

Proyecto “KEOPS”. Objetivos principales. Hacia unos hormigones más respetuosos con el medio ambiente en la construcción de infraestructuras

Francisco Javier Prego Martínez⁽¹⁾; Rubén Caride Coello⁽²⁾; Alberto Miguéns Blanco⁽³⁾

(1) *Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable de los Dptos. de I+D+i de **EXTRACO, S.A.** y **MISTURAS, S.A.** Ourense. España
Grupo de Geotecnologías Aplicadas (GEOTECH)-**Universidad de Vigo (UVigo)**.
Pontevedra, España*

(2) *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de concesión de la **Autovía Ourense-Celanova (AUCEL)**. **EXTRACO, S.A.** Ourense. España*

(3) *Ingeniero Químico. Responsable del **Área de Materiales Avanzados. Centro Tecnológico de Investigación Multisectorial (CETIM)**. Culleredo (A Coruña)*

i-d-i@extraco.es

Palabras clave: Nuevos materiales de construcción; sostenibilidad en la construcción; hormigones y morteros geopoliméricos; infraestructuras del transporte.

RESUMEN: Esta comunicación presenta los principales **objetivos** del proyecto “**KEOPS: Nuevas soluciones cementantes geopoliméricas de sostenibilidad integral y alto valor añadido a partir de residuos de construcción**”, cofinanciado por el **Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI)**, Ministerio de Ciencia e Innovación-Gobierno de España, en el que se desarrollan novedosos materiales para la **construcción de infraestructuras del transporte**. Frente a las dosificaciones convencionales de morteros y hormigones, en este proyecto se propone la sustitución del cemento portland por productos geopoliméricos que mejoran su desempeño medioambiental, dando lugar a materiales de construcción alineados con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** impulsados por las Naciones Unidas (ONU). En el proyecto participan las empresas **Adec Global, Cromogenia, Cementos Cruz, Prefhorvisa y EXTRACO**, con apoyo del Área de Materiales Avanzados del **Centro Tecnológico de Investigación Multisectorial (CETIM)**.

1. Introducción: Las infraestructuras del transporte y los materiales de construcción. El hormigón.

Desde la antigüedad, las **vías de comunicación** han jugado un papel fundamental en la organización territorial y la interrelación del ser humano con el medio físico (**Nárdiz** [1]). En su construcción se han empleado multitud de materiales, aptos para garantizar su durabilidad y mantenerlas practicables en todo tiempo y circunstancia, contribuyendo así a la circulación de las personas y al intercambio de productos y mercancías entre los diferentes asentamientos humanos. Podemos considerar que, de alguna manera, **la historia de las vías de comunicación es, también, la historia de los materiales empleados en su construcción.**

En las infraestructuras de carácter más primitivo (caminos y veredas; zonas de fondeo y atraque; vaguadas en ríos; pasos de barcas...), se empleaban materiales naturales poco o nada elaborados, seleccionados en las inmediaciones de las zonas de paso, tales como piedras, rocas naturales y maderas, tratadas de acuerdo con los conocimientos y tecnologías de cada época. A medida que las diferentes culturas y sociedades se desarrollaban, fue necesario mejorar y aumentar la red de vías de comunicación que vertebraran el territorio y construir asentamientos estables de mayor calidad y durabilidad, lo que propició la búsqueda de materiales de construcción cada vez más sofisticados y resistentes, capaces de dar respuesta a las nuevas necesidades arquitectónicas y de infraestructura.

Existen pruebas arqueológicas que demuestran que en el norte de Chile, hace unos 5.000 años, se construía con piedras unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de un tipo de algas (huiro), mezcladas con agua de mar: con este producto se fabricaban las paredes de las chozas de los primitivos moradores de esta zona del planeta (**Fernández-Cánovas** [2]). Podría decirse que se trata de los morteros y hormigones más antiguos conocidos.

Mientras que los egipcios empleaban morteros de yeso y de cal en sus construcciones monumentales, en la Grecia clásica se empleaban piedras unidas por arcilla para construir obras de fábrica (**Arredondo** [3]). Los romanos dieron un paso muy importante en el desarrollo de los materiales de

construcción, al descubrir un cemento fabricado a partir de la mezcla de cenizas volcánicas con cal viva: es el conocido como “**cemento puzolánico**”, así llamado por elaborarse por primera vez en la ciudad italiana de Puzzuoli (antigua *Puteoli*) [2].

La ingente labor constructora realizada por los romanos a lo largo y ancho de sus territorios es un claro ejemplo del importante desarrollo que la arquitectura y las vías de comunicación alcanzaron en la antigüedad, tanto desde el punto de vista de su planificación como de las técnicas constructivas y de los materiales empleados. No hay que olvidar que, para el poder de Roma, las vías de comunicación fueron en primer lugar una herramienta de conquista (**Vega-Avelaria** [4]) y, posteriormente, un instrumento de homogeneización social y de culturización de los territorios conquistados, que dotaron de cierta unidad al conjunto (**De la Peña** [5]).

Gracias al grado de desarrollo alcanzado en estos materiales de construcción han llegado hasta nuestros días obras tan emblemáticas como el Panteón de Roma, ordenado construir por Agripa en el año 27 a.C. Tras sufrir un incendio, fue reconstruido en época del emperador Adriano (año 120 de nuestra era), habiendo llegado hasta nuestros días con su extraordinaria cúpula de hormigón de 44 m de luz en perfecto estado de conservación [2].

El hormigón como material estructural de uso general cayó en desuso hasta el siglo XVIII: en 1756, el ingeniero inglés **John Smeaton** lo volvió a emplear en la reconstrucción del faro de Edystone, en la costa sur de Inglaterra, al comprobar el extraordinario comportamiento estructural que tenían los morteros calizos mezclados con arcillas. También en Inglaterra, en 1796, el ingeniero James Parker patentó un sistema de fabricación de cemento hidráulico formado por nódulos de cal calcinados con un alto contenido de arcillas, dando lugar a lo que se denominó “**cemento romano**” (**Cassinello** [6]).

Es, por tanto, a finales del siglo XVIII cuando el hormigón reaparece con fuerza como material de construcción, casi tal y como lo conocemos hoy en día: una mezcla de cemento, áridos y agua que da lugar a una pasta moldeable que luego fragua y endurece.

El “padre” del cemento moderno fue el ingeniero francés **Louis Joseph Vicat**. En sus trabajos “*Recherches experimentales*” (1817) y “*Mortiers et ciments calcaires*” (1818) marcó las pautas a seguir para la fabricación de cemento por medio de una mezcla de rocas calizas y de arcillas, dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. Este mismo ingeniero fue, además, pionero en el estudio de la acción destructiva del agua de mar sobre los morteros y hormigones [2].

La primera patente para la fabricación de cemento fue otorgada en 1824 en Inglaterra a **Joseph Aspdin**, quien denominó al producto obtenido como “**cemento portland**”, debido a que el color del hormigón fabricado con este cemento se parecía a la piedra natural de la zona de Portland, en el sur de Inglaterra.

Hacia mediados del siglo XIX se consiguen mejorar significativamente las fórmulas de trabajo y los procedimientos de fabricación del hormigón: el prototipo del primer cemento “moderno” fue producido en Inglaterra a escala industrial por **Isaac Johnson** en 1845, quien logra conseguir temperaturas suficientemente altas para facilitar el proceso químico de reacción entre arcillas y rocas calizas (que se denomina, dentro de la técnica del hormigón, “clinkerización”) [2].

Desde mediados del siglo XIX, y hasta el día de hoy, **el hormigón se ha convertido en el material de construcción más importante**, tanto desde el punto de vista arquitectónico como en el ámbito de la ingeniería civil, estando presente en todo tipo de obras de paso, elementos de contención, puentes y viaductos que configuran las vías de comunicación e infraestructuras del transporte.

2. El hormigón moderno. Ventajas e inconvenientes. Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS).

El hormigón actual es un material de construcción constituido básicamente por áridos (de tamaños máximos y mínimos limitados normativamente) que cumplen determinadas condiciones en cuanto a características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas por una pasta aglomerante formada por un

conglomerante (el cemento) y agua ([Arredondo-Verdú \[7\]](#)). Una vez colocado en obra, experimenta un proceso de fraguado y endurecimiento que le aporta gran resistencia y durabilidad.

El desarrollo experimentado por el hormigón en el período que abarca los siglos XVIII-XX dio lugar a un material de extraordinarias prestaciones para la construcción de todo tipo de estructuras. En primer lugar, permite conseguir piezas de cualquier forma geométrica, por complicada que sea, gracias al carácter plástico que posee mientras está fresco. Este aspecto facilita mucho su puesta en obra. Por otro lado, tras fraguar y endurecer, el hormigón consigue unas altas resistencias a compresión. Su relativa baja resistencia a esfuerzos de tracción se mejora significativamente incorporando barras o cables de acero, dando lugar al hormigón armado (o pretensado, si los cables y barras de acero se tensan cuando se incorporan al hormigón).

En tercer lugar, frente a otros materiales resistentes, el hormigón presenta un gran monolitismo, lo que permite prescindir de juntas y uniones que se convertirían en zonas estructuralmente débiles. Desde este punto de vista, el hormigón se comporta mejor que las construcciones pétreas (mamposterías y sillerías), que las fábricas de ladrillo y que las estructuras de acero laminado más modernas [2].

A pesar de estas grandes ventajas, el hormigón presenta también inconvenientes: es un material muy pesado, con una relación peso/resistencia muy elevada. Comparando la alta resistencia a compresión con su escasa resistencia a tracción, presenta una gran descompensación resistente, que denota su baja isotropía.

El hormigón convencional presenta además inestabilidad volumétrica frente a acciones térmicas, hidráulicas y mecánicas, que pueden llegar a fisurarlo, eliminando entonces una de sus características más positivas: el monolitismo. Es también un material sensible a determinados agentes agresivos de tipo físico y químico, algunos de los cuales pueden destruirlo en periodos de tiempo relativamente cortos [2, 7].

El hormigón se ha ido perfeccionando en los últimos cincuenta años, como consecuencia de la mejora experimentada por los materiales que lo constituyen

y el avance de su tecnología. Así, por ejemplo, los modernos cementos no se parecen en nada a los cementos portland nacidos en Inglaterra en el siglo XVIII: no solo en cuanto al ahorro energético en su producción (actualmente, un cemento requiere para su fabricación menos de la mitad de calorías por tonelada fabricada que las que se precisaban en 1940), sino también en sus características de composición y granulometrías, lo que ha hecho que la evolución de sus resistencias a 28 días sea más rápida que la de los cementos fabricados dos décadas atrás [2],

Los avances científico-técnicos y las nuevas tecnologías desarrolladas y aplicadas al hormigón en las últimas décadas han supuesto importantes mejoras en sus características: el uso de aditivos superfluidificantes ha optimizado su trabajabilidad y bajado la relación agua/cemento empleada en las fórmulas de dosificación, mejorando con ello sus resistencias características.

En los años 70 del siglo XX aparecieron las primeras experiencias de impregnación de **hormigones con monómeros**, que posteriormente polimerizan dentro de su masa: con estos procedimientos se consiguen incrementos muy notables de resistencias mecánicas, además de una gran mejora frente a ataques químicos y a los ciclos hielo-deshielo, que tienden a fisurarlo y a hacer perder el monolitismo del hormigón. También en esta década se desarrollan las primeras experiencias de **hormigones reforzados con fibras**: se incorporan fibras metálicas o plásticas que se distribuyen de forma homogénea dentro de la masa del hormigón, mejorando su isotropía y aumentando sus prestaciones frente a impactos, flexiones, tracciones y fisuración. Los hormigones reforzados con fibras han abierto un amplio abanico de aplicaciones, al ser más idóneos para soportar solicitaciones y esfuerzos para los que no estaba capacitado el hormigón de tipo convencional [2, 7].

Pese a las grandes ventajas del hormigón como material empleado en la construcción de vías de comunicación e infraestructuras, las consecuencias del desarrollo humano en la naturaleza, especialmente desde la Revolución Industrial, y la actual emergencia mundial ocasionada por el Cambio Climático están impulsando la **búsqueda de materiales de construcción más respetuosos con el medio ambiente**. Esta necesidad ha puesto el foco en el

importante impacto ambiental que provoca su fabricación, en particular en lo que concierne a la producción del **cemento portland**.

Los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** (ODS) adoptados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 2015 demuestran la importancia y el alcance mundial de estos nuevos paradigmas: se propuso una agenda global muy ambiciosa, aprobada por la comunidad internacional, para movilizar la acción colectiva entorno a objetivos comunes que posibiliten un desarrollo más justo y equitativo en todos los ámbitos. Además de luchar contra la pobreza extrema, los ODS integran y equilibran tres dimensiones esenciales del desarrollo sostenible, como son la económica, la social y la **ambiental**, proporcionando una valiosa hoja de ruta para articular la formulación de políticas mundiales encaminadas a lograr los 17 objetivos postulados por la ONU (**Gómez-Gil** [8]).



Fig. **Objetivos de Desarrollo Sostenible** (ODS) adoptados por la ONU en 2015. (Fuente: Organización de las Naciones Unidas (ONU). Consultado en www.un.org)

3. El proyecto KEOPS. Origen de la idea.

El sector de la construcción representa el 40% del consumo total de energía de la Unión Europea, el 35% de sus emisiones de gases de efecto invernadero, un tercio de su consumo de agua y un tercio de los residuos generados. Uno de los principales materiales que constituyen el hormigón es el **cemento portland**:

se trata de la **segunda fuente de emisiones de dióxido de carbono** (4% – 7% de las emisiones de CO₂ globales), además de ser un gran consumidor de recursos materiales (más de 400 millones/t al año de materiales para su elaboración) (**Gunasekara et al.** [9]).

Por otro lado, los residuos generados por el sector de la construcción (denominados genéricamente “**residuos de construcción y demolición, RCDs**) son en España 35 millones t/año (el 28% de los residuos totales), según estimaciones de la patronal del sector (**Confederación Nacional de la Construcción, CNC**).

Aunque se ha producido un incremento notable de los estudios para el desarrollo de cementos, morteros y hormigones sostenibles, actualmente son muy escasas las soluciones planteadas que aboguen por la **sustitución total del cemento portland** por otros componentes de mejor desempeño ambiental. Entre dichas soluciones están los **geopolímeros**, que utilizan distintos materiales de base aluminosilicatos que, en conjunción con disoluciones alcalinas, dan lugar a materiales cementantes más sostenibles que los convencionales. Esta solución es la que da origen al proyecto “**KEOPS: Investigación en soluciones cementantes geopoliméricas de sostenibilidad integral y de alto valor añadido a partir de residuos de construcción**”. Se trata de un proyecto de I+D que persigue el desarrollo y optimización de soluciones cementantes integralmente sostenibles y de alto valor añadido basadas en geopolímeros, implantando estrategias de economía circular en el sector de la construcción a través de la **revalorización de residuos de alto impacto medioambiental**, como son los **residuos de construcción y demolición (RCDs)**, y las **escorias de arco eléctrico** procedentes de la industria siderúrgica.

4. Estrategias desarrolladas en el proyecto KEOPS.

El proyecto KEOPS apuesta por la **sustitución total del uso del cemento portland**, productos sintéticos y áridos extraídos en la producción de hormigón, mediante el tratamiento y la transformación de residuos de alto impacto medioambiental para la elaboración de todos los componentes necesarios para

nuevas formulaciones, adecuadas para la construcción de **infraestructuras del transporte**. Dichas soluciones se presentarán con propiedades de alto valor añadido frente a sus homólogos desarrollados con cemento portland, aprovechando al máximo las propiedades que los geopolímeros aportarán a las nuevas dosificaciones investigadas.

Los **geopolímeros son una alternativa eco-sostenible al cemento portland**, ya que para su formulación es común el uso de residuos de carácter aluminosilicato, reduciendo la necesidad de explotar recursos vírgenes naturales, y disminuyendo potencialmente las emisiones de CO₂ en un 26 – 45%, respecto a las asociadas a la fabricación del cemento portland (**Turner et al.** [10]; **Chindaprasirt et al.** [11]). Las bondades de los geopolímeros los convierten en materiales adecuados para múltiples aplicaciones, siendo por ello seleccionados como objeto de estudio experimental en el proyecto KEOPS.

El **geopolímero** es un material polimérico sintético inorgánico, de naturaleza aluminosilicato, que se obtiene a través de una reacción química en un medio fuertemente alcalino (solución activadora, normalmente compuesta por hidróxido sódico y un silicato alcalino), donde la estructura tridimensional del material mineral (el aluminosilicato) se rompe por acción de la disolución alcalina, dejando ‘monómeros libres’. Dichos monómeros se reorientan y forman el gel precursor de una nueva red geopolimérica. Este gel sufre un proceso de fraguado y endurecimiento que da lugar a un material duro, cementicio, que constituye el nuevo cemento como tal.

Son numerosos los precursores que se han utilizado para desarrollar geopolímeros en experiencias previas: residuos industriales como cenizas volantes, escorias de alto horno, barros rojos, residuos vítreos, y también algunos minerales y rocas [9]. A partir de ellos se han obtenido cementos, morteros y hormigones con un gran abanico de ventajas respecto al hormigón fabricado con cemento portland. Estos estudios se han tomado como base a la hora de planificar este proyecto: en KEOPS se desarrollan **diferentes líneas de actuación**, soportadas por cada una de las empresas que participan en él.

Se indican a continuación, de manera resumida, las actividades-objetivo previstas y la empresa que lidera cada una de ellas:

- Acondicionado y optimización de RCDs y escorias de arco eléctrico para ser evaluadas como precursores/catalizadores geopoliméricos (aluminosilicatos) y áridos gruesos y finos en las dosificaciones de los nuevos tipos de hormigón investigados: **ADEC GLOBAL**.
- Síntesis molecular ad-hoc de ayudantes a la molienda de escorias, RCDs y superplastificantes para las formulaciones geopoliméricas planteadas en el proyecto: **CROMOGENIA**.
- Desarrollo y optimización de materiales cementantes geopoliméricos de base: formulaciones con precursores optimizados y disoluciones básicas activadoras; aditivos complementarios: **CEMENTOS CRUZ**.

A partir de los componentes generados en las tareas de cada empresa, se investigarán nuevas formulaciones de alto valor añadido, que se evaluarán en **pruebas de concepto experimentales** para diferentes técnicas de aplicación: hormigón proyectado; hormigón en masa; hormigones para elementos prefabricados; fabricación aditiva.

Se resumen a continuación las actividades previstas, que comenzaron en 2020 y que están actualmente en marcha, a fecha septiembre de 2021:

- Formulaciones de fraguado rápido y bajo rebote de **hormigón proyectado**; formulaciones **captadoras de metales pesados**: hormigón en masa y/o prefabricado para **remediación medioambiental**; formulaciones de **hormigones resistentes al ataque de cloruros y sulfatos**: hormigón en masa y/o prefabricados de alta resistencia química: **EXTRACO**.
- Formulaciones de **fraguado rápido y reología específica**: elementos singulares por fabricación aditiva: **CEMENTOS CRUZ**.
- Formulaciones de reología específica y fácil desmoldado: **hormigones aptos para prefabricados** de alto valor añadido: **PREFHORVISA**.

Las cinco empresas participantes en el proyecto cuentan con la colaboración del **Área de Materiales Avanzados** del **Centro Tecnológico de Investigación Multisectorial (CETIM)**, que actúa en el proyecto como subcontrata tecnológica.

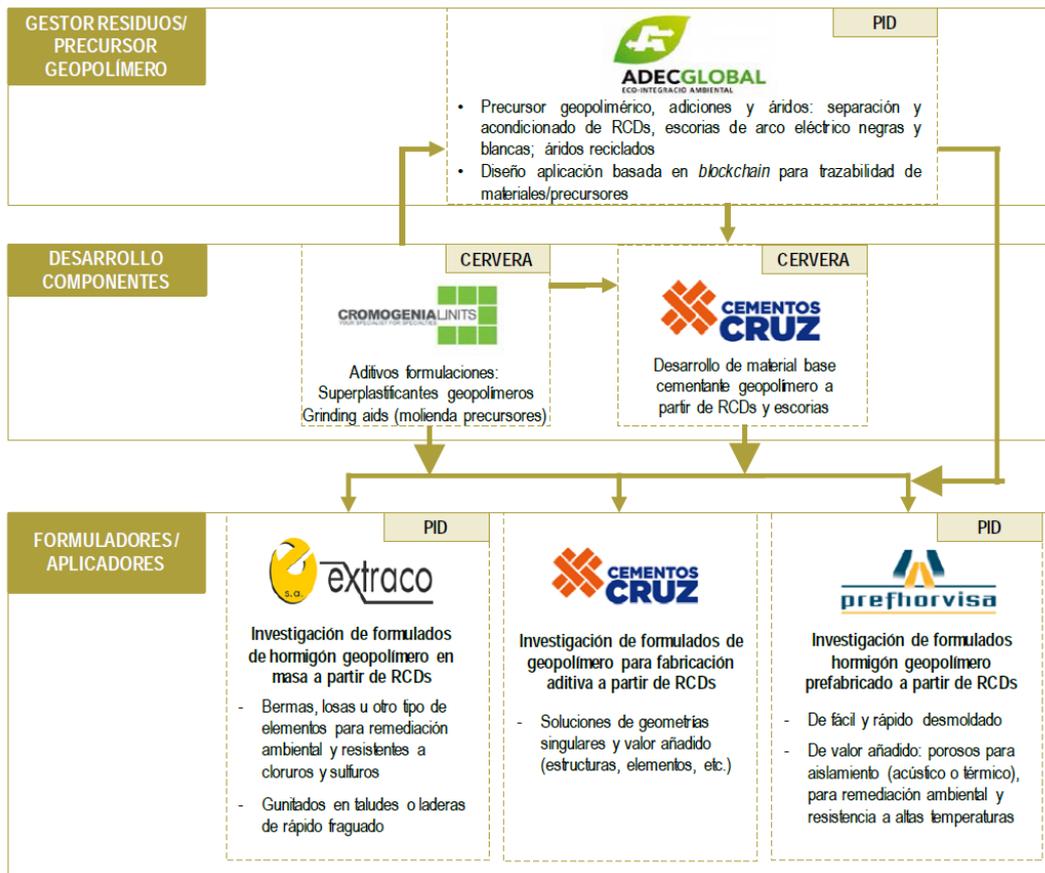


Fig. Esquema general del proyecto KEOPS: interacciones entre las empresas que lo desarrollan, en diferentes modalidades de ayudas del CDTI para proyectos de I+D (líneas PID, Cervera).

5. Nuevos tipos de hormigones desarrollados por EXTRACO.

En lo que respecta a la participación de **EXTRACO** en KEOPS, ésta se centra especialmente en la formulación y desarrollo de **tres aplicaciones específicas** en las que se utilizarán los hormigones geopoliméricos desarrollados. En los tres casos se plantean **hormigones de nueva formulación**, aptos para su empleo en la construcción de infraestructuras del transporte.

Los principales tipos de **hormigones experimentales** que están siendo desarrollados por el Dpto. de I+D de EXTRACO en el proyecto son los siguientes:

- (1) **Hormigones proyectados** (también denominados **gunitas**), para aplicaciones específicas en el ámbito de la ingeniería civil, como son la

estabilización de taludes, túneles y elementos de contención de terrenos. Se trata de hormigones de consistencia muy fluida, que se colocan en obra mediante máquinas de proyectar. Las fórmulas de trabajo de este tipo de productos requieren buscar un equilibrio entre la consistencia apta para la proyección y la resistencia necesaria para la estabilización estructural. Además, las nuevas dosificaciones han de garantizar que en la proyección del hormigón se produce un bajo rebote sobre la superficie de proyección de los materiales empleados.



Fig. Ejemplo de puesta en obra de **hormigón proyectado** en un talud de carretera (Fuente: CETIM)

(2) **Hormigón en masa para remediación ambiental:** se trata de hormigones especiales, diseñados específicamente para la **captación de metales pesados procedentes del tráfico rodado de las carreteras**. Los metales pesados no son biodegradables y persisten durante largos períodos de tiempo en los diferentes medios en los que quedan retenidos o sobre los que se movilizan. Por tanto, su eliminación no es sencilla, siendo la mejor alternativa evitar su emisión masiva. Según lo expuesto, la colocación de hormigones captadores de contaminantes en las carreteras puede resultar de interés. Para formular los nuevos hormigones se están empleando geopolímeros aplicables en elementos constructivos fabricados con hormigón en masa, presentes en las infraestructuras del transporte en bermas, cunetas, cunetones, medianas y enlaces en carreteras.

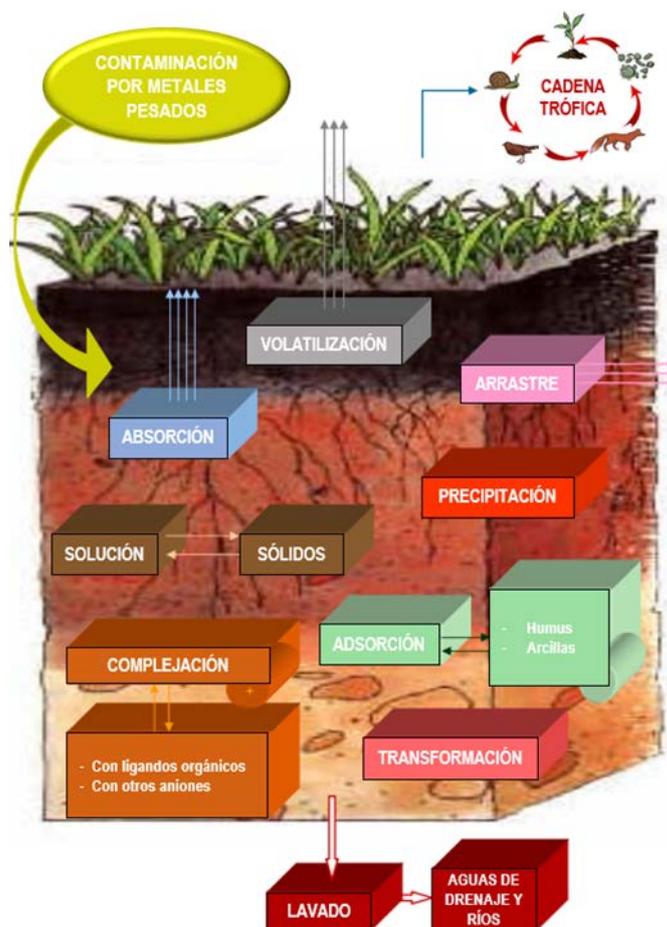


Fig. Diferentes **procesos de movilización de los contaminantes generados en una carretera**, en las zonas adyacentes a la misma. (Fuente: CETIM)

(3) **Hormigones de alta resistencia química**: se trata de hormigones especialmente orientados a su empleo en **ambientes muy exigentes químicamente**, expuestos a **cloruros** (depósitos o estructuras de contención de sales y salmueras empleadas en carreteras para garantizar la vialidad invernal, en contratos de conservación y explotación –COEX-) y al **ataque por sulfatos** (presentes en zonas expuestas a ambientes marinos, como son las instalaciones y estructuras marítimas y portuarias). Si bien existen en el mercado hormigones anticorrosión destinados a ambientes marinos, en los cuales se introducen como componentes inhibidores de la corrosión (tales como dietanol monoisopropanolamina maleato; carboximetilcelulosa; sulfoaluminato de calcio; siliconas; lignosulfonatos; metasilicato de sodio; gluconato de sodio y humo de sílice), se trata de **hormigones de**

formulación convencional que no recurren a los geopolimeros en su composición.



Fig. Ejemplo de **ataque por cloruros** en una estructura de hormigón armado
(Fuente: CETIM)

En la siguiente figura se representa la relación entre los residuos que se pretende valorizar en KEOPS, las formulaciones experimentales de hormigón y los tres productos finales que **EXTRACO** probará en escenarios reales, seleccionados dentro de la Autovía Ourense-Celanova:



Fig. Principales actividades y productos-objetivo de EXTRACO en el proyecto KEOPS (Fuente: los autores)

6. Demostradores a escala real previstos en KEOPS. Autovía Ourense-Celanova.

A medida que las diferentes formulaciones experimentales desarrolladas en el proyecto se vayan optimizando, está previsto que en próximas anualidades de KEOPS (2022-2023) **se prueben a escala real los diferentes tipos de hormigones desarrollados**, en prototipos que se construirán “ad hoc” en la **Autovía Ourense-Celanova**.

La **Autovía Ourense-Celanova** es una vía de alta capacidad, de titularidad autonómica (Xunta de Galicia) que enlaza la **Autovía das Rías Baixas** (A-52, dependiente del Ministerio de Transportes y Movilidad-Gobierno de España) con la localidad ourensana de Celanova, configurando un nuevo eje de comunicaciones entre el sur de Galicia y el Norte de Portugal. Esta infraestructura se construyó con el objetivo de vertebrar territorialmente el interior de la provincia de Ourense, mejorando las comunicaciones con el país vecino a través de la zona de O Xurés, en la frontera entre ambos estados.

Para la ejecución de la obra y su posterior explotación (a través de la fórmula de “peaje en sombra”) se constituyó en 2009 la **sociedad concesionaria AUCEL**, formada por las empresas **EXTRACO** y COPASA, que actualmente gestiona la autovía.

Esta infraestructura tiene 22,5 km de longitud e incluye estructuras de gran magnitud, como son 3 viaductos de gran porte (con vanos de hasta 42 metros y longitudes de hasta 170 m), 13 pasos superiores y 16 inferiores.



Fig. Vista aérea del **Enlace Centro-Celanova** de la Autovía, durante el proceso de construcción de la infraestructura (Fuente: AUCEL)

Por la gran diversidad de elementos constructivos que posee y posibilidades de intervención, la Autovía Ourense-Celanova se incluyó en la memoria técnica de KEOPS como **escenario adecuado para realizar las pruebas de concepto** previstas.

En lo que se refiere al **hormigón proyectado**, se han seleccionado varios taludes, susceptibles de ser estabilizados con el nuevo material que se obtenga. Se muestran a continuación varios (Fotografías de los autores):



Fig. **Talud con problemas de “chirrup”** sobre la vía principal (P.K. 7+200): frente de talud (izquierda) y cuneta de seguridad al pie del mismo (derecha).



Fig. **Talud inestable** del P.K. 10+580, previamente gunitado por la presencia de cuñas de deslizamiento activas: vista general del frente.

En cuanto a los **hormigones con capacidad de biorremediación**, se han seleccionado en la Autovía varias **vías de servicio**, adyacentes al tronco principal de la infraestructura, en los que situar losas de hormigón fabricadas con las nuevas dosificaciones experimentales. Se muestra a continuación un ejemplo de la futura localización.

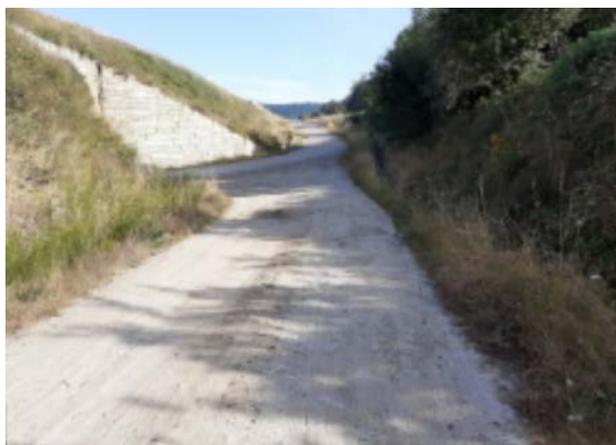


Fig. **Vía de servicio** en el P.K. 8+700 (margen izquierda). Se aprecia al fondo, a la izquierda, la embocadura del paso inferior que conecta ambas márgenes de la Autovía.

En lo que se refiere a los **hormigones de alta resistencia al ataque químico** previstos en KEOPS, dada la imposibilidad de colocar los futuros prototipos sobre la propia capa de rodadura de la autovía, se han buscado ubicaciones alternativas, localizadas en los alrededores de las zonas de acopio de fundentes del **Centro de Conservación y Explotación (COEX)** de A Manchica, en el término municipal de A Merca (Ourense), en las inmediaciones del P.K. 5+600 de la autovía (margen izquierda).

Hay que recordar que en las **operaciones de mantenimiento de la vialidad invernal** se emplean principalmente **sales y salmueras** para combatir la presencia de heladas y nieve en la calzada. Se esparcen y se acumulan sobre la infraestructura, favoreciendo el ataque químico de la misma. Es muy habitual que los firmes (en especial, la capa de rodadura) y las obras de paso (construidas con hormigón armado) se vean atacadas por ácidos y sulfatos, ocasionando numerosos desperfectos y fallos de uso durante la vida de servicio de estas estructuras.

Se muestran a continuación las instalaciones de la autovía previstas para las pruebas a escala real de los **hormigones de alta resistencia química**.



Fig. **Silo de fundentes** ubicado en el **Centro COEX** de la Autovía Ourense-Celanova. Vista general. (Fuente: los autores).



Fig. **Depósito de sal del Centro COEX**, donde se aprecia el **ataque salino** en el elemento metálico de contención del acopio. Fotografía de los autores.

7. Conclusiones

En este artículo se han presentado los **principales objetivos técnicos** que persigue el proyecto **KEOPS**, así como un resumen de las estrategias planteadas para su ejecución.

En este proyecto de I+D se investiga la factibilidad del empleo de geopolímeros en la formulación y fabricación de novedosos tipos de hormigones, en los que los geopolímeros actúan como materiales cementantes. Con el empleo de geopolímeros se elimina el cemento portland de la composición del hormigón, mejorando con ello el desempeño medioambiental de este material de construcción, el más empleado en las estructuras de las vías de comunicación.

Para la obtención de los geopolímeros se valorizan principalmente RCDs y escorias de arco eléctrico, residuos procedentes del propio sector de la construcción, favoreciendo así la circularidad en el sector.

Por último, se enumeran los hormigones específicos desarrollados por la empresa **EXTRACO** dentro del proyecto **KEOPS**, que se probarán a escala real en diversas estructuras de la Autovía Ourense-Celanova, gestionada por esta empresa.

8. Bibliografía

- [1] **Nárdiz Ortiz, C.** *El territorio y los caminos en Galicia: planos históricos de la red viaria*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid (1993).
- [2] **Fernández-Cánovas, M.** *Hormigón*. Servicio de Publicaciones. Revista de Obras Públicas. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid (1991).
- [3] **Arredondo y Verdú, F.** “Yesos y cales”. Servicio de Publicaciones. Revista de Obras Públicas. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid (1991).

- [4] **Vega-Avelaria, T.** *El ejército y las obras públicas en el Imperio Romano. El desarrollo de las comunicaciones terrestres.* Grupo Arqueológico Larouco (2008).
- [5] **De la Peña, J.M.** *Alcance y organización de las obras públicas en el Imperio Romano.* III Congreso de las Obras Públicas Romanas. Astorga, León (2006).
- [6] **Cassinello, F.** *Hormigonería.* Editorial Rueda. Madrid (1974).
- [7] **Arredondo-Verdú, F.** *Generalidades sobre materiales de construcción.* Servicio de Publicaciones. Revista de Obras Públicas. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid (1990).
- [8] **Gómez-Gil, C.** *Objetivos de Desarrollo Sostenible: una revisión crítica.* Publicado en "Papeles de Relaciones Ecosociales y Cambio Global". Nº 140, 2017/18, pp. 107-118.
- [9] **Gunasekara, C. et al.** *Chloride induced corrosion in different fly ash based geopolymer concretes.* Construction and Building Materials 200 (2019) 502–513. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.168
- [10] **Turner, L.K. ; Collins, F.G.** *Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete.* Construction and Building Materials 43 (1) (2013) 125–130. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023
- [11] **Chindaprasirt, P; Chalee, W.** *Effect of Sodium Hydroxide Concentration on Chloride Penetration and Steel Corrosion of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete under Marine Site.* Construction and Building Materials 63 (2014) 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.010>

9. Agradecimientos

Los autores de esta comunicación agradecen al **Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI)**, organismo dependiente del **Ministerio de Ciencia e Innovación-Gobierno de España**, el apoyo recibido en la cofinanciación del proyecto KEOPS, en la modalidad PID (**Ref. IDI-20210195**) para proyectos de I+D nacionales.

Así mismo, los autores agradecen el apoyo de las cinco empresas involucradas en el proyecto KEOPS (**Adec Global; Cementos Cruz; Cromogenia; Prefhorvisa y EXTRACO**) y del **Área de Materiales Avanzados de CETIM**.



