro, y a los 28 días llega a ser similar o a disminuir en un rango entre 5 -10 % en comparación con el hormigón ordinario.
- Se necesitan más investigaciones en esta temática que permitan establecer criterios concluyentes relacionados con el empleo del agua y la arena de mar en los hormigones, específicamente para las características de las materias primas en Cuba.

1. J. Xiao, C. Qiang, A. Nanni, and K. Zhang, "Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities," *Construction and Building Materials*, vol. 155, pp. 1101-1111, 2017.
2. S. P. Carrandi. (2018). Cemento, ladrillo y arena...¿cuánto tenemos? Available: <https://www.granma.cu/cuba/2018-08-02/cemento-ladrillo-y-arenacuanto-tenemos-02-08-2018-18-08-45>
3. (2018). Distribución de agua en el planeta. Available: <http://jumapan.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta>
4. S. Kaushik and S. Islam, "Suitability of sea water for mixing structural concrete exposed to a marine environment," vol. 17, no. 3, pp. 177-185, 1995.
5. (2021). Concreto mezclado con agua de mar y reforzado con barras GFRP. Nueva frontera de la sostenibilidad. Available: <https://aritrec.blog/2021/02/05/concreto-mezclado-con-agua-de-mar-y-reforzado-con-barras-gfrp-nueva-frontera-de-la-sostenibilidad>
6. M. Rossini, T. Cadenazzi, S. Nolan, and A. Nanni, "SEACON and resilient FRP-RC/PC solutions: The halls river bridge," presented at the Conference on Italian Concrete Days Italia, 2018.
7. J. Limeira, L. Agulló, and M. Etxeberria, "Dredged marine sand as a new source for construction materials," *Materiales de Construcción*, vol. 62, no. 305, pp. 7-24, 2012.
8. B. Safi et al., "The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM)," vol. 78, pp. 430-438, 2015.
9. W. Liu, H. Cui, Z. Dong, F. Xing, H. Zhang, and T. Y. J. C. Lo, "Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding," *Construction and Building Materials*, vol. 120, pp. 1-9, 2016.
10. S. Sarker and M. I. Hasan, "Salinity removal and feasibility study on sea sand in geopolymer concrete," in 4th International Conference on Civil Engineering and Architecture, Chittagong, Bangladesh, p. 676-682, 2018.
11. Z. Dong, G. Wu, X. L. Zhao, H. Zhu, and J. L. Lian, "The durability of seawater sea-sand concrete beams reinforced with metal bars or non-metal bars in the ocean environment.," *Advances in Structural Engineering*, vol. 23, pp. 334-347, 2020.
12. T. Li et al., "Preparation of sea water sea sand high performance concrete (SHPC) and serving performance study in marine environment," vol. 254, p. 119114, 2020.
13. D. Niu, L. Su, Y. Luo, D. Huang, and D. Luo, "Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete," *Construction Building Materials*, vol. 237, p. 117628, 2020.
14. F. M. Wegian, "Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete," Part A: Civil Structural Engineering, vol. 3, no. 4, pp. 235-243, 2010.
15. A. Hernández Pérez de Guereñu, "Análisis de la efectividad del inhibidor en hormigones (convencional y reciclado) fabricados con agua de mar," *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2015.
16. M. Etxeberria, J. M. Fernandez, and J. Limeira, "Secondary aggregates and seawater employment for sustainable concrete dyke blocks production: Case study," *Construction and Building Materials*, vol. 113, pp. 586-595, 2016.
17. H. Hamada, Y. Sagawa, and D. Yamamoto, "Influence of seawater mixing and curing on strength characteristics and porosity of ground granulated blast-furnace slag concrete," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 271, no. 1, p. 012070: IOP Publishing, 2017.
18. J. L. Vilchez Becerra, "Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto usando agua de mar," Título profesional de: Ingeniero Civil, Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente, Facultad de ingeniería arquitectura y urbanismo. Escuela profesional de ingeniería civil, Perú, 2020.
19. (2019). Las Sales del mar: ¿son todas los mares igual de salados? Available: <https://aedyr.com/sales-mar-son-todos-mares-igual-salados/>
20. S. K. Kaushik and S. Islam, "Suitability of sea water on curing and compressive strength of structural concrete," *Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 37-45, 2012.
21. T. U. Mohammed, H. Hamada, and T. Yamaji, "Performance of seawater-mixed concrete in the tidal environment," *Cement concrete research*, vol. 34, no. 4, pp. 593-601, 2004.
22. J. Limeira, L. Agulló, and M. Etxeberria, "Dredged marine sand as construction material," *European journal of environmental civil engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 906-918, 2012.
23. J. Limeira, M. Etxeberria, L. Agulló, and D. J. C. Molina, "Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand," *Construction and building materials*, vol. 25, no. 11, pp. 4165-4174, 2011.
24. H. Donza, O. Cabrera, and E. Irassar, "High-strength concrete with different fine aggregate," *Cement Concrete research*, vol. 32, no. 11, pp. 1755-1761, 2002.

25. E.-I. Yang, S.-T. Yi, and Y.-M. Leem, "Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties," vol. 35, no. 11, pp. 2175-2182, 2005.
26. E.-I. Yang, M.-Y. Kim, H.-G. Park, and S.-T. Yi, "Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete," *Construction building materials*, vol. 24, no. 5, pp. 758-765, 2010.
27. A. E. Richardson and T. J. S. S. Fuller, "Sea shells used as partial aggregate replacement in concrete," vol. 31, no. 5, pp. 347-354, 2013.
28. M. Etxeberria, A. Gonzalez-Corominas, and P. Pardo, "Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties," *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 496-505, 2016.
29. J. Limeira, L. Agullo, and M. Etxeberria, "Dredged marine sand in concrete: An experimental section of a harbor pavement," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 863-870, 2010.
30. X. He, J. Zhou, Z. Wang, and L. Zhang, "Study on mechanics and water transport characteristics of sea-sand concrete based on the volume analysis of each solid composition," *Construction and Building Materials*, vol. 257, p. 119591, 2020.
31. N. Otsuki, A. K. Min, T. Nagata, and C. Yi, "Durability of seawater mixed concrete with different replacement ratio of BFS (Blast Furnace Slag) and FA (Fly Ash)," *Journal of Civil Engineering Architecture*, vol. 10, no. 5, pp. 568-580, 2016.
32. Y. Huiguang, L. Yan, L. Henglin, and G. Quan, "Durability of sea-sand containing concrete: Effects of chloride ion penetration," *Mining science technology*, vol. 21, no. 1, pp. 123-127, 2011.
33. W. Q. Cao, Q. Su, Zhao, , B. T. J., and G. Z., "Experiments research on the durability of concrete made of sea sand," in 19th National Conference of Structural Engineering, EUA, vol. 2, 2010,.
34. W. P. S. Dias, G. A. P. S. N. Seneviratne, and S. M. A. Nanayakkara, "Offshore sand for reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1377-1384, 2018.
35. J.-G. Teng, Y. Xiang, T. Yu, and Z. Fang, "Development and mechanical behaviour of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete," *Advances in Structural Engineering*, vol. 22, no. 14, pp. 3100-3120, 2019.
36. P. Li, W. Li, T. Yu, F. Qu, and V. W. Tam, "Investigation on early-age hydration, mechanical properties and microstructure of seawater sea sand cement mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 249, p. 118776, 2020.
37. M. Guo et al., "Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis," *Construction and Building Materials*, vol. 234, p. 117339, 2020.
38. L. Montanari, P. Suraneni, M. Tsui Chang, and M. Khatib, "Hydration, Pore Solution, and Porosity of Cementitious Pastes Made with Seawater," *Journal of Materials in Civil Engineering* 2019.
39. (2017). Why There Is a Shortage of Sand. Available: <https://www.economist.com/the-economist-explains/2017/04/24/why-there-is-a-shortage-of-sand?fsrc=gnews>
40. V. Beiser, "'The Deadly Global War for Sand.'" *WIRED*, Available: <https://www.wired.com/2015/03/illegal-sand-mining>
41. T. Dhondy, A. Remennikov, and N. M. Shiekh, "Investigating the use of sea sand and seawater in concrete," presented at the Australasian Structural Engineering Conference, Adelaide, Australia, 2018.
42. Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars, 2019.