

POWERCRETE: Nueva batería de hormigón en forma de tramo de carretera urbana para la energía fotovoltaica trasladada al entorno Smart City

Carlos Fernández Navarro; César Bartolomé Muñoz; Ernesto Colomer-Rosell; Fran Ribes-Llario; Ignacio Carrascosa Requena; Jose Antonio Zapater Hernández; Carmem Tatiane Primaz Schmidt; Antonio Rubio Bodí; Francisca Hernández González

- 1 Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, España, cfernandez@ieca.es
- 2 Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, España, cbartolome@ieca.es
- 3 Asociación para el fomento de la innovación y la sostenibilidad en la Arquitectura, ingeniería y construcción (I2Con), Valencia, España, ernesto.colomer@i2con.org
- 4 Asociación para el fomento de la innovación y la sostenibilidad en la Arquitectura, ingeniería y construcción (I2Con), Valencia, España, ernesto.colomer@i2con.org
- 5 Asociación para el fomento de la innovación y la sostenibilidad en la Arquitectura, ingeniería y construcción (I2Con), Valencia, España, fran.ribes@i2con.org
- 6 Asociación para el fomento de la innovación y la sostenibilidad en la Arquitectura, ingeniería y construcción (I2Con), Valencia, España, nacho.carrascosa@i2con.org
- 7 Hormigones Vinalopó, Alicante, España, joseantonio@hormigonesvinalopo.com
- 8 Hormigones Vinalopó, Alicante, España, carmem@hormigonesvinalopo.com
- 9 Hormigones Vinalopó, Alicante, España, arubio@hormigonesvinalopo.com
- 10 Hormigones Vinalopó, Alicante, España, paqui@hormigonesvinalopo.com

Resumen

POWERCRETE plantea una solución de pavimento urbano capaz de mantener su función constructiva y, al mismo tiempo, actuar como sistema de almacenamiento electroquímico distribuido. El trabajo se ha centrado en desarrollar una batería de hormigón integrada en una sección de pavimento, alimentada mediante energía fotovoltaica y orientada a consumos urbanos de baja potencia, como balizas LED, señalización o pequeños dispositivos de ciudad inteligente. La metodología incluyó el diseño de materiales cementicios electroactivos, la definición de un electrolito sólido alcalino, la integración de distintas configuraciones de celda y la validación de un demostrador a escala relevante. Los resultados obtenidos muestran que es posible reducir la resistividad del material conductor hasta el orden de 0,5 $\Omega \cdot m$ manteniendo prestaciones mecánicas compatibles con el uso estructural, así como formular un electrolito cementicio con conductividad iónica medible y resistencia suficiente para integrarse en una celda multicapa. La configuración final seleccionada combinó un ánodo con hierro disperso, una capa electrolítica con KOH y barras de acero galvanizadas con níquel como colectores/cátodo. El demostrador final, formado por diez celdas conectadas en configuración 5s2p, fue cargado mediante un panel fotovoltaico de 20 W y alimentó cargas LED de baja potencia. La tecnología queda validada como prueba funcional de pavimento activo, aunque requiere optimización en densidad energética, control de humedad, autodescarga y durabilidad en servicio.

Palabras Clave: pavimento de hormigón; batería estructural; almacenamiento fotovoltaico; Smart City.

1 Introducción

La integración de generación fotovoltaica en entornos urbanos está avanzando con rapidez, pero sigue existiendo una limitación clara: la energía se produce durante el día y parte de los consumos urbanos de interés, como la iluminación, la señalización de seguridad o determinados sensores, aparecen en periodos de baja o nula radiación solar. Esta diferencia entre generación y demanda obliga a incorporar almacenamiento distribuido si se quiere aprovechar localmente la energía generada.

La solución convencional consiste en colocar baterías en armarios, báculos o cajas técnicas. Desde el punto de vista eléctrico es una solución conocida, pero no siempre encaja bien en el espacio público: ocupa volumen, requiere protección frente a vandalismo, añade mantenimiento y depende de tecnologías basadas en materiales críticos. POWERCRETE parte de una idea distinta: utilizar el propio pavimento como soporte de almacenamiento, convirtiendo una infraestructura pasiva en un elemento con doble función estructural y energética.

El concepto se basa en el codiseño de materiales cementicios con prestaciones mecánicas y electroquímicas. En lugar de introducir una batería convencional bajo el pavimento, la propia matriz cementicia se modifica para actuar como electrodo o como electrolito sólido. De este modo, el elemento constructivo puede integrarse en una sección de vía urbana o de paso peatonal, almacenar energía fotovoltaica y suministrarla a dispositivos cercanos de baja potencia.

La Figura 1 resume el principio de funcionamiento adoptado: captación fotovoltaica, electrónica de carga, celda de hormigón integrada en el pavimento y suministro a cargas urbanas ligeras. La comunicación se centra en la ruta seguida para pasar de los materiales electroactivos a un demostrador funcional.

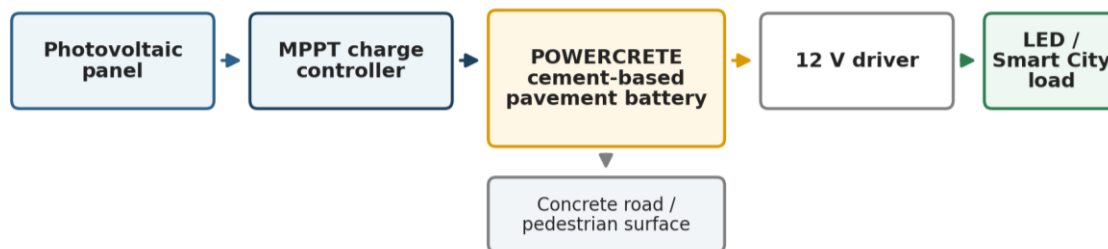


Figura 1. Esquema conceptual de funcionamiento de POWERCRETE como pavimento activo.

2 Objetivos y planteamiento metodológico

El desarrollo técnico se estructuró en una secuencia progresiva. Primero se abordó la formulación de materiales cementicios capaces de conducir electrones o iones. Después se integraron esos materiales en celdas unitarias para comparar configuraciones. Por último, se trasladó la solución a un módulo de pavimento, incluyendo la verificación estructural, la arquitectura de carga fotovoltaica y la monitorización del sistema.

El criterio de diseño no fue únicamente maximizar la salida eléctrica en laboratorio. Para que la solución tuviera sentido como producto de construcción, debía poder fabricarse, mantener cierta robustez frente a la humedad, incorporar elementos de refuerzo y conservar una respuesta mecánica compatible con un pavimento urbano. La Tabla 1 resume los objetivos principales y su traducción en resultados técnicos del proyecto.

Tabla 1. Objetivos técnicos y resultados funcionales de POWERCRETE.

Objetivo	Enfoque técnico	Resultado funcional
Material conductor	Reducir la resistividad del hormigón/mortero mediante fibra de carbono, negro de humo y fase metálica.	Electrodo base cemento con resistividad eléctrica del orden de 0,5 $\Omega \cdot m$ y resistencia mecánica estructural.
Electrolito sólido	Formular una matriz cementicia alcalina con KOH que permita transporte iónico.	Capa electrolítica con conductividad iónica medible y resistencia a compresión superior a 9 MPa.
Celda de batería	Comparar configuraciones BAT0, BAT2 y BAT3 considerando energía, seguridad, humedad y escalabilidad.	Selección de BAT3 como compromiso entre funcionamiento electroquímico y viabilidad constructiva.
Pavimento activo	Integrar celdas en una solución estructural conectada a un sistema fotovoltaico.	Demostrador 5s2p de diez celdas, panel de 20 W, MPPT, monitorización y balizas LED.

3 Materiales cementicios electroactivos

3.1 Hormigón y mortero conductor para electrodos

El primer reto fue transformar una matriz cementicia, normalmente poco conductora, en un material capaz de actuar como electrodo sin perder su condición de material constructivo. En una batería de hormigón, esta capa no puede diseñarse únicamente desde la electroquímica: debe poder amasarse, colocarse, compactarse y endurecer con una resistencia compatible con su integración en un elemento de pavimento. Por ello, la selección de adiciones se planteó con cinco criterios simultáneos: reducción de resistividad, dispersión homogénea, mantenimiento de resistencia, disponibilidad industrial y coste razonable.

La primera línea de trabajo partió de un hormigón conductor con árido, fibras de carbono, negro de humo y aditivos superplastificantes. Sin embargo, al avanzar en la caracterización se observó que el árido grueso introducía discontinuidades y zonas de aislamiento dentro de la probeta, lo que dificultaba la formación de una red conductora estable. Esta conclusión llevó a evolucionar hacia un mortero conductor, más homogéneo y adecuado para controlar la distribución de las adiciones funcionales en la matriz cementicia.

Las adiciones carbonosas se seleccionaron por su efecto complementario. La fibra de carbono aporta caminos conductores de mayor longitud y ayuda a coser la matriz, mientras que el negro de humo actúa como fase fina capaz de ocupar huecos entre partículas y mejorar el contacto eléctrico a escala microscópica. El incremento de estas adiciones reduce la resistividad, pero también penaliza la reología: por encima de determinados contenidos la mezcla pierde trabajabilidad, aumenta la demanda de agua o aditivo y se vuelve menos robusta para una fabricación reproducible. Por eso el diseño no se basó en añadir el máximo material conductor, sino en encontrar el punto de equilibrio entre conductividad y comportamiento fresco.

Tabla 2. Criterios de selección de adiciones para el mortero conductor.

Adición o decisión de diseño	Función técnica	Criterio de selección
Fibra de carbono	Crear caminos conductores de mayor longitud dentro de la matriz.	Alta eficacia conductora, pero con contenido limitado para no perder trabajabilidad.
Negro de humo/carbono	Aumentar la conectividad eléctrica a escala fina entre partículas.	Elevada capacidad de reducción de resistividad y necesidad de buena dispersión.
Supresión de árido grueso	Evitar discontinuidades aislantes y mejorar la homogeneidad funcional.	Mayor control de la red conductora y de la interfaz con el electrolito.
Hierro en polvo	Actuar como fase activa anódica y mejorar la respuesta electroquímica.	Material abundante, más seguro y más escalable que el níquel disperso en masa.
Paquete conductor final	CEM II/B-M (S-L) 42,5 R, fibra de carbono (~1,2 %) y negro de humo (~3 %).	Equilibrio entre resistividad próxima a $0,5 \Omega \cdot m$ y resistencia 30-50 MPa.

Durante la optimización también se evaluó el uso de hidroxipropil-metilcelulosa como ayuda de dispersión de las partículas carbonosas. Su interés estaba en evitar la formación de grumos de negro de humo y favorecer una distribución más estable dentro de la lechada de cemento. No obstante, su función se consideró auxiliar, no como material activo principal: la ruta final se apoyó en la combinación de fibra de carbono, negro de humo, aditivos plastificantes y control del procedimiento de amasado para conseguir una red conductora suficientemente continua sin complicar de forma innecesaria la dosificación.



Figura 2. Ensayo de resistividad eléctrica de materiales base cemento.

El último paso fue introducir una fase metálica activa compatible con la arquitectura electroquímica. En la solución final se incorporó hierro en polvo en la capa anódica, no solo como material conductor, sino como componente funcional de la reacción de la celda. Esta decisión permitió mantener una formulación de base cementicia más segura y escalable que las alternativas con níquel disperso en masa. Desde el punto de vista de IECA, este punto es especialmente relevante: el material resultante no es un hormigón convencional con una adición aislada, sino un mortero base cemento en el que la dosificación, la reología y la red conductora se diseñan de forma integrada.

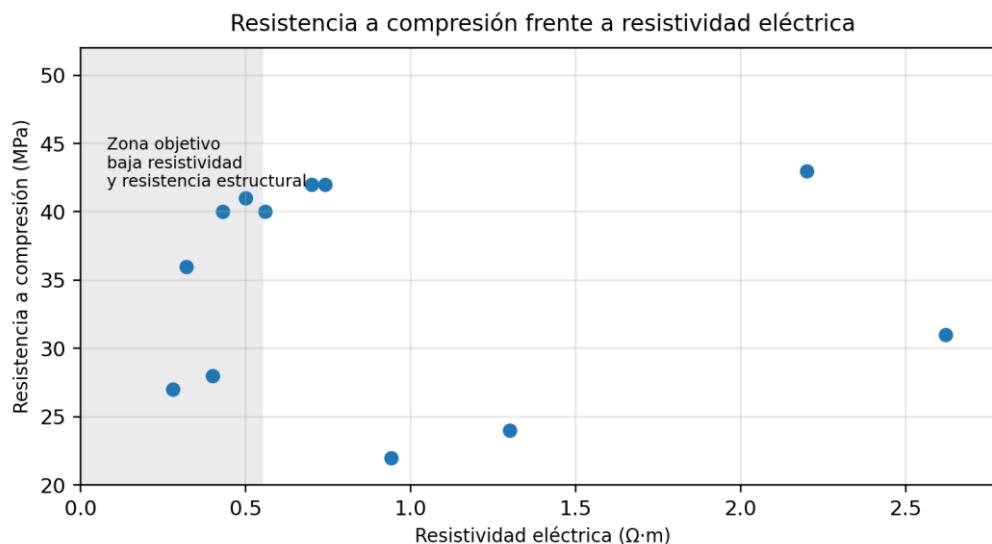


Figura 3. Relación entre resistencia a compresión y resistividad en las mezclas conductoras evaluadas.

La validación experimental mostró una reducción de varios órdenes de magnitud respecto a un hormigón convencional. Se alcanzaron resistividades próximas a 0,43-0,5 $\Omega \cdot m$ y resistencias a compresión en el rango de 30-50 MPa. Este resultado es relevante porque permite que el material no se entienda como un simple componente eléctrico, sino como una parte del elemento prefabricado o de la sección de pavimento.

3.2 Electrolito sólido alcalino

En paralelo se desarrolló una capa electrolítica cementicia. Su función no es conducir electrones, sino permitir el transporte de iones entre los electrodos, separarlos físicamente y evitar cortocircuitos. Este aspecto es central en POWERCRETE, porque obliga a resolver una contradicción propia de los materiales cementicios: se necesita una matriz sólida, estable y resistente, pero con una fase porosa y alcalina suficientemente conectada para que pueda producirse el intercambio iónico.

La primera alternativa analizada fue el uso de licor negro procedente de la industria papelera, planteado como fuente alcalina circular por su contenido en compuestos sódicos. La idea era atractiva desde la perspectiva de sostenibilidad, pero no resultó adecuada como base de una dosificación reproducible. La variabilidad composicional, la presencia de impurezas y la dificultad para garantizar una concentración estable de especies alcalinas hacían difícil comparar resultados y trasladarlos después a una fabricación controlada. Por ese motivo se abandonó como ruta principal y se avanzó hacia reactivos alcalinos comerciales.

La investigación comparó distintas familias de hidróxidos y adiciones: NaOH, KOH, LiOH, Ca(OH)₂, Mg(OH)₂ y resinas de intercambio iónico. Los hidróxidos alcalinos aportan especies móviles y elevan la concentración de OH⁻, mientras que las resinas pueden retener y liberar aniones, ayudando a estabilizar el medio. Sin embargo, no todos los compuestos son igualmente adecuados para una matriz cementicia: algunos presentan menor solubilidad, mayor sensibilidad a la carbonatación, costes más altos o peor compatibilidad con el proceso de fabricación.

La formulación final se orientó hacia una lechada saturada con KOH. La elección se apoyó en su buen desempeño electroquímico, su elevada alcalinidad y la posibilidad de preparar una composición más controlada que con subproductos variables. Frente a un mortero convencional, la solución electrolítica redujo la presencia de áridos para favorecer la continuidad de la fase iónica. En otras palabras, la capa se diseñó como un electrolito sólido de base cemento, no como un mortero estructural ordinario.



Figura 4. Fabricación y ensayo mecánico de muestras de electrolito sólido base cemento.

El control de humedad se identificó desde esta fase como un parámetro crítico. Una cierta cantidad de agua es imprescindible para la movilidad iónica, pero el exceso, la pérdida de humedad o la fuga de solución alcalina pueden afectar a la estabilidad de la celda. Por ello, el electrolito no se evaluó solo por su conductividad inicial, sino también por su resistencia, su comportamiento con el curado y su capacidad para integrarse entre capas sin generar cortocircuitos ni discontinuidades mecánicas.

La dosificación final incorporó cemento, agua, KOH, aditivo y retardante. El resultado fue una conductividad iónica aproximada de 2,89 mS/m y una resistencia a compresión superior a 9 MPa, suficiente para integrarse en la celda como capa funcional, aunque no como capa estructural principal. Desde el punto de vista de la aplicación constructiva, este resultado demuestra que es posible diseñar un material base cemento que actúe como separador iónico sólido y que, al mismo tiempo, sea compatible con una celda de pavimento.

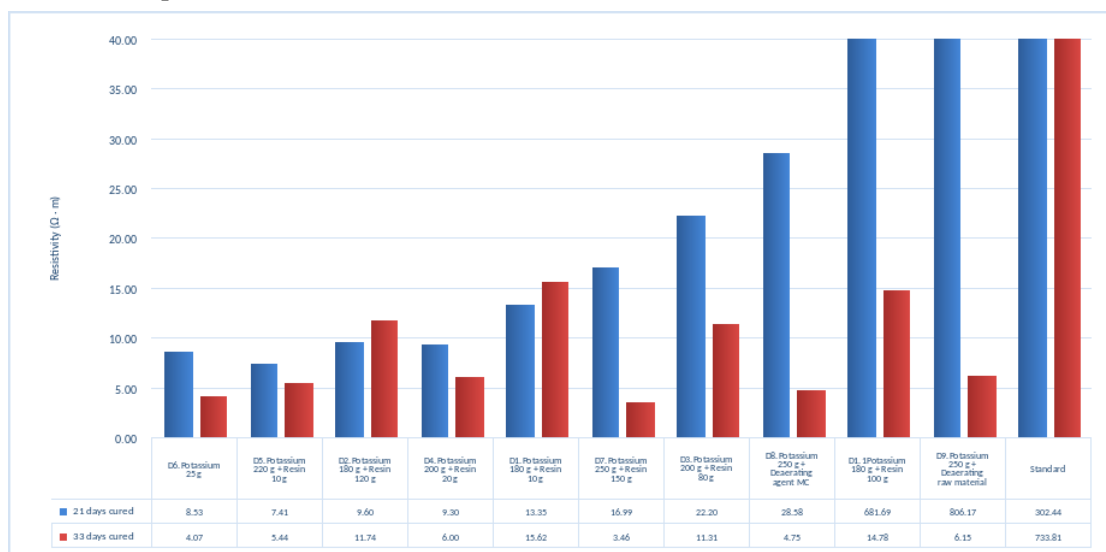


Figura 5. Evolución de resistividad de formulaciones de electrolito base cemento a 21 y 33 días.

Tabla 3. Prestaciones relevantes de los materiales funcionales seleccionados.

Material	Función en la celda	Prestación alcanzada	Condición de diseño
Mortero/hormigón conductor	Electrodo y colector distribuido	Resistividad aproximada 0,43-0,5 $\Omega \cdot m$; resistencia 30-50 MPa.	Debe mantener trabajabilidad y capacidad mecánica.
Electrolito base cemento con KOH	Separador iónico sólido	Conductividad iónica aproximada 2,89 mS/m; resistencia >9 MPa.	Debe conservar humedad y evitar cortocircuitos.
Acero galvanizado con níquel	Colector/cátodo	Superficie metálica activa compatible con la celda híbrida.	Debe integrarse como refuerzo y elemento eléctrico.
Hierro en polvo disperso	Material activo anódico	Mejora la función electroquímica sin introducir los problemas del níquel disperso.	Debe distribuirse de forma homogénea en la matriz.

4 Configuración de celda y prueba de concepto

Con los materiales definidos se compararon varias configuraciones de batería. La primera decisión fue distinguir entre celdas de tipo probeta, útiles para comprobar actividad electroquímica, y celdas por capas, más próximas al concepto de pavimento. Esta distinción fue importante porque una celda que funciona bien en laboratorio no necesariamente es válida como solución constructiva: debe poder integrarse en capas, incorporar refuerzo, mantener separación entre electrodos y permitir conexiones eléctricas repetibles.

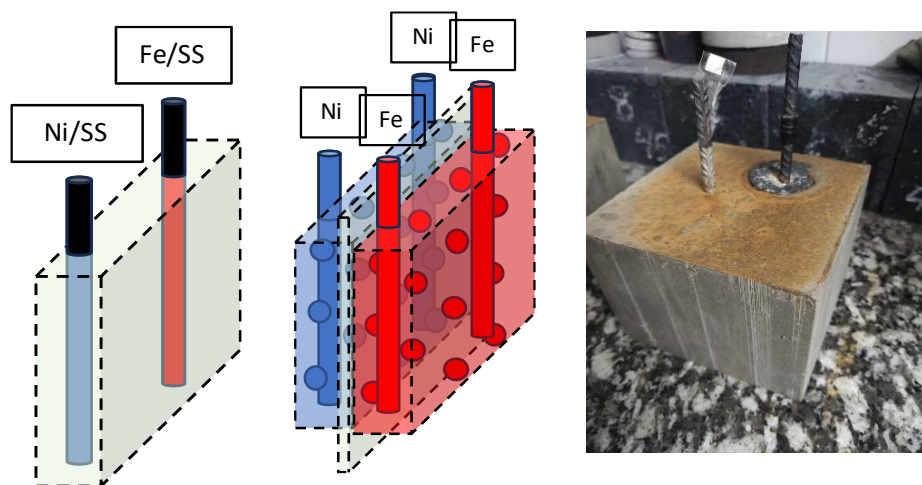


Figura 6. Esquema simplificado de configuración de celdas POWERCRETE.

BAT0 representaba la aproximación más sencilla, tipo probeta, con electrodos metálicos embebidos en un medio alcalino. Su interés fue servir como referencia de comportamiento electroquímico y permitir ensayos rápidos de carga y descarga. No obstante, su geometría no resolvía la integración estructural, porque no reproducía una sección de pavimento ni una arquitectura clara de ánodo, electrolito y cátodo. Por tanto, sus buenos resultados iniciales no podían trasladarse directamente a un producto de construcción.

BAT2 incorporaba ya una disposición por capas, con mortero conductor, electrolito cementicio y una fase catódica con compuestos de níquel dispersos. Esta configuración era más cercana al concepto previsto, pero introdujo problemas prácticos relevantes. La presencia de material de níquel en masa afectaba a la reología, dificultaba la homogeneidad de fabricación y planteaba problemas de seguridad y salud durante la manipulación de polvos. Además, los resultados fueron menos regulares, lo que reducía su interés para un futuro escalado.

BAT3 fue la solución híbrida finalmente seleccionada. En ella, el ánodo se basa en el mortero conductor con hierro disperso, el electrolito se formula con KOH y el cátodo/colector se resuelve mediante acero corrugado galvanizado con níquel. Así se mantiene la lógica de una batería Fe-Ni, pero evitando introducir níquel pulverulento en toda la masa del mortero. La celda conserva una arquitectura constructiva clara y, al mismo tiempo, reduce riesgos de fabricación, mejora la estabilidad de resultados y permite que las barras actúen tanto como colectores eléctricos como elementos de refuerzo.



Figura 7. Configuraciones de celda BAT0, BAT2 y BAT3 evaluadas en POWERCRETE.

Tabla 4. Comparación cualitativa de las configuraciones de celda estudiadas.

Criterio	BAT0	BAT2	BAT3
Ajuste al concepto inicial de pavimento	No	Sí	Sí
Uso de hormigón/mortero armado como electrodo	No	Sí	Sí
Rendimiento energético inicial	Alto	Medio	Medio
Capacidad estructural	Baja	Buena	Buena
Respuesta frente a humedad	Poco consistente	Consistente	Consistente
Estabilidad de resultados	Buena	Irregular	Buena
Níquel disperso en el electrodo	No aplica	Problemas de reología y seguridad	No aplica

La selección de BAT3 no responde a una maximización directa de la densidad energética inicial. BAT0 ofrecía mejor rendimiento electroquímico bruto en condiciones de laboratorio, pero se alejaba del concepto constructivo y tenía menor valor como pavimento. BAT2 mantenía la lógica por capas, aunque el uso de níquel disperso generaba problemas de reología, seguridad de fabricación y variabilidad de resultados. BAT3 mantuvo la arquitectura compatible con el pavimento, redujo los problemas asociados al níquel disperso y ofreció una respuesta más estable.

A partir de BAT3 se definió una celda unitaria entendida como elemento bicapa funcional: una zona conductora con material activo anódico, una zona electrolítica alcalina que permite la migración iónica y barras/colectores metálicos que cierran el circuito. La fabricación de las celdas obligó a cuidar especialmente la distancia entre mallas, la continuidad entre capas y la adherencia en la interfaz, ya que estos factores condicionan la resistencia interna y la autodescarga. Las iteraciones posteriores de celdas mostraron que reducir la distancia de migración iónica y aumentar la superficie efectiva de contacto mejoraba de forma apreciable el comportamiento de descarga.

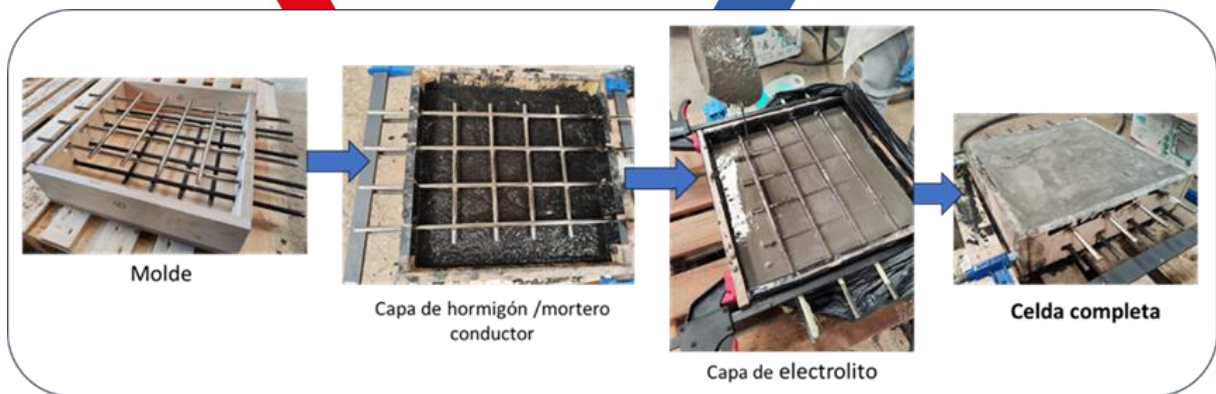


Figura 8. Secuencia de fabricación de la celda unitaria de hormigón BAT3

5 Integración en pavimento y arquitectura eléctrica

La celda seleccionada se trasladó a un concepto de módulo de pavimento. Desde el punto de vista estructural se verificó una solución bicapa, con una capa conductora y una capa electrolítica reforzadas mediante barras de acero. En el modelo se consideraron propiedades mecánicas coherentes con los materiales desarrollados: módulo elástico de 35,65 GPa para el hormigón conductor, 22 GPa para el electrolito y 200 GPa para el acero B500S. La evaluación confirmó que la celda puede concebirse como elemento constructivo para usos urbanos ligeros, siempre que se controle el recubrimiento, la interfaz entre capas y la protección frente a pérdida de humedad.

Tabla 5. Propiedades mecánicas empleadas para la evaluación estructural de la celda unitaria POWERCRETE

Propiedad	Capa Electrolito	Capa Hormigón Conductor	Refuerzo pasivo B500S
Módulo Elástico, E (GPa)	22	35.65	200
Coefficiente de Poisson, ν (-)	0.20	0.20	0.30
Densidad (kg/m^3)	1850	2800	7850

La solución integrada no se planteó como una batería enterrada bajo el pavimento, sino como un pavimento prefabricado activo. Las celdas se concibieron como piezas de 40 x 40 cm, con aproximadamente 10 cm de espesor total, en las que cada capa mantiene una función concreta. La geometría permitió pasar de la escala de probeta a una escala representativa de construcción, incorporando armaduras, bornes de conexión y una secuencia de fabricación compatible con moldes y curado controlado.

En el escalado hacia el demostrador se conectaron diez celdas. La topología final fue 5s2p: dos ramas en paralelo, cada una con cinco celdas en serie. Esta configuración permite aproximarse a una tensión de banco del orden de 10 V, coherente con la tensión de trabajo de cinco celdas de alrededor de 2 V, y duplicar la capacidad disponible frente a una única rama. La arquitectura se escogió para alimentar cargas reales de baja potencia sin exigir a cada celda una demanda excesiva.

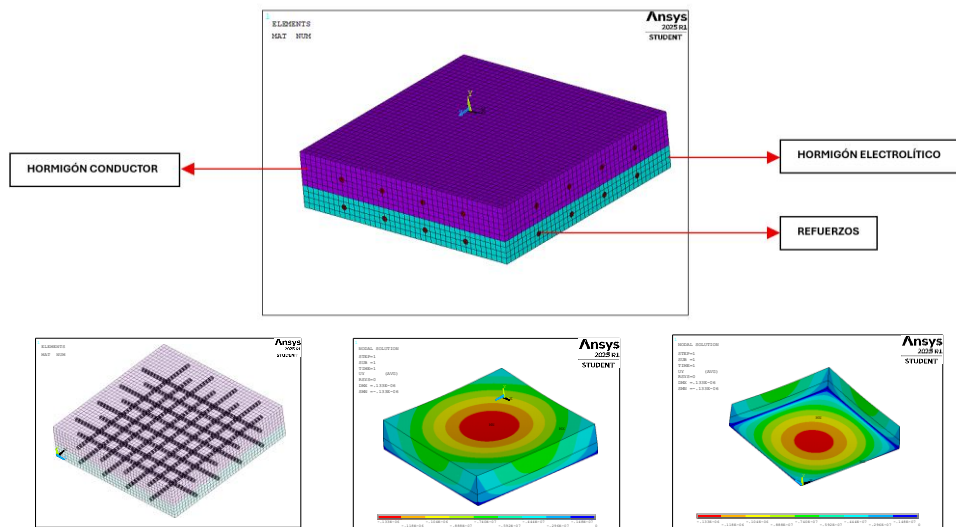


Figura 9. Modelo FEM de la celda multicapa considerada en el análisis.

El demostrador final seleccionado utilizó diez celdas de hormigón. Estaban conectados como dos ramas paralelas, cada rama conteniendo cinco celdas en serie. Esta disposición 5s2p proporcionaba un voltaje nominal cercano a 10 V, asumiendo aproximadamente 2 V por celda, y una mayor capacidad en comparación con una rama en serie única. Por ello, el sistema reproducía la estructura básica de un punto autónomo de iluminación solar: panel fotovoltaico, almacenamiento embebido, carga de controlador y LED.

La arquitectura eléctrica se diseñó específicamente para el comportamiento de las celdas. No se emplearon cargadores comerciales, ya que estas celdas no siguen las curvas típicas de baterías de litio o plomo. Se desarrolló un convertidor DC-DC con seguimiento del punto de máxima potencia, sensores de tensión y corriente, comunicación inalámbrica y salida serie para registro de datos. Esta electrónica permitió adaptar la energía del panel fotovoltaico a la respuesta del banco POWERCRETE y, al mismo tiempo, disponer de datos para interpretar la evolución de la carga y descarga.

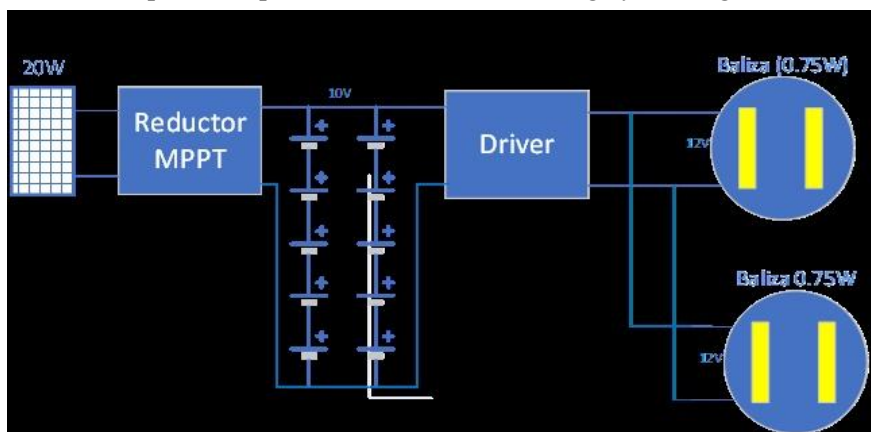


Figura 10. Esquema eléctrico del demostrador con panel fotovoltaico, MPPT, banco de celdas y balizas LED.

Tabla 6. Elementos principales del demostrador final.

Elemento	Configuración	Función
Banco POWERCRETE	10 celdas en configuración 5s2p.	Almacenamiento embebido en el pavimento.
Panel fotovoltaico	Potencia nominal aproximada de 20 W.	Fuente de energía para la carga diurna.
Convertidor DC-DC/MPPT	Control específico de carga y seguimiento del punto de máxima potencia.	Acondicionar la energía del panel y proteger las celdas.
Monitorización	Medición de tensión, corriente y variables de carga; comunicación Bluetooth/serie.	Seguimiento del comportamiento del sistema.
Carga LED	Dos balizas de baja potencia, alrededor de 0,75 W cada una.	Simulación de señalización o alumbrado urbano autónomo.

6 Validación del demostrador y análisis de resultados

La validación final se realizó en un entorno controlado para disponer de seguridad, repetibilidad e instrumentación suficiente antes de pasar a un entorno urbano abierto. El demostrador reprodujo un caso de uso próximo a un paso peatonal o a una solución de señalización autónoma: módulo de batería en pavimento, panel fotovoltaico, electrónica de carga y balizas LED. Esta decisión permitió ensayar el sistema completo en condiciones exteriores controladas y ajustar la instrumentación sin los riesgos asociados a una vía pública abierta.

Durante los ensayos, el panel fotovoltaico permitió elevar el banco de celdas hacia tensiones próximas a 10 V, coherentes con la conexión de cinco celdas en serie. La descarga se realizó a través de un driver de 12 V para alimentar las balizas. El comportamiento observado confirmó la funcionalidad del ciclo completo: captación solar, carga controlada, almacenamiento en matriz cementicia y suministro a una carga real de baja potencia. El sistema no se limitó a registrar una tensión en vacío, sino que alimentó un consumo real asociado a una aplicación urbana.

La caracterización previa de celdas individuales permitió interpretar mejor el comportamiento del banco. En las primeras series se observaron celdas con retención limitada, autodescarga rápida o degradación asociada a fisuración y pérdida de humedad. Las iteraciones C7-C10 mejoraron el rendimiento al reducir la distancia entre mallas y aumentar la superficie de contacto entre capas; la celda C7 fue especialmente útil para confirmar que la geometría de la interfaz influye tanto como la propia química. En el lote C11-C19 se buscó una respuesta más homogénea para disponer de celdas seleccionables en el demostrador final.

Uno de los resultados más claros fue la influencia de la humedad. Las celdas secas tendían a aumentar su resistencia y a comportarse de forma casi resistiva, mientras que la rehidratación y la protección frente a pérdida de humedad mejoraban la capacidad y estabilizaban la descarga. Esta observación es fundamental para el desarrollo futuro, porque confirma que el electrolito sólido debe conservar una humedad interna suficiente y que el sellado perimetral no es un detalle constructivo menor, sino parte del diseño electroquímico.

El modelo eléctrico equivalente ayudó a interpretar las limitaciones del sistema. Se identificaron resistencias internas apreciables, autodescarga y sensibilidad a la humedad, factores esperables en una tecnología cementicia en fase temprana. Los ajustes indicaron resistencias de serie en reposo del orden de 2-5 Ω , incrementos aparentes al inicio de carga por sobrepotenciales y resistencias de autodescarga suficientemente bajas como para explicar la pérdida de tensión cuando el sistema no está estabilizado. Por tanto, el resultado debe interpretarse como validación de viabilidad y no como producto industrial final.

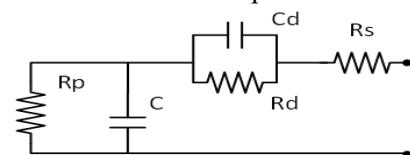


Figura 11. Modelo eléctrico equivalente de comportamiento de la celda.

En términos de demostración, el resultado principal fue haber pasado de probetas y celdas aisladas a un módulo funcional de pavimento activo. El sistema integrado cargó con un panel de 20 W, operó con control MPPT, suministró energía a balizas LED y permitió registrar variables eléctricas en tiempo real. El demostrador también delimitó con precisión las siguientes líneas de mejora: aumentar la densidad energética, reducir la autodescarga, mejorar la estabilidad de interfaces, proteger la humedad interna y optimizar el protocolo de carga.

Tabla 7. Lectura técnica de los resultados del demostrador final.

Aspecto validado	Resultado observado	Implicación para el desarrollo
Carga fotovoltaica	El panel de 20 W elevó el banco hacia tensiones próximas a 10 V.	La topología 5s2p es coherente con cinco celdas de aproximadamente 2 V en serie.
Suministro a carga real	Las balizas LED se alimentaron mediante driver de 12 V.	Se validó una función urbana de baja potencia, no solo una medida en vacío.
Modelo eléctrico	Se observaron resistencias internas y autodescarga apreciables.	La mejora debe centrarse en interfaces, humedad y protocolo de carga.
Escalado constructivo	El sistema pasó de celdas aisladas a módulo de pavimento instrumentado.	El concepto es viable como demostrador, aunque requiere optimización antes de industrializarse.

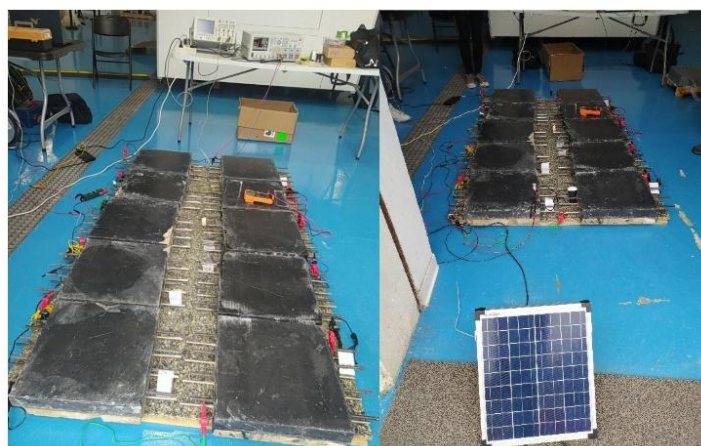


Figura 12. Demostrador final con banco de celdas POWERCRETE y panel fotovoltaico.

7 Discusión

POWERCRETE no debe entenderse como una alternativa directa a baterías convencionales de alta capacidad, sino como un concepto de infraestructura activa para aplicaciones distribuidas, robustas y de baja potencia. Su valor no reside solo en la energía almacenada, sino en la integración dentro de un elemento estructural existente, sin ocupación adicional del espacio público y con protección física por la propia infraestructura.

Las principales palancas de mejora están bien identificadas. La primera es el control de humedad: la conducción iónica necesita presencia de agua, pero el secado, la entrada no controlada de agua o la pérdida de electrolito pueden alterar la capacidad y aumentar la autodescarga. La segunda es la interfaz entre capas, donde se concentran parte de las pérdidas y de los problemas de estabilidad. La tercera es el aumento de superficie activa de los electrodos y la mejora de los colectores de corriente, que permitiría incrementar la densidad energética sin penalizar la resistencia mecánica.

En todos los casos, la solución debe definirse como un sistema completo y no como una celda aislada: mezcla, proceso de fabricación, conexión eléctrica, sellado, electrónica de carga, monitorización y protocolo de inspección.

8 Conclusiones

- El proyecto ha demostrado la viabilidad técnica de integrar almacenamiento electroquímico en un elemento de pavimento de base cementicia, manteniendo una función estructural compatible con aplicaciones urbanas ligeras. La solución desarrollada combina materiales conductores, electrolito sólido alcalino, refuerzos/colectores y electrónica específica de carga y monitorización.
- La formulación de los materiales fue determinante. El material conductor alcanzó resistividades del orden de $0,5 \Omega \cdot m$ con prestaciones mecánicas suficientes, mientras que el electrolito cementicio con KOH consiguió conductividad iónica y resistencia compatibles con su integración en una celda multicapa. Estos resultados permiten plantear el hormigón no solo como material resistente, sino como soporte activo de funciones energéticas.
- La comparación entre BAT0, BAT2 y BAT3 mostró que la configuración más adecuada no es necesariamente la de mayor rendimiento inicial, sino la que equilibra función electroquímica, seguridad, estabilidad, fabricabilidad y comportamiento estructural. Por ello se seleccionó BAT3 como ruta principal de desarrollo.
- El demostrador final, formado por diez celdas en configuración 5s2p, panel fotovoltaico de 20 W, control MPPT, monitorización y balizas LED, validó el ciclo completo de funcionamiento. La tecnología queda situada en una etapa de prueba funcional avanzada, con margen claro de optimización en autonomía, autodescarga, durabilidad, control de humedad y escalado industrial.
- La línea de desarrollo abierta por POWERCRETE permite avanzar hacia pavimentos activos para ciudades inteligentes, en una lógica de Energy-as-a-Pavement. La aplicación más realista a corto plazo se encuentra en sistemas urbanos distribuidos y de baja potencia, donde la integración discreta del almacenamiento en el pavimento puede aportar ventajas frente a soluciones convencionales visibles y expuestas.

9 Agradecimientos

El proyecto POWERCRETE (CPP2021-008978) ha sido desarrollado mediante colaboración público-privada y financiación de la Agencia Estatal de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación. Se reconoce el trabajo conjunto de Hormigones del Vinalopó, I2CON, IECA, ITCL, ITG, LEITAT y la Universidad de Oviedo-GEII en el desarrollo de materiales, arquitectura energética, caracterización electroquímica, diseño constructivo y validación del demostrador.

