

DESEMPEÑO AMBIENTAL EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Arauz Legnazzi, Joaquín^a; Zito, Silvina Vanessa^b;
Tridone, Valeria^c; Peralta, María Haydeé^d

^{a,b,c,d} Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

^ajoaquin.arauz@fio.unicen.edu.ar, ^bsilvina.zito@fio.unicen.edu.ar,
^cvtridone@fio.unicen.edu.ar, ^dmperalta@fio.unicen.edu.ar

Palabras clave: hormigón, eficiencia estructural, sostenibilidad, economía circular.

RESUMEN

El hormigón armado es uno de los materiales más utilizados en el mundo y, al mismo tiempo, uno de los principales responsables de las emisiones de CO₂. En este contexto, este trabajo reúne tres líneas de investigación desarrolladas en el marco de un grupo de investigación universitario, orientadas a reducir el impacto ambiental de las estructuras de hormigón armado a lo largo de su ciclo de vida. Se presentan dos enfoques aplicables en la etapa de diseño y construcción, basados en la incorporación de residuos como materiales alternativos en matrices cementicias, mediante la reutilización de fibras provenientes de palas de aerogeneradores fuera de servicio y de residuos cerámicos de construcción y demolición. Asimismo, se aborda una tercera línea de investigación enfocada en el diagnóstico y la evaluación de la vida útil residual de estructuras existentes, con el objetivo de optimizar su mantenimiento y prolongar su vida en servicio. En conjunto, estas investigaciones muestran estrategias complementarias para promover estructuras más sostenibles, durables y eficientes en el uso de los recursos.

ABSTRACT

Reinforced concrete is one of the most widely used construction materials in the world and, at the same time, one of the major contributors to CO₂ emissions. In this context, this paper brings together three research lines developed within a university research group, all aimed at reducing the environmental impact of reinforced concrete structures throughout their life cycle. Two approaches applicable during the design and construction stages are presented, both based on the incorporation of waste materials as alternative constituents in cementitious composites through the reuse of fibers from decommissioned wind turbine blades and ceramic construction and demolition waste. In addition, a third research line is presented, focusing on the diagnosis and assessment of the remaining service life of existing structures, with the objective of optimizing maintenance strategies and extending their service life. Collectively, these studies demonstrate complementary strategies for promoting more sustainable, durable, and resource-efficient concrete structures.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón armado es el material de construcción más utilizado a nivel mundial debido a su versatilidad, resistencia y eficiencia estructural. No obstante, su producción está asociada a un elevado consumo de recursos naturales y a importantes emisiones de dióxido de carbono (CO₂) ^[1], lo que lo convierte en uno de los principales desafíos para la sostenibilidad en el sector de la construcción.

En este contexto, resulta necesario incorporar criterios de sostenibilidad a lo largo de todo el ciclo de vida de las estructuras de hormigón armado, desde su diseño y construcción hasta su operación, mantenimiento y eventual reutilización o reciclaje.

Asimismo, el escenario actual de cambio climático exige transformar el potencial constructivo del hormigón en soluciones que minimicen la huella ambiental y promuevan un uso más eficiente de los recursos. En este sentido, la sostenibilidad en la construcción se encuentra estrechamente vinculada con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas ^[2], entre ellos el desarrollo de infraestructuras resilientes (ODS 9), la construcción de ciudades sostenibles (ODS 11) y la promoción de modalidades de producción y consumo responsables (ODS 12).

Frente a este escenario, el presente artículo sintetiza el estado del arte sobre la gestión de la vida útil, el monitoreo de la salud estructural (Structural Health Monitoring, SHM) y la incorporación de materiales reciclados y estrategias de economía circular como herramientas para reducir el impacto ambiental de estas estructuras.

2. MARCO CONCEPTUAL

La vida útil de una estructura se define como el periodo durante el cual es capaz de cumplir con los requisitos mínimos de seguridad, estabilidad y funcionalidad para los que fue concebida, resistiendo los mecanismos de deterioro sin incurrir en costos imprevistos de reparación. La durabilidad, por su parte, se entiende como la capacidad de la estructura para soportar las condiciones ambientales de exposición sin experimentar una pérdida significativa de su capacidad de servicio. Ambos conceptos resultan fundamentales dentro de una estrategia de sostenibilidad, ya que la prolongación del período de servicio de las estructuras permite reducir la demanda de nuevos recursos y disminuir el impacto ambiental asociado a la construcción de nuevas obras.

La sostenibilidad se entiende como la capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. En el ámbito de la construcción, este concepto requiere adoptar una visión integral del ciclo de vida de las estructuras, considerando no solo las etapas de diseño y ejecución, sino también su comportamiento durante el servicio, las estrategias de mantenimiento y las alternativas de reutilización o reciclaje.

Una de las principales estrategias para reducir el impacto ambiental asociado al hormigón armado consiste en extender la vida útil de las estructuras existentes mediante programas adecuados de evaluación, monitoreo y mantenimiento ^[3]. La conservación de estructuras en servicio permite disminuir la necesidad de demoliciones anticipadas y la construcción de nuevas obras, reduciendo así el consumo de recursos naturales y las emisiones asociadas a la producción de materiales.

La evaluación de estructuras existentes presenta particularidades respecto del diseño de obras nuevas, principalmente debido al nivel y la calidad de la información disponible. Mientras que en el proyecto estructural se trabaja con propiedades especificadas como requisitos mínimos de diseño, en la evaluación resulta necesario caracterizar el estado real de la estructura mediante inspecciones, ensayos in situ, mediciones directas y análisis de documentación existente. Existen metodologías y marcos normativos orientados a valorar la contribución de una estructura a la sostenibilidad, como la norma ISO 15392:2019 ^[4] o modelos integrados de evaluación, los cuales integran indicadores ambientales, económicos y sociales para comparar diferentes alternativas de intervención ^[5].

Desde el punto de vista técnico, pueden distinguirse diferentes niveles de evaluación estructural. Los métodos simplificados se basan principalmente en inspecciones visuales y en el empleo de índices de daño estructural, permitiendo establecer prioridades de intervención cuando los recursos disponibles son limitados. Por otro lado, los métodos detallados comprenden análisis exhaustivos elemento por elemento, considerando la pérdida efectiva de sección del acero y del hormigón, las condiciones de exposición y la evolución temporal de la capacidad resistente.

La calidad de una estructura no depende únicamente de las propiedades de los materiales empleados, sino del conjunto de decisiones adoptadas durante las etapas de proyecto, ejecución y servicio. Estudios sobre fallas en estructuras de hormigón han demostrado que una proporción significativa de los errores se origina durante las etapas de diseño y construcción, evidenciando la importancia de implementar un enfoque integral de calidad a lo largo de todo el ciclo de vida de la estructura ^[6]. Entre los mecanismos de deterioro más relevantes, la corrosión del acero de refuerzo constituye una de las principales amenazas para la durabilidad del hormigón armado. Este fenómeno se manifiesta mediante la aparición de fisuras, desprendimientos del recubrimiento, manchas de óxido y pérdida de sección de las barras, afectando tanto la capacidad resistente como las condiciones de servicio de la estructura.

En este contexto, el monitoreo de la salud estructural (Structural Health Monitoring, SHM) se ha consolidado como una herramienta clave para la gestión sostenible de las estructuras existentes. Su objetivo consiste en detectar de manera temprana la aparición de defectos y daños, tanto durante la construcción como durante la etapa de servicio, mediante el empleo de tecnologías avanzadas de adquisición y procesamiento de datos, junto con sistemas capaces de gestionar grandes volúmenes de información. Estas herramientas contribuyen a optimizar las estrategias de mantenimiento y favorecer la extensión de la vida útil de las estructuras, en concordancia con los principios de economía circular.

Cuando la construcción de nuevas estructuras resulta inevitable, la sostenibilidad depende también de la selección de materiales con menor impacto ambiental y de la incorporación de estrategias orientadas a la economía circular. En este sentido, una alternativa consiste en la sustitución parcial de materiales convencionales por materiales más sostenibles. En los últimos años, además, han cobrado relevancia investigaciones orientadas a la valorización de residuos provenientes de distintos sectores productivos como componentes alternativos en matrices cementicias ^[7]. Estas soluciones permiten disminuir el consumo de recursos vírgenes, reducir el volumen de residuos destinados a disposición final y promover la circularidad entre distintos sectores productivos.

3. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL HORMIGÓN

En este contexto, la economía circular surge como una estrategia complementaria para mejorar el desempeño ambiental del sector de la construcción. Su aplicación promueve la valorización de residuos provenientes de diferentes actividades industriales, transformándolos en materias primas secundarias capaces de reemplazar materiales convencionales. De esta manera, no solo se reduce la cantidad de residuos destinados a disposición final, sino que también se disminuye la extracción de recursos vírgenes y el impacto ambiental asociado a la fabricación de nuevos materiales.

En los últimos años, diversas investigaciones desarrolladas en el ámbito universitario han explorado la incorporación de residuos reciclados en la matriz del hormigón, buscando mantener o incluso mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad, al mismo tiempo que se favorece una gestión más sostenible de los recursos. En esta línea, la investigación que se lleva adelante en el área de estructuras y materiales de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (FIO-UNICEN) busca contribuir a la transición hacia un modelo constructivo más circular y con menor impacto ambiental.

Dentro de esta línea de trabajo se presentan tres estudios que abordan problemáticas ambientales de distinta naturaleza: el primero analiza la reutilización de fibras obtenidas de palas de aerogeneradores fuera de servicio como refuerzo del hormigón, el segundo evalúa el aprovechamiento de residuos cerámicos provenientes de la construcción y demolición como material alternativo para la elaboración de mezclas cementicias, y el tercero investiga metodologías de evaluación y diagnóstico de estructuras en servicio, con o sin signos de deterioro, que han alcanzado o superado la vida útil de diseño. En conjunto, estos casos representan ejemplos concretos de cómo la investigación puede contribuir a integrar los principios de la economía circular en la ingeniería estructural, generando soluciones técnicamente viables y ambientalmente más sostenibles.

3.1. Valorización de residuos de palas de aerogeneradores

El acceso a la energía constituye una necesidad fundamental para la sociedad y, como consecuencia, la demanda energética mundial ha experimentado un crecimiento sostenido durante las últimas décadas. Frente a los impactos ambientales derivados del uso intensivo de combustibles fósiles ^[8], las energías renovables han adquirido un papel cada vez más relevante dentro de la matriz energética mundial. Entre ellas, la energía eólica se ha consolidado como una de las tecnologías de mayor expansión debido a su capacidad para generar electricidad con bajas emisiones durante su etapa de operación.

Los aerogeneradores están compuestos principalmente por la cimentación, la torre y el rotor, siendo este último el encargado de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica mediante las palas. Mientras que la cimentación y la torre pueden reciclarse mediante tecnologías ampliamente desarrolladas para el hormigón y el acero, respectivamente, las palas constituyen el componente más complejo de gestionar al final de su vida útil debido a la naturaleza de los materiales compuestos con los que son fabricadas ^[9].

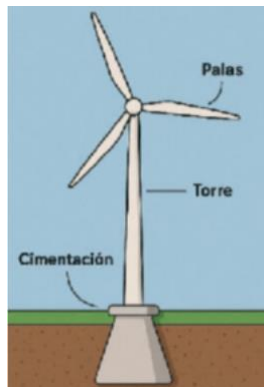


Figura 1. Componentes del aerogenerador

Las palas eólicas están fabricadas principalmente con materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio, que les proporcionan elevada resistencia mecánica y bajo peso. Durante su operación están sometidas a cargas cíclicas y condiciones ambientales severas que pueden generar microfisuras, delaminaciones, erosión e impactos, por lo que el monitoreo de la salud estructural resulta fundamental para planificar el mantenimiento y estimar su vida útil remanente ^[10].

Aun cuando las tareas de monitoreo y mantenimiento permiten prolongar su vida en servicio, las palas poseen una vida útil de diseño entre 20 y 25 años ^[9]. Como consecuencia, durante las próximas décadas se espera un incremento significativo en la cantidad de palas fuera de servicio, generando un desafío ambiental.

Debido a la naturaleza termoestable de sus matrices poliméricas y al elevado contenido de fibras de vidrio, las alternativas convencionales de reciclaje son limitadas. En consecuencia, gran parte de estos residuos termina en vertederos, aunque actualmente distintos países promueven estrategias de reutilización y valorización, como aplicaciones en infraestructura civil, mobiliario urbano y materiales de construcción (Figura 3). En los últimos años también ha surgido un creciente interés por incorporar residuos de palas eólicas en materiales cementicios, aprovechando las propiedades mecánicas de las fibras y partículas presentes en el material triturado. Esta alternativa permitiría transformar un residuo de difícil disposición final en un recurso para la industria de la construcción, contribuyendo a la economía circular y al desarrollo de materiales más sostenibles.

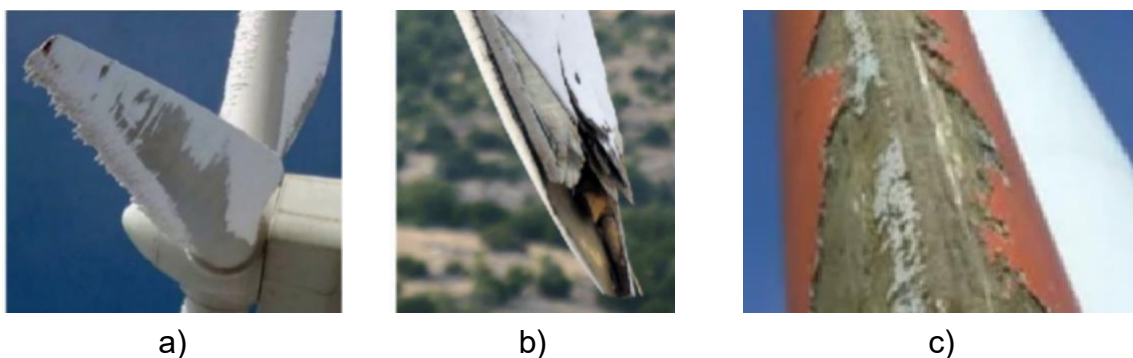


Figura 2. Mecanismos de deterioro en palas de aerogeneradores durante su vida útil: a) acumulación de hielo; b) impacto de rayo; c) erosión superficial del borde de ataque.



a)



b)



c)



d)

Figura 3. a) Vertedero de palas eólicas en Wyoming ^[11]; b) Pasarela en Szprotawa, Polonia ^[12]; c) Parque infantil en Rotterdam, Países Bajos ^[13] ; d) Estacionamiento para bicicletas en Dinamarca ^[14].

Situación y proyección de residuos de palas eólicas en Argentina

Aunque la mayoría de los parques eólicos se encuentra actualmente en operación, una parte importante de los equipos instalados durante la última década comenzará a retirarse en los próximos años, generando un volumen de residuos que requerirá alternativas de reutilización, reciclaje o disposición final.

Para dimensionar esta problemática se relevaron los parques eólicos en operación, considerando ubicación, cantidad de aerogeneradores y año de puesta en servicio. Asumiendo una vida útil promedio de 25 años, se estimó la cantidad de equipos que alcanzará el final de su vida útil en distintos horizontes temporales. La Figura 4 muestra la distribución territorial de los parques y aerogeneradores, observándose una marcada concentración en las provincias Buenos Aires, Chubut y Santa Cruz.

Para estimar la magnitud potencial de dichos residuos se adoptó como referencia una pala representativa con una longitud aproximada de 49 m y una masa cercana a 7,5 toneladas por unidad ^[15]. A partir de esta hipótesis se estimó la evolución temporal de la cantidad acumulada de aerogeneradores fuera de servicio y de la masa total de residuos asociados. Las proyecciones realizadas determinaron que el volumen de residuos comenzará a incrementarse de manera significativa a partir de la década de 2040. En particular, para el año 2043 se estima que 379 aerogeneradores habrán alcanzado el final de su vida útil, lo que representa aproximadamente 8.527,5 toneladas de residuos de palas eólicas. Esta tendencia continúa en los años siguientes, alcanzando hacia 2051 un total acumulado superior a 1.390 aerogeneradores fuera de servicio y más de 31.000 toneladas de residuos, evidenciando la magnitud del desafío asociado a su gestión y valorización.

Estas estimaciones permiten dimensionar la magnitud potencial del problema a nivel nacional. Sin embargo, actualmente Argentina no dispone de una normativa específica para la gestión y disposición final de las palas de aerogeneradores fuera de servicio. Si bien la Ley N.º 25.019 ^[16] promueve el desarrollo de la energía eólica, no establece mecanismos específicos para la gestión de los residuos generados al final de la vida útil de los equipos. Asimismo, los estudios de impacto ambiental de los parques eólicos suelen contemplar aspectos generales de desmantelamiento y manejo de residuos, pero no definen criterios específicos para su valorización o reciclaje, por lo que su gestión recae principalmente en los operadores.

Esta situación evidencia un vacío normativo frente a un residuo de gran volumen y compleja composición material. En contraste, diversos países han comenzado a restringir su disposición en vertederos y a promover estrategias de reutilización y reciclaje ^[17,18]. En este contexto, el desarrollo de alternativas tecnológicamente viables para transformar estos residuos en recursos aprovechables resulta de interés tanto ambiental como tecnológico, particularmente mediante su incorporación en materiales cementicios para aplicaciones en la industria de la construcción.

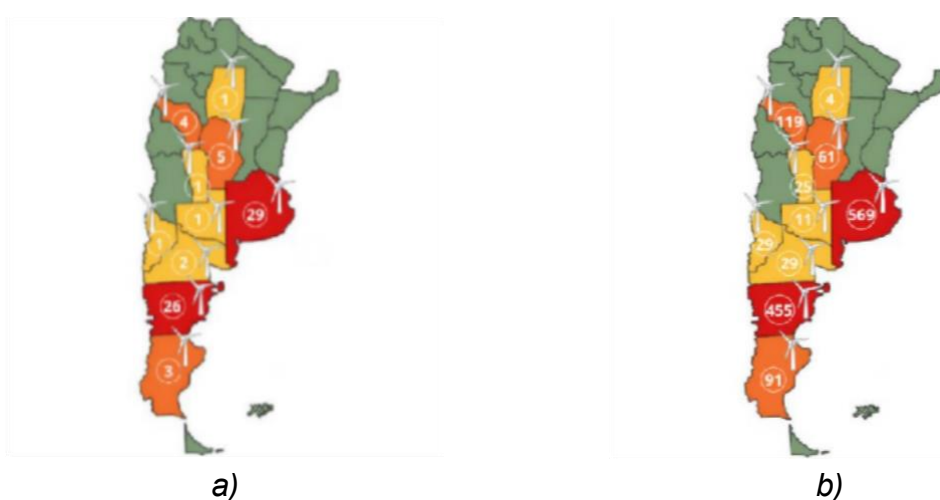


Figura 4. a) Cantidad de parques eólicos en Argentina por provincia.
b) Cantidad de aerogeneradores en Argentina por provincia

Materiales utilizados en el programa experimental

Se empleó un cemento Portland puzolánico (CPP35), conforme a la norma IRAM 50000 ^[19], con una densidad de 2,92 g/cm³ y una superficie específica Blaine de 401 m²/kg. Como agregados se utilizaron arena silíceea natural, arena de trituración granítica y agregado grueso granítico de tamaño máximo nominal de 19 mm, cumpliendo los requisitos de la norma IRAM 1627 ^[20].

Como material reciclado se utilizó residuo de pala de aerogenerador triturado (R.P.A.), obtenido a partir de una pala eólica fuera de servicio. Inicialmente, una porción de la pala fue seccionada mediante una amoladora angular, obteniéndose fragmentos prismáticos de aproximadamente 5 a 7 cm de longitud.

Los fragmentos fueron triturados en un molino de martillos de alimentación y descarga continua. El material obtenido fue tamizado mediante una malla de 3/8" (9,5

mm), reprocesándose las partículas retenidas hasta lograr que la totalidad del material atravesara dicha abertura. La Figura 5 muestra las principales etapas del proceso de obtención del R.P.A.

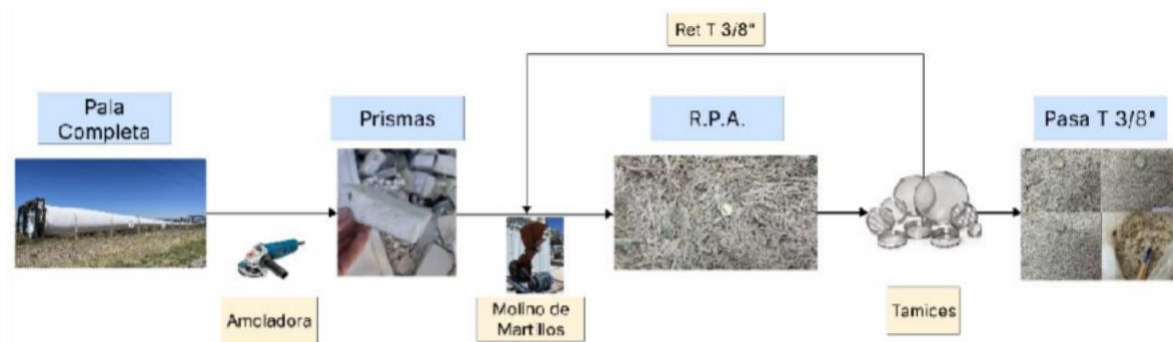


Figura 5. Proceso de trituración del R.P.A.

Caracterización física y química del R.P.A.

La caracterización física del R.P.A. comenzó con un análisis granulométrico mediante tamizado. Aproximadamente el 66 % del material quedó retenido entre los tamices N.º 4 y N.º 16, evidenciando una elevada proporción de material de tamaño relativamente grueso. La inspección visual confirmó la naturaleza heterogénea del residuo, identificándose fibras de vidrio, fragmentos de resina y materiales livianos, como madera balsa y espumas poliméricas. Las fracciones más gruesas presentaron una geometría alargada, mientras que las más finas mostraron una morfología predominantemente granular. La densidad, determinada mediante picnómetro conforme a la norma IRAM 1520 ^[21], fue de 1,69 g/cm³, valor inferior al de los agregados minerales convencionales debido a la naturaleza multifásica del material.

La caracterización química mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y la determinación de la pérdida por calcinación (PPC) según IRAM 1512 ^[22] mostraron como principales componentes SiO₂ (36,0 %), CaO (14,25 %) y Al₂O₃ (8,47 %). La PPC alcanzó el 36,40 %, asociada principalmente a la presencia de matriz polimérica y materiales orgánicos.

En conjunto, los resultados confirman que el R.P.A. es un material compuesto heterogéneo, cuyas características permiten evaluar su incorporación en mezclas cementicias.

Elaboración y programa experimental

Se elaboraron dos mezclas: un hormigón de referencia (Patrón) y otro con incorporación del 1,5 % de R.P.A. en volumen, porcentaje definido a partir de antecedentes bibliográficos y ensayos preliminares sobre morteros ^[23,24]. Ambas mezclas utilizaron cemento Portland puzolánico CPP35, agregados silíceos y graníticos, una relación agua/material cementicio de 0,50 y aditivo superplastificante. Las dosificaciones se presentan en la Tabla 1.

Para cada mezcla se elaboró un pastón independiente utilizando una mezcladora de 50 litros de capacidad. El volumen de hormigón obtenido en cada pastón fue suficiente para cubrir la cantidad de material necesaria para el moldeo de las probetas y vigas correspondientes a las distintas edades y ensayos.

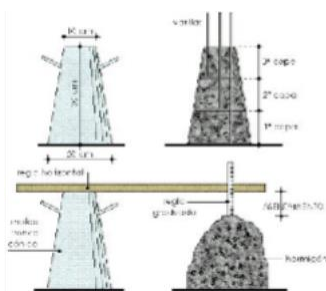
El desempeño de los hormigones se evaluó en estado fresco y endurecido mediante probetas cilíndricas de 100 × 200 mm y vigas prismáticas de 75 × 75 × 400 mm, ensayadas a los 7 y 28 días. Para cada mezcla y edad se moldearon tres probetas para el ensayo de resistencia a compresión, tres para resistencia a tracción indirecta, tres probetas para la determinación del módulo de elasticidad longitudinal y tres vigas prismáticas para resistencia a flexión, totalizando 12 especímenes por edad y por mezcla.

La utilización de tres especímenes para cada combinación de mezcla, edad y ensayo permitió obtener un valor promedio representativo y evaluar la dispersión de los resultados, reduciendo la influencia de posibles variaciones asociadas al material, al moldeo, al curado o al procedimiento experimental. De este modo, se incrementó la confiabilidad de los resultados y se obtuvo una base experimental adecuada para la comparación entre los dos hormigones.

En estado fresco se determinaron el asentamiento mediante cono de Abrams y la consistencia mediante mesa de Graff, de acuerdo con las normas IRAM 1536 [25] e IRAM 1690 [26] (Figura 6). Para cada mezcla, las determinaciones mediante cono de Abrams y mesa de Graff se realizaron en tres oportunidades, registrándose los valores obtenidos en cada determinación. En estado endurecido se evaluaron la resistencia a compresión, tracción indirecta, flexión y módulo de elasticidad longitudinal, conforme a las normas IRAM 1456 [27], IRAM 1658 [28], IRAM 1547 [29] e IRAM 1865 [30], respectivamente (Figura 6).

Material	Patrón	F 1.5%
Cemento	360.0	354.6
Agua	180.0	177.3
Piedra silícea	232.1	228.7
Arena 0-6	584.6	575.9
Piedra 6-20	980.0	965.3
R.P.A.	—	25.4
a/cm	0.50	0.50

Tabla 1 - Proporciones de los materiales utilizados para los hormigones (kg/m³).



a)



b)



c)

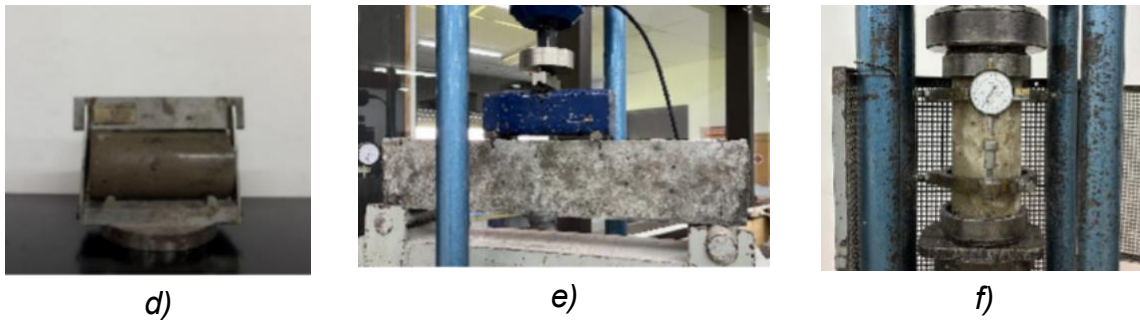


Figura 6. Ensayos en hormigón. a) Metodología del cono de Abrams. b) Ensayo de consistencia en la mesa de Graff. c) Equipo de ensayo a compresión. d) Equipo de ensayo a tracción por compresión diametral. e) Equipo de ensayo a flexión. f) Equipo de ensayo módulo de elasticidad longitudinal.

Resultados primer trabajo

En estado fresco, la incorporación de R.P.A. redujo significativamente la trabajabilidad del hormigón. La fluidez disminuyó de 210 % a 137,5 %, mientras que el asentamiento pasó de 6 cm a 0 cm (Figura 7).

Este comportamiento se atribuye a la elevada superficie específica, la geometría irregular y la naturaleza heterogénea del R.P.A., que incrementan la demanda de agua y dificultan el flujo de la mezcla [23,24]. Sin embargo, ambas mezclas presentaron adecuada cohesión, sin segregación ni exudación.

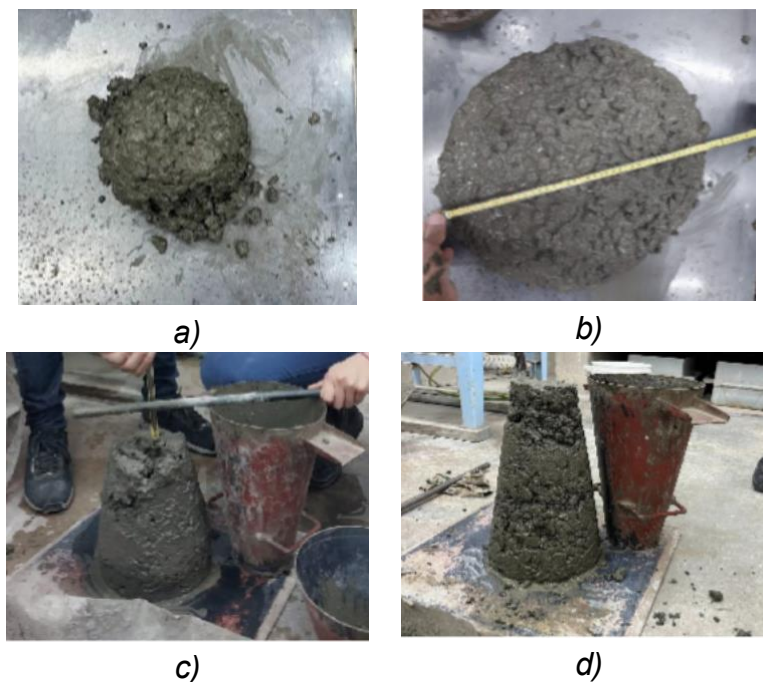


Figura 7. a) Masa de hormigón F 1.5% posterior a las 15 caídas de la mesa de Graff; b) Masa del hormigón Patrón. c) Masa de hormigón Patrón una vez retirado el molde del cono de Abrams; d) Masa de hormigón F 1.5% una vez retirado el molde.

En estado endurecido, la incorporación del 1,5 % de R.P.A. no produjo pérdidas de resistencia a compresión y mejoró el comportamiento frente a solicitaciones de tracción y flexión (Figura 8).

Respecto del hormigón Patrón, la resistencia a compresión aumentó un 7,6 % a los 7 días y un 1,1 % a los 28 días. Las mayores mejoras se observaron en la resistencia a tracción indirecta (61,8 % y 19,1 %) y a flexión (9,0 % y 15,0 %), atribuibles al efecto de puenteo ejercido por las fibras de vidrio presentes en el R.P.A.

Durante los ensayos, las probetas con R.P.A. presentaron un comportamiento menos frágil que el hormigón Patrón, manteniendo su integridad luego de la fisuración y observándose fibras atravesando las superficies de fractura (Figura 9).

Finalmente, el módulo de elasticidad disminuyó entre un 5 % y un 6 %, reducción moderada que no compromete su aplicación como hormigón estructural.

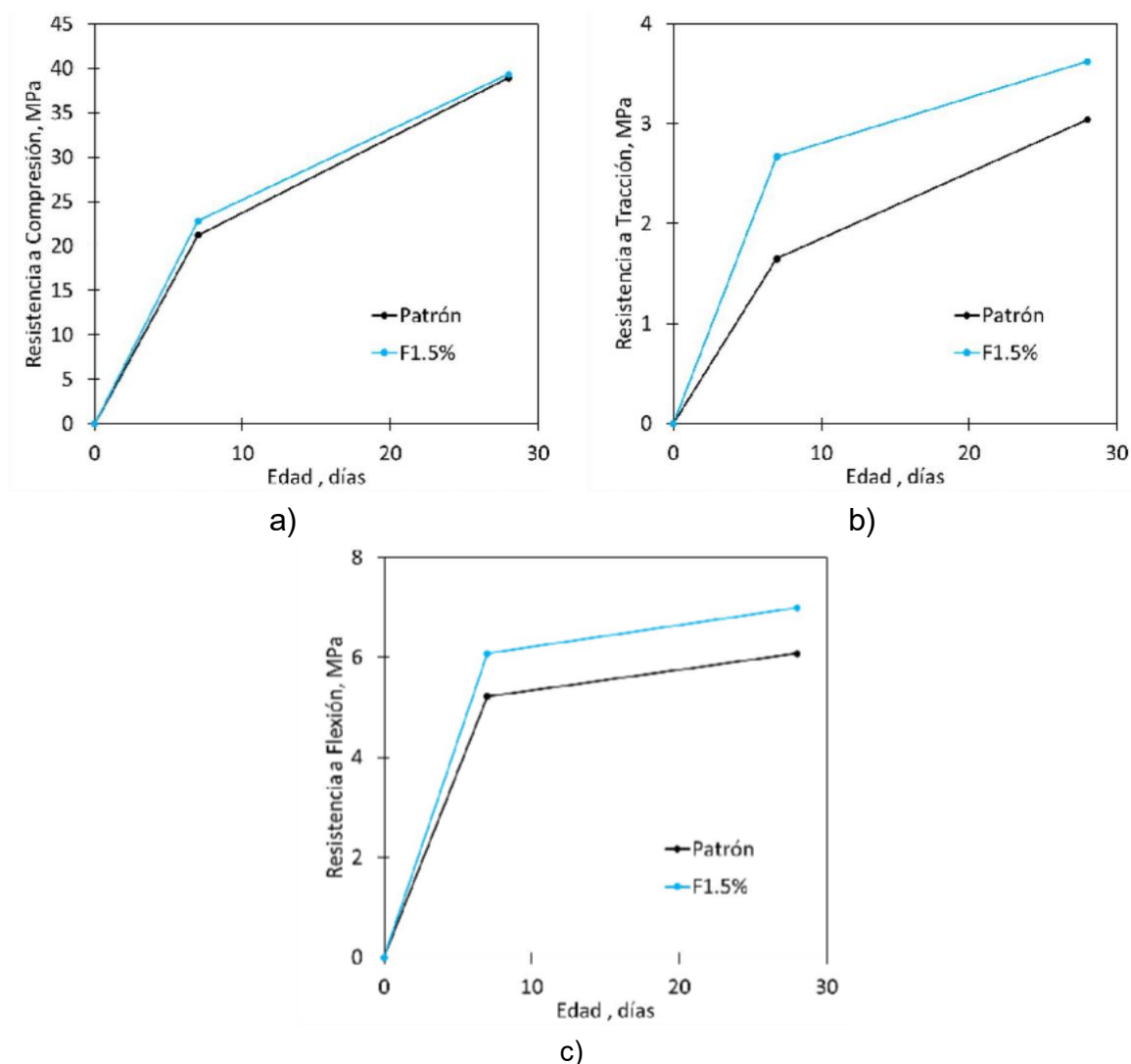


Figura 8. Resultados de los hormigones Patrón y F 1.5%. a) Resistencia a compresión; b) Resistencia a tracción; c) Resistencia a flexión

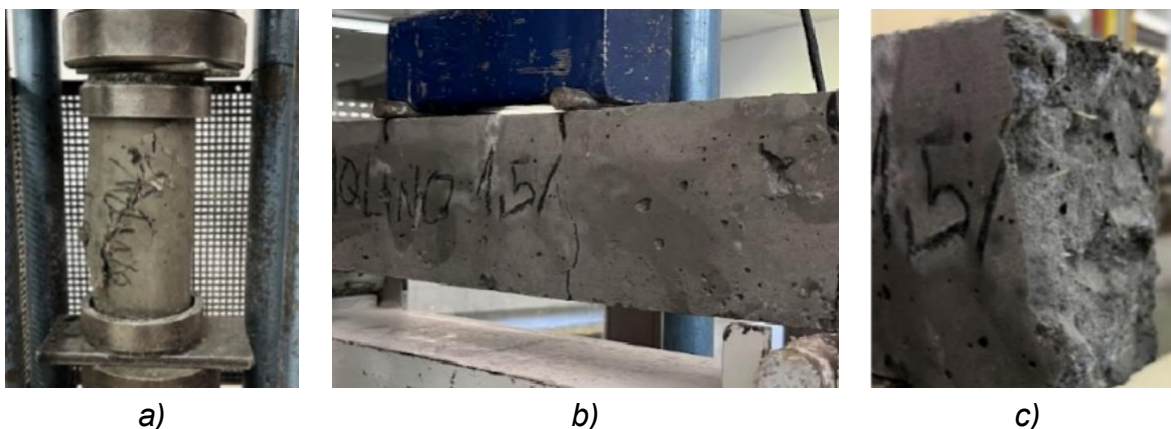


Figura 9. a) Probeta luego de alcanzar la carga máxima. b) Viga luego de alcanzar la carga máxima. c) Evidencia de las fibras en la matriz de hormigón.

3.2. Reutilización de residuos cerámicos de construcción y demolición

Los residuos cerámicos constituyen una fracción importante de los residuos generados tanto por la industria cerámica como por las actividades de construcción y demolición. Durante la fabricación de productos cerámicos se generan residuos sólidos asociados principalmente a materias primas y piezas defectuosas, tanto antes como después de la cocción, estimándose que estos representan entre el 3 y el 7 % de la producción global. A su vez, una fuente significativa de residuos cerámicos corresponde a las actividades de construcción y demolición, donde se generan fragmentos de bloques, ladrillos, revestimientos y morteros, entre otros materiales.

Los residuos de construcción y demolición (RCD) comprenden los materiales descartados durante la ejecución, reparación y demolición de obras, incluyendo residuos de excavación, construcción, demolición y obras viales. En la Unión Europea se generan alrededor de 900 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) por año, constituyendo uno de los principales flujos de residuos de la región [31].

El segundo estudio de este trabajo aborda la valorización de residuos cerámicos provenientes de la construcción y demolición (RCD), particularmente de una mampostería de bloques cerámicos. En este caso, se utilizó un residuo obtenido de la demolición de una pared completa, incluyendo los bloques cerámicos, el mortero de asiento y el revoque. El material fue triturado y molido hasta alcanzar una granulometría adecuada para su incorporación en matrices cementicias.

Elaboración y programa experimental

Para evaluar su comportamiento, se elaboraron pastas, morteros y hormigones empleando cemento Portland normal CPN2, comparando una mezcla de referencia (CP2) con otra en la que se reemplazó el 25 % del cemento en peso por el residuo de demolición (25RD). En los hormigones se evaluaron propiedades en estado fresco y endurecido, incluyendo trabajabilidad, exudación, tiempo de fraguado, resistencia a compresión, flexión y tracción por compresión diametral, además del módulo de elasticidad [32]. En estado endurecido, la resistencia a compresión, la resistencia a tracción por compresión diametral y el módulo de elasticidad se determinaron a los 2, 7, 28 y 90 días, mientras que la resistencia a flexión se evaluó a los 7, 28 y 90 días.

Para cada mezcla y edad de ensayo se utilizaron tres especímenes por cada tipo de ensayo: probetas cilíndricas para compresión, tracción por compresión diametral y módulo de elasticidad, y vigas prismáticas para flexión, con un total de 12 especímenes por edad y por mezcla. Debido a que el volumen superaba la capacidad útil de la mezcladora disponible, fue necesario elaborar dos pastones independientes para cada mezcla, manteniendo cada dosificación y procedimiento de elaboración.

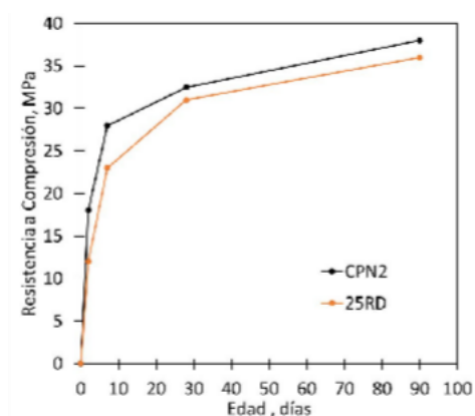


Figura 10. Residuos cerámicos

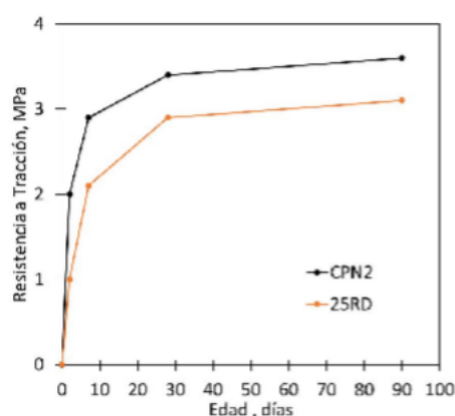
Resultados segundo trabajo

En estado fresco, el hormigón con RCD presentó un comportamiento general similar al de referencia, sin segregación y con una terminación adecuada. El asentamiento inicial disminuyó de 10 a 7 cm, mientras que la fluidez se mantuvo en aproximadamente 40 cm. La incorporación del residuo produjo además una reducción significativa de la exudación, tanto en velocidad como en volumen, atribuida a la elevada superficie específica y capacidad de absorción de agua del material.

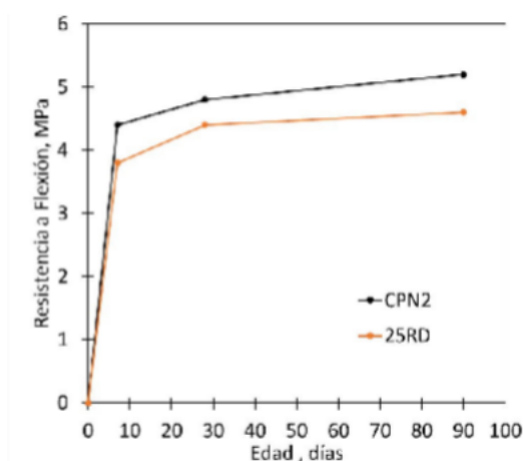
En estado endurecido, el hormigón 25RD presentó menores resistencias a edades tempranas, pero mostró una recuperación progresiva con el aumento de la edad de curado. A los 28 y 90 días alcanzó aproximadamente el 95 % de la resistencia a compresión del hormigón de referencia. En flexión, la resistencia relativa se mantuvo entre el 86 y 91 %, mientras que la resistencia a tracción por compresión diametral alcanzó valores similares o superiores al hormigón patrón a partir de los 28 días. El módulo de elasticidad también evolucionó favorablemente, alcanzando a los 90 días un valor prácticamente igual al del hormigón de referencia.



a)



b)



c)

Figura 11. Resultados de los hormigones CPN2 y 25RD. a) Resistencia a compresión; b) Resistencia a tracción; c) Resistencia a flexión

El comportamiento observado se atribuye inicialmente al efecto de dilución producido por el reemplazo del cemento, mientras que a edades posteriores adquieren mayor relevancia el efecto de relleno de las partículas finas y la actividad puzolánica del residuo, que favorecen la formación de productos de hidratación adicionales y contribuyen al desarrollo de la resistencia.

En conjunto, los resultados demostraron que el reemplazo del 25 % del cemento por residuos cerámicos de demolición permite obtener hormigones con un desempeño mecánico cercano al convencional a edades avanzadas, además de reducir la exudación. Esto evidencia el potencial de estos residuos como materiales cementicios suplementarios y constituye un antecedente para su valorización dentro de estrategias de economía circular en la construcción.

3.3. Diagnóstico y evaluación de vida útil residual en estructuras de hormigón armado

Esta línea de investigación se centra en el diagnóstico y la evaluación de estructuras existentes, integrando el estudio del deterioro de los materiales, la estimación de la vida útil residual y el análisis de su comportamiento estructural. Se consideran fenómenos asociados al envejecimiento, la exposición a ambientes agresivos, eventos extremos como incendios y acciones dinámicas derivadas del uso o funcionamiento de las estructuras. El objetivo es vincular el daño observado con parámetros técnicos verificables, proyectando escenarios de intervención que garanticen la funcionalidad y la seguridad a lo largo del tiempo.

La metodología combina revisión documental, inspección, ensayos experimentales y modelación numérica mediante el Método de los Elementos Finitos [33]. Se prioriza el empleo de ensayos no destructivos [34], como esclerometría, ultrasonido, carbonatación, resistividad, termografía y ensayos dinámicos, para caracterizar el estado real del material sin intervenciones invasivas. Los resultados se incorporan en modelos computacionales, ajustando propiedades mecánicas y factores de reducción de resistencia.

Dentro de esta línea se estudia particularmente el uso de parámetros dinámicos para detectar procesos de degradación y pérdida de rigidez que pueden no resultar evidentes mediante métodos estáticos. Los ensayos normalizados ASTM C215 ^[35] y ASTM C469 ^[36] permiten determinar, respectivamente, propiedades dinámicas y estáticas del hormigón, proporcionando parámetros que ayudan a establecer correlaciones entre ambos comportamientos. En este contexto, estudios experimentales en hormigones fisurados han obtenido una relación aproximada entre el módulo de elasticidad elástico E_c y el dinámico E_d de 1.26. Asimismo, estudios experimentales en elementos estructurales demostraron que las mediciones de vibración son sensibles a procesos progresivos de fisuración, observándose que una disminución del 30 % en la frecuencia fundamental puede asociarse con un nivel significativo de daño por flexión ^[37].

La metodología fue aplicada y validada mediante casos de estudio reales. En el Puente Avenida Sarmiento de Olavarría, construido en 1960, el monitoreo realizado entre 2007 y 2021 permitió identificar un comportamiento dinámico crítico asociado al incremento de las cargas y velocidades de tránsito. A partir del diagnóstico se implementó una intervención mediante separadores de carriles, que permitió aumentar el amortiguamiento estructural del 0,6 % al 6,9 %, estabilizando las vibraciones y extendiendo su operatividad segura ^[39].

Asimismo, estas metodologías fueron aplicadas en la evaluación de edificios afectados por incendios en Quilmes y Necochea, donde la ausencia de una referencia "sana" previa obligó a utilizar técnicas dinámicas para estimar la pérdida de capacidad resistente. En el Teatro Municipal de Olavarría, se realizaron mediciones vibratorias luego de que los asistentes percibieran vibraciones durante un evento musical. Los resultados mostraron una frecuencia natural de 4 Hz y una amplitud máxima de velocidad de 19,95 mm/s, evidenciando un comportamiento inadecuado asociado a la elevada flexibilidad de la estructura y una posible condición de daño. A partir de este diagnóstico se realizó el cálculo de refuerzos estructurales que, una vez ejecutados, permitieron alcanzar un comportamiento compatible con los límites de uso seguro y confort de la estructura.

En conjunto, esta línea busca desarrollar diagnósticos integrales que permitan fundamentar decisiones de reparación, refuerzo o demolición, contribuyendo a extender la vida útil de las estructuras cuya recuperación resulte técnicamente viable. De esta manera, complementa las investigaciones sobre valorización de residuos, incorporando otra estrategia de sostenibilidad basada en conservar y aprovechar las estructuras existentes antes de recurrir a su reemplazo.

4. CONCLUSIONES

En conjunto, las investigaciones desarrolladas muestran que la sostenibilidad de las estructuras de hormigón puede abordarse mediante estrategias complementarias, tanto a través del desarrollo de nuevos materiales a partir de residuos como mediante el aprovechamiento de materiales de uso habitual. El estudio de residuos de palas de aerogeneradores demuestra el potencial de valorizar residuos complejos y de difícil disposición, mientras que el estudio de residuos cerámicos evidencia que no es necesario recurrir exclusivamente a residuos emergentes o de composición particular para desarrollar soluciones más sostenibles, sino que también pueden aprovecharse residuos ampliamente disponibles, como los provenientes de la construcción y demolición.

En ambos casos, la incorporación de residuos permitió mantener un comportamiento mecánico adecuado, demostrando que la valorización de materiales descartados puede reducir el consumo de materias primas y el volumen destinado a disposición final, al mismo tiempo que favorece la economía circular en el sector de la construcción.

Estas estrategias se complementan con la tercera línea de investigación, orientada al diagnóstico y evaluación de la vida útil residual de estructuras de hormigón armado. Mientras los dos primeros estudios buscan desarrollar materiales más sostenibles a partir de residuos, esta última línea aborda el aprovechamiento y extensión de la vida útil de las estructuras existentes mediante inspecciones, ensayos no destructivos, modelización numérica y estudios de casos reales. De este modo, las investigaciones convergen en un mismo objetivo: reducir el impacto ambiental de la construcción no solo mediante nuevos materiales, sino también mediante el aprovechamiento de residuos disponibles y la extensión de la vida útil de las estructuras existentes, contribuyendo a un modelo constructivo más eficiente, seguro y circular.

Los resultados obtenidos permiten destacar que la sostenibilidad en la construcción no depende de una única estrategia ni de un determinado tipo de residuo. Tanto un residuo complejo y emergente, como el proveniente de las palas eólicas, como un residuo habitual de la actividad constructiva, como los RCD cerámicos, pueden encontrar alternativas de valorización mediante su incorporación en materiales cementicios. A su vez, la evaluación adecuada de las estructuras existentes permite determinar cuándo resulta posible conservarlas, repararlas o reforzarlas, evitando intervenciones innecesarias y el consumo adicional de recursos asociado a su reemplazo.

En este sentido, la combinación de valorización de residuos, desarrollo de materiales sostenibles y extensión de la vida útil de las estructuras constituye una estrategia integral para avanzar hacia una construcción más eficiente en el uso de los recursos. Las investigaciones presentadas aportan, desde diferentes perspectivas, herramientas para transformar residuos en recursos, aprovechar materiales disponibles y conservar las estructuras existentes, fortaleciendo los principios de economía circular y sostenibilidad dentro de la ingeniería civil.

REFERENCIAS

- [1] J. Watts, "Concrete: the most destructive material on Earth," *The Guardian*, Feb. 25, 2019. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>.
- [2] Naciones Unidas, *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.
- [3] A. Strauss, K. Bergmeister, P. Daró, G. Mancini, F. Sattler, and A. Bigaj-van Vliet, "Monitoring and data-informed approaches for the assessment of existing structures," *Structural Concrete*, vol. 24, no. 4, pp. 4433–4445, 2023, <https://doi.org/10.1002/suco.202201242>
- [4] International Organization for Standardization, *ISO 15392:2019 Sustainability in buildings and civil engineering works — General principles*, Geneva, Switzerland: ISO, 2019.
- [5] J. M. de la Fuente, A. P. C. Aguado, A. Josa, and A. de la Fuente, "A systematic review on MIVES: A sustainability-oriented multi-criteria decision-making method," *Building and Environment*, vol. 222, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109515>.
- [6] J. Fraczek, "ACI Survey of Concrete Structure Errors," *Concrete International*, vol. 1, no. 12, pp. 14–20, Dec. 1979. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&id=8940>
- [7] Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries*. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- [8] Azcatec. (2024). ¿Cuál es la fuente de energía más utilizada en todo el mundo? <https://azcatec.com/cual-es-la-fuente-de-energia-mas-utilizada-en-todo-el-mundo/>
- [9] Elena Loureiro Bouzon. (2022). Cálculo y gestión del potencial residuo eólico en Galicia. <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/25888/1/Elena%20Loureiro%20Bouz%C3%B3n.pdf>
- [10] Shah Abdul Haseeb; Marek Krawczuk. *Journal of Nondestructive Evaluation* 2026 45:4 <https://doi.org/10.1007/s10921-025-01296-5>
- [11] MiningPress (2020). Turbinas eólicas, el nuevo desafío ambiental. <https://miningpress.com/327452/turbinas-eolicas-el-nuevo-desafio-ambiental>
- [12] BEonloop (2023). LAS ASPAS DE AEROGENERADOR buscan una segunda vida. <https://www.beonloop.com/las-aspas-de-aerogenerador-buscan-una-segunda-vida/>
- [13] Xataka (2022). Todos los alucinantes usos que estamos dando a las palas de aerogeneradores usados: de puentes a torres eléctricas https://www.xataka.com/energia/todos-alucinantes-usos-que-estamos-dando-a-palas-aerogeneradores-usados-puentes-a-torres-electricas?utm_source=chatgpt.com
- [14] Ovacen (2023). De palas de un generador eólico a proteger bicicletas. <https://ovacen.com/pala-aerogenerador/>

- [15] Vestas. (2012). Wind turbine specification report: V100-1.8 MW. HAF Wind Energy. https://www.hafwindenergy.ca/PDF/rea/1104037_Wind_Turbine_Spec_Report_Combined_20April12.pdf
- [16] Argentina.gob.ar, 1998. Régimen nacional de energía eólica y solar <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/ley-25019-53790>
- [17] Euronews (2021). El reciclaje de las palas supone un gran problema para la energía eólica. <https://es.euronews.com/my-europe/2021/06/25/el-reciclaje-de-las-palas-supone-un-gran-problema-para-la-energia-eolica>
- [18] IER (2020). Wind Turbine Blades Will Continue to Pile Up at U.S. Landfills. https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/wind/wind-turbine-blades-will-continue-to-pile-up-at-u-s-landfills/?utm_source=chatgpt.com
- [19] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), Norma IRAM 50000: Cementos. Cementos para uso general. Composición y requisitos. Buenos Aires, 2019.
- [20] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1627: Granulometría de los agregados para hormigones. IRAM.
- [21] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). IRAM 1520: Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua. IRAM.
- [22] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1512: Agregado fino para hormigón de cemento. Requisitos. IRAM.
- [23] Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., Rieder, K.-A., Tian, Y., & Chen, C. (2021). Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105580. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105580>
- [24] Revilla-Cuesta, V., Manso-Morato, J., Hurtado-Alonso, N., Skaf, M., & Ortega-López, V. (2024). Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component. *Journal of Cleaner Production*, 440, 141843. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141843>
- [25] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1536: Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono. IRAM.
- [26] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1690: Método de ensayo de la consistencia utilizando la mesa de Graf. IRAM.
- [27] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1546: Método de ensayo de compresión. IRAM.
- [28] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1658: Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral. IRAM.
- [29] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1547: Ensayo de tracción por flexión. IRAM.
- [30] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2013). IRAM 1865: Métodos de ensayo para la determinación del módulo de elasticidad estático y de la relación de Poisson de probetas y testigos cilíndricos de hormigón sometidos a esfuerzos de compresión axial. IRAM.
- [31] López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2019). *The circular*

economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. Journal of Cleaner Production, 248, 119238.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119238>

[32] Zito, S.V.; Irassar, E.F.; Rahhal, V.F. Recycled Construction and Demolition Waste as Supplementary Cementing Materials in Eco-Friendly Concrete. Recycling 2023, 8, 54. <https://doi.org/10.3390/recycling8040054>

[33] Peralta, M. H., Pico, L. O., Bacchiarello, R., & Tridone, V. (2023). Cuando el Análisis Estático es Insuficiente para Evaluar Comportamientos Estructurales. Mecánica Computacional, 40(7), 251-260.

[34] Tridone, V., & Peralta, M. H. (2024) Influencia de la variación de las características dinámicas en el comportamiento de elementos estructurales. Trabajo presentado en las XXIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Asociación de Ingenieros Estructurales (AIE). <https://aiearg.org.ar/trabajos-lista/>

[35] ASTM International. *ASTM C215/C215M: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA, ASTM International.

[36] ASTM International. *ASTM C469/C469M-22: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. West Conshohocken, PA, ASTM International.

[37] Tridone, V. E., Pico, L. O., Cabrera, O., & Peralta, M. H. (2023). Análisis de la Variación de Parámetros Asociados a la Rigidez en Elementos de Hormigón Utilizando Métodos Dinámicos. Mecánica Computacional, 40(7), 241-250

[38] Tridone, V., Peralta, M. H., Bachiarello, R., & Pico, L. O. (2022). Análisis del monitoreo de un puente de hormigón con un comportamiento flexible y de las mejoras para extender su vida útil. Memorias de las XXVII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, Rosario, Argentina, 1-15

Nota: La investigación relacionada con la reutilización de residuos cerámicos de construcción y demolición corresponde a un trabajo previamente publicado, citado como Referencia [32] del presente artículo. Asimismo, los resultados de la investigación sobre la reutilización de residuos de palas de aerogeneradores fueron presentados en el Congreso de Jóvenes Investigadores 2025 y en el Congreso de Estudiantes de Ingeniería Civil 2025. Al momento de la elaboración de este trabajo, dichos resultados no cuentan con una publicación científica formal. Por otra parte, la línea de investigación vinculada al diagnóstico, monitoreo y evaluación de estructuras de hormigón armado se encuentra respaldada por trabajos previamente publicados citados como referencias [37] y [38].

Fotografías de los autores:



Arauz Legnazzi, Joaquin



Zito, Silvana Vanessa



Tridone, Valeria



Peralta, María Haydeé