

Influencia de las cenizas de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento utilizado para la elaboración del concreto: una revisión de literatura

Influence of rice husk ash as a partial replacement for cement used in the manufacture of concrete: a literature review

Boris Enrique Oblitas-Gastelo¹ ; Ingrid Isabel Medina-Cardozo² ;
Ángel Iván Reyes Quintana³ ; Claudia Sofía Jacinto-Huamanchumo⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú. Chiclayo, Perú. C18740@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú. Chiclayo, Perú. imedinac@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú. Chiclayo, Perú. reyes_7380_4035@hotmail.com

⁴Universidad Tecnológica del Perú. Chiclayo, Perú. clauhuamanchumoing@hotmail.com

Autor de correspondencia: Ingrid Isabel Medina-Cardozo, imedinac@utp.edu.pe

Fecha de recepción: 11 de julio de 2022 Fecha de aceptación: 12 octubre 2022

Resumen – La inclusión de cenizas vegetales dentro de una mezcla de concreto ha ganado una gran aceptación, producto del incremento en las propiedades físicas y mecánicas que ofrece. Ante ello, la presente investigación tuvo como objetivo ofrecer una revisión sistemática de literatura sobre la influencia de las cenizas de cascarilla de arroz (CCA) como reemplazo parcial del cemento utilizado para la elaboración del concreto durante los años 2007-2022. En esta revisión de literatura se utilizaron 40 fuentes debidamente seleccionadas con rugosidad académica y científica, obtenidas de bases de datos confiables; por lo que se ordenaron según las propiedades intervenidas y sus respectivos resultados, la relación agua/cemento+CCA y el comportamiento del concreto al aumentar el porcentaje de las CCA. En el análisis de la resistencia a la compresión y tracción, se obtuvo que la proporción adecuada de reemplazo es de 15% con una relación agua:cemento+CCA al 0.50, la cual fue añadida de forma molida y sin elementos puzolánicos extra. En torno a la trabajabilidad, la proporción de reemplazo continúa en ese mismo rango

(5%-15%), controlando a su vez el descenso del valor del slump con un adecuado uso de aditivos superplastificantes y una correcta granulometría del agregado. En términos generales, la incorporación de las CCA como reemplazo parcial del cemento debe ir acompañada de una buena caracterización y preparación de los especímenes, un correcto diseño de mezcla y procedimientos de ensayos de laboratorio que permitan tener una aceptable confiabilidad y certeza en la interpretación de los resultados.

Palabras clave– Cemento, cenizas de cascarilla de arroz, concreto, resistencia a la compresión, trabajabilidad, resistencia a la tracción, elementos puzolánicos.

Abstract– The inclusion of vegetable ash in a concrete mix has gained wide acceptance due to the increase in physical and mechanical properties it offers. Therefore, the objective of this research was to offer a systematic literature review on the influence of rice husk ash (RHA) as a partial replacement of cement used in the production of concrete

Citar este artículo como: B. Oblitas-Gastelo, I. Medina-Cardozo, Ángel Reyes Quintana, y C. Jacinto-Huamanchumo, Influencia de las cenizas de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento utilizado para la elaboración del concreto: una revisión de literatura, *ITECKNE*, 20, (1), 2023. pp. 58 - 67. DOI: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v20i1.2920>

during the years 2007-2022. In this literature review, 40 sources duly selected with academic and scientific roughness obtained from reliable databases were used; therefore, they were ordered according to the properties intervened and their respective results, the water/cement+CCA ratio and the behavior of concrete when increasing the percentage of CCA. In the analysis of compressive and tensile strength, it was obtained that the adequate replacement proportion is 15% with a water:cement+CCA ratio of 0.50, which was added in milled form and without extra pozzolanic elements. In terms of workability, the replacement proportion continues in the same range (5%-15%), while controlling the decrease in the slump value with an adequate use of superplasticizing additives and a correct aggregate granulometry. In general terms, the incorporation of CCA as a partial replacement of cement should be accompanied by a good characterization and preparation of the specimens, a correct mix design and laboratory testing procedures that allow an acceptable reliability and certainty in the interpretation of the results.

Keywords– Cement; rice husk ashes; concrete; compressive strength; workability; tensile strength, pozzolanic elements.

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas cementeras tienen el reto de encontrar e incorporar diversas materias con características puzolánicas en la elaboración de nuevos productos, la cual es una tendencia que cada vez gana más fuerza con el transcurrir del tiempo, ya que se obtienen productos muy similares a los provenientes de materias primas comercializadas. Por esta razón, se necesita desarrollar el uso de cementos tipo Pórtland alternativos, utilizados comúnmente en procesos constructivos, para así poder cubrir las nuevas necesidades, de manera que cumplan con los parámetros básicos de calidad y que los beneficios de su utilización en concretos estructurales y no estructurales sean las esperadas; y que de paso contribuyen con la mitigación de emisiones de gas durante su producción, puesto que se sabe que la industria del cemento contribuye negativamente a la polución del aire, causante del efecto invernadero y del posterior aumento del calentamiento global [1], [2]. Ante lo expuesto anteriormente, un nuevo uso de las cenizas de cascarillas de arroz (CCA) se encuentra en la industria cementera, ya que se manifiesta interesante su participación como agente puzolánico en el cemento tipo Portland para la preparación del concreto estructural y no estructural, debido a su contenido elevado de sílice en su composición [3], y que se puede extender dicho uso incluso como reemplazo parcial del cemento en la elaboración del concreto.

Por lo tanto, surge la necesidad de conocer las diversas presentaciones y mejoras obtenidas de las cenizas de las cascarillas de arroz como reemplazo parcial del cemento en el concreto. En el presente trabajo de investigación se realiza una revisión de literatura con el objetivo de conocer las aproximaciones teóricas sobre la influencia de las cenizas de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento

utilizado para la elaboración del concreto durante el periodo 2007-2022 y por ende analizar su influencia en las propiedades del concreto más resaltantes, las cuales son: resistencia a la compresión, trabajabilidad y resistencia a la tracción.

2. METODOLOGÍA

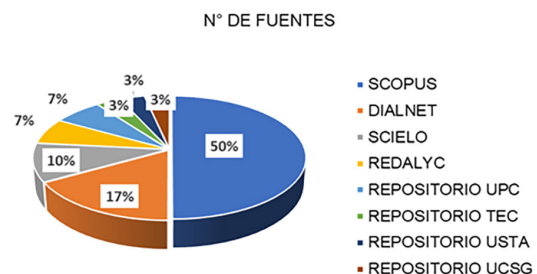
La presente investigación constituye una revisión de literatura, para la cual se consultaron 40 fuentes científicas y académicas con el fin de obtener confiabilidad de resultados y poder llegar a conclusiones claras y objetivas. Se emplearon criterios de inclusión y exclusión. Para empezar como criterio de inclusión se eligieron las palabras claves que se ingresaron en los metabuscadores: Cenizas de cascarillas de arroz, cemento, concreto, sílice, elementos puzolánicos y Rice husk and concrete and properties. Asimismo, se consideraron artículos indexados en bases de datos confiables. Continuando con el criterio de exclusión se tuvo en cuenta el idioma, debido a que solo se analizaron artículos en inglés y español. Por último, se tuvo en cuenta el criterio de temporalidad, la fecha de publicación, ya que permitió encontrar artículos desde el 2007 hasta el 2022.

En cuanto a las diversas bases de datos, se optó por Scielo, Redalyc, Scopus y Dialnet, debido a que presentaron más contenido en relación con el tema de evaluación. Asimismo, se consultaron los repositorios académicos de universidades que gozan de prestigio. De esta manera, se filtró y depuró la información, obteniendo así un resultado final de 25 artículos científicos, pues los 15 restantes se descartaron por precisión temática.

Para realizar una correcta extracción de los datos relevantes de las fuentes y siguiendo procesos debidamente sistematizados, se empleó una matriz de selección de fuentes.

Después de haber implementado la primera matriz, se realizó una segunda en la que se analizó y comparó las fuentes, estableciendo categorías a partir de los objetivos específicos propuestos en la investigación, los cuales fueron resistencia a la compresión, trabajabilidad y resistencia a la tracción. Finalmente, se generaron conclusiones a partir de los resultados obtenidos por los diferentes autores y por cada categoría propuesta, que nos han permitido tener una visión más certera del uso y desempeño de las CCA en el cemento para la elaboración del concreto.

Fig. 1. FUENTES SEGÚN SU BASE DE DATOS



Fuente: Los autores.

Se empleó el gestor de búsquedas de Mendeley y para el análisis y procesamiento de la información se usó una matriz de selección de fuentes, que consistió en identificar los elementos básicos de cada investigación, a partir de los cuales se construyó una segunda matriz, con base en las fuentes seleccionadas, lo que permitió realizar el análisis y síntesis de la información mediante categorías. Este proceso identificó los principales hallazgos, haciendo comparaciones entre los resultados y puntos de vista distintos o semejantes de autores a fin de extraer conclusiones.

3. RESULTADOS OBTENIDOS DE CADA INVESTIGACIÓN

3.1 Resistencia a la compresión con reemplazo parcial del cemento por CCA

Jindal y Ransinchung [4] en su estudio experimental realizaron diversos especímenes de concreto con una proporción agua:cemento+CCA de 0.50. Afirmaron que los resultados de los ensayos de esta propiedad obtenidos a los 28 días, a partir de sus especímenes elaborados con grano triturado, arena de lecho de río y cemento Portland con una adición de CCA al 5, 10 y 15% de reemplazo del cemento fueron de 37.06, 39.13 y 40.46 MPa respectivamente, superando ampliamente los 35.59 MPa obtenidos del concreto convencional referencial, lo cual demuestra que las propiedades puzolánicas del CCA elevan las propiedades de resistencia y mejora la durabilidad del concreto. Asimismo, también experimentaron con otros desechos agrícolas (cenizas de bagazo) e industriales (cenizas volantes), los cuales arrojaron valores similares de resistencia, demostrando la importancia de su utilización como reemplazos parciales del cemento en el concreto. Con la misma linealidad experimental y reforzando la investigación antes mostrada.

Por su parte, Sakr [5] utilizó los mismos insumos para el concreto, incluyendo un superplastificante SP Sikament-163, obteniendo con una adición de CCA al 5, 10 y 15% de reemplazo del cemento, valores a la resistencia a la compresión de 47.00, 52.00 y 54.00 MPa, respectivamente, superando el resultado por el concreto convencional referencial (45.00 MPa), pero verificando que, con un 20% de CCA la resistencia empieza a disminuir gradualmente (51.50 MPa) conforme dicho porcentaje aumente; es por ello que, Mehta y Siddique [6] llegan a esta misma conclusión, con la diferencia de que sus valores de resistencia son aún más elevados debido a la acción puzolánica de la escoria de alto horno granulada molida presente en la mezcla. Dichos autores presentan dentro de su estudio que sus muestras de concreto con la adición de CCA al 5, 10 y 15%, los valores de $f'c$ a los 28 días fueron de 62.10, 64.50 y 67.20 MPa, respectivamente, mayores que la del concreto convencional (60.30 MPa), mientras que aumentando la proporción de CCA al 20, 25 y 30% en el mismo lapso de tiempo, la resistencia disminuyó a 58.00, 53.80 y 51.20 MPa, respectivamente. Dicha disminución se debe a las elevadas áreas de superficie del CCA que consumen mayor cantidad de agua con la intención de obtener la misma

capacidad de trabajabilidad, demostrando que el porcentaje idóneo de CCA como reemplazo parcial del cemento es del 15% según estas investigaciones.

Continuando con el uso de la proporción agua:cemento+CCA de 0.50, Igba et al. [7] presentan dos tipos de concreto, donde se puede observar que las resistencias a la compresión van en descenso conforme el porcentaje de reemplazo del cemento por las CCA aumentaba, pero dichas resistencias consiguen ascender solo si el número de días de curado es mayor.

Ahora, considerando proporciones de agua:cemento+CCA menores que 0.50 e incluso más variadas, encontramos a Hamza Hasnain et al. [8] quienes utilizan una proporción de 0.40 para la elaboración de especímenes de concreto. Estos autores obtienen valores de resistencia con la incorporación de CCA como reemplazo parcial del cemento en el concreto al 10, 20 y 30% de 26.08, 20.08 y 15.22 MPa, por debajo de los 26.64 MPa del concreto convencional; demostrando así que en un mismo rango de proporción (0.40), la resistencia del concreto no incrementará considerablemente, si es que el porcentaje de CCA aumenta (20% y 30%). Y es aquí, donde para continuar consolidando dicha afirmación, Giaccio et al. [9] aparecen con su estudio vinculado a concretos con una relación de agua/cemento+CCA bajo y resistencias a la compresión elevadas. Su $f'c$ del concreto a los 28 días con adición de CCA al 10% de reemplazo del cemento en proporción agua/cemento+CCA al 0.28, 0.32, 0.40 y 0.50 fue de 74.90, 66.00, 52.00 y 40.70 MPa, respectivamente, mientras que para un concreto a los 90 días con adición de CCA al 10% de reemplazo del cemento en proporción agua/cemento+CCA al 0.28, 0.32, 0.40 y 0.50, los valores incrementaron a 82.10, 72.20, 57.30 y 44.70 MPa, respectivamente, probablemente porque existe cemento que no es hidratado por la baja proporción de agua que tiene la mezcla, y al ser reemplazado por un aditivo puzolánico (CCA) este aporta mayor resistencia a la compresión.

De la misma manera, Siddika et al. [10] experimentaron con proporciones de 0.40, 0.50 y 0.60 en concretos convencionales, concretos con 10% de CCA y concretos con 15% de CCA, indicando que la resistencia a la compresión del concreto a los 28 días en concretos convencionales fueron de 35.60, 31.70 y 29.40, respectivamente. Además, en los concretos con adición de CCA al 10% de reemplazo del cemento, los valores fueron de 35.00, 30.90 y 28.80 MPa, mientras que para un concreto con CCA al 15% de reemplazo, las resistencias resultaron ser de 31.00, 28.60 y 26.00 MPa, respectivamente. Por lo que se demuestra una vez más que mientras menores sean los porcentajes de incorporación de CCA y las proporciones de agua/cemento+CCA, la resistencia a la compresión ($F'c$) será mayor, lo cual es justamente lo que se requiere en concretos estructurales de buena calidad.

Por otro lado, junto a los insumos conocidos que son usados en la elaboración de concreto, también se pueden utilizar otros componentes con diversas propiedades, los cuales junto a las CCA consigan mejorar o no la resistencia a

la compresión de dicho concreto. Ante ello, Damayanti et al. [11] en su investigación experimental añaden el uso de fibras óseas de atún. La resistencia disminuyó; y esto se debe a que la descomposición de las partículas de CCA con carbono por encima de 45 μm afecta directamente a la tasa de hidratación, haciendo que la reacción de la sílice (SiO_2) de las CCA descomponga el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), produciendo hidrato de silicato de calcio (CSH), el cual también contribuye con que no se incremente la tasa de resistencia del concreto.

Continuando con la adición de otros componentes al concreto, Adesina y Olutoge [12] incluyen el uso de la cal dentro de la mezcla, que con las CCA fueron trabajadas a diversas proporciones y porcentajes de reemplazo. Al respecto, se determinó una disminución en la resistencia, y probablemente se debe a dos razones: la primera por la alta proporción de agua:cemento+CCA+Cal (0.65) y la segunda es producto de la lixiviación de la cal; por lo que para controlar dicho fenómeno se recomienda que el curado de estas muestras suceda en agua de cal o en un ambiente húmedo sin necesidad de inmersión en agua, y así se conseguirá que dicha lixiviación sea superada progresivamente por la reacción cal-puzolana.

Otro tema por tener en consideración es el estado en el que se encuentra las CCA al momento de ser incluido en la mezcla, puesto que puede ser utilizada de forma natural (tal y como se recolecta tras la incineración) o molida (trituradas con bolas de laboratorio en el interior de un molino) e incluso el tiempo de molienda de dichos desechos. Como primer aporte a lo anteriormente mencionado, tenemos a Zerbino et al. [13], quienes elaboraron muestras de concreto con reemplazo de las CCA molido al 25% del peso del cemento, incrementando los valores de $f'c$ a los 28 días (44.10 MPa) a comparación de los que solo tenían un 15% (39.30 MPa) producto de su capacidad puzolánica; mientras que las resistencias de los concretos con reemplazo de las CCA natural, tanto al 15 y 25%, resultaron ser menores (28.60 y 23.80 MPa) que los concretos convencionales (37.20 MPa) con una relación de agua/cemento + CCA al 0.45. Por lo que el uso de CCA natural requiere necesariamente de un proceso de optimización, con el fin de que alcancen un tamaño de partícula conveniente para la mezcla y así poder demostrar al igual que las CCA molidas una excelente caracterización en estado fresco.

Resultados y conclusiones similares obtuvo Rodríguez de Sensale [14] en su estudio basado en la utilización de las CCA residuales de la industria de molineras de arroz en Uruguay y las CCA producto de solo la incineración controlada. Este autor manifiesta que los concretos con muestras de CCA al 10% provenientes de Uruguay con relaciones de 0.32, 0.40 y 0.50 de cemento + CCA obtuvieron a los 28 días resistencias a la compresión de 60.40, 50.40 y 31.50 MPa, respectivamente, mientras que los concretos con muestras de CCA al 20% sus valores fueron de 54.80, 40.70 y 34.90 MPa, respectivamente. Lo mismo sucede con los concretos con muestras de CCA al 10% solo con incineración controlada, con relaciones de 0.32, 0.40 y 0.50 de cemento + CCA, en las que obtuvieron a los 28 días resistencias a la compresión de 51.40, 40.80 y

34.50 MPa, respectivamente, mientras que los concretos con muestras de CCA al 20% fueron de 47.40, 39.40 y 35.90 MPa, respectivamente. Concluye que la disminución de la resistencia a la compresión está en función del aumento del porcentaje del CCA, la relación agua:cemento+CCA y el proceso de obtención de las cenizas.

Habeeb y Mahmud [15] elaboran muestras con diferentes tiempos de molineras (180 y 360 minutos) a diferentes porcentajes de reemplazo del cemento por las CCA; por lo que el $f'c$ del concreto con adición de CCA con un tiempo de molienda de 180 minutos al 5, 10, 15 y 20% de reemplazo del cemento a los 28 días fue de 40.20, 48.40, 42.40 y 40.60 MPa, respectivamente, siendo todas mayores al del concreto convencional (39.60 MPa), mientras que para un concreto con adición de CCA con un tiempo de molienda de 360 minutos al 5, 10, 15 y 20% de reemplazo, los valores fueron de 42.20, 51.80, 44.40 y 41.70 MPa, respectivamente, los cuales superaron en su totalidad al del concreto referencial, declarando así que mientras mayor sea el tiempo de molienda, el porcentaje de reemplazo no supere el 15% y con un curado adecuado, la resistencia se elevará de forma aceptable.

Justamente el tipo de curado del concreto es otro factor relevante dentro de la búsqueda de incrementar la resistencia a la compresión, presentándose dos tipos (curado estándar y curado con vapor), los cuales son aplicados dentro de su análisis experimental por Mayhoub et al. [16], utilizando diversos porcentajes de reemplazo del cemento por las CCA. Mencionan que es positivo el efecto de usar las CCA como sustituto parcial en este tipo de concreto de ultra alto rendimiento en diferentes porcentajes, siendo el 25% el punto de inflexión, ya que mejora en gran manera la resistencia a la compresión (aumento del 24.5%) bajo curado estándar con base en el obtenido en el concreto convencional, pero dicho aumento es aún más apreciable con un curado con vapor, puesto que el valor del aumento de la resistencia sería de hasta el 46%.

En síntesis, es factible el uso de las CCA como reemplazo parcial del cemento, ya que su alta acción puzolánica beneficia en gran manera al aumento de la resistencia del concreto, siendo la proporción más adecuada del 15%, según los resultados de los autores mencionados anteriormente, ya que al aumentar dicho porcentaje la resistencia comienza a disminuir paulatinamente. Se podría utilizar un mayor porcentaje bajo ciertas condiciones adicionales.

También es necesario verificar la relación agua:cemento+CCA, siendo la relación de hasta 0.50 con la que se obtuvo mejores resultados, ya que al sobrepasar dicho límite las elevadas áreas de superficie del CCA consumirá mayor cantidad de agua con la intención de obtener la misma capacidad de trabajabilidad; por lo que mientras menor sea dicha relación, el comportamiento del concreto en cuanto a resistencia será más aceptable.

Tal y como fue demostrado en las investigaciones, la presencia de algún material extra, sea puzolánico o no, no es

recomendable. Además, el CCA molido durante un lapso de tiempo prolongado (360 minutos) posee una mejor contribución al concreto que su presentación de forma natural, porque no consiguen alcanzar un tamaño de partícula adecuado.

El tipo de curado contribuye también a la resistencia del concreto, siendo el curado con vapor la que obtuvo mejores resultados con respecto al curado estándar, aunque su aplicación está limitada al aspecto económico debido a la maquinaria que se requiere para este tipo de trabajo.

3.2 Trabajabilidad con reemplazo parcial del cemento por CCA

La trabajabilidad está definida como la propiedad del concreto en estado fresco que determina la mayor o menor dificultad para poder ser colocado y compactado con un acabado adecuado. La evaluación de esta propiedad es relativa, porque depende de las facilidades manuales o mecánicas que se dispongan para el proceso de elaboración, colocación y compactación del concreto, esto debido a que bajo ciertas condiciones de trabajo un concreto puede ser trabajable, pero si estas cambian, no se asegura que siga siendo así. La importancia de esta propiedad radica en el equilibrio entre los materiales conformantes de la mezcla, entrando en cada espacio entre encofrados y aceros de refuerzo, lo que evita la aparición de cangrejeras. Así también, cuando la mezcla de concreto es trabajable, esta no presentará exudación; es decir, el agua encontrada en la mezcla no migrará hacia la zona superficial, evitando la sedimentación.

La trabajabilidad o consistencia del concreto se mide con el método del ensayo del Cono de Abrams o ensayo de Slump, el cual nos brinda un valor numérico aproximado de esta propiedad del estado fresco del concreto, sin embargo, hay que tener en cuenta que el slump no es el único valor determinante al momento de elaborar concreto. Robayo et al. [17] concluyeron en su investigación que el reemplazo del 20% de cemento por CCA en la elaboración del concreto, da como resultado una excelente trabajabilidad, con un valor de slump de 18cm, incluso mejor que la muestra control la cual obtuvo un valor de asentamiento de 17cm, adicional a ello en las tablas de dosificación se interpreta que no fue necesario modificar la relación agua/cemento+CCA, ya que fue de 0.45 para ambas, por lo que se deduce que estos resultados se generaron debido al alto contenido de sílice que la CCA posee.

De igual manera, Camargo e Higuera [18] utilizaron la relación a/c de 0.45 en todos sus testigos, la diferencia fue en el porcentaje de reemplazo de cemento en sus probetas. En este caso se utilizó el 5%, 15% y 30% de CCA, arrojando valores que oscilan entre los 6.5cm y 12cm. Sin embargo, para Salas et al. [19] sí es necesario aumentar la relación a/c. En la primera muestra de este estudio se reemplazó el 33% de cemento por CCA con una relación a/c de 0.71, obteniendo como resultado el slump de 1cm, el cual es un pésimo resultado, porque el asentamiento óptimo es de 12cm, por lo que

se optó por aumentar la relación a/c a 0.83, lo que dio como resultado 4cm, el cual sigue siendo un valor desfavorable.

En la segunda muestra se utilizó un reemplazo del 50% con una relación de 0.71 y aquí se obtuvo un descenso casi inapreciable, menos de 1 cm, es por ello que los autores decidieron aumentar la relación a/c a 0.86 y en consecuencia generó un valor de 4.4cm. Por tal motivo, los autores corroboraron que, a pesar de aumentar el valor de la cantidad de agua en la mezcla, el valor de asentamiento no aumentó lo suficiente, en efecto afirmaron que este reemplazo no es viable, ya que se sabe que el incremento excesivo de agua en la mezcla de concreto, mejora la trabajabilidad, pero disminuye la resistencia.

Sustentando la idea anterior, Díaz y Oviedo [20] realizaron la comparación de diferentes combinaciones y el concreto patrón. En la primera reemplazaron el 10% de cemento por CCA, el cual dio como resultado un asentamiento de 8.9cm y en la segunda muestra sustituyeron el 15%, del cual se obtuvo un valor de slump de 7.6cm. Los autores consideran que estos valores son cercanos al asentamiento del concreto patrón (10.20cm), no obstante, en las muestras en las que se excedió el 15% de reemplazo, el slump tiende a disminuir considerablemente, debido a que la CCA es un material de baja densidad a comparación del cemento, lo que llevaría al uso de un aditivo para mejorar la trabajabilidad del concreto. Del mismo modo, Cerutti y Santilli [21] consolidan la idea que la adición de más del 15% no resulta viable. Al suplir el 5% y 10% del material puzolánico (CCA), el valor del asentamiento tiene similitud con el de la muestra control.

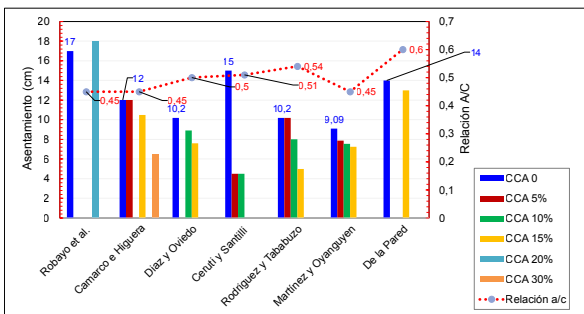
A diferencia de los autores citados anteriormente, Rodríguez y Tibabuzo [3], afirman que el máximo porcentaje de la utilización de CCA en el cemento debe ser de 5%, puesto que menor o igual a este porcentaje la manejabilidad se mantiene constante con un valor de 10.16cm, igual al concreto referencial, pero al superarse, se necesitará aumentar la relación de a/c para lograr el asentamiento óptimo e incluso considerar el uso de aditivos superplastificantes, puesto que con las combinaciones realizadas con 10% y 15% de CCA se aumentó considerablemente la relación a/c y se obtiene el slump que se encuentra en el rango de 5-8 cm, por lo que se puede observar una mezcla que se encuentra justo al límite en una consistencia plástica media. Asimismo, Martínez y Oyaguren [22] comparten la afirmación de Rodríguez y Tibabuzo, porque en sus resultados las muestras con el reemplazo de hasta 5% de CCA, se mantiene la trabajabilidad, pero a partir de más del 5%, se hace necesario aumentar la relación a/c+CCA (Fig. 2).

Por otro lado, teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente por los autores con respecto al uso de aditivos al sobrepasar el 15% de reemplazo de cemento por CCA para mejorar la trabajabilidad. Del mismo modo, Rodríguez de Sensale [23] también empleó el uso de aditivo superplastificante en sus muestras con el reemplazo del 15% y 20% de CCA, con la adición del AS del 0.55% y 0.81%, generando un valor de asentamiento de 8.5cm y 7cm, respectivamente, acercándose así al valor del slump óptimo por lo que resulta una dosificación viable para la elaboración de concreto.

Así como existen casos en los que el uso del aditivo superplastificante logra hacer una dosificación factible mejorando la trabajabilidad de la mezcla, también se encontraron estudios en los que la dosis máxima admisible del AS, no fue suficiente y no logró alcanzar ni acercarse al slump óptimo (Fig. 3). Tal es el estudio de Zerbino et al. [13], en el que se preparó la mezcla con el 15% de reemplazo por CCA triturada, más el 1,1% de AS, alcanzando un valor de slump de 9cm en los primeros 30 minutos, posterior a ello este valor descendió a 4.5cm por lo que se rechazó esta combinación. Finalmente, De la Pared [24] en su trabajo de investigación afirma que todas las muestras de CCA poseen aproximadamente un 97% de sílice (SiO₂) en su composición, lo cual se encuentra por encima del valor mínimo (75%) especificado en la norma ASTM.

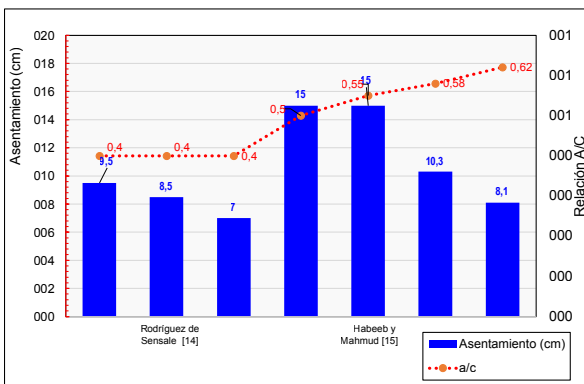
Por consiguiente, varias investigaciones concluyen en las recomendaciones de sus estudios que el uso de aditivos superplastificantes es necesario para mantener la trabajabilidad óptima en mezclas de concreto, en los que se reemplaza un valor mayor o igual al 15% de cemento por CCA, ya que esta añadidura aumenta la cohesión y rigidez de la mezcla [9], [15], tal como se evidencia en las Figuras 2 y 3.

Fig. 2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ASENTAMIENTO SIN ADITIVOS



Fuente. Hallazgos de diferentes autores, considerando el reemplazo de cemento por CCA, la relación a/c y asentamiento. Los autores.

Fig. 3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ASENTAMIENTO CON ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES CCA CON ADITIVO



Fuente. Hallazgos de diferentes autores, considerando el reemplazo de cemento por CCA, la relación a/c, aditivo y asentamiento. Los autores.

Se puede constatar mediante los resultados que el uso de CCA tiene un efecto negativo en la trabajabilidad a partir del 10% o más, de reemplazo de cemento, reduciendo la fluidez del concreto fresco, requiriendo así aumentar la relación agua/cemento o en algunos casos el uso de aditivo superplastificante. Por ende, se concluye que el rango promedio de todos los autores mencionados en esta revisión sistemática de la literatura, es de 5%-10% para obtener un slump similar a la muestra de referencia sin necesidad de utilizar aditivos o aumentar la relación a/c.

Con respecto a una propuesta viable del uso de CCA para la elaboración del concreto, tenemos que el uso de las CCA, es factible hasta en un 20% y 30% de reemplazo, sin añadir aditivos o aumentar el porcentaje de agua con relación al cemento, generando un asentamiento similar a la del concreto patrón, encontrándose dentro de los parámetros establecidos de diseño [17], [18]. Por el contrario, en las mezclas de todos los siguientes autores, este material aumenta la absorción del agua, debido al alto contenido de sílice que genera más consistencia en las mezclas.

En relación con uso de aditivos, algunos estudios consideran el uso de superplastificantes a partir del 10% del reemplazo de CCA, con el fin de que el asentamiento no descienda notablemente y se acerca al slump óptimo de diseño, ya que aumentando el máximo porcentaje admisible de relación a/c, disminuye la propiedad más destacable en el concreto que es la resistencia a la compresión [13], [14]. En los diferentes casos encontrados, el promedio de esta relación fue de 0.55, como se observa en la Figura 4, tienen diferentes proporciones de relación a/c, puesto que este valor depende del tamaño del agregado, la granulometría y el uso de aditivos.

Por último, con base en los resultados obtenidos durante la realización de esta revisión sistemática de la literatura se demostró la factibilidad del uso de concreto adicionado con CCA hasta en un 10%, resaltando que la utilización de este material permite obtener un ahorro de cemento y que además cumple con el porcentaje mínimo de sílice especificado por la norma ASTM.

3.3 Resistencia a la tracción con reemplazo parcial del cemento por CCA

Es importante analizar esta propiedad mecánica del concreto en su estado endurecido debido a que nos permite conocer al concreto en su estado de agrietamiento, a causa de la limitación de las contracciones que presenta, y puede evitar la formación y propagación de grietas en elementos estructurales de concreto armado. Todas las investigaciones que serán analizadas a continuación presentan un valor de resistencia a la tracción (ft) de un concreto convencional como referencia, para que con base en dicho valor se consiga medir la diferencia con los demás concretos que presenten la inclusión de las CCA. Además, es necesario recalcar que todas fueron comparadas a los 28 días de curado, dependiendo de

la proporción agua:cemento+CCA y el porcentaje de CCA en la mezcla que presenten.

Por ejemplo, Jindal y Ransinchung [4] realizaron diversos especímenes de concreto con una proporción agua:cemento+CCA de 0.50, y en su estudio experimental afirman que los resultados de resistencia a la tracción obtenidos a los 28 días a partir de sus especímenes elaborados con grano triturado, arena de lecho de río y cemento Pórtland con una adición de CCA al 5, 10 y 15% de reemplazo del cemento fue de 3.10, 3.53 y 3.67 MPa, respectivamente, superan ampliamente los 2.96 MPa obtenidos del concreto convencional referencial, demostrando que las propiedades puzolánicas del CCA elevan las propiedades de resistencia a la tracción.

De manera similar, Sakr [5] utilizó una adición de CCA al 5, 10 y 15% de reemplazo del cemento, y obtuvo valores a la resistencia a la tracción de 3.30, 3.50 y 3.90 MPa, respectivamente, superando también el resultado por el concreto convencional referencial de 2.90 MPa, pero demostrando que con un 20% de CCA, la resistencia empieza a disminuir progresivamente (3.80 MPa); así, también, Mehta y Siddique [6] llegan a esta misma conclusión, con la diferencia de que sus valores de resistencia son aún más elevados debido a la acción puzolánica de la escoria de alto horno granulada molida presente en su mezcla. Dichos autores mencionan que sus muestras de concreto con la adición de CCA al 5, 10 y 15% los valores de resistencia a la tracción a los 28 días fueron de 6.50, 6.70 y 6.80 MPa, respectivamente, mayores que la del concreto convencional (6.40 MPa), mientras que aumentando la proporción de CCA al 20, 25 y 30% en el mismo lapso de tiempo, la resistencia disminuyó a 6.60, 6.30 y 6.20 MPa, respectivamente. Dicha disminución se debe a las elevadas áreas de superficie del CCA que consumen mayor cantidad de agua con la intención de obtener la misma capacidad de trabajabilidad, así como de la alta tasa de solubilidad de las CCA y la escoria de alto horno granulada molida, y la presencia de sílice en su estado no reactivo presente en la mezcla de concreto, demostrando que el porcentaje idóneo de CCA como reemplazo parcial del cemento es del 15% según estas investigaciones.

Ahora, considerando proporciones de agua:cemento+CCA menores a 0.50, tenemos que al usar una proporción de 0.40 para la elaboración de especímenes de concreto se obtienen valores de resistencia con la incorporación de CCA como reemplazo parcial del cemento en el concreto al 10, 20 y 30% de 2.71, 2.13 y 1.69 MPa, por debajo de los 2.75 MPa del concreto convencional; demostrando así que en un mismo rango de proporción (0.40) e incluso siendo más bajo, la resistencia a la tracción del concreto disminuirá considerablemente, si es que el porcentaje de CCA aumenta (20 y 30%) [8]. Ahora bien, para consolidar dicha afirmación, se experimentó con proporciones de 0.40, 0.50 y 0.60 en concretos convencionales, mezclas con 10% y 15% de CCA, de lo cual se obtuvo que la resistencia a la tracción del concreto a los 28 días en concretos convencionales fue de 4.80, 4.65 y

4.41, respectivamente, dejando en evidencia la disminución de la resistencia [10]. Además, en los concretos con adición de CCA al 10% de reemplazo del cemento en proporción agua/cemento+CCA, los valores fueron de 4.46, 4.23 y 3.98 MPa, mientras que para un concreto con CCA al 15% de reemplazo, las resistencias resultaron ser de 4.16, 3.91 y 3.51 MPa, respectivamente. Por lo que se demuestra una vez más que mientras menores sean los porcentajes de incorporación de CCA y las proporciones de agua/cemento+CCA, la resistencia a la tracción será mayor.

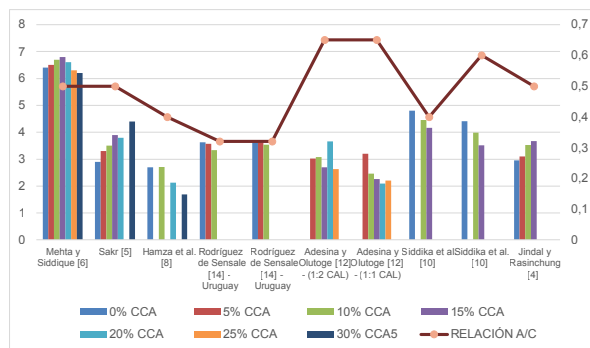
Por otro lado, junto a los insumos conocidos que son utilizados en la elaboración de mezclas de concreto, también se efectuaron investigaciones con otros componentes con diversas propiedades, las cuales junto a las CCA se evaluaron la resistencia a la tracción de dicho concreto. Inclusive, se ha probado también con fibras óseas de atún [11]. Estos autores demostraron que la resistencia a la tracción del concreto disminuyó; y esto se debe a que la descomposición de las partículas de CCA con carbono por encima de 45 μm afecta directamente a la tasa de hidratación, haciendo que la reacción de la sílice (SiO_2) de las CCA descomponga el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), produciendo hidrato de silicato de calcio (CSH), el cual también contribuye al no incremento de la tasa de resistencia del concreto. Por lo que el aumento de la resistencia e incluso de la trabajabilidad con dichas proporciones será relativamente bajo, demostrando que la fusión de estos dos tipos de desechos no es la ideal.

Prosiguiendo con la adición de otros componentes al concreto, Adesina y Olutoge [12] incluyen el uso de la cal dentro de la mezcla, la cual junto a las CCA trabajarán a diversas proporciones y porcentajes de reemplazo, verificándose que no se logró obtener una resistencia adecuada.

Otro tema a tener en consideración es el proceso de obtención de la CCA, que puede ser utilizada de forma natural (tal y como se recolecta tras la incineración) o molida (trituradas en un molino de bolas de laboratorio). En ese sentido, los concretos con muestras de CCA al 10% con relaciones de 0.32 y 0.50 de cemento + CCA obtuvieron, a los 28 días, resistencias a la tracción de 3.57 y 2.32 MPa, respectivamente, mientras que los concretos con muestras de CCA al 20% presentaron valores de 3.34 y 2.63 MPa, respectivamente [14]. Lo mismo sucede con los concretos con muestras de CCA al 10% con relaciones de 0.32 y 0.50 de cemento + CCA, en donde obtuvieron a los 28 días, resistencias a la tracción de 3.62 y 2.92 MPa, respectivamente, mientras que los concretos con muestras de CCA al 20% fueron de 3.54 y 3.00 MPa, respectivamente. Concluyendo que la disminución de la resistencia a la tracción está en función del aumento del porcentaje del CCA, la relación agua: cemento+CCA y el estado de las cenizas.

En la Figura 4 se pueden apreciar los resultados de ensayos de resistencia a la tracción con reemplazo parcial del cemento por CCA.

FIG. 4. RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN CON REEMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO POR CCA



Fuente. Los autores.

En síntesis, es viable el uso de las CCA como reemplazo parcial del cemento, puesto que su alta acción puzolánica beneficia en gran manera al aumento de la resistencia a la tracción del concreto, siendo la proporción más adecuada del 15%, según los resultados de los autores antes descritos, ya que al aumentar dicho porcentaje la resistencia comienza a disminuir gradualmente. Dicha mejora en la resistencia se debe a la coexistencia dentro de la mezcla de hidrato de sílice de calcio (CSH), la cual es originada por la sílice adicional de las CCA y el producto de polimerización del aluminosulfato de sodio (NASH).

Con respecto a la relación agua-cemento+CCA ideal, esta sería como máximo de 0.50, ya que al sobrepasar dicho límite las elevadas áreas de superficie del CCA consumirá mayor cantidad de agua con la intención de obtener la misma capacidad de trabajabilidad, así como la alta tasa de solubilidad de las CCA, sumado a la presencia de sílice en su estado de no reactiva presente en la mezcla de concreto; por lo que mientras menor sea dicha relación, el comportamiento del concreto en cuanto a resistencia será más aceptable.

Por último, la presencia de algún material adicional a la mezcla, sea puzolánico o no, no es aconsejable; por lo que cada insumo o desecho (CCA) debe trabajar de manera individual en el concreto, para que así cada uno aporte sus respectivos beneficios a la resistencia del concreto y no exista un desbalance en cuanto a ello.

4. CONCLUSIONES

Resistencia a la compresión, trabajabilidad y resistencia a la tracción.

Respecto a la revisión de resultados de los ensayos se puede concluir que, en cuanto a la resistencia a la compresión, la adición menor o igual al 15% de CCA en la mezcla mejora la resistencia, debido a su alta acción puzolánica, en comparación con el concreto de control. Al añadir un porcentaje mayor al 15% de CCA, la resistencia tiende a disminuir paulatinamente. Dentro de los factores más importantes para esta propiedad, se tiene el tiempo de molienda de las CCA, la cual

se recomienda ser superior a las 6 horas y el tipo de curado, siendo el curado con vapor el que obtuvo mejores resultados con respecto al estándar, aunque su aplicación está limitada en el aspecto económico debido al uso de maquinarias que se utilizan durante la ejecución de este trabajo. Ante ello, su inclusión como reemplazo parcial del cemento es apta para ser utilizada en concretos estructurales, puesto que los valores de las resistencias halladas experimentalmente son superiores a los 17 MPa, cumpliendo con la resistencia mínima especificada por la Norma E.060 de Concreto Armado.

Con respecto a la trabajabilidad, se puede constatar mediante los valores de asentamiento, que el uso de Cenizas de cascarillas de arroz tiene un efecto negativo en esta propiedad a partir del reemplazo parcial de 10% o más, reduciendo la fluidez del concreto fresco. En vista de que conforme se iba adicionando los distintos porcentajes de ceniza, se obtenía una mezcla más seca, requiriendo así aumentar la relación agua/cemento y en algunos casos el uso de aditivo superplastificante. Por ende, se concluye que el rango promedio es de 5%-10% para obtener un slump similar a la muestra de referencia sin necesidad de utilizar aditivos o aumentar la relación a/c. Estos porcentajes generan un valor de asentamiento entre el rango de 8.5cm a 12cm, el cual se encuentra dentro de los límites establecidos por la Norma ASTM C 143, estos valores varían según sea el tipo de estructura y los procedimientos de encofrado, compactación y colocación.

En relación con los resultados de resistencia a la tracción, se deduce que el porcentaje más adecuado de reemplazo es de 15%, debido a que beneficia en gran manera al aumento de la resistencia del concreto producto de la coexistencia dentro de la mezcla de hidrato de sílice de calcio (CSH), la cual es originada por la sílice adicional de las CCA y el producto de polimerización del aluminosulfato de sodio (NASH). Sin embargo, al aumentar este porcentaje sucede lo mismo que con la resistencia a la compresión, ya que tiende a disminuir progresivamente conforme se le aumenta el porcentaje de reemplazo. Cabe recalcar que la relación a/c con mejores resultados en esta propiedad fue de 0.50. Además, cumple con el porcentaje mínimo de sílice especificado por la norma ASTM C 150 para clasificarlo como aptas para la utilización en la elaboración de mezclas de concreto. Dicho valor de resistencia es utilizado para realizar las verificaciones de las especificaciones de aceptación o rechazo del concreto, por lo que es importante ser calculado experimentalmente. Del mismo modo, se sabe que la utilización de este material permite obtener un ahorro de S/ 0.30 por Kg de cemento que sea reemplazado por CCA, ya que la gran ventaja de este tipo de residuos es que absolutamente todas las muestras que sean destinadas a atravesar un proceso de tratamiento sirven para obtener un producto final puzolánico; por lo que es necesario cuantificar su captación de las cosechas, transporte y el procedimiento industrializado que reciben. Además, su alto contenido de sílice (superior al 90%) contribuye a que el porcentaje restante de impurezas de las CCA no originen efectos negativos en la mezcla de concreto, haciendo que no sea necesario un proceso extra de purificación y, por ende, los costos no sean elevados.

En las muestras elaboradas con reemplazo del cemento por CCA, se puede concluir que el porcentaje óptimo de sustitución es de 10% - 15%, debido a que si se excede este valor las propiedades tienden a tener valores desfavorables. Aunque se podría utilizar un porcentaje mayor de hasta el 20%, solo si se elabora el concreto bajo ciertas condiciones adicionales, como el aumento de la relación agua/cemento o si se le añaden otros componentes que contrarresten dicha reacción negativa en las propiedades, como los aditivos.

Finalmente, este trabajo de investigación correspondió a una revisión de literatura sobre la influencia de las cenizas de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento utilizado para la elaboración del concreto en los últimos 15 años, en el que se pudo demostrar que sí es factible el uso de concreto adicionado con CCA para edificaciones y de esta manera abrir nuevas posibilidades de campos de aplicación en el sector construcción, puesto que, después de haber sido ensayadas en laboratorio se demuestra que los resultados son similares a la del concreto patrón a edades de curado prolongadas (60 días), por lo que no afectan negativamente a las propiedades del concreto fresco y endurecido.

5. REFERENCIAS

- [1] B. Reza, A. Soltani, R. Ruparathna, R. Sadiq, y K. Hewage, «Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 81, pp. 105-114, dic. 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.10.009.
- [2] C. Ngunjiri Ngandu, «Prediction of Compressive Strengths for Rice Husks Ash incorporated concrete, Using Neural Network and Reviews», *Iteckne*, vol. 18, n.o 2, pp. 99-107, 2021, doi: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v18i1.2532>.
- [3] A. M. Rodríguez Sánchez y M. P. Tibabuzo Jiménez, «Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico», Universidad Santo Tomás, 2019. Accedido: 5 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15589>
- [4] A. Jindal y G. Ransinchung, «Behavioural study of pavement quality concrete containing construction, industrial and agricultural wastes», *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 11, n.o 5, pp. 488-501, sep. 2018, doi: 10.1016/j.ijprt.2018.03.007.
- [5] K. Sakr, «Effects of Silica Fume and Rice Husk Ash on the Properties of Heavy Weight Concrete», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 18, n.o 3, pp. 367-376, jun. 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(367).
- [6] A. Mehta y R. Siddique, «Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties», *J. Clean. Prod.*, vol. 205, pp. 49-57, dic. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.313.
- [7] U. T. Igba, J. O. Akinyele, S. O. Ehikhuenmen, S. O. Oyeibisi, P. O. Omotainse, y B. U. Anyanwu, «A comparative study on the strength characteristics of Grade 25 and Grade 30 rice husk ash blended cement concrete», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 640, n.o 1, pp. 242-249, nov. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/640/1/012042.
- [8] M. Hamza Hasnain, U. Javed, A. Ali, y M. Saeed Zafar, «Eco-friendly utilization of rice husk ash and bagasse ash blend as partial sand replacement in self-compacting concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, n.o 1, pp. 168-182, mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121753.
- [9] G. Giaccio, G. Rodríguez de Sensale, y R. Zerbino, «Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, n.o 7, pp. 566-574, ago. 2007, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.005.
- [10] A. Siddika, Md. A. A. Mamun, y Md. H. Ali, «Study on concrete with rice husk ash», *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 3, n.o 18, pp. 18-29, ene. 2018, doi: 10.1007/s41062-018-0127-6.
- [11] S. Damayanti, T. B. Aulia, y Y. Hayati, «The effect of fishbone fiber and rice husk ash additive on the mechanical properties of normal concrete», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 933, n.o 1, pp. 236-246, sep. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/933/1/012036.
- [12] P. A. Adesina y F. A. Olutoge, «Structural properties of sustainable concrete developed using rice husk ash and hydrated lime», *J. Build. Eng.*, vol. 25, n.o 1, pp. 352-262, sep. 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100804.
- [13] R. Zerbino, G. Giaccio, y G. C. Isaia, «Concrete incorporating rice-husk ash without processing», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n.o 1, pp. 371-378, ene. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.016.
- [14] G. Rodríguez de Sensale, «Strength development of concrete with rice-husk ash», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, n.o 2, pp. 158-160, feb. 2006, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005.
- [15] G. Habeeb y H. Mahmud, «Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material», *Mater. Res.*, vol. 13, n.o 2, pp. 185-190, abr. 2010, doi: 10.1590/S1516-14392010000200011.
- [16] O. A. Mayhoub, E.-S. A. R. Nasr, Y. A. Ali, y M. Kohail, «The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review», *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, n.o 1, pp. 145-158, mar. 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.07.016.
- [17] R. Robayo, P. Matthey, y S. Delvasto, «Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y reforzado con fibras de acero», *Rev. Constr.*, vol. 12, n.o 2, pp. 139-151, nov. 2013, doi: 10.4067/S0718-915X2013000200011.
- [18] N. R. Camargo Pérez y C. H. Higuera Sandoval, «Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz», *Cienc. E Ing. Neogranadina*, vol. 27, n.o 1, Art. n.o 1, ene. 2017, doi: 10.18359/rcin.1907.
- [19] J. Salas, G. Gómez, y J. Veras, «Hormigones con ceniza de cascara de arroz (R.H.A.): influencia del curado y del agua de amasado», *Inf. Constr.*, vol. 38, n.o 385, Art. n.o 385, nov. 1986, doi: 10.3989/ic.1986.v38.i385.1692.
- [20] H. N. Díaz Marin y M. G. Oviedo Ali, «Elaboración de un concreto f'c=210 kg/cm2 para elementos verticales reemplazando parcialmente el cemento con cenizas de cascarilla de arroz y la arena con PET reciclado para reducir la sobreexplotación de los agregados de las canteras en Lima», Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2021. Accedido: 5 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/655337>
- [21] F. Cerutti y A. Santilli, «En camino hacia un hormigón sustentable», *Mem. Investig. En Ing.*, n.o 15, Art. n.o 15, nov. 2017, Accedido: 5 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/304>
- [22] F. A. Martínez Urtecho y L. J. Oyanguren Gallo, «Diseño y evaluación de concreto especial con cenizas de cáscara de

arroz (RHA) para aumentar la durabilidad de las estructuras frente a la exposición al ambiente marino», Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2019. Accedido: 5 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/628220>

- [23] G. Rodríguez de Sensale, «Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, n.o 9, pp. 718-725, oct. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.008.

- [24] D. B. De la Pared Condo, «Estabilización del suelo mediante adiciones de ceniza de cascarilla de arroz», Tesis de maestría, Universidad de los Andes, Colombia, 2013. Accedido: 5 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/12242>