

Concreto impermeabilizado mediante ceniza de cascarilla de arroz para aplicaciones en zonas costeras

Yemely Talia Mendoza Churqui¹ ; Skarley Cielo Velasquez Salcedo² ; Valkiria Ibárcena Ibárcena³ 

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, yemelytalia@gmail.com, skarleyy@gmail.com, valkiria.ibarcena@gmail.com

Resumen– En las regiones costeras, la alta humedad relativa y salinidad propician una rápida degradación del concreto. Este estudio evalúa el uso de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como aditivo puzolánico para mejorar la impermeabilidad del material expuesto a ambientes marinos. Bajo un enfoque cuantitativo y experimental, se prepararon mezclas con 0%, 2%, 5% y 10% de CCA. Se realizaron pruebas de absorción de agua conforme a procedimientos estandarizados basados en la norma ASTM C642-13 y pruebas de infiltración con un permeámetro de carga descendente. Los resultados mostraron que la mezcla con 10% de CCA redujo la absorción en un 35% respecto a la mezcla sin CCA y presentó menor paso de agua. El análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) reveló un 98.6% de sílice amorfa, confirmando su potencial como aditivo. Las imágenes microscópicas mostraron una microestructura más compacta con mayor proporción de CCA. El estudio concluye la eficacia del CCA para impermeabilizar el concreto expuesto en zonas marinas.

Palabras clave– permeabilidad, concreto, aditivo, regiones costeras.

I. INTRODUCCIÓN

En las regiones costeras la humedad relativa y la salinidad propicia el deterioro de los materiales de construcción [1], facilitando la infiltración de agua salina, acelerando la corrosión de las edificaciones y aumentando los costos de mantenimiento a largo plazo. Por otro lado, a nivel mundial se generan alrededor de 380 millones de toneladas métricas de cascarilla de arroz al año, convirtiéndose en un residuo agrícola relevante debido a sus propiedades fisicoquímicas y su potencial para un uso más sostenible [2]. Por ejemplo, en el caso de Arequipa al sur del Perú, se estima cerca de 6.500 kg de cascarilla de arroz por cada topo (1.000 m²), alcanzando más de 24,000 toneladas métricas anuales, de las cuales una parte considerable se desperdicia o desecha [3].

Frente a esta problemática, la mayoría de las investigaciones se han centrado en analizar el comportamiento del cemento con diferentes aditivos en laboratorio como [4] y [5], quienes sumergieron sus muestras en 5 mm sobre agua de mar, para determinar la permeabilidad del material y en otros casos durante 28 días para evaluar su porosidad [6] y de esta manera obtener la tasa de absorción de agua [7] en 21 sitios de exposición marina.

En el caso de la calcinación de la cascarilla de arroz, es crucial su procedimiento ya que de esto depende su activación de sílice para limpiar las impurezas metálicas [8]. Por ejemplo, [5] lo llevo a cabo a temperaturas de 300°C, 500°C, 700°C y 900 °C en un tiempo de combustión constante durante 3 horas.

A diferencia de [9] y [10], que llevaron a cabo el proceso de combustión durante 1 hora a 427°C.

Por otro lado, las proporciones de la CCA pueden variar de 15 %, 30% y 45 % [11] o 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % y 15 % [12] las cuales son evaluadas tras 7 y 28 días de curado. A diferencia de [13] que presenta un curado estándar por hasta 24 días utilizando una proporción de 0 %, 10 %, 20 % y 30 % transfiriéndose una solución de cloruro de sodio al 3% durante 4 días, y posteriormente colocándose en el equipo experimental de congelación y descongelación de concreto.

La reducción de la permeabilidad en el concreto se ha logrado mediante aditivos que actúan a nivel microestructural. En el caso de [14] se demostró que la nano-sílice coloidal disminuye la porosidad capilar al promover reacciones puzolánicas secundarias y un empaquetamiento más denso de la matriz cementicia. Por su parte, los aditivos cristalinos generan productos de hidratación adicionales que sellan los poros y grietas, mejorando la resistencia frente a la penetración de agua y cloruros, además de favorecer procesos de auto-sellado en condiciones de microfisuración [15] [16]. Así mismo, los agentes hidrofóbicos han mostrado una notable capacidad para modificar la energía superficial de la pasta y bloquear la absorción capilar, reduciendo los defectos internos y la interconexión de poros, lo cual incrementa la durabilidad y la protección frente a la corrosión del refuerzo [17][18].

Por lo tanto, la mayoría ha comprobado su efectividad de la CCA como aditivo en el concreto. Sin embargo, los estudios se han limitado a establecer pruebas en laboratorio. Lo cual puede variar bajo condiciones reales, lo que limita de cierta manera la comprensión de la permeabilidad y durabilidad del concreto. Para llenar este vacío, se aplicará el método de evaluación de permeabilidad a través de pruebas de absorción de agua a los 28 días, siguiendo el enfoque de [6], solo que adaptando el estudio bajo un análisis in situ.

II. METODOLOGÍA

Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño experimental, basado en la elaboración de probetas cilíndricas de concreto con reemplazo parcial de cemento por CCA en las siguientes proporciones de 0%,2%,5% y 10%, evaluando su efecto de impermeabilidad mediante ensayos de absorción y permeabilidad conforme a las normas técnicas, evaluación microestructural mediante microscopía electrónica de barrido

(SEM) y análisis de espectroscopía de dispersión de energía (EDS).

A. Proceso constructivo

1) Preparación del aditivo

La cascarilla de arroz fue recolectada de los cultivos de la zona costera al sur del Perú, sometiéndose a un pretratamiento químico con ácido clorhídrico (HCL) diluido al 1% en peso por volumen (1g de HCL por cada 100ml de solución), en una relación sólido-líquido de 1:10 (1.5kg de CCA por 15L de solución), con el objetivo de eliminar compuestos metálicos solubles y mejorar la pureza de la sílice. La mezcla se mantuvo a 60° C durante 2 h. Concluido este proceso, el material fue lavado con agua destilada hasta alcanzar el pH neutro (≈ 7) separándose por filtración.

Posteriormente, la CCA fue secada inicialmente a 105°C durante 24h calcinado en un horno tipo mufla de la marca Nabertherm, a una temperatura controlada de 600°C durante un periodo de dos horas, a fin de obtener una ceniza reactiva con propiedades puzolánicas, la cual, según la ecuación 1 tuvo un rendimiento de 23.37%.

$$\text{Peso de la CCA} = \text{Peso de la CA} \times R \quad (1)$$

Donde:

R = rendimiento de calcinación

CA = Peso inicial de la cascarilla de arroz (1.5 kg)

CCA = Peso final de la cascarilla de arroz

La CCA fue enfriada, almacenada en un contenedor hermético durante 24h y posteriormente tamizada con tamiz malla N° 200 (75 μ m) para asegurar una granulometría homogénea, así como su reactividad puzolánica adecuada para su incorporación al concreto. Posterior a ello se realizó un análisis por fluorescencia de rayos X (XRF), utilizando un equipo con energía dispersiva Rigaku, modelo NEX QC+ QuianEZ, con un tubo de rayos X operando a 50 kV y un detector tipo SSD, para caracterizar la composición química de la CCA y evaluar su potencial como aditivo puzolánico.

2) Preparación de las muestras

Se utilizó cemento Portland Tipo I conforme a las normas NTP 334.090 [19] y ASTM C595 [20], así como agregado grueso, el cual fue caracterizado por análisis granulométrico basado en la norma ASTM C136-96^a [21], MTC 400.037 [22], y mediante ensayos de peso específico de acuerdo con ASTM C127 [23]. Las mezclas de concreto se formularon siguiendo el método del ACI 211.1 [24] (ecuación 2) con una dosificación base 1:2:2 (cemento: arena: grava) y una relación agua/cemento de 0.56 litros, estimada para obtener una resistencia a compresión de 210 Kg/cm².

$$W_{total} = V_{cilindro} \times \rho_{concreto} \quad (2)$$

Donde:

W_{total} = Masa total del concreto fresco por probeta (kg)

W_{cilindro} = Volumen de la probeta cilíndrica (m³)

$\rho_{concreto}$ = Densidad del concreto fresco (kg/m³)

Se prepararon cuatro tipos de mezclas con diferentes porcentajes de CCA: 0%, 2%, 5% y 10% respectivamente, detalladas en la Tabla 1.

TABLA I
DOSIFICACIÓN DEL CONCRETO POR PROBETA CON ADICIÓN DE CCA

Código	Materiales					
	CCA (%)	Cemento (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	Agua (l)	Agua (L + 5% ajustada)
MA	0	0.55	1.10	1.65	0.31	0.00
MB	2	0.54	1.10	1.65	0.30	0.32
MC	5	0.52	1.10	1.65	0.29	0.31
MD	10	0.50	1.10	1.65	0.28	0.29

* Nota: los cálculos se basan en una masa total de 1.57 kg de concreto fresco por probeta.

Para preparar la muestra, se utilizó probetas cilíndricas de PVC de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura, conforme a la norma MTC E-702 [25]. La mezcla fue realizada y compactada manualmente utilizando un martillo de caucho de 0.2 Kg y una varilla de acero lisa de 300 mm por 0.025 mm. Luego del vaciado, se esperó 24h para que la muestra fragüe, posteriormente se procedió con el curado de las probetas que se dio durante 28 días en agua potable utilizando el método de inmersión, garantizando las condiciones necesarias para alcanzar la resistencia esperada, la cual debe ser mayor a 24mPa.

3) Ensayos técnicos

Una vez concluido el curado, se evaluó la absorción de agua marina en discos de concreto con diferentes porcentajes de CCA, para ello se utilizó agua de mar recolectada in situ, con el fin de observar su efecto en la permeabilidad del material. Los discos de 50 mm de espesor se obtuvieron de las probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm, por lo que cada disco representa aproximadamente una cuarta parte del volumen total de la probeta original. Los pesos húmedos se midieron después del curado y se expusieron tras inmersión de agua marina a intervalos de 24 horas, durante 3, 6 y 12 días, permitiendo calcular el porcentaje de absorción de agua conforme a ASTM C642-13 [26] y ASTM C1585 [27].

Se evaluó la permeabilidad del concreto mediante un ensayo de infiltración utilizando permeámetro de carga descendente simple de diseño casero, basado en las

recomendaciones del método ACI 522R-10 [28]. Este procedimiento permitió cuantificar la tasa de penetración de agua en condiciones controladas. Además, la geometría de las muestras garantiza un flujo hidráulico predominantemente unidimensional y condiciones homogéneas de ensayo. Al mantenerse constantes el área transversal y la longitud del recorrido del flujo, las variaciones en el descenso de la carga hidráulica se atribuyen exclusivamente a las modificaciones microestructurales del concreto inducidas por la incorporación de CCA.

4) Análisis microestructural

Se realizó un análisis microestructural complementario mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) empleando especímenes cúbicos de 30 mm x 30 mm x 10 mm, con el fin de identificar posibles alteraciones en la matriz interna del concreto asociadas a la incorporación de la CCA. Así mismo, un análisis de espectroscopía de dispersión de energía (EDS) para caracterizar la composición elemental de la matriz cementicia a escala micrométrica, facilitando la identificación de productos de hidratación, reacciones puzolánicas y mecanismos de transporte iónico, lo que resulta fundamental para interpretar el comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Propiedades de la ceniza de cascarilla de arroz sur peruana

La CCA obtenida tras el pretratamiento ácido con HCL seguido de calcinación controlada, fue analizada mediante espectroscopía de XRF con el objetivo de determinar su composición química en términos de óxidos. Los resultados de la Fig. 1 muestran que la CCA de la costa sur peruana posee un contenido predominante de dióxido de silicio (SiO_2) del 98.6%, indicando un alto grado de pureza química y una elevada proporción de sílice amorfa, la cual es fundamental para la reactividad puzolánica del material [28]. Esta concentración supera ampliamente el umbral mínimo del 70% establecido por la norma ASTM C618 [30] para materiales puzolánicos, validando así la aptitud de la CCA para ser utilizada como aditivo en el concreto.

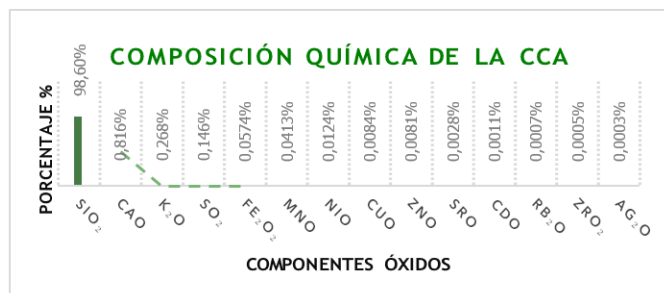


Fig. 1 Composición química de la CCA determinada por la fluorescencia de rayos XRF

La presencia residual de óxido de calcio (CaO , 0.816%) y óxido de potasio (K_2O , 0.268%) contribuye a la activación temprana de la reacción puzolánica, promoviendo la formación de productos de hidratación adicionales, como los geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H), que densifican la microestructura del concreto y mejoran sus propiedades mecánicas y durabilidad [31].

Por otro lado, los bajos contenidos de otros óxidos metálicos ($<0.1\%$) no afectan negativamente las propiedades del aditivo, manteniendo su comportamiento químico favorable [31]. Estas características fisicoquímicas hacen que la CCA sea especialmente adecuada para su aplicación en concreto expuesto a ambientes agresivos, como zonas costeras, donde la impermeabilidad y la resistencia a la penetración de agentes externos son cruciales para prolongar la vida útil estructural [29][32].

B. Ensayos técnicos

1) Prueba de absorción de agua marina

En los ensayos con agua marina (Figura 2), se observó un incremento progresivo en la absorción conforme aumentaba el tiempo de exposición, alcanzando valores máximos al día 12. La Muestra B presentó el mayor porcentaje de absorción con 10.4%, mientras que la Muestra D registró el valor más bajo con 7.2%, lo que sugiere un efecto de refinamiento en la matriz del concreto y una reducción de la porosidad asociada a la actividad puzolánica del aditivo. Estas tendencias coinciden con lo reportado por [33], quienes señalan una disminución significativa de la permeabilidad y un mejor desempeño frente a ambientes agresivos.

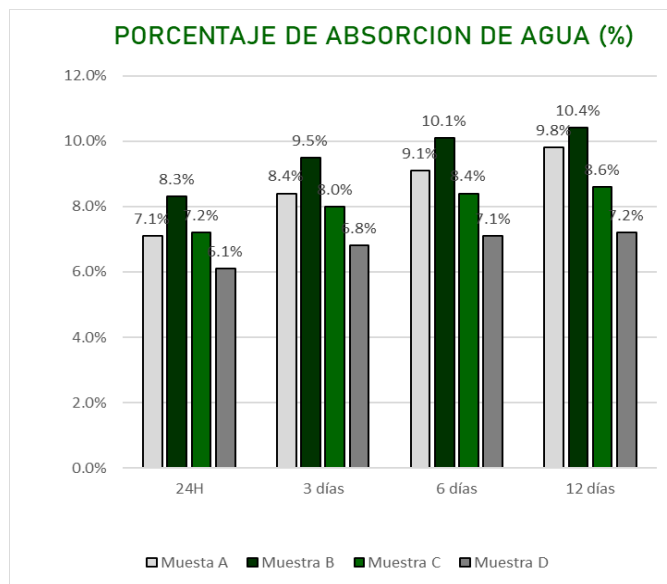


Fig. 2 Absorción de agua marina en diferentes intervalos de tiempo

A comparación con la muestra A que no contiene CCA, versus la muestra D que contiene menores niveles de absorción de agua. Se deduce que la reducción del porcentaje de absorción de agua evidencia una disminución de la porosidad accesible y una mejora en la impermeabilidad del concreto con adición de CCA al 10%.

2) Prueba de permeabilidad

Los ensayos de permeabilidad (Figura 3) mediante el método de carga descendente revelan que la incorporación de CCA reduce significativamente la penetración del agua de mar, durante las primeras 24 horas.

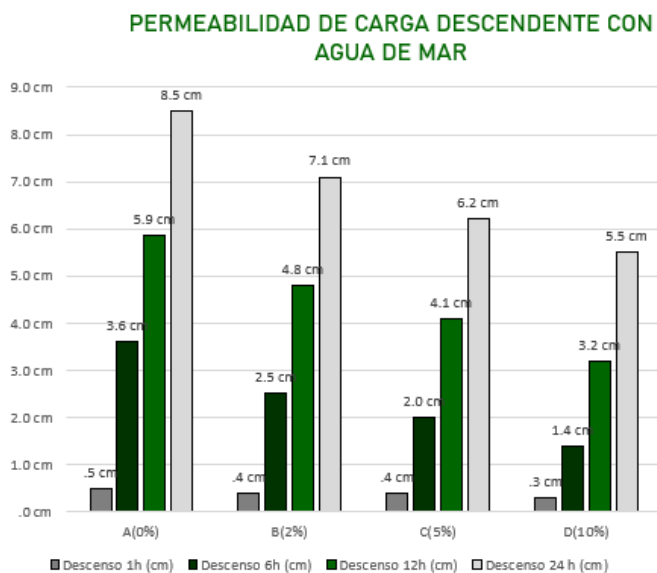


Fig. 3 Descenso de agua marina por hora

Los resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad mediante el método de carga descendente evidencian una reducción progresiva del descenso de la columna de agua a medida que se incrementa el contenido de CCA en las probetas de concreto. Este comportamiento indica una disminución del coeficiente de permeabilidad, lo que confirma el efecto impermeabilizante de la CCA sobre la matriz cementicia.

En la muestra de referencia sin CCA (muestra A), el mayor descenso acumulado de la columna hidráulica a las 24 horas (8,5 cm) revela una microestructura más porosa y con mayor conectividad capilar, lo que facilita el flujo del agua de mar a través del concreto. Este resultado es consistente con lo reportado por [4] y [10], quienes señalan que los concretos convencionales presentan una red capilar continua que incrementa la permeabilidad y, por ende, la susceptibilidad al ingreso de agentes agresivos como cloruros.

Por el contrario, las muestras con adición de CCA (B, C y D) muestran descensos significativamente menores, siendo la

muestra con 10 % de CCA (5,5 cm a las 24 horas) la que presenta el mejor desempeño hidráulico. Este comportamiento puede atribuirse a la reacción puzolánica de la CCA, rica en sílice amorfa, que consume hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y genera productos secundarios de hidratación tipo C-S-H, los cuales refinan la estructura porosa y reducen el diámetro y la continuidad de los poros capilares. Hallazgos similares han sido reportados en estudios como los de [29] y [32], quienes destacan que los materiales cementicios suplementarios de origen silíceo contribuyen a la densificación de la matriz y a la mejora de la durabilidad.

Asimismo, la tendencia observada en los resultados concuerda con lo documentado por [5] y [13], quienes demostraron que tanto la CCA como sus variantes nanoestructuradas reducen significativamente la permeabilidad y la difusión de cloruros, incluso bajo condiciones ambientales agresivas. En particular, [13] señalan que la CCA limita la movilidad de los iones cloruro al incrementar la tortuosidad del flujo y disminuir la conectividad de los poros, fenómeno que explica el menor descenso hidráulico registrado en las muestras con mayor contenido de CCA.

La disminución progresiva del descenso de carga desde la muestra B (2 % CCA) hasta la muestra D (10 % CCA) sugiere que el efecto impermeabilizante es dependiente del contenido de CCA, en concordancia con los resultados de [11], quienes observaron que reemplazos moderados de cemento con CCA optimizan la relación entre resistencia mecánica y durabilidad. No obstante, la literatura también advierte que porcentajes excesivos pueden afectar negativamente la resistencia mecánica si no se controla adecuadamente la finura y el grado de combustión de la ceniza, aspecto que deberá evaluarse de manera complementaria.

En el contexto de exposición marina, el uso de agua de mar como fluido de ensayo otorga mayor relevancia a los resultados, ya que simula condiciones reales de servicio en zonas costeras. Estudios como el de [7] y [9] destacan que la reducción de la permeabilidad es un factor clave para mejorar la durabilidad a largo plazo del concreto en ambientes con alta concentración de cloruros. En este sentido, los resultados obtenidos confirman que la incorporación de CCA contribuye significativamente a la mitigación del ingreso de agentes agresivos, posicionándola como una alternativa sostenible y técnicamente viable para concretos expuestos a ambientes marinos.

C. Evaluación microestructural mediante SEM

La evaluación microestructural realizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitió examinar la evolución del concreto con diferentes porcentajes de CCA, tras 21 días de exposición continua en agua de mar (Figura 4). En la muestra A sin aditivo, se identificaron discontinuidades

estructurales, con vacíos y microgrietas. Esta morfología es coherente con lo descrito [33], quien reporta que mezclas sin aditivos presentan mayor vacíos intergranulares y capacidad de absorción de agua.

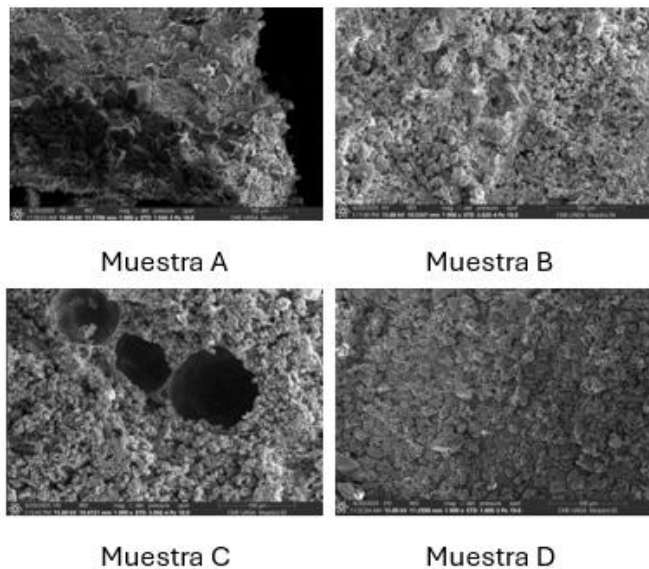


Fig. 4 Micrografía SEM a 100 µm

En la muestra B con 2% de CCA, se evidenció una ligera mejora en la formación del gel C–S–H, aunque aún se identificaron vacíos intersticiales entre los productos de hidratación. La reactividad puzolánica a este nivel de reemplazo no fue suficiente para modificar de forma significativa la densidad de la matriz.

A partir del 5 % de adición (Muestra C), la microestructura presentó una disposición más compacta y homogénea, con menor número de poros visibles. Estas observaciones coinciden con los hallazgos de [35], quienes señalan que el rango óptimo de reemplazo se encuentra entre el 5 y 10 % para mejorar la densidad interna del concreto. En la muestra con 10% de CCA (Muestra D), se alcanzó la mayor compactación microestructural. La matriz se presentó homogénea, con reducida presencia de porosidad superficial y sin fisuras relevantes (Figura 5), con coloración azulada tras la exposición al agua de mar, fenómeno asociado a reacciones iónicas en ambientes alcalino-salinos.

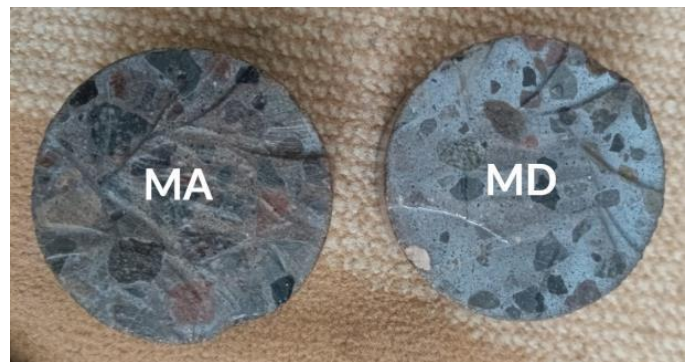


Fig. 5 Comparación de la coloración superficial entre las muestras A y D tras su exposición al agua de mar

D. Análisis de espectroscopia de dispersión de energía (EDS)

El análisis por EDS (Figura 6) reveló la presencia de oxígeno (O), calcio (Ca), silicio (Si), y trazas de cloro (Cl), sodio (Na), magnesio (Mg), hierro (Fe) y bromo (Br), lo que sugiere la formación de compuestos secundarios como sales cloradas y férricas. Esta interpretación coincide con lo reportado por [35][36], quienes observaron precipitación de fases salinas en concretos expuestos a soluciones salobres con pH alcalino. En conjunto, las micrografías evidencian que el incremento del contenido de CCA se traduce en una progresiva densificación de la microestructura del concreto. Este comportamiento ha sido validado por [36], quienes demostraron que la incorporación de CCA en ambientes marinos mejora la impermeabilidad y durabilidad del concreto al reducir su porosidad y limitar la migración de iones agresivos.

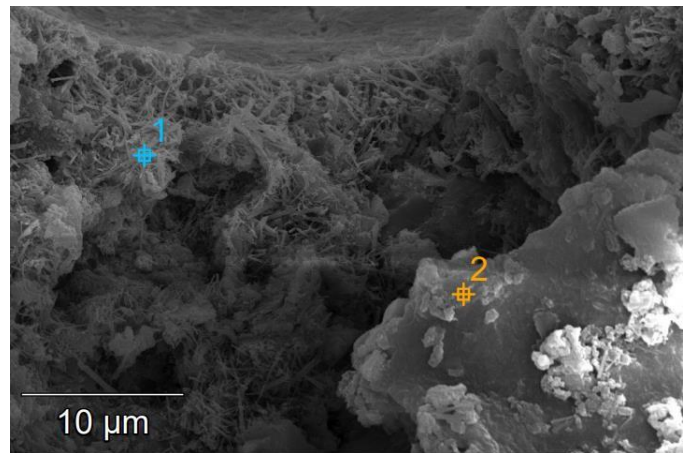


Fig. 6 Prueba EDS de Muestra D con 10% de CCA expuesta al agua de mar

A partir de la Figura 6, se extrajo 2 espectros (azul y amarillo) El espectro 1 EDS (Figura 7) evidencia una matriz cementicia rica en silicio y calcio, lo que confirma la formación predominante de productos tipo C–S–H. La elevada señal de Si se atribuye a la incorporación de CCA, cuya sílice

amorfa participa activamente en reacciones puzolánicas, consumiendo hidróxido de calcio y densificando la microestructura. Esta densificación explica la reducción de la permeabilidad observada experimentalmente. La detección de cloro sugiere interacción con agua de mar, aunque su presencia combinada con fases aluminadas indica posible fijación química, limitando la migración de iones agresivos.

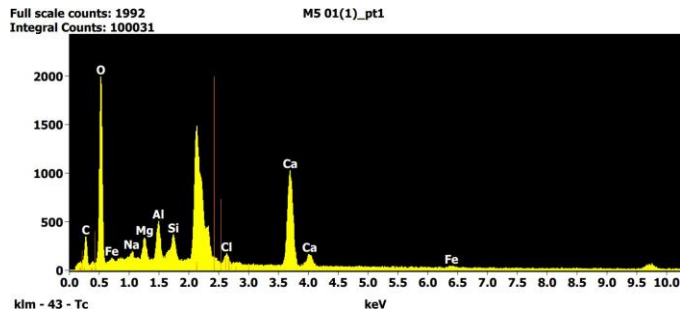


Fig. 7 Espectro 1 obtenido de la prueba EDS de Muestra D con 10% de CCA expuesta al agua de mar

Al comparar los espectros EDS se evidencia un cambio significativo en la composición elemental y en la microestructura del concreto, lo cual puede deberse al proceso de fabricación, presentando irregularidades en la homogenización del aditivo. Por lo que, el espectro 2 de la Figura 8 presenta una relación Ca/Si más elevada, característica de matrices con mayor contenido de hidróxido de calcio libre y menor desarrollo de productos puzolánicos secundarios. En contraste, el espectro 1 mostró un incremento notable del silicio, atribuible a la incorporación de CCA, lo que favorece la formación de geles C-S-H y C-A-S-H más densos. Asimismo, la mayor intensidad relativa del cloro en la muestra de referencia sugiere una mayor movilidad de iones agresivos, asociada a una red porosa más abierta. Estos resultados microestructurales explican la mayor permeabilidad observada experimentalmente en las mezclas sin CCA, en comparación con aquellas modificadas con porcentajes crecientes de este material puzolánico.

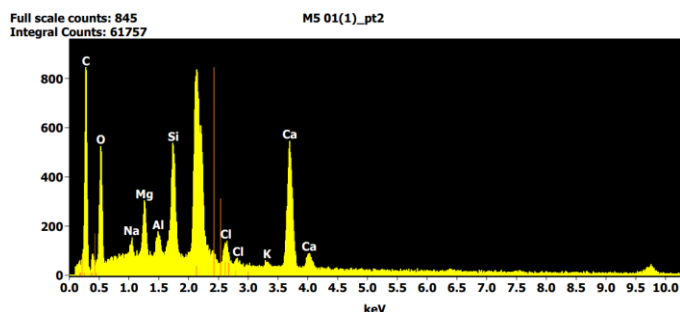


Fig. 8 Espectro 2 obtenido de la prueba EDS de Muestra D con 10% de CCA expuesta al agua de mar

La integración de los resultados SEM-EDS con los ensayos de permeabilidad evidencia una relación directa entre la modificación microestructural inducida por la CCA y la

reducción del transporte hidráulico. Las mezclas sin CCA presentan una matriz porosa con alta relación Ca/Si, lo que favorece la conectividad capilar y la migración de agua y cloruros. En contraste, la incorporación progresiva de CCA incrementa el contenido relativo de silicio, promoviendo la formación de geles C-S-H secundarios que densifican la microestructura. Este refinamiento de poros se traduce en un menor descenso de la columna de agua en el ensayo de carga descendente, confirmando la mejora en la impermeabilidad del concreto expuesto a ambientes marinos.

IV. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados confirmaron que la adición de CCA mejora significativamente la impermeabilidad del concreto. En las pruebas de absorción con agua de mar, la muestra con 10% de CCA presentó el menor porcentaje de absorción (7.2%), frente al 9.8% de la muestra sin aditivo.

Asimismo, el ensayo de carga descendente evidenció una reducción del ingreso del agua hasta 62% en las primeras horas, lo que sugiere un efecto positivo en la resistencia inicial frente a la infiltración. El análisis microestructural mediante SEM mostró que a partir del 5% de reemplazo se logra una matriz más compacta y con menor porosidad. Estos resultados coinciden con investigaciones previas sobre el comportamiento puzolánico de la CCA y validan su efectividad como aditivo impermeabilizante.

Por otro lado, la caracterización química mediante XRF indicó que la CCA utilizada alcanzó un contenido de dióxido de silicio (SiO_2) del 98.6 %, superando ampliamente el umbral mínimo exigido por la norma ASTM C618. Esta elevada pureza confirma su potencial reactividad puzolánica y respalda los resultados obtenidos en laboratorio. En conjunto, se concluye que la CCA sur peruana es una alternativa viable y sostenible para mejorar la durabilidad del concreto en zonas costeras.

Como línea futura de investigación, se sugiere evaluar el comportamiento del material frente a ciclos de congelamiento-descongelamiento, exposición prolongada a cloruros y estudios de resistencia mecánica a largo plazo, que también pueda darse en otros contextos costeros.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Perú, en particular al Arq. Luis Portilla Cordova, por sus alcances y recomendaciones durante el desarrollo de la presente investigación.

REFERENCES

- [1] SENAMHI, "Arequipa: situación hidrológica de los ríos Colca, Majes y Camaná," 18-jun.-2020. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.senamhi.gob.pe/?p=prensa&n=1156>. [Accedido: 17-diciembre-2025].
- [2] M. Kordi, N. Farrokhi, M. I. Pech-Canul y A. Ahmadikhah, "Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications," *Rice Science*, vol. 31, no. 1, pp. 14–32, 2024, doi: 10.1016/j.rsci.2023.08.005.
 - [3] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), "Arequipa: OEFA promueve buenas prácticas en el cultivo de arroz para reducir impacto ambiental negativo," *Nota de prensa*, Arequipa, Perú, 26-jun.-2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/oeffa/noticias/978717-arequipa-oeffa-promueve-buenas-practicas-en-el-cultivo-de-arroz-para-reducir-impacto-ambiental-negativo>. [Accedido: 17-diciembre-2025].
 - [4] H. Huang, X. Gao, H. Wang y H. Ye, "Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 621–628, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.155.
 - [5] A. S. Faried, S. A. Mostafa, B. A. Tayeh y T. A. Tawfik, "The effect of using nano rice husk ash of different burning degrees on ultra-high performance concrete properties," *Construction and Building Materials*, vol. 290, art. no. 123279, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123279.
 - [6] B. B. Jindal, P. Jangra y A. Garg, "Effects of ultra fine slag as mineral admixture on the compressive strength, water absorption and permeability of rice husk ash based geopolymer concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 32, pt. 4, pp. 871–877, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.219.
 - [7] A. A. Ramezaniapour, A. R. Pourkhorshidi, J. Sobhani y F. Moodi, "Durability of concrete containing blended cements in harsh marine environments: 18 years exposure study," *Construction and Building Materials*, vol. 299, art. no. 123863, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123863.
 - [8] S. Azat, Z. Sartova, K. Bekseitova y K. Askaruly, "Extraction of high-purity silica from rice husk via hydrochloric acid leaching treatment," *Turkish Journal of Chemistry*, vol. 43, no. 5, pp. 1258–1269, 2019, doi: 10.3906/kim-1903-53.
 - [9] X. Ye, E. Bastidas-Arteaga y Q. Li, "Reliability-based conformity control method for chloride diffusivity of coastal reinforced concrete buildings," *Journal of Building Engineering*, vol. 87, art. no. 108997, 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.108997.
 - [10] M. Z. Nain y S. Kasilingam, "Influence of rice husk ash and bagasse ash on durability of concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 93, pt. 3, pp. 71–78, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.464.
 - [11] Q. Su y J. Xu, "Compression behavior and permeability of concrete composed of glass sand and rice husk ash," *Journal of Building Engineering*, vol. 76, art. no. 107095, 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107095.
 - [12] A. Shirgire, S. Thenmozhi, V. P. Jesuraj, A. Shelar, V. S. Chavhan y V. Javanjal, "Experimental study on high performance concrete using rice husk ash," *Materials Today: Proceedings*, vol. 103, pp. 594–600, 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2023.11.004.
 - [13] W. Zhang, Z. Duan, H. Liu, Y. Yao, Z. Zhang y C. Liu, "Salt freezing-thawing damage evolution model based on the time-dependent hydration reaction incorporating rice husk ash and recycled coarse aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 440, art. no. 137179, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137179.
 - [14] J. Wang, X. Lu, B. Ma y H. Tan, "Cement-based materials modified by colloidal nano-silica: Impermeability characteristic and microstructure," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 18, art. no. 3176, 2022, doi: 10.3390/nano12183176.
 - [15] C. Antón, H. Gudián, G. de Vera y M.-Á. Climent, "Effect of a crystalline admixture on the permeability properties of concrete and the resistance to corrosion of embedded steel," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 5, art. no. 1731, 2024, doi: 10.3390/app14051731.
 - [16] R. K. Shetiya, S. Elhadad, A. Salem, A. Fülöp y Z. Orban, "Investigation into the effects of crystalline admixtures and coatings on the properties of self-healing concrete," *Materials*, vol. 17, no. 3, art. no. 767, 2024, doi: 10.3390/ma17030767.
 - [17] J. Cai, Q. Ran, Q. Ma, H. Zhang, K. Liu, Y. Zhou y S. Mu, "Influence of a nano-hydrophobic admixture on concrete durability and steel corrosion," *Materials*, vol. 15, no. 19, art. no. 6842, 2022, doi: 10.3390/ma15196842.
 - [18] B. Zhang, Q. Li, R. Ma, X. Niu, L. Yang, Y. Hu y J. Zhang, "The influence of a novel hydrophobic agent on the internal defect and multi-scale pore structure of concrete," *Materials*, vol. 14, no. 3, art. no. 609, 2021, doi: 10.3390/ma14030609.
 - [19] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 334.090 – Cementos hidráulicos. Requisitos*, Lima, Perú.
 - [20] ASTM International, *ASTM C595: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 - [21] ASTM International, *ASTM C136-96a: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 - [22] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), *MTC 400.037 – Análisis granulométrico de agregados*, Lima, Perú.
 - [23] ASTM International, *ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 - [24] American Concrete Institute (ACI), *ACI 211.1: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, ACI, Farmington Hills, MI, USA.
 - [25] Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), *MTC E-702: Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*, Lima, Perú.
 - [26] ASTM International, *ASTM C642-13: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
 - [27] *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, ASTM C1585-20, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2020.
 - [28] American Concrete Institute (ACI), *ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete*, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2010.
 - [29] M. Amran, R. Fediuk, G. Murali, N. Vatin, M. Karelina, T. Ozbakkaloglu, R. S. Krishna, A. K. Sahoo, S. K. Das y J. Mishra, "Rice husk ash-based concrete composites: A critical review of their properties and applications," *Crystals*, vol. 11, no. 2, art. no. 168, 2021, doi: 10.3390/cryst11020168.
 - [30] ASTM C618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2019.
 - [31] J. G. Jang y S. Park (eds.), *Microstructures and Durability of Cement-Based Materials*, Special Issue, *Materials*, vol. 14, no. 4, art. no. 866, 2021, doi: 10.3390/ma14040866.
 - [32] E. Kapeluszna, W. Szudek, P. Wołka y A. Zieliński, "Implementation of alternative mineral additives in low-emission sustainable cement composites," *Materials*, vol. 14, no. 21, art. no. 6423, 2021, doi: 10.3390/ma14216423.
 - [33] R. Abousnina, "A state-of-the-art review on the influence of porosity and pore structure on concrete performance," *Buildings*, vol. 15, no. 13, art. no. 2311, 2025.
 - [34] E. Khankhaje, H. Jang, J. Kim y M. Rafieizonooz, "Utilizing rice husk ash as cement replacement in pervious concrete: A review," *Developments in the Built Environment*, vol. 22, art. no. 100675, 2025, doi: 10.1016/j.dibe.2025.100675.
 - [35] Y. Jing, J. C. Lee, W. C. Moon, J. L. Ng, M. K. Yew y Y. Jin, "Durability and environmental evaluation of rice husk ash sustainable concrete containing carbon nanotubes," *Scientific Reports*, vol. 15, art. no. 4352, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-88927-z.
 - [36] R. De Weerd, C. T. G. van Duin, J. W. Geus, L. Pel, F. Bos y C. M. Sang-Wook, "Phase changes in cementitious materials exposed to saline solutions," *Cement and Concrete Research*, vol. 165, Mar. 2023, art. no. 107071, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107071.