

## **IDENTIDAD DIGITAL EN MATERIALES BASE CEMENTO: PASAPORTE DIGITAL DE PRODUCTO**

Carlos Fernández Navarro, César Bartolomé Muñoz, Arturo Alarcón Barrios

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 Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid, España, aalarcon@ieca.es

### **Resumen**

El trabajo desarrolló una solución de identidad digital para materiales base cemento basada en dos elementos complementarios: un pasaporte digital de producto estructurado en XML y un vínculo físico-digital mediante tecnología RFID. El pasaporte se concibió como una estructura de datos capaz de reunir información prestacional, reglamentaria y ambiental del producto, incluyendo características técnicas, composición, datos de fabricación y categorías de impacto ambiental derivadas del análisis de ciclo de vida. Para ello se partió de la lógica Smart CE y de las declaraciones digitales, se incorporaron identificadores GUID para estabilizar el significado de propiedades y unidades, y se definieron prototipos diferenciados para cemento y hormigón preparado. En paralelo, se evaluó la viabilidad de tags RFID pasivos embebidos en hormigón mediante una fase de selección tecnológica, ensayos de laboratorio y una estrategia de validación industrial. Los resultados mostraron que la humedad condiciona la lectura a edades tempranas, que la armadura puede actuar como barrera o como antena pasiva según la configuración, y que los tags cerámicos seleccionados resisten los esfuerzos de amasado y vibrado. Finalmente, la comunicación conecta esta identidad digital con sistemas de captura de datos como Blockhormigón, donde los datos monitorizados de producción y transporte pueden alimentar automáticamente el pasaporte y servir de base para declaraciones ambientales, control de calidad y trazabilidad durante la vida útil del activo.

Palabras Clave: pasaporte digital de producto; RFID; materiales base cemento; trazabilidad, BIM, Análisis de Ciclo de Vida.

### **1 Introducción**

La digitalización de los productos de construcción está dejando de ser una cuestión documental para convertirse en una condición de trazabilidad, interoperabilidad y gestión ambiental. En materiales base cemento este cambio tiene una dificultad añadida: el producto se integra en elementos de larga vida útil, pierde visibilidad física una vez colocado y, en el caso del hormigón, parte de la información relevante se genera durante producción, transporte y puesta en obra. La identidad digital debía resolver precisamente esa discontinuidad entre el material físico y la información que lo describe.

El enfoque desarrollado se basó en una idea sencilla: el pasaporte digital de producto no debía limitarse a reproducir documentos en formato electrónico, sino organizar los datos para que pudieran ser leídos por personas y por máquinas. Esa estructura debía mantener la relación con la declaración reglamentaria, incorporar información ambiental y conservar la trazabilidad del producto o elemento durante su vida útil. Para que esta trazabilidad fuera operativa, la información digital debía quedar vinculada al material mediante un identificador físico robusto, legible sin contacto visual directo y compatible con hormigón fresco, hormigón endurecido y armaduras.

El trabajo, por tanto, integró tres líneas que normalmente se tratan de forma separada. La primera fue la construcción de prototipos XML de pasaporte digital para cemento y hormigón. La segunda fue la validación de RFID pasivo embebido como llave física de acceso al registro digital. La tercera fue la conexión con sistemas de captura de datos de proceso, como Blockhormigón, capaces de transformar información de planta, transporte y suministro en datos útiles para el pasaporte. La Figura 1 resume esta arquitectura funcional.

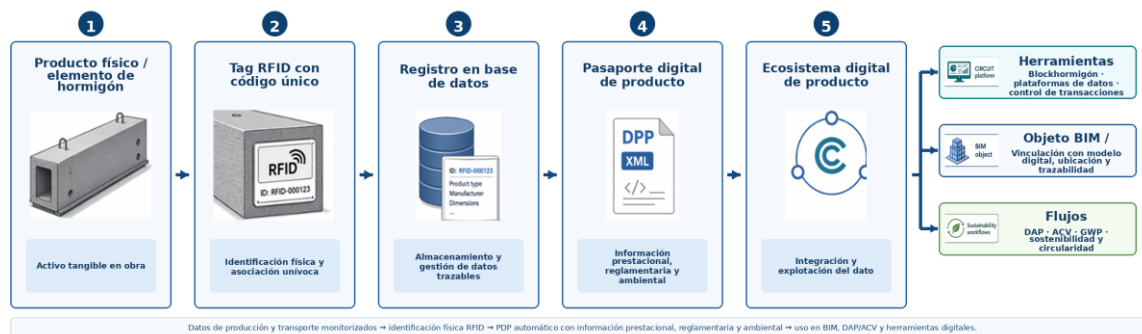


Figura 1. Ecosistema RFID-PDP-BIM y conexión con herramientas digitales.

## 2 Objetivos y enfoque metodológico

El objetivo general fue demostrar una ruta técnicamente viable para dotar a los materiales base cemento de una identidad digital persistente. Esa identidad debía cumplir cuatro condiciones: estructurar los datos del producto, conservar el significado de cada propiedad, enlazar el registro con el material físico y permitir que los datos generados en la cadena de valor del hormigón alimentaran el pasaporte de forma fiable.

La metodología se articuló en fases encadenadas. Primero se definió la arquitectura del pasaporte digital, tomando como referencia la lógica de declaraciones digitales de producto y los principios de plantillas de datos. Después se desarrollaron prototipos XML para cemento y hormigón preparado, incorporando tanto información técnica como ambiental. En paralelo se revisaron tecnologías de identificación y se seleccionaron tags RFID pasivos para su ensayo en matrices cementicias. Finalmente, los resultados de laboratorio se trasladaron a una lógica de escalado industrial y se conectaron con los datos de producción y transporte que captura Blockhormigón.

Tabla 1. Estructura metodológica del desarrollo.

Fase	Trabajo realizado	Resultado obtenido
Modelo de datos	Construcción de una estructura XML basada en declaración digital, información adicional y datos ambientales.	PDP legible por máquina, con jerarquía clara y campos técnicos, reglamentarios y ambientales.
Semántica	Uso de GUID para propiedades, unidades, relaciones y conceptos técnicos.	Datos intercambiables sin depender solo del texto visible o del idioma.
RFID	Selección de tags, ensayos de lectura, humedad, armadura, amasado y dosificación.	Estrategia viable para usar el tag como identificador físico, no como contenedor completo del PDP.
Escalado	Traslado a elemento prefabricado y definición de configuraciones de lectura y dosificación.	Criterios para una implantación industrial compatible con hormigón armado.
Blockhormigón	Conexión con datos de planta, transporte, visión artificial, IoT y DLT.	Fuente de datos verificados para alimentar el PDP y automatizar información ambiental.

### 3 Desarrollo y estructura del XML del pasaporte digital

El pasaporte digital se desarrolló como un modelo de datos jerárquico. La elección de XML respondió a una razón práctica: permite representar relaciones de dependencia entre declaración, característica, propiedad, valor, unidad y referencia documental. El archivo no se concibió como un anexo estático, sino como una forma estructurada de conservar y transferir información de producto en un entorno interoperable.

El origen del XML se situó en la lógica Smart CE y en las declaraciones digitales de prestaciones. En el caso del cemento, esta ruta es más directa porque ya existe un marco de declaración muy consolidado vinculado a EN 197-1 y a la normalización española de la declaración digital. Por ese motivo, el prototipo de cemento pudo construirse sobre una jerarquía reglamentaria más estable. En cambio, el hormigón preparado exigió una aproximación más experimental, al no disponer de una ruta equivalente de marcado CE armonizado. Aun así, se mantuvo la misma filosofía: núcleo de declaración, capa de información adicional y bloque ambiental integrado.

La raíz del modelo se organizó en torno a Declarations. Desde ese nodo se despliegan dos ramas principales. La primera, DeclarationOfPerformance, conserva la lógica de declaración del producto: prestaciones declaradas, características esenciales, propiedades de primer y segundo nivel y valor declarado. La segunda, AdditionalInformation, permite incorporar información que no encaja de forma directa en el núcleo declarativo, pero que resulta esencial para trazabilidad, sostenibilidad y uso posterior del dato: composición, parámetros de dosificación, clasificación ambiental, información de EPD y enlaces a registros asociados.

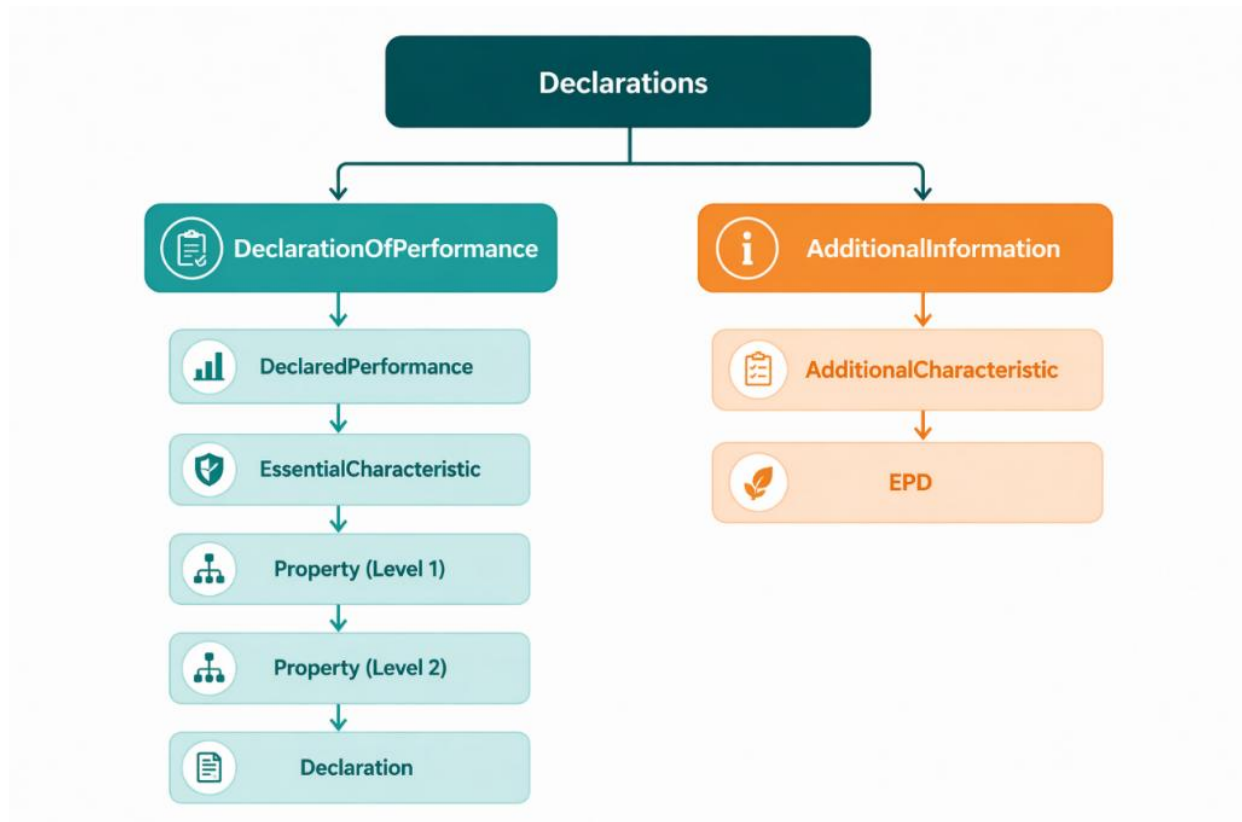


Figura 2. Jerarquía funcional del XML empleado para estructurar el pasaporte digital de producto.

Tabla 2. Origen técnico de los principales bloques del XML.

Bloque del modelo	Origen o lógica empleada	Función dentro del PDP
DeclarationOfPerformance	Lógica Smart CE y declaración digital de prestaciones.	Conservar el núcleo reglamentario del producto y sus prestaciones declaradas.
EssentialCharacteristic	Estructura de características esenciales aplicable a cada familia de producto.	Organizar resistencia, composición, durabilidad, estado fresco u otras prestaciones.
Property nivel 1 / nivel 2	Descomposición jerárquica de las propiedades técnicas.	Evitar campos planos ambiguos y permitir lectura automatizada por software.
Declaration	Valor, unidad, relación y referencia documental.	Expresar el dato declarado de forma verificable e interpretable por máquina.
AdditionalInformation	Extensión del modelo para datos no estrictamente declarativos.	Incorporar composición, clasificación de CO2, datos de producción, EPD y enlaces.

### 3.1 GUID, semántica e integración ambiental

El uso de GUID fue una de las decisiones más relevantes del modelo. Una propiedad como resistencia a compresión, unidad MPa o relación nominal puede escribirse de forma distinta en herramientas, idiomas o bases de datos. El GUID permite que el sistema reconozca el concepto aunque cambie la etiqueta visible. Esto convierte al pasaporte en una estructura semántica digital, no en una simple tabla de campos.

La integración ambiental se resolvió dentro de la misma arquitectura. La información de EPD no se añadió como documento externo, sino como bloque estructurado dentro de AdditionalInformation. Esta decisión permite que el dato ambiental sea reutilizable en flujos BIM, cálculos de ACV, declaraciones ambientales y herramientas de sostenibilidad. En la práctica, el pasaporte queda preparado para contener indicadores derivados de EN 15804, información metodológica, escenarios, módulos declarados y enlaces a la documentación ambiental de soporte.

```

-----
Jerarquía:
EssentialCharacteristic (característica esencial EN 197-1 ZA)
  -> Property (nivel 1)
    -> Property (nivel 2)
      + ReferenceDocument (norma de ensayo)
      + Declaration (cómo se declara: Name/Value/Unit/Relation)
    + Property AVCP ... (sistema de verificación para esa característica)
-->
<!-- 1) Common cements (subfamilies) constituents and composition. Componentes y composición -->
<EssentialCharacteristic>
  <Name>common cements (subfamilies) constituents and composition</Name>

  <Property>
    <Name GUID="0v04p5JuvFvhFwh$otDE1s">constituents and composition</Name>
    <Property>
      <Name GUID="1nIxuzODPFgvSKFNfZxacb">cement constituents and composition according to EN 197-1:2011</Name>
      <ReferenceDocument>EN_197-1:2011</ReferenceDocument>
      <Declaration>
        <!--
          GUID:
          - Son identificadores "Global Unique Identifier" recomendados por UNE 80000 (anexo de GUID).
          - Sirven para mapear propiedades entre herramientas (BIM, DPP, bases de datos) sin ambigüedad.
          - Ojo: si cambias parámetros (unidad/relación/tipo de dato), el GUID correspondiente también cambia.
        -->
        <Name GUID="2ruRcEu55DtwFOHLg6QZV">nominal</Name>
        <Value>"input"</Value>
        <!--
          Valores válidos en "input" CEM I / CEM II / CEM III/ CEM IV / CEM V
        -->
        <Unit GUID="0UKa5x99XOD9Pkbs8YZ6Tv">unitless</Unit>
        <Relation>class</Relation>
      </Declaration>
    </Property>
  </Property>

```

Figura 3. Prototipo XML: uso de jerarquía de declaración, propiedades y GUID en el pasaporte de cemento.

### 3.2 Prototipos de cemento y hormigón

Los prototipos de cemento y hormigón comparten la misma arquitectura general, pero no el mismo grado de madurez. El cemento se apoyó en una ruta más estable: producto normalizado, declaración reglamentaria consolidada, características esenciales bien definidas y correspondencia más clara con la lógica Smart CE. El hormigón preparado se desarrolló como prueba de concepto más amplia, porque debía reflejar datos que dependen de la dosificación, de los constituyentes, del estado fresco, de la durabilidad y de la evolución prestacional del material.

En el prototipo de hormigón se agruparon las características en familias funcionales: propiedades resistentes, propiedades en estado fresco, prestaciones de durabilidad, propiedades físicas y otras clases. La capa adicional cobró más peso que en el cemento, ya que permite recoger composición, parámetros de mezcla, temperatura del hormigón fresco y clasificación de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta diferencia es importante: en el hormigón, el pasaporte no solo describe un producto, también preserva información de producción que condiciona su comportamiento real.

Tabla 3. Comparación técnica entre los prototipos de PDP para cemento y hormigón.

Aspecto	Cemento	Hormigón preparado
Madurez normativa	Ruta más consolidada por la relación con cementos comunes, declaración digital y características esenciales normalizadas.	Ruta más exploratoria por la ausencia de una vía armonizada equivalente y por la variabilidad del producto.
Núcleo del XML	Declaración de prestaciones con estructura compacta y estable.	Declaración de prestaciones ampliada con familias de características más diversas.
Información adicional	Extiende el núcleo con datos específicos, ambientales y documentación complementaria.	Resulta crítica para composición, dosificación, estado fresco, clasificación ambiental y trazabilidad.
Integración ambiental	Bloque EPD estructurado con indicadores ACV y referencias metodológicas.	Misma lógica ambiental, pero con mayor dependencia de datos reales de producción y transporte.
Uso previsto	Intercambio de información digital de producto con alta estabilidad semántica.	Trazabilidad de lote, suministro, elemento construido y conexión con datos de proceso.

### 4 RFID como vínculo físico-digital

El pasaporte digital solo es operativo si puede relacionarse con el material o elemento físico al que describe. En cemento, el vínculo puede apoyarse en documentación de lote o suministro. En hormigón y elementos prefabricados, la cuestión es más compleja: el material queda embebido en el activo construido y puede no ser visible ni accesible después de la puesta en obra. Por esa razón se evaluó el uso de RFID pasivo como identificador físico embebido.

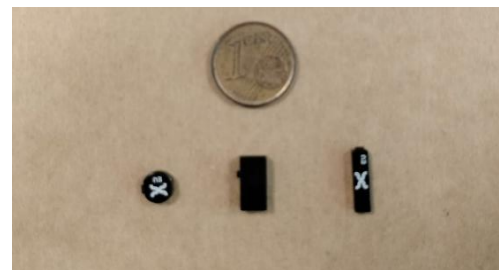


Figura 4. Tamaño tags RFID seleccionadas

La solución adoptada no consistió en almacenar el pasaporte completo dentro del tag. La memoria disponible y la necesidad de actualizar la información hacen más robusto otro enfoque: el tag almacena un identificador único normalizado, mientras que el PDP completo queda alojado en una base de datos o plataforma. La lectura del RFID permite recuperar el registro asociado. Este planteamiento reduce carga sobre el dispositivo, permite enriquecer el pasaporte con el tiempo y mantiene la compatibilidad con lectores y protocolos estándar.

Tabla 4. Criterios que justificaron la selección de RFID pasivo.

Criterio	Relevancia para materiales base cemento	Implicación de diseño
Sin batería	Los elementos de hormigón tienen vidas útiles largas y no admiten mantenimiento del identificador.	Prioridad a RFID pasivo frente a tecnologías activas.
Resistencia al medio	El tag debe soportar humedad, alcalinidad, amasado y vibrado.	Selección de tags cerámicos, compactos y con protección IP68.
Tamaño reducido	El dispositivo no debe alterar la continuidad de la matriz cementicia.	Rango de tamaños objetivo próximo a 5-15 mm.
Lectura sin contacto visual	El identificador puede quedar embebido o no visible.	Uso de UHF RFID en lugar de códigos visibles como solución principal.
Código único	El PDP necesita una llave estable de consulta.	Uso de EPC/identificador unívoco asociado al registro digital.
Coste y escalabilidad	El hormigón se produce en grandes volúmenes.	Optimización de posición y dosificación para evitar soluciones sobredimensionadas.

#### 4.1 Resultados de laboratorio

Los ensayos de laboratorio se ejecutaron con probetas cilíndricas normalizadas de 15 x 30 cm y probetas prismáticas de 30 x 30 x 10 cm. Se estudiaron cuatro variables: **distancia de lectura, humedad, interacción con armadura y supervivencia frente a amasado y vibrado**. Esta separación permitió aislar el origen de los fallos de lectura: rotura real del tag, posición fuera de rango o bloqueo temporal de la señal por humedad.



Figura 5. Set-up de laboratorio para validación de tecnología RFID en probetas de hormigón

El resultado más claro fue la influencia de la humedad. En estado fresco no se obtuvieron lecturas positivas. A 1 y 7 días se observó una recuperación parcial, especialmente para tags próximos a la superficie. A 28 días, cuando el hormigón había perdido parte significativa de su humedad libre, la lectura se recuperó de forma casi completa. Esta conclusión cambió la interpretación del problema: la ausencia de señal en edades tempranas no equivale necesariamente a fallo del identificador.





Fresco	1 día	7 días	28 días
			
0%	40%	70%	~90%
Sin lecturas positivas	Recuperación inicial	Mejora clara de lectura	Lectura prácticamente recuperada

Figura 6. Evolución de la legibilidad RFID en función del curado y de la humedad del hormigón.

En el ensayo de rango, la posición del tag confirmó esta lectura. A 1 cm se obtuvieron lecturas a 1 y 7 días, mientras que las posiciones equivalentes a 7,5 cm y 15 cm solo resultaron legibles a 28 días. El medio cementicio atenúa la señal, pero el efecto más restrictivo se concentró en el estado húmedo. Esta información es esencial para definir protocolos de lectura: en elementos recién fabricados debe contemplarse una ventana de espera o una lectura de confirmación posterior al curado inicial.

Tabla 5. Matriz de lectura en función del curado y de la profundidad relativa.

Estado de curado	15 cm	7,5 cm	1 cm	Interpretación
Húmedo / fresco	No leído	No leído	No leído	La humedad impide la transmisión de señal.
1 día	No leído	No leído	Leído	Solo resultan viables posiciones muy próximas a la superficie.
7 días	No leído	No leído	Leído	La recuperación existe, pero sigue condicionada por humedad y profundidad.
28 días	Leído	Leído	Leído	El rango se recupera y la matriz cementicia deja de ser el factor dominante.

La interacción con armadura fue más interesante de lo previsto. La hipótesis inicial consideraba el posible apantallamiento por efecto jaula de Faraday. Sin embargo, los ensayos mostraron que el acero no siempre actúa como barrera. Cuando el tag se apoyó directamente sobre la armadura, la señal pudo mejorar por efecto de antena pasiva. Este resultado es relevante para elementos prefabricados y elementos armados: una colocación controlada junto a la armadura puede ser más eficiente en términos económicos y logísticos que una dosificación aleatoria de tags.



F

Figura 7. Localización tag RFID dentro del refuerzo cilíndrico

Los ensayos de dosificación y amasado indicaron que los tags seleccionados resistieron los esfuerzos mecánicos del proceso. La evolución de lecturas positivas aumentó con el curado, y la distribución en probetas fue suficientemente homogénea. La dosificación elevada incrementó el número absoluto de tags legibles, pero no resolvió por sí sola todos los condicionantes de lectura; por ello, la optimización debe combinar dosis, posición, profundidad, orientación y momento de lectura.

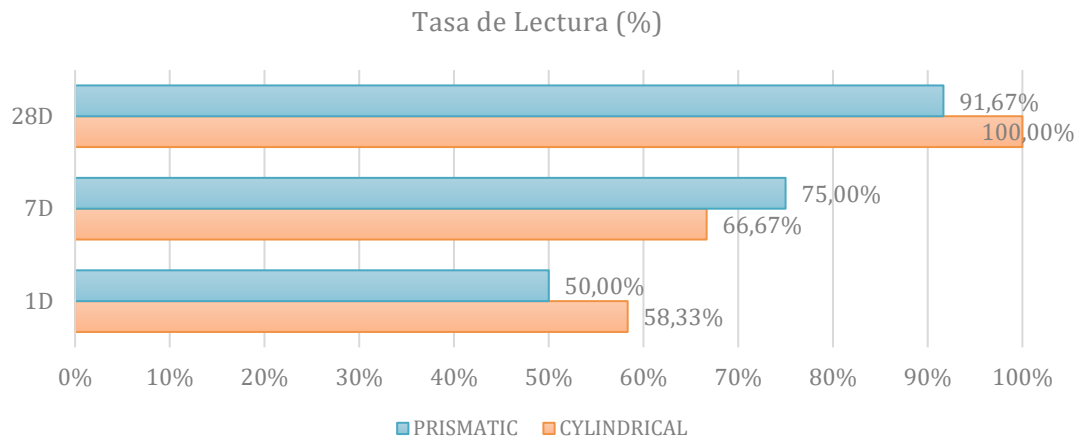


Figura 8. Gráfico de barras del ratio de lecturas positivas obtenidas en los ensayos de amasado y dosificación de tags RFID.

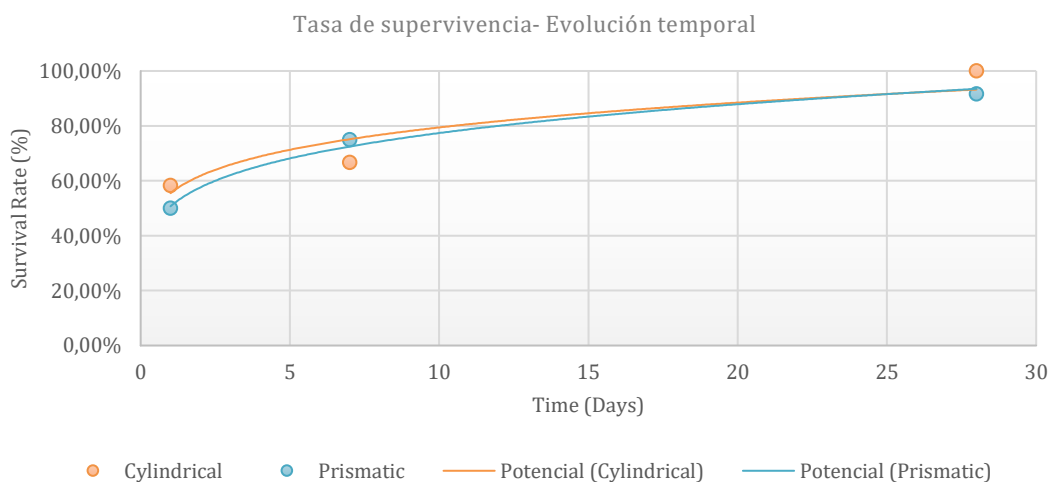


Figura 9. Gráfico tasa de supervivencia-tiempo.

## 4.2 Escalado industrial

La validación industrial se definió sobre una losa prefabricada armada de 4,00 x 2,09 x 0,22 m, representativa de una aplicación real en prefabricación para puentes. El elemento se planteó con hormigón C35/45, armado Q-335 B500B y un recubrimiento nominal de 5 cm. Esta escala permitió trasladar las conclusiones de laboratorio a tres preguntas de implantación: hasta qué profundidad se mantiene la lectura, cómo interactúa el RFID con la armadura y qué dosificación resulta razonable en una producción industrial.

La estrategia combinó colocación controlada y dosificación en masa. En la primera, se dispusieron tags a 4-5 cm, 11 cm y 17-18 cm para evaluar la influencia de la profundidad en una losa de 22 cm. En la segunda, se compararon tags en contacto directo con la armadura y tags próximos a ella sin contacto directo, con el fin de separar el posible apantallamiento del efecto antena pasiva. Además, se plantearon amasadas de aproximadamente 0,7 m<sup>3</sup> con 35 y 70 tags, equivalentes a 0,05 y 0,10 tags/L, para evaluar la supervivencia y la dispersión en condiciones de planta.

Tabla 6. Variables principales consideradas en el escalado industrial.

Variable	Configuración aplicada	Finalidad técnica
Profundidad	Tags a 4-5 cm, 11 cm y 17-18 cm desde la cara superior.	Definir rango de lectura en una losa de 22 cm.
Armadura	Tags en contacto directo con acero y tags próximos sin contacto.	Evaluar apantallamiento y posible efecto de antena pasiva.
Dosificación	35 tags (0,05 tags/L) y 70 tags (0,10 tags/L) en amasadas industriales.	Comprobar supervivencia, dispersión y coste razonable.
Momento de lectura	Estado fresco, tras desencofrado y a 28 días.	Separar efecto de humedad, curado y estabilidad de señal.
Aplicación	Elemento prefabricado armado a escala real.	Verificar que el sistema puede pasar de probeta a producto industrial.

## 5 Blockhormigón y cadena de valor

La identidad digital no puede construirse solo al final del proceso. En hormigón, muchos datos que dan sentido al pasaporte se generan antes de que el material llegue a obra: dosificación, cemento empleado, contenido de agua, aditivos, tiempos de carga y transporte, condiciones de la cuba, incidencias y evidencias de suministro. Blockhormigón aportó precisamente esa capa de captura y certificación de datos en la cadena de valor del hormigón.

El sistema se orientó a adquirir datos mediante IoT y visión artificial en camiones hormigonera, asegurando las transacciones mediante tecnologías de registro distribuido. Estos datos permiten conocer mejor el proceso de producción y transporte, reducir incertidumbres sobre calidad, identificar variables críticas de no conformidad y alimentar cálculos ambientales automatizados. En el esquema de identidad digital, Blockhormigón actúa como fuente de evidencia; el PDP actúa como estructura de conservación e intercambio; y el RFID actúa como mecanismo de recuperación física del registro asociado al elemento.

Tabla 7. Relación entre datos de Blockhormigón y campos del pasaporte digital.

Dato capturado o certificado	Uso dentro del PDP	Valor añadido
Datos de fabricación y dosificación	Composición, lote, constituyentes, relación agua/cemento y trazabilidad de materiales.	Permite explicar prestaciones y demostrar coherencia con requisitos de uso.
Tipo y contenido de cemento	Campos técnicos, reglamentarios y ambientales del producto.	Conecta el hormigón con información del cemento (PDP) y con indicadores ACV.
Transporte y condiciones de la cuba	Información de suministro, tiempos, incidencias y control de proceso.	Reduce pérdida de información entre planta y obra.
Eventos e incidencias de transacción	Historial del suministro y evidencias compartidas.	Aumenta confianza entre agentes y reduce disputas por datos contradictorios.
Datos para DAP/ACV	Indicadores ambientales, GWP y módulos de ciclo de vida.	Facilita generación automática de información ambiental a partir de datos reales.
Identificador RFID	Relación física con lote, elemento o activo construido.	Permite recuperar el PDP desde el material o componente durante la vida útil.

La conexión entre ambas líneas permite resolver un problema práctico: el pasaporte digital necesita datos fiables, pero esos datos no deben introducirse manualmente al final del proceso. Si los datos de planta y transporte se capturan y certifican durante la transacción, pueden alimentar de forma natural el PDP. Esta lógica permite pasar de un modelo documental a un modelo automatizado de dato trazable: lo que ocurre en la producción y suministro del hormigón queda disponible para el modelo BIM, las herramientas ambientales, los sistemas de control de calidad y la gestión posterior del activo.

## 6 Discusión técnica

El desarrollo ejecutado mostró que la identidad digital de materiales base cemento no depende de una sola tecnología. El XML/JSON aporta estructura; los GUID aportan estabilidad semántica; el RFID aporta vínculo físico; y Blockhormigón aporta datos de proceso y validación experimental trazable. La combinación de estas capas es lo que convierte el pasaporte digital en una herramienta útil en toda la cadena de valor, más allá del cumplimiento formal.

Desde el punto de vista del XML, la principal lección fue que la información técnica y ambiental debe convivir dentro de una misma arquitectura. Si la información ambiental queda como un PDF externo, su reutilización en BIM, ACV o herramientas de compra pública verde vuelve a depender de interpretación manual. En cambio, cuando se estructura mediante un bloque EPD dentro del PDP, puede integrarse con mayor facilidad en flujos automatizados.

En relación con la tecnología RFID, la viabilidad quedó condicionada por reglas claras de diseño. La tecnología no debe evaluarse solo por el dato comercial de rango de lectura. En hormigón importan la humedad, la profundidad, la orientación, la armadura, el momento de lectura y la estrategia de colocación. Los resultados de laboratorio y la lógica de escalado industrial apuntan a una combinación de tags colocados de forma controlada en posiciones estratégicas, complementados, cuando tenga sentido, con dosificación en masa.

Desde la perspectiva de Blockhormigón, el valor no está únicamente en registrar datos, sino en convertirlos y trazarlos, de forma certificada, en información de producto. La producción y el transporte dejan de ser una sucesión de eventos aislados y pasan a alimentar un registro digital que puede acompañar al elemento construido. Esta continuidad es especialmente importante para hormigón, donde los ensayos de recepción tradicionales no explican por sí solos todas las causas de una no conformidad ni contienen la información ambiental específica del suministro.

## 7 Conclusiones

- Se desarrolló una arquitectura de identidad digital para materiales base cemento basada en un pasaporte digital de producto estructurado y en un identificador físico RFID asociado al registro.
- El XML del pasaporte se organizó en torno a un núcleo de declaración de prestaciones y una capa de información adicional capaz de incorporar composición, datos de proceso e información ambiental.
- El uso de GUID permitió dotar de estabilidad semántica a propiedades, unidades, relaciones y conceptos técnicos, evitando que la interoperabilidad dependa únicamente del texto visible.
- El prototipo de cemento alcanzó mayor madurez por su conexión con una ruta de declaración digital más consolidada, mientras que el prototipo de hormigón preparado se configuró como prueba de concepto más amplia y dependiente de datos de producción.
- Los ensayos de RFID confirmaron que la humedad es el principal factor limitante a edades tempranas, y que la ausencia de lectura inicial no debe interpretarse automáticamente como fallo del tag.
- La armadura mostró un comportamiento dual: puede atenuar la señal en ciertas geometrías, pero también puede mejorar la lectura cuando el tag se dispone en contacto directo y actúa como antena pasiva.

- Los tags cerámicos seleccionados resistieron el proceso de amasado y vibrado, aunque la dosificación debe optimizarse con criterios de coste, posición, profundidad y protocolo de lectura.
- La conexión con Blockhormigón permite que los datos monitorizados de fabricación y transporte alimenten el pasaporte digital y habiliten cálculos ambientales y trazabilidad de producto con menor intervención manual.
- La solución desarrollada ofrece una ruta realista para unir cumplimiento reglamentario, sostenibilidad, BIM, control de calidad y gestión de activos a partir de datos de producto trazables.

## 8 Referencias

- [1] European Parliament and Council. (2024). Regulation (EU) 2024/3110 laying down harmonised rules for the marketing of construction products.
- [2] European Parliament and Council. (2024). Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products.
- [3] UNE-EN 15804:2012+A2:2019. Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products.
- [4] EN ISO 22057:2022. Sustainability in buildings and civil engineering works. Data templates for the use of environmental product declarations for construction products in BIM.
- [5] UNE 41316. Declaración digital de prestaciones para productos de construcción. Smart CE.
- [6] UNE 80000. Declaración digital de prestaciones para cementos comunes.
- [7] EN ISO 23386:2020. Building information modelling and other digital processes used in construction. Methodology to describe and maintain properties in interconnected data dictionaries.
- [8] EN ISO 23387:2020. Building information modelling. Data templates for construction objects used in the life cycle of built assets.