

Construction and demolition waste used in the production of mortar and concrete

Residuos de la construcción y demolición empleados en la elaboración de mortero y hormigón

Autores:

Parrales-Coello, Kevin Martín
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
Egresado en Ing. Civil
Portoviejo-Ecuador



kparrales5253@utm.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0009-7879-4991>

Ruiz-Párraga, Wilter Enrique
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ
Ing. Civil, Mag. en Tecnología de los Materiales de Construcción
Docente Tutor del área de Resistencia de Materiales
Portoviejo-Ecuador



wilter.ruiz@utm.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-0045-9781>

Fechas de recepción: 01-MAR-2024 aceptación: 01-ABR-2024 publicación: 15-JUN-2024



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>
<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

La perspectiva de tratar y reciclar los residuos de construcción y demolición (RCD) como componentes en la fabricación de hormigón y mortero ha emergido como un tema de suma importancia en la industria de la construcción. La presente investigación tiene como objetivo analizar, a través del estudio comparativo las propiedades mecánicas y físicas del mortero y hormigón elaborado con áridos naturales y reciclados. La metodología aplicada en esta investigación tiene un enfoque cuantitativo basado en un estudio experimental, del cual se llevó a cabo realizando una serie de pruebas basadas en las normas NTE-INEN y ASTM. En la dosificación del mortero y hormigón se aplicó una relación agua/cemento constante de 0.4. Los porcentajes de sustitución de árido natural por reciclado fueron del 0%, 15%, 20% y 25%. Las series de los especímenes del mortero y hormigón fueron sometidas a un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron que la aplicación de un 15% de árido fino reciclado en el mortero proporciona una resistencia a la compresión comparable con la muestra de control. En el caso del hormigón, se determinó que la inclusión de un 15% de árido grueso reciclado produce resultados similares en resistencia a compresión y resistividad eléctrica con la muestra de control. Este estudio proporciona evidencia sólida que respalda la viabilidad técnica y las ventajas de utilizar áridos reciclados en la fabricación de hormigón y mortero, lo que contribuye significativamente a la sostenibilidad de la industria de la construcción.

Palabras Clave: Hormigón; mortero; áridos reciclados, áridos naturales; resistividad eléctrica; resistencia a la compresión

Abstract

The perspective of treating and recycling Construction and Demolition Waste (CDW) as components in the production of concrete and mortar has emerged as a topic of paramount importance in the construction industry. This study aims to analyze, through a comparative study, the mechanical and physical properties of mortar and concrete made with natural and recycled aggregates. The methodology applied in this research has a quantitative approach based on an experimental study, which was carried out by conducting a series of tests based on NTE-INEN and ASTM standards. A constant water/cement ratio of 0.4 was applied in the dosing of the mortar and concrete. The percentages of substitution of natural aggregate by recycled aggregate were 0%, 15%, 20%, and 25%. The series of mortar and concrete specimens were subjected to curing times of 7, 14, and 28 days, respectively. The results obtained showed that the application of 15% recycled fine aggregate in the mortar provides a compression strength comparable to the control sample. In the case of concrete, it was determined that the inclusion of 15% recycled coarse aggregate produces similar results in compression strength and electrical resistivity compared to the control sample. This study provides solid evidence supporting the technical feasibility and advantages of using recycled aggregates in the production of concrete and mortar, significantly contributing to the sustainability of the construction industry.

Keywords: Concrete; mortar; recycled aggregates, natural aggregates; electrical resistivity; compression strength

Introducción

La gestión eficiente de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) se ha convertido en una preocupación imperativa en el ámbito de la construcción contemporánea. Estos residuos, generados durante y después de los procesos constructivos, representan un desafío ambiental y económico significativo. Según Valdes & Reyes (2017), los RCD, compuestos principalmente por materiales como asfalto, ladrillo y cerámica, han experimentado un aumento considerable en su volumen, atribuible en gran medida al desarrollo demográfico de las grandes ciudades.

A nivel global, la magnitud del problema de los RCD es evidente, con una alarmante producción anual de aproximadamente 461 millones de toneladas (Ceballos & Gonzales, 2021). Este dato revela que un 10% de los materiales empleados en la construcción terminan convertidos en residuos, una proporción que se incrementa hasta diez veces más en el caso de las operaciones de demolición. En el contexto ecuatoriano, la industria de la construcción civil se posiciona como un actor clave, influenciado directamente por el crecimiento demográfico sostenido que ha generado una considerable producción de residuos sólidos estimada en 0.75 kg por día (Cevallos & Inca, 2018).

En Portoviejo, cantón de la provincia de Manabí, la actividad constructiva se manifiesta como una constante en el entorno urbano; sin embargo, el ineficiente tratamiento de residuos sólidos de construcción y demolición, combinada con la falta de políticas de gestión efectivas, ha llevado a la acumulación de escombros en áreas verdes, vertederos de agua y sitios no autorizados, lo cual repercute al desarrollo urbano planificado, afectando la estética general de la ciudad, generando problemas de salud pública y provocando un impacto negativo al medio ambiente. Este escenario destaca la urgencia de abordar la gestión de residuos en el sector de la construcción desde un enfoque científico, promoviendo soluciones innovadoras que equilibren el crecimiento económico con la sostenibilidad ambiental y el bienestar social.

Actualmente, la calidad de los materiales reciclados derivados de RCD ha provocado un gran interés por aprovechar los residuos directa o indirectamente en la generación de hormigón o mortero, que son los materiales con mayor influencia en las construcciones civiles (Sara & Maia, 2021). Esta tendencia ha impulsado una serie de investigaciones con el propósito de mitigar el depósito de residuos de construcción y demolición en vertederos, fomentando en su lugar su reutilización y reciclado. Este enfoque busca reducir la dependencia de recursos naturales para la fabricación de materiales de construcción, lo cual implica un menor consumo energético en sus procesos de extracción, procesamiento y transporte. De esta manera, se persigue la disminución de los niveles de contaminación ambiental asociados a la industria de la construcción.



Autores como Wajeeha & Asad (2021), realizaron una investigación sobre el análisis de las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con agregado reciclado. En el proceso metodológico del estudio, diseñaron cinco mezclas de hormigón, manteniendo una relación agua-cemento constante de 0.42. Los agregados gruesos naturales fueron sustituidos por agregado grueso reciclados en 5 porcentajes diferentes: 0%, 30%, 50%, 70% y 100%. Los resultados indicaron que las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón con 0% y 30% de reemplazo son comparables. Asimismo, concluyeron que un reemplazo del 30% del árido grueso natural por árido grueso reciclado es una opción viable para su aplicación en el ámbito de la construcción.

Silva Souza et al. (2021) llevaron a cabo una investigación exhaustiva sobre la caracterización de los residuos de construcción y demolición (RCD) recopilados en 24 sitios de obras, abarcando estructuras, mampostería y acabado. Se produjeron y evaluaron áridos reciclados finos y gruesos, cuyo desempeño se analizó en cuatro mezclas diseñadas para morteros con reemplazos de agregados naturales, así como una mezcla diseñada para hormigón con la sustitución del 50% y 100% de agregado natural. Los resultados indicaron que el mortero y hormigón elaborados con agregados reciclados mostraron características como menor densidad, mayor retención de agua, mejor adhesión inicial y resistencia mecánica en comparación con los productos convencionales. Por lo tanto, determinaron que los áridos reciclados demostraron ser técnicamente satisfactorios para su uso en morteros y hormigones.

Pablo Saiz (2017), realizó un estudio técnico acerca de la utilización de áridos reciclados (AR) procedentes de RCD y áridos naturales (AN) en la fabricación de morteros de albañilería, en la cual concluyó que a pesar de que los AN presentan mejores propiedades, los AR en la fabricación de mortero muestran mejor viabilidad tanto técnica como económica, ya que la aplicación de la fracción fina de los AR cumple con la normativa vigente.

Susan Miranda (2020) en su investigación, desarrollo de hormigones resistentes al fuego con áridos reciclados procedentes de una planta de residuos de construcción, determinó que la aplicación de AR en la elaboración de hormigones es una alternativa viable, ya que los resultados que se obtuvieron son positivos y satisfactorio referente a la resistencia mecánica, una de las propiedades fundamentales en la producción de hormigón.

Leydi Bolaños et al. (2019), evaluaron el aprovechamiento de RCD como agregado en materiales de construcción, en su investigación analizaron y determinaron que es factible utilizar residuos de construcción y demolición para la producción de ladrillos, en sus propiedades obtuvieron una resistencia a compresión de 17.9 MPa y absorción de agua máxima de 9.79% a los 28 días de curado, cuyos valores cumplen con la normatividad técnica.



La literatura muestra que el uso de residuos de construcción y demolición se está convirtiendo en una alternativa de considerable importancia en la industria de la construcción. En este contexto, surge la necesidad de abordar la escasa influencia de investigaciones específicas sobre la aplicación de los RCD en Ecuador, destacando la importancia de su reutilización en la producción de materiales de construcción.

Esta investigación tiene como objetivo principal analizar, a través del estudio comparativo de las propiedades mecánicas y físicas del motero y hormigón elaborado con áridos naturales y reciclados. Para lograr este objetivo, se llevó a cabo ensayos a los áridos reciclados y naturales según la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE-INEN), con el fin de alcanzar los porcentajes idóneos para la obtención de morteros de resistencia de 10 MPa y hormigones de 21 MPa.

Metodología

La metodología empleada en esta investigación se basó en un enfoque cuantitativo y se llevó a cabo mediante un estudio experimental de alcance transversal, cuyo proceso se desarrolló de manera secuencial, iniciando con la recolección de los residuos de construcción y demolición, seguido por la etapa de trituración. Posteriormente, se realizaron ensayos de laboratorios, se diseñaron mezclas y se elaboraron morteros y hormigones, según el porcentaje de agregado natural y reciclado utilizado. Este proceso permitió recopilar datos y analizar información para comparar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras elaboradas.

Para el desarrollo del estudio experimental, se utilizaron materiales como el cemento hidráulico tipo GU (uso general) para la construcción, fabricado según la normativa técnica NTE INEN 2380:2011, equivalente a ASTM-C1157. Se empleó agregados finos y gruesos naturales constituidos de roca basáltica, provenientes de una de las canteras de la parroquia Picoazá del cantón Portoviejo, así como agregados finos y gruesos reciclado. Además, se utilizó agua potable para las mezclas de los morteros y hormigones, cumpliendo con las especificaciones de la norma técnica NTE INEN 2617:2012. Por último, se aplicó un aditivo plastificante acelerante para hormigón de densidad igual a 1.10 kg/dm³.

La obtención de los agregados reciclados implicó la recolección de los RCD, los cuales provinieron de residuos de vigas y columnas de una edificación en demolición en la parroquia 18 de Octubre de la ciudad de Portoviejo, estos desechos fueron sometidos a un proceso mecánico de trituración con el fin de reducir las partículas de los RCD de mayor tamaño a materiales granulares.

Los ensayos realizados a los RCD y áridos naturales se llevaron a cabo siguiendo las normas técnicas ecuatorianas NTE INEN, las cuales permitieron determinar, mediante diversos

procedimientos técnicos, las características físicas y mecánicas de los materiales en estudio, de los cuales se especifican a continuación:

- Áridos. Análisis granulométrico en los áridos finos y grueso. NTE-INEN 696:2011.

La granulometría empleada en el desarrollo de la investigación se ajusta según las especificaciones de la norma NTE-INEN 696:2011. Esta consistió en separar áridos finos y gruesos según sus tamaños, utilizando un conjunto de tamices con abertura cuadrada que se reducen para determinar las cantidades de partículas que constituyen el material.

Los resultados obtenidos para los áridos naturales son los siguientes: La arena fina utilizada en mortero alcanza un módulo de finura de 0,50 mm, mientras que la arena homogenizada empleada en hormigón logra un módulo de finura de 2,85mm. Además, el árido grueso utilizado en hormigón presenta un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ pulgadas.

Respecto al análisis granulométrico de los áridos reciclados, se presentaron los siguientes valores: El árido fino reciclado, utilizado en mortero, obtiene un módulo de finura de 2,21 mm, mientras que el árido grueso reciclado empleado en hormigón alcanza un módulo de finura de 1,76 mm.

Es importante destacar que todas las caracterizaciones realizadas, tanto para los áridos naturales como para los reciclados, cumplen con los límites granulométricos establecidos por la norma técnica NTE-INEN 696 2011.

- Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso volumétrico) y el porcentaje de vacío. NTE-INEN 858:2010.

La norma técnica NTE-INEN 858:2010 fue empleada para determinar el Peso Unitario Suelto (PUS) y el peso unitario compacto (PUC) de los agregados. El ensayo, conforme a esta normativa, consistió en llenar el molde hasta un tercio de su capacidad con la muestra y nivelar la superficie manualmente. Posteriormente, se compactó la capa de muestra con 25 golpes utilizando una varilla de compactación. Luego, se repitió el mismo procedimiento llenando dos tercios del molde, permitiendo que la muestra rebosara, y compactándola nuevamente.

La Tabla 1 presenta de manera detallada los resultados obtenidos de los ensayos realizados conforme a la norma NTE-INEN 858:2010 para los áridos tanto naturales como reciclados.

Tabla 1. Resultados peso unitario suelto y compacto de los áridos naturales y reciclados

Agregado	PUS (gr/cm ³)	PUC (gr/cm ³)
Arena fina	1,28	1,45



Ensayos Áridos Naturales	Arena homogenizada	1,29	1,44
	Árido grueso	1,34	1,42
Ensayos Áridos Reciclados	Árido fino reciclado	1,2	1,304
	Árido grueso reciclado	1,34	1,445

- Áridos para hormigón. Determinación del contenido de humedad. NTE-INEN 862:2011.

La norma NTE-INEN 862 2011 se utiliza para determinar el contenido de humedad de las muestras de los áridos en términos de porcentaje de humedad vaporable. El procedimiento involucra el secado de la muestra en un recipiente mediante un horno durante un periodo de 24 horas, con un control preciso de la temperatura para evitar la pérdida de partículas. Posteriormente, la muestra se deja enfriar, se pesa y se registran los datos necesarios para calcular el contenido de humedad, siguiendo las disposiciones de la normativa. En la Figura 1 se muestran los porcentajes determinados del contenido de humedad de los áridos naturales y reciclados.

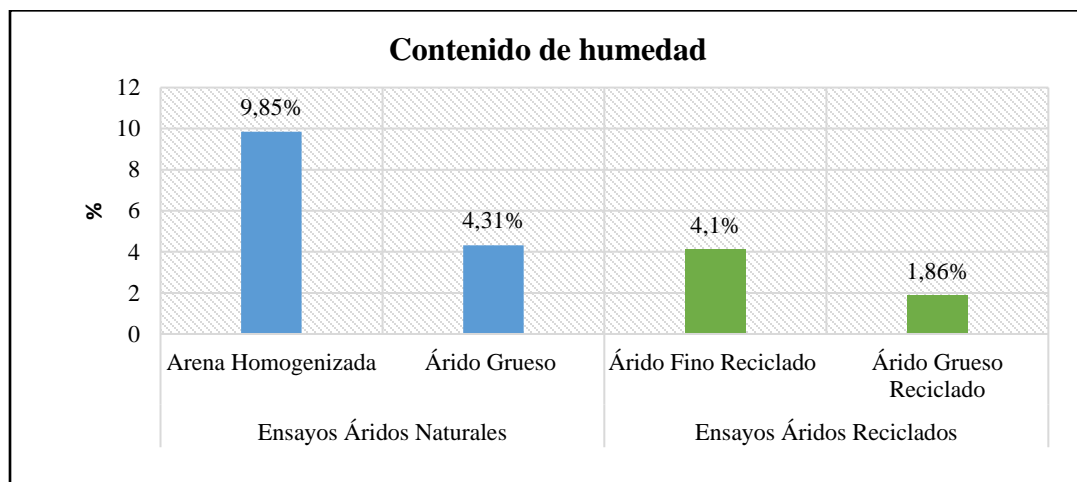


Figura 1. Porcentaje de contenido de humedad de los áridos naturales y reciclados

Los datos obtenidos revelan que los residuos de construcción y demolición proveniente de vigas y columnas presentan un valor menor en comparación con los áridos naturales. Esto indica que estos materiales, al haber formado parte de una construcción anterior, muestran diferencias en sus propiedades, destacándose por su contenido mínimo de agua.

- Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. NTE-INEN 856:2010.

La normativa NTE-INEN 856:2010 establece los procedimientos para determinar propiedades físicas como densidad, densidad relativa y absorción del árido. El método especificado consiste en el secado de una muestra de agregado en un recipiente dentro de un

horno a una temperatura controlada de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, la muestra se enfría durante un periodo de $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$ para alcanzar un estado de saturación superficialmente seco. Una vez que la muestra esté en este estado, se llena parcialmente un picnómetro con agua potable, luego se agrega una cantidad específica de agregado ($500\text{g} \pm 10 \text{ g}$) al picnómetro y se completa con agua hasta el 90% de su capacidad. Después de agitar el picnómetro para eliminar los vacíos, se determina la masa total del picnómetro con la muestra y el agua. Finalmente, se retira la muestra del picnómetro y se seca nuevamente en el horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que alcance una masa constante, lo que permite medir el peso en seco del material.

En la Tabla 2 y 3 se visualizan los resultados obtenidos de los ensayos según la norma NTE-INEN 856:2010.

Tabla 2. Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción del árido natural

Ensayos Árido Natural	Arena Fina (para mortero)	Arena homogenizada	Ripio
Peso específico corriente (PEC)	2,6 gr/cm ³	2,475 gr/cm ³	2,391 gr/cm ³
Peso específico saturado (PES)	2,64 gr/cm ³	2,525 gr/cm ³	2,492 gr/cm ³
Peso específico aparente (PEA)	2,71 gr/cm ³	2,606 gr/cm ³	2,660 gr/cm ³
% de Absorción	1.5%	2,04%	4,23%

Tabla 3. Determinación de la densidad, gravedad específica y absorción del árido reciclado

Ensayos Árido Reciclado	Árido Fino Reciclado	Árido Grueso Reciclado
Peso específico corriente (PEC)	2,204 gr/cm ³	2,468 gr/cm ³
Peso específico saturado (PES)	2,315 gr/cm ³	2,568 gr/cm ³
Peso específico aparente (PEA)	2,479 gr/cm ³	2,742 gr/cm ³
% de Absorción	5,04%	4,04%

- Dosificación del mortero. NTE-INEN 488:2009.

Para las mezclas de mortero, se empleó árido fino 100% natural como muestra de control, posteriormente, se sustituyó progresivamente el árido fino natural por árido fino reciclado en porcentajes de 15%, 20% y 25%. Siguiendo las pautas establecidas en la normativa NTE-INEN 488:2009 en referencia a la composición específica de los morteros, se elaboraron seis especímenes por cada porcentaje de agregados, conformados por una Muestra de Control (MC) y agregados de Áridos Reciclados (AR) según los porcentajes indicados. Las características de las propiedades en la dosificación del mortero se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados Dosificación del Mortero

Dosificación del Mortero				
Materiales	MC 0%	AR 15%	AR 20%	AR 25%
Peso cemento (gr)	500	500	500	500
Peso arena (gr)	1375	1169	1100	1031
Peso arena reciclada (gr)	0	206	275	344
Peso agua	242	242	242	242

- Dosificación del hormigón. NTE-INEN 1855:2014

En el diseño de las mezclas de hormigón, se utilizó árido fino 100% natural para todas las muestras, ya que el reemplazo se realizó únicamente en el árido grueso. Por ende, la primera muestra de control consistió en árido grueso 100% natural, seguido de la sustitución progresiva del árido grueso natural por árido grueso reciclado en porcentajes de 15%, 20% y 25%. Para la dosificación del hormigón, se siguió la norma NTE-INEN 1855:2014, la cual establece los procedimientos para la preparación de mezclas de hormigón. Se fabricaron nueve especímenes de acuerdo con los diferentes porcentajes de agregados, determinando las proporciones adecuadas de cemento, agua y áridos para obtener la resistencia, durabilidad y trabajabilidad deseada en la mezcla. Las propiedades en la dosificación del hormigón se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados Dosificación del hormigón

Dosificación del hormigón para 1m ³				
Materiales	MC 0%	AR 15%	AR 20%	AR 25%
Peso cemento (kg)	350	350	350	350
Peso arena (kg)	819	819	819	819
Peso Piedra (kg)	918	780	734	680
Peso Piedra Reciclada (kg)	0	138	184	230
Peso Agua (lt)	140	140	140	140

- Asentamiento del hormigón (cono de Abrams) ASTM C 14

El asentamiento del hormigón es una propiedad fundamental que indica su capacidad de fluir y conformarse adecuadamente durante el proceso de colocación. El procedimiento de la norma ASTM C 14 de Asentamiento del hormigón se basa en utilizar un molde de tronco de cono con bocas circulares paralelas de 10 y 20 cm respectivamente, y una altura de 30 cm, previamente humedecido. Este molde se coloca sobre una chapa metálica en una superficie



plana y horizontal. Posteriormente, se vierten capas de concreto en tercios de altura del molde, compactando la mezcla con una varilla de 60 cm y 5/8", aplicando 25 golpes uniformemente distribuidos. Una vez lleno el molde y nivelada la mezcla, se levanta cuidadosamente en dirección vertical para permitir que el concreto fresco se asiente y así medir la diferencia de altura, conocida como asentamiento.

La Figura 2 presenta los resultados obtenidos del asentamiento del hormigón, realizados a través del ensayo según la norma ASTM C14. Se evidencia una marcada disminución en el asentamiento a medida que se incrementa el porcentaje de agregado reciclado en la mezcla.

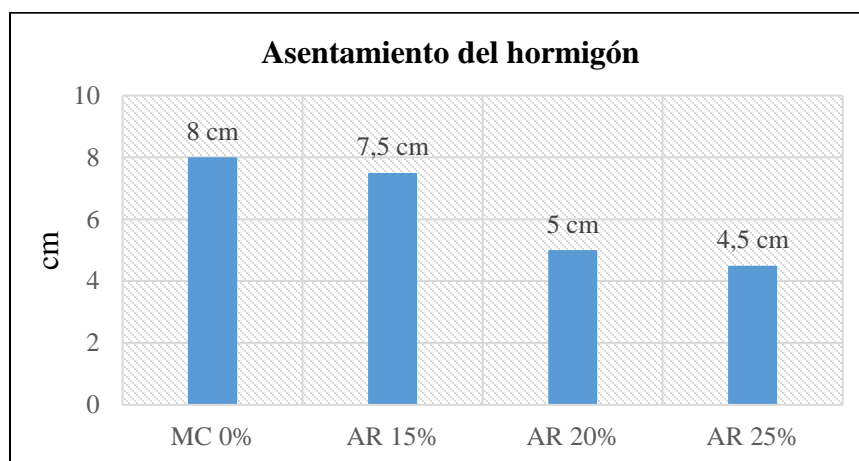


Figura 2. Resultados asentamiento del hormigón

La muestra de control, compuesta por 100% de agregado natural y 0% de agregado reciclado, exhibe un asentamiento de 8cm, indicativo de una excelente fluidez y colocación del hormigón. No obstante, al introducir agregado reciclado, se observa una reducción significativa en el asentamiento. En el caso de la muestra con un 15% de agregado reciclado, el asentamiento disminuye a 7.5 cm, y con un 25% de agregado reciclado, el asentamiento se reduce aún más a 4.5 cm. Este fenómeno se atribuye a las diferencias en las propiedades físicas y superficiales entre el agregado natural y el agregado reciclado, el cual tiende a contener mayor cantidad de partículas finas y a presentar una mayor absorción de agua debido a su exposición previa a una estructura.

- Resistividad del hormigón. ASTM C1760

La prueba de resistividad eléctrica del hormigón, según la norma ASTM C1760, proporciona una indicación sobre el comportamiento de captura de corrosión en las barras de acero y la durabilidad del hormigón. Esto se logra al analizar la relación entre el voltaje aplicado y la corriente eléctrica que fluye a través de una muestra.

Para llevar a cabo esta prueba, se empleó un dispositivo de resistividad eléctrica de superficies (Giatec Surf). Este elemento cuenta con una configuración precisa de medición automática de la resistividad alrededor del espécimen del hormigón mediante la utilización de cuatro canales de una matriz de sondas. Los valores entre la prueba de penetrabilidad del cloruro y la resistividad eléctrica superficial del hormigón se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Comportamiento del hormigón en relación con la presencia de cloruros y resistividad eléctrica de la superficie.

Penetración de cloruro	Carga de permeabilidad rápida al cloruro de un día aprobada según ASTM C1202 (Coulomb)	Resistividad de superficie kΩ cm
Alta	>4,000	<10
Moderada	2,000-4,000	10-15
Baja	1,000-2,000	15-25
Muy Baja	100-1,000	25-200
Despreciable	<100	>200

Fuente: Kessler et al. 2005.

Resultados y discusión

Resistencia a compresión

La resistencia a la compresión se erige como un indicador fundamental para evaluar las propiedades mecánicas tanto del hormigón como el mortero. El procedimiento para llevar a cabo esta prueba implica la aplicación gradual de cargas a compresión sobre muestras representativas del material, con el propósito de inducir su ruptura o fallo. Los resultados obtenidos de esta prueba ofrecen datos críticos sobre la capacidad máxima del material para resistir la carga compresiva, permitiendo así un análisis exhaustivo de los requisitos regulatorio y la calidad en el diseño del mortero y hormigón con áridos naturales y reciclados.

Resistencia a compresión en mortero

La prueba de resistencia a compresión en morteros se llevó a cabo utilizando muestras solidificadas de 5 cm de altura, 5 cm de ancho y 5 cm de espesor. Para cada variación porcentual de agregado, se prepararon seis especímenes (24 especímenes en total), como se detalla en la Tabla 7. Estas muestras se sometieron a un periodo de curado de 7, 14 y 28 días. Además, se destaca que en todas las mezclas se mantuvo una relación agua/cemento de 0.4.

El mortero diseñado en esta investigación es de clasificación tipo M10 conforme a la normativa NTE-INEN 0247 (ASTM C207), este elemento forma parte del grupo de morteros

premezclados empleados comúnmente en revestimientos de mampostería. La principal característica que tiene el mortero tipo M10 es poseer una resistencia nominal a la compresión de 10 MPa después de 28 días de curado.

Tabla 7. Resultados resistencia a la compresión del mortero

Serie de espécimen	Total de especímenes	Relación agua/cemento	Diseño de mortero	Fc (MPa) 7 días	Fc (MPa) 14 días	Fc (MPa) 28 días
6	24	0,4	MC 0%	7,0	12,93	14,8
			AR 15%	6,3	11,71	14,5
			AR 20%	6,2	11,06	12,7
			AR 25%	6,1	10,65	12,8

La Figura 3 presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos a través de las pruebas de resistencia a compresión de los especímenes en el diseño del mortero. Se observa que las muestras ganan resistencia a la compresión después de 7 días de curado, seguido de un aumento adicional a los 14 y 28 días. Esto evidencia que la resistencia a compresión tiende a elevarse a medida que se les proporciona más tiempo de curado a los especímenes.

La muestra de control (MC) exhibe la mayor resistencia a la compresión debido a la carencia de áridos finos reciclados, permitiendo que, a los 28 días de curado la muestra alcance un valor de 14.8 MPa, representando un aumento del 148% respecto al intervalo del 98% al 102% de su resistencia establecida de 10 MPa.

Por otra parte, las muestras en las que se aplicaron el 15%, 20% y 25% de agregado fino reciclado como sustituto de agregado fino natural mostraron una disminución en su resistencia a la compresión en comparación con la muestra de control. Esto sugiere que a medida que aumenta el porcentaje de agregado fino reciclado, disminuye la resistencia a la compresión. Esta disminución puede atribuirse a posibles variaciones en la calidad y propiedades mecánicas del agregado fino reciclado en comparación con el agregado fino natural.

Sin embargo, la muestra que contiene el 15% de árido fino reciclado mostró una resistencia a la compresión de 14.5 MPa después de 28 días de curado, superando en un 145% el intervalo de resistencia establecido entre el 98% y el 102%. Un análisis similar se aplica a las muestras con un 20% y 25% de árido fino reciclado, las cuales muestran resistencia del 127% y 128%, respectivamente, con valores de 12.7 MPa y 12.8 MPa a los 28 días de curado.

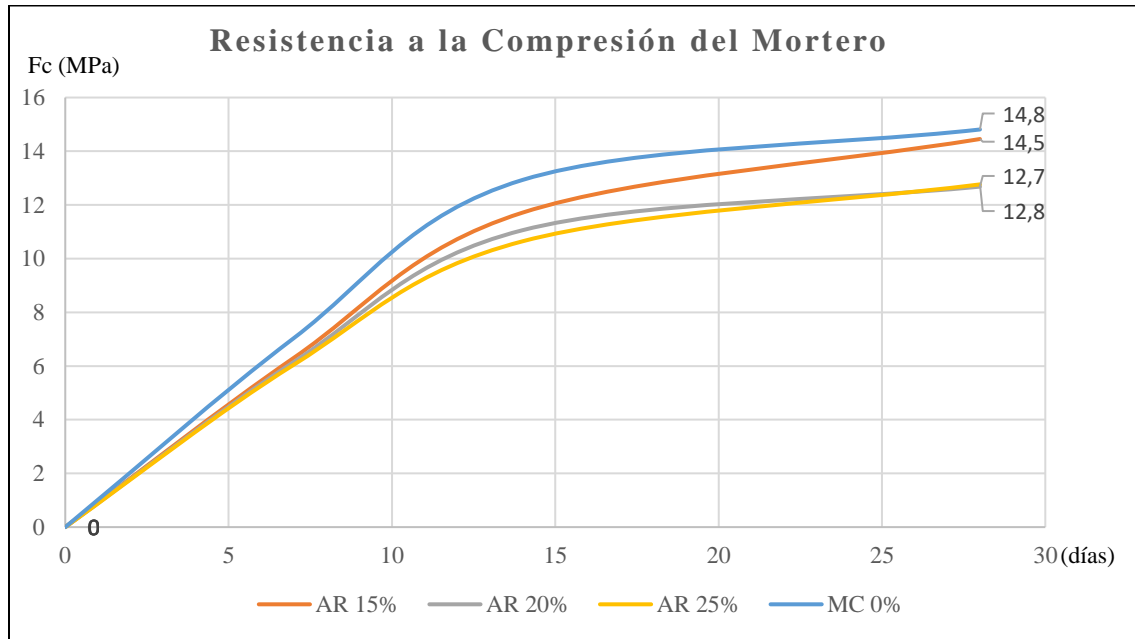


Figura 3. Comportamiento de la resistencia a la compresión del mortero

Resistencia a compresión en el hormigón

En el marco de pruebas de resistencia a la compresión en hormigón, se emplearon muestras endurecidas en forma de cilindro, con dimensiones de 20 cm de altura y 10 cm de radio. Se procedió a la elaboración de un conjunto de nueve especímenes para cada variante de proporción de agregado (36 especímenes en total). Estas muestras se confeccionaron bajo una relación agua/cemento de 0.4 y un tiempo de curado de 7, 14 y 28 días, como se indica en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados resistencia a la compresión del hormigón

Serie de espécimen	Total de especímenes	Relación agua/cemento	Diseño de hormigón	Fc (MPa)	Fc (MPa)	Fc (MPa)
				7 días	14 días	28 días
9	36	0,4	MC 0%	14,2	17,51	23,5
			AR 15%	13,3	17,11	22,0
			AR 20%	13,0	16,93	21,2
			AR 25%	12,7	15,81	19,3

En la Figura 4 se visualiza el comportamiento de los resultados obtenidos en la prueba de resistencia a compresión de las muestras en el diseño del hormigón. Similarmente a lo

observado en la resistencia a compresión del mortero, los valores tienden a aumentar después del tiempo de curado a los 7, 14 y 28 días.

La muestra de control, que carece de agregado grueso reciclado en el diseño del espécimen del hormigón, obtiene la mayor resistencia a compresión, alcanzado 23.5 MPa después de 28 días de curado. Este valor supera en un 111.9% el intervalo establecido del 98% al 102% de la resistencia a compresión del hormigón, que es de 21 MPa.

A medida que aumenta el porcentaje de agregado grueso reciclado en los especímenes, se observa una disminución en sus resistencias a compresión respecto a la muestra de control. Esta reducción se atribuye a la composición heterogénea y a la mala distribución de partículas de los agregados reciclados al presentar diferentes impurezas.

No obstante, la muestra que contiene un 15% de agregado grueso reciclado, después de 28 días de curado, presenta una resistencia a compresión de 22 MPa, lo cual se aproxima al valor de la muestra de control, llegando al 104.8% del intervalo establecido. Por otro lado, la muestra con un 20% de agregado reciclado obtiene una resistencia a compresión de 21.2 MPa a los 28 días, alcanzando el 100.9%, un valor aceptable que se asemeja a la resistencia establecida del hormigón de 21 MPa. En contraste, la muestra con un 25% de agregado reciclado presenta valores de resistencia a la compresión por debajo de lo establecido, incumpliendo con los intervalos de resistencia a edades de 7, 14 y 28 días.

Por lo tanto, la muestra que contiene el 15% de agregado reciclado resulta ser la más óptima dentro del diseño del hormigón, ya que su resistencia a compresión a los 28 días de curado muestra valores cercanos a la muestra de control. Esto se debe a que la proporción de agregado grueso reciclado fue menor, lo que contribuye a una mejor adherencia y distribución de las partículas de los residuos en el diseño del hormigón.

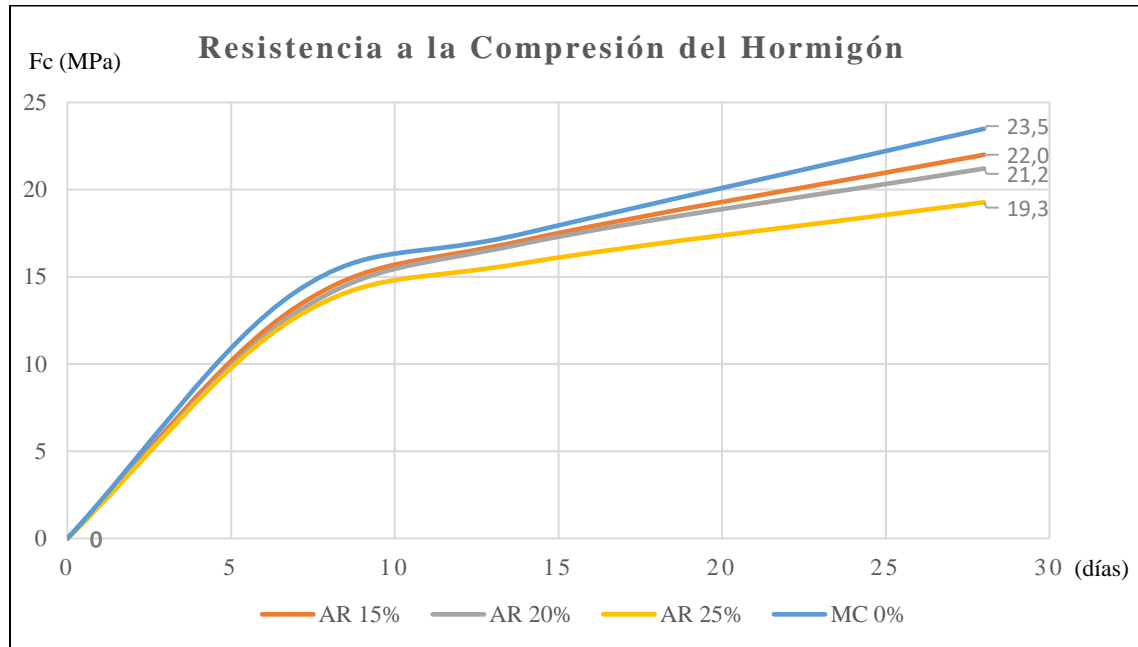


Figura 4. Comportamiento de la resistencia a la compresión del hormigón

Resistividad eléctrica del hormigón

La prueba de resistividad eléctrica en la investigación tiene como objetivo analizar la capacidad de oposición al flujo de corriente que presentan las muestras en el diseño del hormigón, utilizando áridos reciclados y naturales. Los resultados obtenidos experimentalmente permiten determinar el comportamiento del grado de saturación de los poros de los especímenes del hormigón, lo que a su vez posibilita evaluar el riesgo de corrosión del refuerzo metálico.

En la Tabla 9 se visualizan los valores obtenidos en la prueba de resistividad eléctrica realizada a una serie de 9 especímenes para cada porcentaje de agregado, siguiendo un patrón de curado de 7, 14 y 28. Es importante destacar que las mezclas de las muestras se mantienen con una relación agua/cemento de 0.4, asegurando así la consistencia de los resultados y facilitando la comparación entre las diferentes muestras y periodos de curado.

Tabla 9. Resultados de la resistividad eléctrica del hormigón

Serie de espécimen	Total de especímenes	Diseño de hormigón	kΩ cm 7 días	kΩ cm 14 días	kΩ cm 28 días
9	36	MC 0%	9,8	15,9	17,4
		AR 15%	8,6	14,1	16,4
		AR 20%	8,5	13,7	15,9

AR 25%	8,4	11,5	11,6
--------	-----	------	------

En la Figura 5 se puede apreciar de manera detallada el comportamiento de los resultados de la resistividad eléctrica de los especímenes del hormigón. Los valores obtenidos indican una clara tendencia de disminución en la resistividad eléctrica al aumentar el porcentaje de agregado reciclado y con el transcurso del tiempo de exposición.

La muestra de control presenta la resistividad eléctrica más elevada, registrando un valor de 17.4 k Ω .cm después de 28 días de curado, cuyo riesgo a la corrosión se sitúa en un nivel bajo, dentro del rango de 15 a 25 k Ω .cm de resistividad de superficie, como se indica en la Tabla 6. Este resultado era previsible debido a la ausencia de áridos reciclados en la muestra de control, lo que conduce a una óptima adherencia y distribución de las partículas. Esta condición limita la migración de iones y la difusión de agua, factores cruciales en el proceso de corrosión del refuerzo metálico.

Para las muestras con un porcentaje de agregado reciclado del 15% y 20% se observa que, a los 28 días de curado, los valores de resistividad eléctrica son de 16.4 k Ω .cm y 15.9 k Ω .cm, respectivamente, lo que los sitúa en el rango bajo de riesgo a la corrosión. Por otro lado, la muestra que contienen un 25% de agregado reciclado presentan una resistividad eléctrica de 11.6 k Ω .cm, ubicándose en un rango moderado, lo que indica una calidad insatisfactoria del espécimen en términos de resistividad a la corrosión.

Es importante destacar que la disminución en la resistividad eléctrica con el aumento del porcentaje de agregado reciclado puede atribuirse a una mayor porosidad y discontinuidades en la estructura del hormigón, lo que aumenta el riesgo de corrosión del refuerzo metálico.

Sin embargo, después de los 28 días de curado las muestras de control y la muestra que contiene un 15% de agregado reciclado presentan los mejores valores de resistividad eléctrica, lo que indica que cuanto mayor sea la resistividad, menor será la tasa de corrosión del refuerzo de acero y, por lo tanto, habrá menor penetrabilidad del agua, minimizando el riesgo que el acero se oxide en el menor tiempo posible, controlando de esta manera la vida útil de la estructura del hormigón.

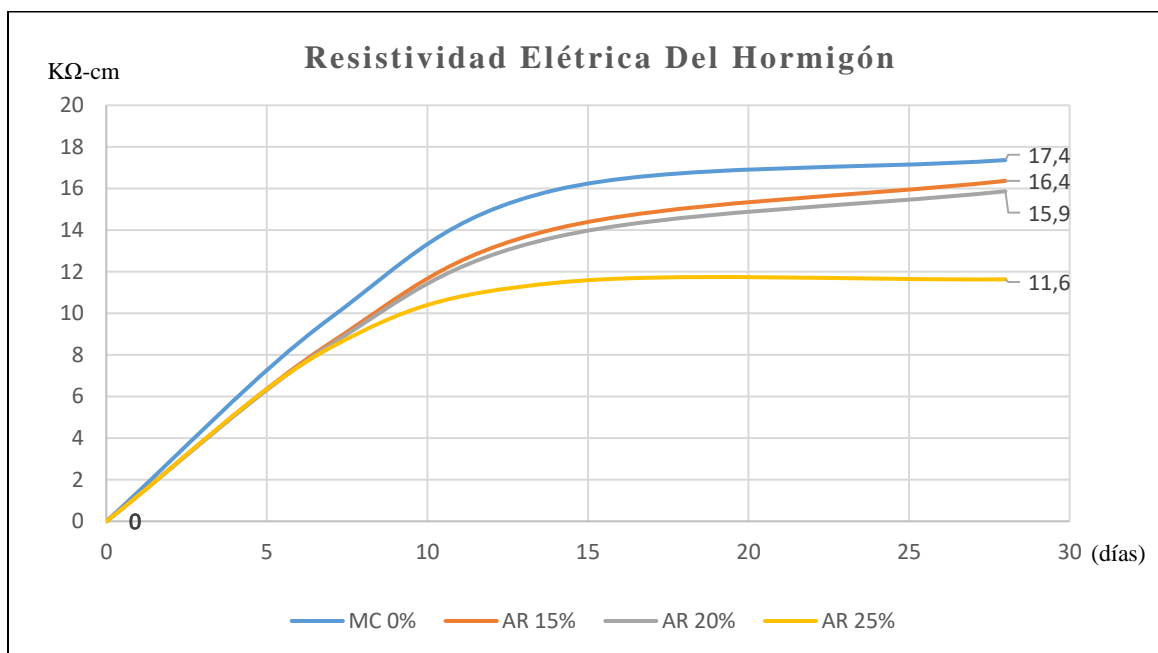


Figura 5.Comportamiento de la resistividad eléctrica del hormigón

Enfoque ambiental

La incorporación de residuos de construcción y demolición (RCD) en la elaboración de morteros y hormigones emerge como una estrategia prometedora desde una perspectiva ambiental. Los resultados obtenidos en esta investigación experimental demuestran que, con procesamiento adecuado, los agregados reciclados pueden ser una alternativa viable y sostenible a los áridos naturales en la industria de la construcción.

La correcta gestión y procesamiento de los RCD como agregados reciclados contribuyen de manera directa a la reducción de la cantidad de desechos destinados a vertederos, lo cual conlleva a la mitigación del impacto ambiental asociado con la administración inapropiada de los residuos. Por esta razón, es imperativo abordar los desafíos asociados con la selección, clasificación y procesamiento de estos materiales para garantizar su idoneidad y seguridad en las aplicaciones de la construcción.

Por otra parte, al disminuir la necesidad de extraer y procesar áridos naturales, se reduce la presión sobre los recursos naturales, como la arena y la grava, favoreciendo así la conservación de los ecosistemas. Además, la producción de agregados reciclados suele requerir menos energía y genera menos emisiones de carbono en comparación con la extracción y procesamiento de áridos naturales, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático.

En el aspecto económico, la disponibilidad y el costo de los áridos naturales y reciclados pueden influir en la decisión de utilizar agregados reciclados en comparación con los naturales, especialmente en regiones donde los precios y la calidad varían significativamente. No obstante, el proceso de selección, clasificación y trituración de los RCD para obtener agregados reciclados puede implicar costos adicionales que deben ser considerados en la evaluación de la viabilidad económica de su utilización.

Conclusiones

La optimización del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) para el desarrollo de unidades de productos sustentables es un aspecto clave en la evolución de la industria de la construcción hacia prácticas más sostenibles. Los resultados de este estudio ofrecen una perspectiva valiosa sobre las implicaciones técnicas y científicas de incorporar estos materiales reciclados en la producción de mortero y hormigón.

Se ha demostrado que, si bien la introducción de áridos reciclados puede disminuir la resistencia a la compresión en comparación con los materiales convencionales, la adopción de un porcentaje óptimo de RCD puede resultar en una resistencia a la compresión comparable o incluso superior a la resistencia establecida de 10 MPa en morteros y 21 MPa en hormigones. En el caso del mortero, el reemplazo del 15% de árido fino reciclado en muestras con 28 días de curado se obtuvo una resistencia a compresión de 14.5 MPa, resultado similar a lo de la muestra de control (14.8 MPa). Para el hormigón la muestra con un 15% de árido grueso reciclado tuvo una resistencia a la compresión de 22 MPa, resultado que se acerca a la resistencia de 23.5 MPa de la muestra de control.

Por otra parte, las pruebas de resistividad eléctrica a muestras de hormigón surgen como un aspecto crítico a considerar, especialmente en términos de riesgo de corrosión del refuerzo metálico. Los datos revelan que la presencia de áridos reciclados puede disminuir la resistividad eléctrica, lo que aumenta el riesgo de corrosión. Sin embargo, se observa que un nivel moderado de árido reciclado (15-20%) puede mantener la resistividad en un rango aceptable, lo que sugiere que la adecuada selección del porcentaje de RCD puede mitigar los efectos negativos en la durabilidad y la integridad estructural del hormigón.

Dentro del desempeño técnico, se evidencia que los agregados reciclados pueden ofrecer un rendimiento mecánico comparable al de los áridos naturales en términos de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica, lo que respalda su viabilidad técnica en aplicaciones de mortero y hormigón. En este contexto, es esencial destacar la importancia de la distribución adecuada de los áridos reciclados en la matriz del hormigón y el mortero, lo que contribuye significativamente a mejorar las propiedades mecánicas y a cumplir e incluso superar los estándares de resistencia establecidos.

Referencias Bibliográficas

Bolaños, L., Sanchez, N., & Diaz, Y. (2019). Estudio de aprovechamiento de RCD en Santiago de Cali como agregado en materiales de construcción. *Revista de la Facultad de Ciencia Básicas*, 87-93.

Ceballos, S., & Gonzales, D. (2021). Reciclaje de residuos de construcción y demolición (RC&D) generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la fabricación de adoquines. *Revista ION*, 27-35. doi:10.18273/revion. v34n1-2021003

Cevallos, P., & Inca, D. (2018). Gestión de residuos de la construcción en la ciudad de Riobamba. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo. Recuperado de <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/5263/1/UNACH-EC-ING-CIVIL-2019-0001.pdf>

Eduardo, M. (2019). Estudios del polvo fino de mortero de distintas fuentes de residuos para la producción de hormigón reciclado. En Libro de Actas del tercer congreso internacional de construcción sostenible y soluciones eco-eficientes (pp. 941-953). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/59301/Aguirre%20maldonado%2c%20eduardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos, Requisitos. Quito. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/515214336/NTE-INEN-872-2011-Aridos-Hormigon-Requisitos#>

Miranda, S. (2020). Desarrollo de hormigones resistentes al fuego con áridos reciclados procedentes de una planta de residuos de construcción. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Recuperado de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71781/fichero/TFM-1781+SANTOS+MIRANDA%2C+SUSAN+DE+LOS.pdf>

Saiz, P. (2017). Utilización de arenas procedentes de residuos de construcción y demolición, RCD, en la fabricación de morteros de albañilería. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de https://oa.upm.es/39585/1/PABLO_SAIZ_MARTINEZ.pdf

Sara, J., & Maia, C. (2021). Reducción del contenido de cemento por incorporación de áridos finos reciclados de residuos de construcción y demolición en mortero de revoque. *MDPI*, 1, 6-11. doi: <https://doi.org/10.3390/infraestructuras6010011>

Valdes, G., & Reyes, O. (2017). Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción. *Ingeniería*, 29(1), 17-33. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/852/85222642003.pdf>



Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.