

INGENIERÍA CIVIL

Núm.: 204/2024
ISSN: 0213-8468

Leonardo Torres Quevedo,
ingeniero de caminos ... y
mucho más



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

ÁREAS TEMÁTICAS Y TECNOLÓGICAS DE ACTIVIDAD

Aguas

Estructuras y Materiales

Puertos y Costas

Transporte y Movilidad

Carreteras

Sostenibilidad

Transición Ecológica

Geotecnia

Interoperabilidad Ferroviaria

**Patrimonio Histórico de
Obras Públicas**

Economía Circular

**Transferencia de
Conocimiento**





Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas

Publicación incluida en el Programa Editorial para 2024



COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidenta

Elena Pérez Zabaleta

Vocales

Paula Pascual Bernaldez
José Manuel de la Peña Olivas
Pablo Mira McWilliams
Luis Pujol Terés
Rafael Jiménez Sáez
M^a Asunción Morales Hortelano
Alfredo Arroyo Puente
Alfonso Luján Díaz

Comisión Asesora

Luis Pujol Terés
José-Carlos Pacheco Díaz

Secretaría

Diana de la Lama Jiménez
M^a José de la Fuente Arenas
José-Carlos Pacheco Díaz

Colaboradores

Javier Plasencia Jiménez (Fotografía)

REDACCIÓN

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
(CEDEX)

C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tels.: (+34) 91 335 72 16 / 72 85 / 73 10
E-mail: ingcivil@cedex.es

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras
Públicas (CEDEX) no se hace responsable de las
opiniones, teorías o datos publicados en los artículos
de *Ingeniería Civil*, siendo ello responsabilidad
exclusiva de sus autores

COORDINACIÓN DE PUBLICIDAD

Cloudbridge SL
Tel.: (+34) 606 30 26 91 | dani@cloudbridge.es

PVP: 12,25 euros

ISSN: 0213-8468 - NIPO papel: 197-24-001-X
ISSN: 2659-7039 - NIPO línea: 197-24-002-5
NIPO HTML: 197-24-009-3
Depósito legal: M-28150-1971

NUESTRA PORTADA:

Imagen del transbordador español sobre el Niágara
en su viaje inaugural de 8 de agosto de 1916.

© Underwood & Underwood, N. Y.



Sumario

Estructuras de hormigón armado en ambiente marino. Armaduras alternativas a las convencionales de acero al carbono

Reinforced Concrete Structures in Marine Environment. Alternative Reinforcing Bars to Conventional Carbon Steel Rebar

Laura Juárez, Laura Rodríguez, Asunción Morales

5

Caracterización ambiental de escorias de fundición de cobre mediante ensayos de lixiviación normalizados

Environmental Characterization of Copper Slags by Standardized Leaching Tests

David Ramos Pecharromán, Julio Termenón Delgado, Laura Parra Ruiz

21

Herramienta de estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos para la gestión portuaria. Proyecto Samoa 2

Air Pollutant Dispersion Study Tool for Port Management. Samoa 2 Project

Laura Crespo García, José M.^a Terrés-Nicoli, Fernando Jiménez Arroyo, Christian Mans, Javier García Valdecasas-Bernal, Alberto Gil Tomás, Susana Pérez Rubio, Enrique Álvarez Fanjul

35

Leonardo Torres Quevedo, ingeniero de caminos ... y mucho más

Leonardo Torres Quevedo, Civil Engineer ... and Much More

Francisco A. González Redondo, Daniel González Fernández

46

Verificación de los estados límite últimos por métodos numéricos en el marco de la segunda generación del Eurocódigo 7

Verification of the Ultimate Limit States Using Numerical Methods in the Framework of the Second Generation of Eurocode 7

Jorge Ibarra Pérez

61

La construcción de los túneles del proyecto Américo Vespucio Oriente 1 en Santiago de Chile

The Construction of the Tunnels of the Américo Vespucio Oriente 1 Project in Santiago de Chile

Manuel de Cabo, José M. Galera, Daniel Santos, Rodrigo Richmagüi, Luis Eusebio Íñigo, Luis Felipe García, Pedro Gómez, Martín Fernández, Alejandro Barrera, Juan Manuel Molina, María Marcos, José Vicente Cañas, José Ramón Alcalá, Antonio Escribano

77

Persistencia de un nuevo comportamiento de las orcas ibéricas: las interacciones con embarcaciones

Persistence of a New Behaviour of Iberian Orcas: Interactions with Boats

A. López, R. Esteban, A. García de los Ríos, M. Ferreira, F. Martinho, P. Méndez-Fernández, E. Andréu, J.C. García, L. Olaya-Ponzone, R. Espada-Ruiz, F.J. Gil-Vera, M. González, C. Martín, J.A. Martínez-Cedeira, M. Sequeira

95

Camino de Innovación en Ingeniería Civil

Aumenta hasta el 21 % la superficie marina protegida en España

Fernando Magdaleno, Ignacio Torres

103

Exposiciones

Marta Morueco O'Mullony, Aída Suárez Díaz

106

Ediciones del CEDEX

107

Normas de redacción

También disponibles en la página web del CEDEX: <http://cedex.es>

114



Ingeniería Civil,
por su compromiso
con la innovación y
la transferencia
de conocimiento.

Carreteras y Movilidad

Líneas de Actividad

Caracterización de
Materiales

Funcionalidad y
Durabilidad de las
Carreteras

Sostenibilidad y Cambio
Climático

Seguridad Vial y Movilidad

Adaptación de la
Carretera al Vehículo
Autónomo y Conectado

Carreteras Inteligentes:
Digitalización e Innovación
Tecnológica

Fields of Activity

Road Materials

Road Pavement Durability
and Condition

Sustainability and Climate
Change

Traffic and Road Safety

Connected and Automated
Mobility

Smart Roads Technology:
Digitalisation and
Innovation

Más información en
<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas

Estructuras de hormigón armado en ambiente marino. Armaduras alternativas a las convencionales de acero al carbono

Reinforced Concrete Structures in Marine Environment. Alternative Reinforcing Bars to Conventional Carbon Steel Rebar

Laura Juárez¹, Laura Rodríguez², Asunción Morales^{3*}

Resumen

Los requisitos de sostenibilidad de las estructuras que hoy día se demandan hacen que sea necesario buscar soluciones a los problemas que más afectan a su durabilidad. En el caso de las estructuras de hormigón armado, esos problemas van fundamentalmente ligados a la corrosión de las armaduras de acero. Pueden ser varias las causas que originen este proceso, pero, en todo caso, los cloruros de ambiente marino son uno de los principales motivos que provocan y desarrollan la corrosión de las armaduras y los consecuentes efectos negativos sobre la estructura de hormigón.

En este artículo se resumen las características y propiedades de algunas alternativas que pueden sustituir al acero al carbono en las estructuras de hormigón armado: materiales resistentes a la corrosión (acero inoxidable y polímeros reforzados con fibras de vidrio) y revestimientos resistentes a la corrosión (acero galvanizado); y se presentan como ejemplos algunas obras, principalmente en el ámbito costero español, en las que se han empleado este tipo de armaduras.

Finalmente, se hace un estudio de la importancia que tiene el incorporar las operaciones de mantenimiento y rehabilitación de las estructuras dañadas por corrosión en el análisis del ciclo de vida. Recogiendo datos disponibles en la bibliografía, se ha podido valorar como los costes operacionales (económicos, medioambientales y sociales), en los que se incurre durante la vida en servicio de una estructura de hormigón dañada por la corrosión, son determinantes en el resultado comparativo de los análisis del ciclo de vida (LCC y LCA) de las distintas alternativas, en beneficio siempre de las armaduras de materiales menos corrosibles.

Palabras clave: acero galvanizado, acero inoxidable, GFRP, sostenibilidad, durabilidad, LCC, LCA.

Abstract

The sustainability requirements of structures that are demanded today make it necessary to seek solutions to problems that affect the most their durability. In the case of reinforced concrete structures, these problems are fundamentally linked to the corrosion of the steel reinforcements. There may be several causes that lead to this process, but, in any case, chlorides in the marine environment are one of the main reasons that cause and develop corrosion of the reinforcement and the consequent negative effects on the concrete structure.

This article summarizes the characteristics and properties of some alternatives that can replace carbon steel in reinforced concrete structures: corrosion-resistant materials (stainless steel and glass-fibre reinforced polymers) and corrosion-resistant coatings (galvanized steel); and some works, mainly in the Spanish coastal area, in which this type of reinforcement has been used are presented as examples.

Finally, a study of the importance of incorporating maintenance and rehabilitation operations of structures damaged by corrosion in the life cycle analysis is made. By collecting data available in the bibliography, it has been possible to assess how the operational costs (economic, environmental, and social), which are incurred during the service life of a concrete structure damaged by corrosion, are determining factors in the result of the comparison of the life cycle analysis (LCC and LCA) of the different alternatives. It always benefits reinforcements made of less corrodible materials.

Keywords: Galvanized steel, stainless steel, GFRP, sustainability, durability, LCC, LCA.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El problema de deterioro más frecuente y grave de las estructuras de hormigón armado, que dificulta garantizar su durabilidad, es la **corrosión de las armaduras** de acero al carbono tradicional, lo que supone la pérdida de sección resistente de las barras y alambres, así como la aparición de tensiones internas, debido al aumento de volumen originado por los subproductos de corrosión con la consiguiente fisuración y desconchado o exfoliación del hormigón de recubrimiento.

Para evitar las consecuencias derivadas de la corrosión de las barras de acero, se ha trabajado fundamentalmente

* Autora de contacto: lc.productos.de.construccion@cedex.es

¹ Ingeniera de caminos, canales y puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM), del CEDEX.

² Doctora en Ciencias Físicas. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM), del CEDEX.

³ Doctora por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (LCEYM), del CEDEX.

en la dosificación de los hormigones, buscando conseguir una mayor compacidad en la masa, para impedir tanto la entrada de humedad y CO₂ atmosférico como la entrada de agentes agresivos. Los primeros, disminuyen la alcalinidad del hormigón originada por el cemento y, por tanto, su protección pasivante, y los segundos, provocan o coadyuvan a desencadenar el proceso corrosivo.

Dado que los cloruros son uno de los agentes más dañinos, debido a que destruyen la capa pasivante que protege la superficie del acero, la exposición de las armaduras será más crítica en ambientes donde la presencia de estos compuestos sea mayor y más probable; como es el caso de las estructuras portuarias, por la exposición al agua marina, y el de los tableros de puentes en zonas de frecuentes heladas, por la exposición a las sales para el deshielo. También puede ser un problema importante en cualquier otro tipo de estructura de hormigón armado expuesta a cloruros, sulfatos u otros elementos agresivos.

Este artículo está enfocado a la problemática de la corrosión de las estructuras de hormigón armado en ambiente marino, aunque muchos de sus comentarios y conclusiones son aplicables a cualquier otro tipo de estructura.

La protección de las armaduras frente a la corrosión obliga a diseñar elementos estructurales con recubrimientos mayores, dosificaciones que eviten la pérdida de alcalinidad del hormigón y mezclas con componentes de mejores prestaciones, usando mayores cantidades de cemento, aditivos o adiciones especiales. Como alternativa o, si fuera el caso, complemento a estas medidas anticorrosivas, se plantea la posibilidad de **uso de armaduras distintas a las de acero al carbono convencional**. En concreto, en este artículo se revisan las propiedades y situación práctica de las siguientes tipologías:

- Armaduras galvanizadas de acero al carbono.
- Armaduras de acero inoxidable.
- Armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP).

El planteamiento de este artículo se basa en una revisión bibliográfica con los objetivos de:

- Analizar las propiedades físico-mecánicas de cada tipología de armadura y ponerlas en comparación con las de las armaduras de acero tradicional.
- Exponer las mejoras que aportan las armaduras alternativas a la durabilidad del hormigón, y su influencia en el coste e impacto medioambiental durante la vida útil de las estructuras, considerando tanto la fase de construcción como la de servicio.
- Reseñar algunas estructuras relevantes y conocidas, ubicadas en ambiente marino, en su mayoría en territorio español, en las que se hayan empleado alguna de las mencionadas tipologías de armaduras alternativas.

2. ARMADURAS GALVANIZADAS DE ACERO AL CARBONO

El galvanizado consiste en el recubrimiento de la barra de armadura, normalmente de acero al carbono convencional, por varias capas de aleación hierro-cinc, en las que

el contenido de cinc aumenta con la proximidad a la superficie exterior. El proceso de galvanización se produce en un baño de cinc fundido entre 440 y 465 °C, durante el cual se produce la reacción superficial entre el hierro y el cinc, resultando varias capas de aleaciones metalúrgicamente unidas al acero base.

El galvanizado puede ser parte del proceso integral de fabricación de la barra o realizarse en barras ya terminadas y elaboradas según su respectiva norma de producto, en función del acero base de que se trate. En ambos casos, es fundamental garantizar la adherencia del acero con su revestimiento galvánico.

Las características del acero base influyen notablemente en la calidad de los revestimientos galvanizados; y entre ellas, la rugosidad superficial, que afecta a la reactividad y a la adherencia con el sustrato, y las tensiones internas previas al galvanizado, que se pueden liberar durante el proceso y producir deformaciones; pero la característica más influyente es la composición química y, en concreto, los contenidos de silicio y fósforo, y, en menor medida, de carbono, que son los que determinan la reactividad entre hierro y cinc y, por tanto, el espesor final de las capas de aleación. Contenidos de silicio entre 0,03 y 0,14 %, o superiores a 0,25 %, producen revestimientos más gruesos que pueden llegar a desprenderse del sustrato de acero; el efecto es similar en aceros con alto contenido de fósforo y contenido de silicio inferior a 0,03 %.

La galvanización en caliente cuenta con normativa específica en la que se establecen sus requisitos mínimos. Las normas más significativas son la UNE-EN ISO 1461 [1], que define las propiedades generales y los métodos de ensayo de los recubrimientos aplicados por inmersión de productos de hierro y acero y también las especificaciones relativas a la composición del baño de cinc, aunque no es de aplicación, entre otros productos, a alambres galvanizados en continuo o, en general, a aquellos para los que existan normas específicas; y la UNE-EN ISO 14713-2 [2], que ofrece directrices y recomendaciones respecto a los principios generales de diseño adecuados a las piezas que van a ser galvanizadas en caliente después de su fabricación; como por ejemplo, los aceros para armaduras, elaborados según UNE-EN 10080 [3] o UNE-EN 10348-2 [4], y las piezas fabricadas según la norma UNE-EN ISO 1461 [1].

2.1. Características de las armaduras de acero galvanizado

El **acero base** de las armaduras galvanizadas es normalmente el mismo tipo de acero que el de las armaduras tradicionales. Dicho acero no sufre modificaciones sustanciales durante el proceso de galvanización, por lo que su **comportamiento físico-mecánico** y requisitos exigibles a las armaduras son también los mismos. Así, al coincidir prácticamente con las barras convencionales, las características mecánicas de las barras de acero galvanizado son muy conocidas, y su uso deja poco margen a la incertidumbre. Como característica adicional, únicamente debe controlarse la continuidad, el espesor y la composición de las capas de aleación. El Código Estructural [5] señala que las armaduras galvanizadas deben cumplir los mismos requisitos, tanto mecánicos como de adherencia, que los prescritos para las armaduras pasivas de acero al carbono. Una vez montadas las armaduras galvanizadas, también deben

cumplir las mismas exigencias que las prescritas para las armaduras pasivas convencionales.

La **adherencia con el hormigón** es similar a la del acero sin recubrimiento, siempre y cuando se evite durante el galvanizado la acumulación de cinc en la zona de contacto de la corruga con la superficie circular de la barra. Respecto a la acumulación de cinc, la norma UNE-EN 10348-2 [4], dedicada al acero galvanizado para armaduras, indica que los resaltos superficiales, tanto corrugas como grafilas, no deben ver disminuida su altura o profundidad en más de un 95 % tras el proceso de galvanizado. Este efecto podría perjudicar tanto a la adherencia como a la resistencia a cortante.

Respecto a la posible pérdida de adherencia a edades tempranas del hormigón, cuando está aún fresco, hay que tener en cuenta que los álcalis del cemento pueden disolver el cinc debido a la reacción de éste con el agua alcalina de los poros. Durante el proceso de fraguado, puede existir una fase activa de corrosión del cinc, en la que combinado con el agua formaría hidróxido de cinc y se desprendería hidrógeno. El hidróxido de cinc formado no tiene capacidad adecuada para proteger contra la corrosión y el resultado puede ser una pérdida uniforme de cinc de unas 5 a 10 μm . Con el aumento del pH, cuando los cementos son más alcalinos, aumenta el tiempo de disolución y corrosión antes del endurecimiento y el metal de cinc podría no resultar suficientemente pasivado durante un tiempo largo, lo que podría provocar, además de la pérdida de espesor, la disminución de la adherencia con el hormigón y la resistencia a cortante. En una segunda fase, el hidróxido de cinc se combinaría con hidróxido cálcico, resultando como segundo producto de corrosión una película protectora de hidroxincato cálcico. Estos productos sí pasivan el metal de cinc y detienen la pérdida del revestimiento y el desprendimiento del hidrógeno.

Respecto al **doblado de las armaduras galvanizadas**, no se recomienda realizarlo tras la galvanización, ya que se puede producir fisuración, especialmente si los revestimientos son de gran espesor. El galvanizado, se realiza generalmente después del doblado, si bien es cierto que se puede producir la fragilización del acero en la zona que ha sido estirada en frío, debido al gradiente térmico durante la galvanización. La norma UNE-EN 10348-2 [4] indica los diámetros mínimos de doblado para disminuir la susceptibilidad a este fenómeno. El beneficio de reducción de recubrimientos mínimos de hormigón que otorga el Código Estructural [5] cuando se emplean armaduras galvanizadas, no aplica cuando el doblado se realiza después del proceso de galvanización.

En cuanto a la **soldabilidad**, las barras corrugadas de acero galvanizado se pueden soldar de la misma forma que las barras de acero al carbono, pero conviene tomar una serie de precauciones con relación a la velocidad de soldeo, que, en general, debe ser más baja de lo normal para que no se generen poros debido al cinc y gases evaporados que no tienen tiempo de eliminarse antes de que se produzca la solidificación del metal.

Puede ser recomendable galvanizar después de soldar, o retirar la capa de cinc antes. En este segundo caso, y especialmente si la parte eliminada es grande, sería necesario su restauración mediante pintura epoxi, pintura rica en cinc o mediante otros medios de protección adicionales.

2.2. Durabilidad de las armaduras de acero galvanizado

La **durabilidad** de las barras con recubrimiento galvanizado es mayor que la correspondiente a las de acero convencional. Los revestimientos en base cinc protegen de la corrosión mediante el efecto barrera, la protección catódica y el efecto autocicatrizante. A pesar de esta triple protección, el mayor problema de durabilidad que pueden presentar las armaduras galvanizadas sería el ocasionado por la falta de continuidad del revestimiento, bien por defectos de ejecución o por daños debidos a su pérdida o deterioro posterior. La posibilidad de que ocurra este tipo de daños es la que limita las operaciones de elaboración de la ferralla después del galvanizado.

La protección es directamente proporcional al espesor, siendo la velocidad de corrosión del cinc inferior a la del acero, entre 15 y 50 veces. Mientras hay cinc, el acero no se corroe. Además, los productos de corrosión del cinc son menos voluminosos y más solubles que los del acero al carbono, por lo que la exfoliación y el desconchado del hormigón son también menos acusados.

El dato más relevante es el valor medio del espesor de revestimiento, que suele estar en el rango de 85 a 87 μm , lo cual equivale a 600 a 610 g/m^2 de masa de recubrimiento. En algunos países se limita además el espesor máximo en el orden de unas 200 μm . En el Código Estructural [5], se indica exclusivamente que el espesor de galvanizado no podrá ser menor de 70 μm , equivalente a 505 g/m^2 . Además, para garantizar la durabilidad, se puede reducir el recubrimiento mínimo necesario de hormigón en sólo 10 mm, siempre que la galvanización se haya producido posteriormente a la elaboración de la ferralla; y, en todo caso, se debe evitar el contacto con armadura convencional de acero al carbono y así garantizar que no se formen pilas galvánicas. Durante el fraguado, el cinc está activo y su potencial de corrosión es bajo, pero al conectar las dos armaduras, la velocidad de corrosión del cinc aumenta. Una vez formada la capa protectora de cinc, aumenta su potencial y la diferencia de potencial de ambos metales disminuye con lo que el riesgo de efectos nocivos de la conexión galvánica se reduce, pero sólo si el hormigón está libre de cloruros [6].

En un **hormigón carbonatado**, las pérdidas por corrosión de las barras de acero galvanizado son menores que las que se producen en el acero al carbono; ya que la pérdida de la capa de cinc es bastante uniforme y se produce a una velocidad muy baja; por tanto, se ralentiza la aparición de fisuras y el desconchado de hormigón. Cuanto menos denso sea el hormigón y más pequeño el recubrimiento de la armadura, más ventajoso puede llegar a ser el empleo de armaduras galvanizadas.

La **corrosión por cloruros** en un acero galvanizado es en forma de picaduras. Las capas de aleación cinc-hierro son ligeramente menos resistentes al ataque por cloruros que la capa de cinc puro, por lo que los revestimientos de cinc que no tuvieran esa capa externa se disociarían más rápidamente. Entre los iones cloruro que pueden atacar el revestimiento de cinc hasta llegar a despasivarlo se pueden distinguir aquellos añadidos en la mezcla, que estarán presentes durante la formación de la capa pasivante, y los que penetran en el hormigón desde exterior. Los primeros son más perjudiciales, ya que pueden atacar el revestimiento

antes y durante la formación de la citada capa protectora. En cambio, los segundos, penetrarán desde el exterior una vez formada esta capa, por lo que serán menos agresivos. El Código Estructural [5], para obras de hormigón armado expuestas a ambiente marino, limita la aportación del ion cloruro de todos los componentes del hormigón al 0,2 % del peso del cemento.

El contenido crítico de cloruros para el inicio de la corrosión es, en el caso de las barras corrugadas de acero galvanizado, mayor que en el caso de las barras de acero al carbono. En algunas publicaciones [7] se ha indicado como valor de referencia de 2 a 2,5 veces mayor; o incluso hasta 3 o 4 veces. En todo caso, tal y como se comenta en el Código Estructural [5], para conocer el límite máximo de cloruros en cada caso particular, se deben llevar a cabo trabajos experimentales según UNE 83992-2 [8], realizados con los componentes del hormigón con los que se vayan a emplear cada tipo de armaduras. La mejora resultará especialmente significativa en hormigones carbonatados y no muy densos.

Los beneficios que otorga la reglamentación a las armaduras galvanizadas no son muy significativos, principalmente debido a que la mejora de durabilidad es muy sensible a defectos en el recubrimiento de cinc. Cualquier causa que produzca su fisuración podría mermar su protección frente a la corrosión.

2.3. Estructuras más relevantes en el ámbito costero español con armaduras galvanizadas

En general, a nivel internacional, las realizaciones más numerosas se han identificado en estructuras costeras y marinas como muelles y rompeolas; infraestructuras de transporte, tableros de puentes, dársenas y puertos deportivos; instalaciones para el tratamiento de agua, postes de iluminación y centrales eléctricas. Como ejemplo de estructuras de hormigón armado representativas del refuerzo con este tipo de armaduras en España se presentan a continuación algunas construcciones realizadas en puertos de la Generalitat Valenciana.



Estación marítima de Denia

La obra se realizó en el año 2011 y fue inaugurada en marzo de 2013. Se trata de una edificación con un total de 54.845 m² de los cuales 2.300 m² corresponden al propio edificio de tres alturas y el resto a tres muelles de atraque, campa, aparcamientos y superficies contiguas. Se utilizaron armaduras de acero al carbono en su mayor parte, y se destinaron las galvanizadas exclusivamente para las zonas de exposición más agresiva, principalmente en los pilares. Además, el hormigón (HA-50/F/20/IIIa) se dosificó con un inhibidor de la corrosión (CHRYSO Cl dosificado: 6,4 l/m³). [9] y [10].

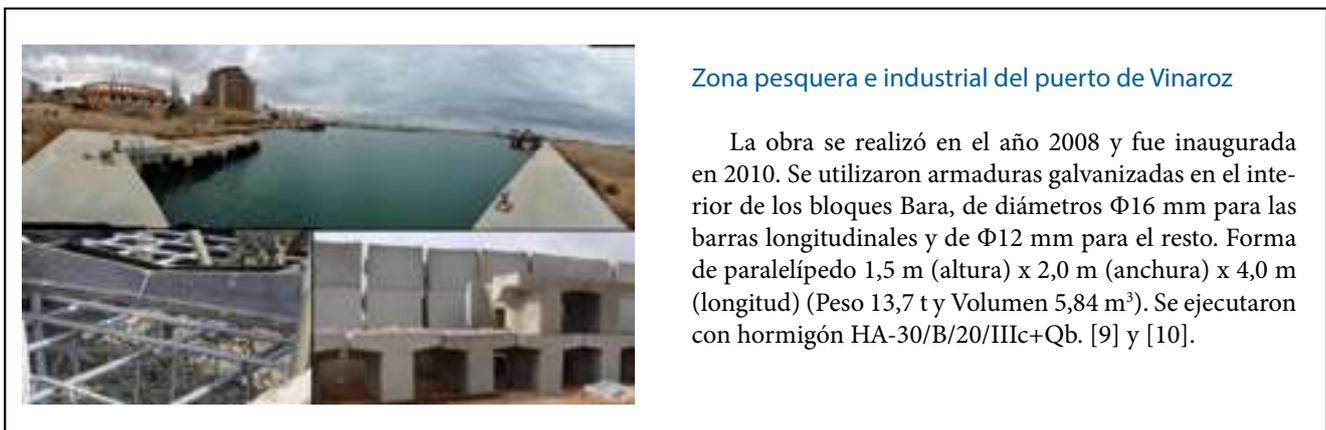
Figura 1. Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes del hormigonado y del estudio de durabilidad realizado por el IETcc-CSIC © [9].



Lonja del puerto de Benicarló

La obra se realizó en el año 2002 y fue inaugurada en 2005. Se utilizaron armaduras galvanizadas en pilares. El hormigón se ejecutó con cemento Portland CEM I 42.5 SRMR y el espesor de recubrimiento fue de 30 mm. Las armaduras se galvanizaron ya dobladas y ferralladas. Se usaron armaduras para los estribos de diámetros $\Phi 12$ y $\Phi 8$ mm; para las esperas se utilizó armadura de diámetro $\Phi 16$ mm. Las uniones se hicieron con latiguillos de acero. [9] y [10].

Figura 2. Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes y después del hormigonado © [9].



Zona pesquera e industrial del puerto de Vinaroz

La obra se realizó en el año 2008 y fue inaugurada en 2010. Se utilizaron armaduras galvanizadas en el interior de los bloques Bara, de diámetros $\Phi 16$ mm para las barras longitudinales y de $\Phi 12$ mm para el resto. Forma de paralelepípedo 1,5 m (altura) x 2,0 m (anchura) x 4,0 m (longitud) (Peso 13,7 t y Volumen 5,84 m³). Se ejecutaron con hormigón HA-30/B/20/IIIc+Qb. [9] y [10].

Figura 3. Arriba, obra finalizada; abajo, detalles de la armadura galvanizada antes y después del hormigonado © [9].

3. ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE

Según la norma UNE-EN 10088-1 [11], los aceros inoxidables son aquellos que contienen al menos un 10,5 % de cromo y un máximo de 1,2 % de carbono. Este contenido de cromo permite la formación de una capa muy fina de óxido que los autoprotege. En la tabla 1, se incluye el porcentaje de los elementos principales de aleación de los aceros inoxidables según su microestructura, incluyendo exclusivamente los tipos que interesan para el armado del hormigón: ferríticos, austeníticos y austenoferríticos (dúplex).

Tabla 1. Aceros inoxidables. % aproximado de composición química [11]

TIPO	% Cromo	% C	% Níquel	% Molibdeno
Ferrítico	10,5 - 30	< 0,08	0,3 - 2,5	0,2 - 4,5
Austenítico	14 - 28	< 0,15	0,5 - 35	0,2 - 8
Austenoferrítico	18 - 30	< 0,05	1,0 - 9,5	0,1 - 5

Los aceros inoxidables se fabrican como los tradicionales de acero al carbono; tanto mediante laminación en

caliente para los diámetros entre $\Phi 6$ y $\Phi 40$ mm, reduciendo el diámetro aprovechando la ductilidad del material a altas temperaturas; como mediante laminación en frío para diámetros más pequeños entre $\Phi 4$ y $\Phi 16$ mm, reduciendo el diámetro a temperatura ambiente. En cuanto a la normativa específica en España para armaduras de acero inoxidable, únicamente se dispone de la UNE 36067 [12] para alambres corrugados o grafilados para hormigón armado. El comité de normalización CTN 036/SC 04 está actualmente elaborando la norma prEN 10370 [13], que regulará los productos de acero inoxidable para el armado del hormigón, incluyendo tanto barras como alambres.

3.1. Características de las armaduras de acero inoxidable

El Código Estructural [5] contempla el uso de aceros inoxidables soldables en las estructuras de hormigón armado, en forma de barras, rollos y alambres, todos ellos corrugados o grafilados como medida especial de durabilidad. Los tipos de acero contemplados son los ferríticos, austeníticos y dúplex. Sus propiedades en cuanto a **características mecánicas, resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad**, varían según el tipo y la

Tabla 2. Tipos de acero y composición química sobre producto (porcentajes máximos en masa y rangos mínimo/máximo)

TIPO	C	S	P	N	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
1.4003	0,03	0,015	0,040	0,03	1,00	1,5	10,5/12,5	0,3/1,0	---	---
1.4301	0,07	0,015	0,045	0,10	1,00	2,00	17,5/19,5	8,0/10,5	---	---
1.4482	0,03	0,030	0,035	0,05/0,20	1,00	4,0/6,0	19,5/21,5	1,5/3,5	0,10/0,6	1,0
1.4362	0,03	0,015	0,035	0,05/0,20	1,00	2,00	22,0/24,5	3,5/5,5	0,10/0,60	0,10/0,60
1.4462	0,03	0,015	0,035	0,10/0,22	1,00	2,00	21,0/23,0	4,5/6,5	2,5/3,5	---

composición química. Los productos de acero inoxidable deben cumplir los mismos requisitos que se especifican en la reglamentación para las barras, rollos y alambres de acero al carbono, salvo lo relativo a su composición química.

Los aceros inoxidables citados en el Código Estructural [5] se han recogido en la tabla 2. El tipo EN 1.4003 es un acero inoxidable ferrítico muy usado, que tiene una buena resistencia a la corrosión y a la tracción y también buena soldabilidad. El tipo EN 1.4301 es un acero inoxidable austenítico base que posee buenas propiedades de resistencia a la corrosión, conformabilidad y soldabilidad. El tipo 1.4482 es un acero inoxidable de baja aleación (lean dúplex) con límite elástico dos veces superior al anterior y buena conformabilidad y resistencia a la corrosión. El acero inoxidable 1.4362 es también dúplex de baja aleación y se comporta como el anterior. El tipo 1.4462 es un acero inoxidable dúplex con una alta resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión.

Las **características mecánicas** de las armaduras de acero inoxidable son superiores a las del acero convencional, desde el punto de vista de las tensiones: carga máxima y límite elástico, y también de la deformación bajo carga máxima; tanto para el inoxidable laminado en caliente como en frío. Aun así, en el caso de las armaduras laminadas en frío la deformación es menor que en las laminadas en caliente, por lo que el uso de las primeras estaría restringido a los casos en los que no existen exigencias específicas de ductilidad. En todo caso, la ductilidad depende, en gran medida, del tipo de acero inoxidable de que se trate en cada caso.

Las armaduras de acero inoxidable se **cortan y doblan** igual que las de acero al carbono. El atado en los procesos de colocación debe hacerse con alambre también de acero inoxidable del mismo grado o de una aleación superior.

Todos los **aceros inoxidables son soldables**, pero su soldabilidad no es ilimitada, por lo que, cuando sea necesario, el suministrador debe facilitar los procedimientos recomendados para realizar las soldaduras y asegurarse que éstas sean igualmente inoxidables y resistentes a la corrosión atmosférica. Es recomendable usar electrodos del mismo grado o de un grado más alto. En la zona afectada térmicamente se debe eliminar la capa de óxido que se forma por las altas temperaturas para reducir así la probabilidad de corrosión.

El Código Estructural [5] indica que el contacto entre acero convencional y armaduras de acero inoxidable está permitido, y que para soldar ambos aceros se recomienda usar un material de aportación sobre-aleado, para que se pueda garantizar una buena resistencia a la corrosión de la unión y unas propiedades mecánicas apropiadas.

3.2. Durabilidad de las armaduras de acero inoxidable

Las armaduras de acero inoxidable tienen una gran resistencia a la corrosión; se oxidan formando en la

superficie de las barras una fina capa de óxido de cromo muy densa que constituye una barrera contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de cubrición, se vuelve a formar inmediatamente, por combinación del cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente. Existen opciones de acero inoxidable totalmente resistentes a la corrosión, que garantizan la mayor durabilidad de las estructuras en ambientes muy agresivos. Durante su vida en servicio no se produce pérdida de sección, ni merma de su resistencia a la corrosión. Su deterioro es prácticamente inexistente.

El Código Estructural [5] incluye las armaduras inoxidables soldables como **medida especial de durabilidad** en las estructuras de hormigón armado. En el caso particular de estructuras de obra civil en ambiente marino, con o sin heladas, o de estructuras de obra civil en zona de mareas, los grados recomendados por las diferentes normativas y fabricantes de armaduras de acero inoxidable son: EN 1.4362 o EN 1.4301 para ambiente marino sin heladas, y EN 1.4462 para ambiente marino con heladas y para zona de mareas.

Cuando se proyecta con armadura de acero inoxidable se pueden tener en cuenta ciertas consideraciones sobre los requisitos de durabilidad del hormigón:

- El valor límite de la anchura de fisura puede ser menor o igual a 0,30 mm, independientemente de la clase de exposición en la que esté ubicado el elemento.
- El contenido límite de cloruros a partir del que se inicia la corrosión es mayor que con las armaduras de acero convencional, aunque depende del tipo de acero inoxidable.
- El recubrimiento mínimo de hormigón se puede reducir hasta un valor de 30 mm.

3.3. Estructuras más relevantes en el ámbito costero español con armaduras de acero inoxidable

El acero inoxidable es una de las opciones más seguras y que más fuerza ha ganado en proyectos donde se exige una mayor durabilidad. Se usa tanto para estructuras nuevas como para rehabilitaciones, pero su empleo, aunque es abundante, no se ha generalizado, ni siquiera en ambientes muy agresivos. Sus aplicaciones son variadas: puentes, aparcamientos, túneles, pasos subterráneos, muros de contención, estructuras marinas y portuarias o, en general, estructuras costeras. En España se conocen muy pocas aplicaciones en obras portuarias ejecutadas con acero inoxidable; a continuación, se cita como obra de referencia la extensión de Mónaco hacia el mar, mediante cajones portuarios ejecutados con material de origen español [14].



Figura 4. Arriba, desplazamiento de los cajones; abajo, fabricación de los cajones y detalle de armadura © CEDINOX [14].

4. ARMADURAS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE VÍDRIO (GFRP)

Los polímeros reforzados con fibras (FRP) están formados por fibras continuas impregnadas de resina polimérica. Las fibras tienen alta resistencia y rigidez y son la columna vertebral del material, y la matriz polimérica ata y protege a las fibras, las mantiene separadas y transfiere las tensiones. La resina debe ser química y térmicamente compatible con las fibras, y juega un papel importante en el control del comportamiento tenso-deformacional y en la resistencia en ambientes corrosivos. Para el hormigón armado en ambiente agresivo, las barras de polímero reforzado más usadas como armadura son de fibras de vidrio (GFRP), y las resinas más habituales, por sus buenas prestaciones para el ambiente alcalino del hormigón, son las de viniléster, que se encuentran dentro del grupo de las resinas termoestables.

El proceso de fabricación más habitual de las barras de FRP es la pultrusión. Se trata de un proceso productivo por medio del cual se obtienen de forma continua materiales compuestos de sección constante. Durante el mismo, se somete a las materias primas a arrastre, para formar la barra, y parado, para realizar operaciones de impregnado, conformado, curado y corte. Para mejorar la adherencia con el hormigón de las barras, hay varias técnicas, como imprimir deformaciones en la superficie, aplicación de un revestimiento de arena, sobreposición de una nueva superficie o combinación de varias.

Este material tiene poca trayectoria de uso en España, no existe normativa a nivel nacional y su uso no está contemplado implícitamente en la reglamentación. Aun así, se están multiplicando su investigación y desarrollo tecnológico, ya que tiene notables ventajas de durabilidad, principalmente en ambientes muy agresivos, lo que además está suponiendo un notable incremento de su empleo a nivel internacional, tanto en Norteamérica como en Europa. Países como Estados Unidos, Japón, Noruega, Italia, Brasil y Canadá cuentan con guías de diseño y recomendaciones para el proyecto y ejecución de estructuras armadas con FRP; otros países están trabajando en la elaboración de documentos similares.

Una de las primeras **publicaciones de referencia** [15], se debe a la FIB (Fédération Internationale du Béton); se trata de un informe técnico que repasa las principales

Cajones portuarios en la extensión de Mónaco

Se trata de una extensión artificial de 60.000 m² construida sobre un manto de rocas y con arena traída de Sicilia. La barrera de protección frente al mar de esta nueva extensión estará formada por 18 cajones de 30 m de largo y 24 m de alto y un peso de 10.000 t. Son de tipo Jarlan de hormigón armado, con las barras de acero inoxidable colocadas en la zona exterior de los pilares y entre los muros de la parte hueca del cajón por donde circula el agua de mar. La cuantía de acero es de 4.000 t de corrugado inoxidable tipo dúplex EN 1.4362 con diámetros entre $\Phi 12$ y 40 mm, que garantizan una durabilidad para el proyecto de 100 años [14].

propiedades de las barras de FRP haciendo especial énfasis en la durabilidad y mostrando también diferentes modelos y filosofías de diseño. Actualmente, este documento está en proceso de revisión, ya que el conocimiento del material y de las estructuras armadas con él ha aumentado notablemente en los últimos años. Son muchas las publicaciones más recientes que han ido incorporando esos avances. Del mismo corte, en cuanto al tipo de documento, es el publicado en 2021 por la AFGC (Association Française de Génie Civil), que supone una guía completa o estado del arte acorde al conocimiento actual [16].

En cuanto a **códigos y normativa**, el conjunto más completo y actualizado se encuentra en el seno de la ACI (American Concrete Institute) y de la ASTM (American Society for Testing and Materials) norteamericanos. La ACI tiene numerosas publicaciones, entre las que se pueden destacar, por considerarlas suficientes para el diseño de una estructura armada con FRP, la guía de diseño ACI 440.1R-15 [17] y el código ACI CODE-440.11-22 [18]; el primero es más general y se podría aplicar en todo tipo de estructuras armadas con barras poliméricas, mientras que el segundo se centra en estructuras de edificación y armaduras de fibra de vidrio. La ASTM ha desarrollado un acervo completo de normativa de ensayo para determinar las propiedades específicas de estas armaduras y también dispone de una norma de producto, la D7957/D7957M-22 [19], que incluye las propiedades mínimas que deben cumplir las armaduras FRP.

A **nivel europeo**, se está en proceso de redacción de una nueva generación de eurocódigos estructurales. En concreto, el proyecto de revisión de la norma *UNE-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures*, incluye, entre otras novedades, un anejo informativo dedicado a las reglas específicas de aplicación cuando se emplea la alternativa de armaduras FRP para el refuerzo interno de estructuras sometidas predominantemente a cargas estáticas. Además, aunque estas armaduras no están cubiertas por ninguna norma armonizada, recientemente se ha aprobado, al amparo del Reglamento de Productos de Construcción (UE) 305/2011, el Documento de Evaluación Europea EAD 260023-00-0301 [20], que permitirá y fomentará la libre comercialización de este producto de construcción en el mercado único europeo, mejorará la información de sus características y prestaciones y,

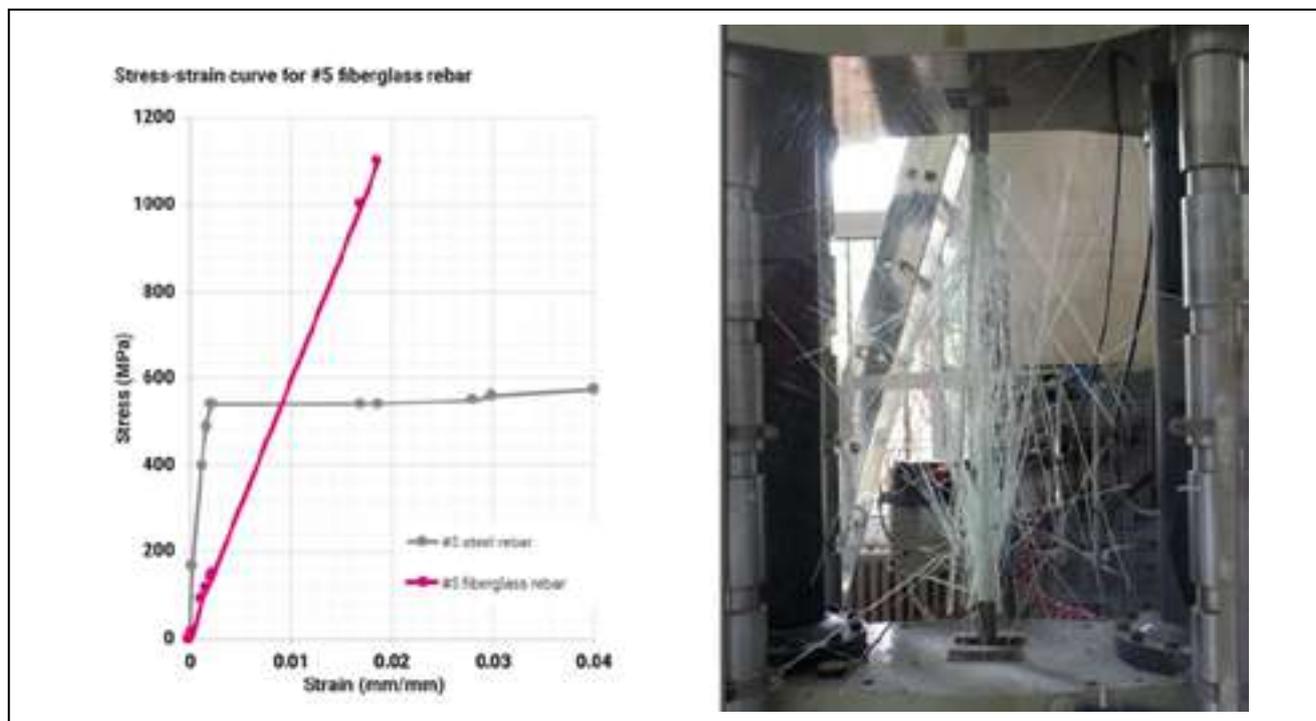


Figura 5. Izquierda, resistencia a tracción: comparativa entre acero y GFRP (©2021 OwensCorning, all right reserved, used with permission); derecha, rotura por tracción en el Laboratorio del CEDEX.

finalmente, cuando se publique dicho documento en el Diario Oficial de la Unión Europea los fabricantes podrán obtener el marcado CE de su producto y acompañarlo de la correspondiente declaración de prestaciones.

4.1. Características de las armaduras GFRP

Las **características físico-mecánicas** de las armaduras poliméricas **difieren notablemente de las de acero** y, por tanto, así sucede también con las propiedades resistentes del hormigón armado resultante. Las barras GFRP tienen respuesta elástica hasta el fallo, son frágiles y no avisan antes de la rotura. La resistencia a tracción de las barras de GFRP normalmente disminuye al aumentar el diámetro. Se trata de un material anisótropo, caracterizado por una alta resistencia a tracción en dirección de las fibras, pero bastante más débil en lo que respecta a la resistencia a cortante. Su coeficiente de dilatación es diferente en dirección longitudinal y radial. Su módulo de elasticidad es bajo, lo que hace que el diseño de los elementos estructurales esté gobernado por la deformación. Las barras de GFRP presentan el fenómeno denominado fatiga estática o rotura por fluencia (*creep*); es decir, sometidas a carga constante pueden fallar después de un cierto periodo de tiempo conocido como durabilidad.

La **adherencia con el hormigón** de las barras GFRP dependen de la composición resina-fibra, del proceso de fabricación, de las condiciones medioambientales y, sobre todo, del tipo de superficie de acabado de las armaduras. La interacción de la unión de las barras de GFRP con el hormigón es diferente a la del acero en muchos aspectos. En el caso de las barras de acero corrugadas, la interacción surge principalmente de la acción mecánica de la corruga de la barra contra el hormigón. En el caso de las barras de GFRP, con un módulo elástico más bajo



Figura 6. Distintas superficies de acabado en armaduras GFRP.

y ondulaciones superficiales menos prominentes que las corrugas de las barras de acero, la interacción en el contacto tiene un carácter más friccional. El fallo de la adherencia en las barras de acero se debe al aplastamiento del hormigón en la zona cercana a las corrugas, mientras que en el GFRP se debe principalmente al fallo parcial en el hormigón y a posibles daños en el acabado superficial de la armadura GFRP [15].

Respecto a la **fatiga**, o degradación de los materiales por estar sometidos a ciclos de carga, el comportamiento de las armaduras GFRP es bastante bueno, pero puede haber factores que lo deterioren, como el aumento de la temperatura o la humedad, o cualquier otro que provoque la degradación medioambiental de la resina. Como en el caso de otros materiales, también influyen la frecuencia de los ciclos de carga, la tensión media y la ratio de fatiga

(relación entre las tensiones mínima y máxima). Algunas guías recomiendan actuar con criterios muy conservadores por la gran cantidad de factores que afectan a su comportamiento y por la escasez de investigación del efecto de las cargas cíclicas sobre la adherencia con el hormigón. Como se ha comentado, el proyecto de revisión del Eurocódigo 2 limita el uso de armaduras GFRP a estructuras sometidas a cargas predominantemente estáticas.

Otras características en las que difieren notablemente de las estructuras de acero serían:

- Su peso es considerablemente más ligero, lo que beneficia su transporte y colocación en obra. Su densidad oscila entre 1,25 y 2,1 g/cm³.
- Estas armaduras facilitan la demolición cuando se emplean en estructuras temporales.
- Son materiales que tienen transparencia magnética y aislantes desde el punto de vista térmico y eléctrico.

Existen algunas características de las armaduras GFRP que no son, a priori, ventajosas con relación a las de acero, o, al menos, necesitarían un **mayor trabajo de experimentación** para alcanzar un conocimiento más detallado. Por ausencia de experiencia en su uso no está recomendada su utilización en algunos elementos estructurales donde la redistribución de momento sea requerida, ni en elementos que deban resistir principalmente compresión [17]. Es un material susceptible al fuego y que se degrada con las altas temperaturas, perdiendo propiedades mecánicas y adherencia. Las armaduras no pueden doblarse en obra y en su colocación puede haber pérdidas por rotura. Los elementos curvos de las barras de GFRP presentan una resistencia a la tracción menor que la de los elementos rectos (alrededor del 40 % en primera aproximación). El material se degrada con la radiación ultravioleta, por lo que no debe almacenarse a la intemperie.

4.2. Durabilidad de las armaduras GFRP

Los factores que afectan a la **durabilidad de las armaduras poliméricas** embebidas en el hormigón y el modo en que lo hacen son muy diferentes a los del acero; lo más significativo es que no se ven afectadas ni por la carbonatación del hormigón ni por la presencia de cloruros. No obstante, las características de las barras de GFRP pueden verse modificadas antes, durante y después de colocadas en obra, tanto disminuyendo como aumentando. Ambientes con agua, radiación ultravioleta, elevadas temperaturas, y soluciones alcalinas, ácidas o salinas, pueden afectar a la resistencia y/o rigidez de este tipo de armaduras.

Uno de los factores más significativos, por lo que supone en cuanto a la pérdida de propiedades resistentes a largo plazo, es el fenómeno de **fluencia o creep**. Cuanto mayor es la carga sostenida, menor es el llamado límite de endurance o tiempo que transcurre hasta el fallo. El límite de endurance también se ve muy afectado por condiciones medioambientales como las altas temperaturas, la exposición a radiación ultravioleta, la alcalinidad, los ciclos humedad sequedad, y los ciclos hielo deshielo. Fruto de los datos de numerosas investigaciones se ha llegado a la conclusión de que existe una relación lineal entre la tensión de rotura y el logaritmo del tiempo transcurrido

hasta el fallo por creep. Cuantificar esa relación, exige la realización de trabajos experimentales en cada tipo de concreto de material.

Las fibras de vidrio son sensibles a la **degradación en medio alcalino**, por lo que, a priori, el hormigón sería un ambiente intrínsecamente agresivo para este tipo de barras. Los álcalis pueden provocar cambios en apariencia, en masa y en ciertas propiedades mecánicas, como la resistencia a tracción o al corte interlaminar. En todo caso, la mayoría de los estudios de durabilidad existentes hasta la fecha se han realizado mediante envejecimiento acelerado en soluciones más agresivas que el medioambiente que proporciona el hormigón, por lo que el enfoque resultante se puede considerar muy conservador.

En el proyecto de estructuras de hormigón armado con GFRP se podrían tener en cuenta ciertas consideraciones debido a la ausencia de corrosión electroquímica y el consiguiente aumento de la durabilidad del hormigón:

- Utilizar espesores de hormigón de recubrimiento menores, que podrían reducirse hasta 50 mm en ambiente marino con cloruros [21] y [22].
- Prescindir de dosificaciones de hormigón especialmente diseñadas para prevenir la corrosión del acero.
- Proyectar para una anchura de fisura mayor en ambientes agresivos.
- Poner en contacto y usar de modo combinado con cualquier tipo de armadura de acero.

4.3. Estructuras más relevantes en el ámbito costero español con armaduras GFRP

En general, el empleo de esta tipología de armaduras a nivel internacional está casi siempre asociado a la problemática de la corrosión en ambientes agresivos por cloruros, a la necesidad de una fácil demolición o a la conveniencia de lograr transparencia magnética en las armaduras. También se usan cada vez más en rehabilitación del patrimonio histórico.

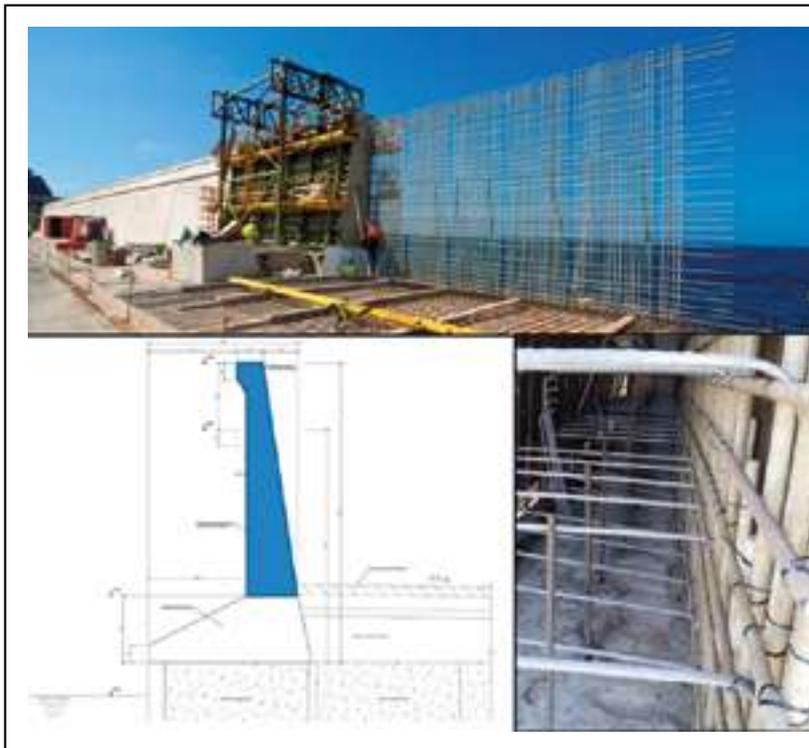
- Hormigón expuesto a ambiente marino: diques, muelles, construcciones en la costa, desalinizadoras, plataformas en mar abierto, etc.; hormigón expuesto a sales de deshielo: tableros de puentes, barreras y pavimentos de hormigón, etc.; y hormigón expuesto a otros ambientes agresivos: plantas de tratamiento de aguas residuales, depósitos, en industrias químicas, en piscinas cubiertas, canalizaciones, etc.
- Aplicaciones que requieren baja conductividad eléctrica o neutralidad electromagnética: cámaras de resonancia magnética en hospitales, instalaciones de radares, torres de control de aeropuertos, ferrocarril con sistema de levitación electromagnética, etc.
- Estructuras temporales: muros pantalla y chimeneas que tienen que ser demolidos, por ejemplo, en trabajos realizados mediante tuneladora.
- Rehabilitación de patrimonio histórico, elementos prefabricados y elementos arquitectónicos con poco espesor de recubrimiento y/o combinados con hormigones de cal.



Bloques dique Langosteira (A Coruña)

El refuerzo del manto principal del dique de abrigo de Punta Langosteira, en el puerto de A Coruña consistió en la fabricación y colocación de 35 bloques cúbicos de 4 m de lado, de hormigón HM-30/20/I+Qb+E: 31 de ellos de densidad $2,66 \text{ t/m}^3$ y los 4 restantes de densidad $2,82 \text{ t/m}^3$, armados en ambos casos con 60 barras de GFRP de diámetro $\Phi 32 \text{ mm}$. La obra se ejecutó en 2017 (Información y figuras facilitadas por la Autoridad Portuaria de A Coruña y Galaicontrol).

Figura 7. Armadura GFRP en distintas fases del proceso de fabricación de los bloques.



Espaldón del dique suroeste de Escombreras, Cartagena (Murcia)

A los 15 años de su puesta en obra, el hormigón presentaba problemas severos de corrosión. La reparación se ejecutó en 2015 y consistió en la demolición del espaldón de 400 m de longitud y recrecido con hormigón HA-35 desde la cota +8 a la +10, ya que además del daño por corrosión, se producían rebases en esa zona del dique. El armado se ejecutó con barras de acero al carbono, en la cara interna, y de polímero reforzado con fibras de vidrio, en la cara externa. Se colocaron 9 barras GFRP $\Phi 32$ por metro lineal. Aplicando la normativa italiana, la armadura transversal debía ser del 20 % de la vertical; así se emplearon 5 barras $\Phi 20$ por metro lineal (Información facilitada por la Autoridad Portuaria de Cartagena y RTHp) [23].

Figura 8. Arriba, armadura GFRP durante una de las fases de hormigonado; abajo, croquis de la intervención y armadura interior © [23].

5. REPERCUSIONES ECONÓMICAS Y MEDIOAMBIENTALES DEL EMPLEO DE ARMADURAS ALTERNATIVAS RESISTENTES A LA CORROSIÓN

Para impulsar el desarrollo de innovaciones tecnológicas en obras de construcción, hoy día es fundamental cuantificar las **implicaciones económicas y medioambientales** que conllevan, así como los impactos que producen. Está demostrado que el hormigón armado con barras alternativas a las de acero al carbono es una solución válida para evitar, o retrasar, la **corrosión** en ambiente marino, y por tanto aumentar la **durabilidad del hormigón**. Ese aumento en la durabilidad repercute directamente en

algunos aspectos relativos a la valoración económica y medioambiental, siempre y cuando se considere en dicha valoración el **ciclo de vida**¹ completo de las estructuras, y, por tanto, repercute directamente en la **sostenibilidad** de las estructuras. Es importante entonces realizar estudios que cuantifiquen esta repercusión en estructuras marítimas y portuarias, como pueden ser cajones, diques, losas, vigas cantil, pantalanés, etc. y, en general, en cualquier

¹ Según la versión corregida de 2021 de la norma UNE-EN ISO 14040 [35], el ciclo de vida se define como las *etapas consecutivas e interrelacionadas, desde la adquisición o generación de materia prima a partir de recursos naturales hasta la disposición final*.

estructura que se ubique en ambiente especialmente susceptible a la corrosión.

El estudio de cada alternativa, en cuanto al empleo de materiales y/o procesos constructivos, y de sus alcances económicos y medioambientales durante el ciclo de vida ayudará a la toma de decisiones teniendo en cuenta, no sólo el resultado de la evaluación en el momento de la construcción, sino también el resultado completo en todo el periodo de servicio hasta el fin de su vida útil. Estos enfoques forman parte de la perspectiva global de evaluación de la sostenibilidad y están dentro del marco de la Directiva Europea 2014/24/UE sobre contratación pública [24], [25].

Para el **análisis de los costes del ciclo de vida** (LCC - *Life-Cycle Cost*) existe normativa internacional que recoge metodología estandarizada. Se pueden citar como más significativas las normas ISO 15686-5 [26] y UNE-EN 17472 [27]. La esencia del procedimiento consiste en valorar, tanto los costes iniciales, como todos aquellos en los que se puede incurrir con cada alternativa durante un periodo de referencia dado (por ejemplo, 100 años). Un análisis de este tipo puede tener como objetivo elegir entre diferentes alternativas de diseño para el conjunto, o para una parte, de una obra en la etapa de proyecto y construcción de ésta, o en la etapa de uso (por ejemplo, ante la necesidad de una rehabilitación estructural). Las operaciones y costes en los que se incurre con cada alternativa deben garantizar en todo momento el cumplimiento de los estándares mínimos de funcionamiento del activo bajo análisis, así como que las soluciones son equivalentes a nivel usuario y que la unidad funcional a que se referencian los costes es siempre la misma.

Los costes a tener en cuenta incluirían al menos los siguientes aspectos:

- **La etapa de producción de los materiales.** Todas las alternativas de armado consideradas en este trabajo resultan de mayor coste en la etapa de fabricación del material. Este encarecimiento inicial depende de la tipología: las galvanizadas son menos gravosas que las de acero inoxidable o GFRP. Respecto a estas últimas, habría que tener en cuenta que no se puede comparar directamente el precio del kg, debido a que las densidades son muy distintas (aproximadamente 1:4), pero además habría que considerar, si fuera el caso, la diferente cuantía necesaria de armadura GFRP en una misma sección resistente; por ejemplo, entre ser aproximadamente igual [21] [28] o estar en una relación de 1,5 veces superior a la del acero [22]. Así, el precio por kilo podría ser incluso más de 14 veces superior [28], pero, teniendo en cuenta la relación de densidades, ese aumento se reduciría a aproximadamente 3,6.

El encarecimiento inicial de los materiales, para cualquiera de estas alternativas, podría ser menor si, además de su diferencia de coste, se tuvieran en cuenta en el análisis los posibles ahorros en otros componentes del hormigón, como podrían ser los debidos al empleo de una menor cantidad de cemento, adiciones, inhibidores de corrosión, etc. Otras diferencias para analizar, podrían ser la disminución del espesor de recubrimiento de hormigón, como se

ha mencionado en los apartados anteriores, o las derivadas del empleo de áridos reciclados o incluso de agua de mar para el amasado del hormigón, en las soluciones no corrosibles (por ejemplo, descontando los costes de desalinización), que podrían llegar a ser muy significativos en países con escasos recursos hídricos [29] [28]; por el contrario, en este tipo de hormigones habría que considerar costes adicionales debidos al empleo de plastificantes u otros aditivos, o a la necesidad de un aumento del contenido de cemento para conseguir la resistencia mínima deseada. En todo caso, la diferencia de costes debida a la dosificación del hormigón parece que es despreciable frente a la influencia del cambio de armaduras [28].

Como ejemplos, respecto a las armaduras galvanizadas en la construcción de edificios, su empleo puede suponer un aumento del 6 al 10 % en el coste del hormigón, y del 1,5 al 3 % del coste total de la obra [7]. Para el caso del acero inoxidable, se ha llegado a valorar que, aunque éste resulta entre 6 y 10 veces más caro que el convencional, el coste total de hormigón se incrementaría menos de un 20 %, al poder rebajar su calidad, recubrimiento, etc. [30]; en otras referencias, en las que se han evaluado diferentes alternativas para el refuerzo del hormigón de un tanque de cloración de agua, esta valoración podría llegar a más del 80 %, teniendo en cuenta diferencias geográficas y coyunturales [21].

Otra alternativa, para reducir los costes iniciales manteniendo una alta durabilidad, consistiría en el empleo de armaduras combinadas de distinta tipología en una misma sección de hormigón, reservando las armaduras no corrosibles a las zonas más expuestas al ataque por corrosión y dejando las convencionales de acero en el resto. Como se ha mencionado, esta fue la solución que se adoptó en el dique de Escombreras en Cartagena, donde el estudio de costes de ejecución material concluyó que la alternativa con barras GFRP resultaba un 26 % más costosa, mientras que la solución mixta con este mismo tipo de barras elevaba el coste tan sólo un 4 % con relación a las armaduras convencionales [23].

- **La etapa de construcción.** Para cada alternativa se tendrían en cuenta las diferencias de coste debidas a aspectos tales como el transporte (menor para las armaduras GFRP, si sólo dependiera del peso), la productividad de los procesos de colocación y conformado en obra de las armaduras, la cuantía necesaria de cada tipología, y las diferencias en la fabricación y puesta en obra del hormigón y en la gestión de los residuos de construcción. Un análisis completo y exhaustivo valoraría también la diferencia de coste de control de calidad. Los costes de construcción se podrían valorar en función de los de los materiales y, a priori, considerarlos iguales para todas las alternativas que empleen acero.

Como ejemplo, en el caso de las armaduras GFRP, este tipo de costes resultará, en general, menor en cuanto a transporte y montaje [28]; pero su empleo también puede implicar algunos sobrecostes de construcción, por ejemplo, debidos a que necesi-

ten más atado ante la posibilidad de que, por su menor peso, puedan flotar en el hormigón [21].

- La **etapa de uso**. Para cada tipología de armadura, habría que considerar los costes de mantenimiento y reparación durante todo el tiempo de referencia considerado. Estos costes dependerán del tipo de hormigón armado que se haya ejecutado y de la exposición a la que vaya a estar sometido; en definitiva, dependerán de cada estructura concreta, pudiendo variar entre aquellas que únicamente necesiten mantenimiento preventivo durante toda su vida útil y aquellas que, teniendo una vida de servicio inferior al tiempo de referencia, necesiten operaciones de mantenimiento periódicas para recuperar los estándares mínimos requeridos, e incluso reparaciones o rehabilitaciones completas.

En la primera situación se podrían considerar las estructuras ejecutadas con acero inoxidable y con armaduras GFRP, y entre las segundas, las armaduras de acero al carbono y probablemente también las galvanizadas, ya que aunque retrasen la corrosión, y puedan admitir un límite de cloruros mayor que las convencionales, son muy sensibles a los defectos superficiales y no se puede garantizar que los revestimientos permanezcan intactos durante todo el periodo de referencia, principalmente en la fase de ejecución, pero también en la fase de uso cuando el ambiente es muy agresivo (por ejemplo, zona de salpicaduras o carrera de marea de las obras portuarias).

Además, habría que considerar los costes de inspección y mantenimiento rutinario; y adicionalmente, para aquellas alternativas que tengan una vida útil inferior al periodo de referencia, también habría que incluir los costes de inspecciones detalladas y de reparaciones para recuperar los estándares mínimos exigidos. Existen programas y modelos probabilísticos para determinar si se producirán episodios de corrosión durante el periodo de referencia (y, por tanto, si se incurrirá en dichos costes), que tienen en cuenta, además de la tipología de armado, el tipo de hormigón, el recubrimiento y la estrategia de reparación que se emplee [21] [28] [30] [31].

- La **etapa de demolición**. Al final de la vida útil habría que considerar los costes de demolición y vertido, y, si fuera el caso, descontar el beneficio obtenido del reciclado de los materiales. Todos los tipos de acero son reciclables y se puede estimar que hasta el 90 % del material es recuperable. La cuantía econó-

mica obtenida de la chatarra dependerá del tipo de acero y será mayor para el inoxidable. Según la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG), el cinc es considerado un material 100 % recuperable y casi un 30 % de su producción total se lleva a cabo con material reciclado. En el caso del material polimérico, aunque existen investigaciones que tratan de desarrollar metodologías de reciclado y reutilización, no están a un nivel como para que se pueda considerar algún beneficio por su aprovechamiento tras la demolición. Si al final del periodo de referencia, alguna alternativa tiene una vida remanente de servicio, ésta podría contabilizarse como un beneficio [28] [31].

Cuando se realiza un análisis de costes de diferentes partidas que se suceden a lo largo del tiempo, es necesario referir dichos costes a su **valor actual** para que la comparación sea válida. Como es bien conocido, el coste actual neto (NPC – Net Present Cost) se obtiene mediante la fórmula:

$$NPC = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n}$$

Siendo n el año enésimo, N el periodo de referencia, C_n los costes en el año n y r la tasa de descuento. Respecto a esta última, además de ser difícil de prever, los resultados de estos estudios siempre son muy sensibles a ella, de modo que, cuanto mayor sea r , menor repercusión tendrá la elección de las alternativas más durables en la disminución relativa del valor NPC. Esto es debido a que las alternativas que requieren menos mantenimiento apenas variarán su resultado al variar la tasa de descuento, mientras que las que sí requieren costes diferidos en el tiempo, éstos tendrán menos peso en el resultado final a medida que aumenta el valor de r . Por ello, la mayoría de los análisis de este tipo incluyen una evaluación de la sensibilidad de los resultados a la tasa de descuento. Tasas superiores entre 1,3 y 5 % para acero inoxidable, y entre 4 y 10 % para armaduras FRP, pueden servir de referencia como límite de eficacia económica de estas alternativas [21], [22], [28], [29], [31].

En todo caso, cada estructura tiene que ser analizada independientemente y no es posible extrapolar resultados de una construcción a otra. En la decisión sobre la solución más ventajosa, principalmente cuando existe una incertidumbre alta sobre la futura fluctuación de la tasa de descuento real, habrá que tener en cuenta que una alternativa puede suponer una eficacia de coste menor que otra, para una determinada tasa de descuento, pero que dicha

Tabla 3. Estudio bibliográfico % (años) [%] – GS: armaduras galvanizadas; ES: armaduras recubiertas de resina epoxi; SS: armaduras de acero inoxidable; GFRP armaduras de polímeros reforzados con fibras de vidrio

Referencia	GS	ES	SS	GFRP	r (%)
[21]	---	11 [6,0]	25 (50) [1,95]	43 (35) [5,15]	0,6
[22]	---	0,75 [2]	10,37 (75) [2]	20 (40) [4]	1
[31]*	---	---	28,8 (50) [3-5]	---	0,01
[29]	---	---	---	30 (50) [10]	0,7
[28]	---	---	15 (50) [1,35]	≈50 (20) [5,9]	0,7

* Periodo de referencia 79 años.

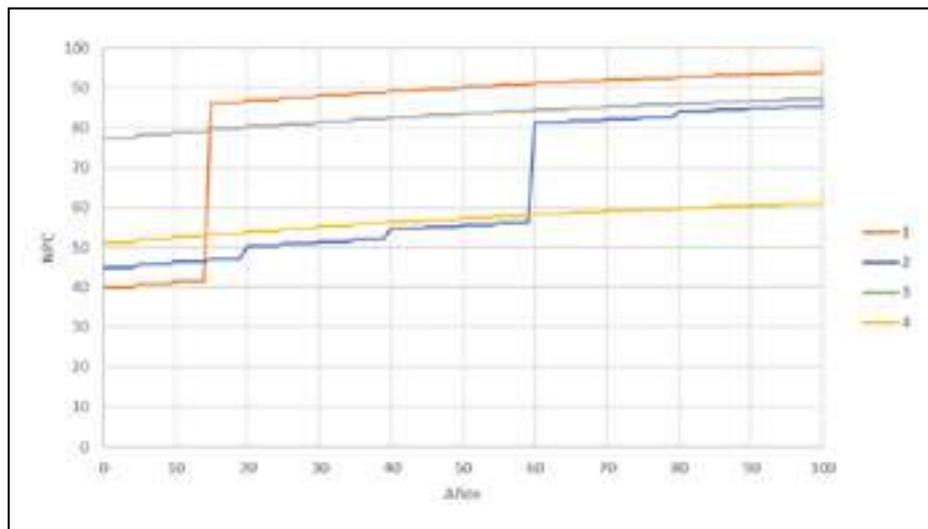


Figura 9. Ejemplo de curva comparativa de los costes actualizados del ciclo de vida de una estructura de hormigón armado con 4 alternativas de armaduras, para un periodo de referencia de 100 años.

eficacia puede seguir siendo de signo positivo hasta tasas de descuento más altas. Igualmente será necesario realizar análisis de sensibilidad con relación a cualquier otro factor que aporte incertidumbre en el tiempo, como pueden ser la posibilidad de retardo o aceleración de los procesos de corrosión, la variación de los costes de los materiales y de la mano de obra, etc.

Simplemente como referencia, en la tabla 3 se recogen algunos casos concretos de estudios de este tipo obtenidos de la bibliografía, para un periodo de referencia de 100 años, y que se han considerado representativos de la temática de este artículo. Se recoge el porcentaje de disminución del NPC de cada alternativa con relación a la opción de acero al carbono, indicando entre paréntesis el número de años necesario para que el NPC de las distintas alternativas sea inferior al que se obtendría empleando armaduras de acero al carbono y entre corchetes, la tasa de descuento a partir de la cual las soluciones no son económicamente ventajosas para el periodo de referencia de 100 años.

En la figura 9 se ilustra a modo de ejemplo los resultados que se podrían obtener para el valor NPC en función de la influencia de la tipología de las armaduras en la durabilidad de una estructura de hormigón armado.

La curva 1 de la figura 9 trata de representar la situación real de algunos diques en el ámbito costero español, construidos con armadura de acero al carbono tradicional y que han tenido que sufrir reconstrucciones importantes en un periodo de tiempo inferior a 20 años, la reconstrucción modelizada en la figura supone su ejecución con armaduras no corrosibles. La curva 2 representaría un hormigón armado, con acero protegido con algún tipo de revestimiento, que podría ser galvanizado o de otro tipo (por ejemplo, recubrimiento mediante resina epoxi), capaz de retrasar el fenómeno de la corrosión, pero no de evitarla durante todo el periodo de referencia.

Las curvas 3 y 4 corresponderían a alternativas cuyo tiempo previsto de vida útil es superior al tiempo de referencia del estudio; como sería el caso de las armaduras de acero inoxidable o de FRP. En ambos casos, el valor actual de los costes se movería entre ambas curvas, siendo mayor o menor en función del precio de mercado de cada material, de la coyuntura económica general y de la ubicación

geográfica. Como se puede apreciar, en estos casos el coste más significativo sería el inicial, y, a pesar de que ambas alternativas se corresponden con los costes más altos de este tipo, pueden llegar a ser muy ventajosas cuando se considera el coste completo del ciclo de vida.

La comparativa del resultado económico de cada alternativa cambiará sustancialmente en los casos en los que se produzcan actuaciones de rehabilitación completa, por lo que, respecto a lo comentado en el análisis de sensibilidad, parece claro que el estudio se verá singularmente afectado por el programa de mantenimiento y rehabilitación previsto para cada una de las alternativas de armado, y, en último término, será singularmente sensible a la previsión que se haya hecho sobre la propagación de cloruros en el hormigón e inicio de la corrosión. Las diferencias en el incremento del NPC de cada alternativa durante el periodo de referencia se deberán fundamentalmente a los trabajos de inspección, mantenimiento, reparación y rehabilitación que requiera cada una.

Una vez valorados todos los costes asociados a cada alternativa, un paso más consistiría en el estudio de la **contribución de cada alternativa a la sostenibilidad y al desarrollo sostenible**. En este sentido, el análisis del coste del ciclo de vida es sólo una parte que valora los aspectos económicos, a los que habría que añadir los **medioambientales** e incluso **sociales**. En general, la evaluación medioambiental y de costes se estudia separadamente, aunque parece claro el interés que tendrá integrar ambos tipos de estudios para poder comparar todos los costes asociados a cada alternativa, incluyendo las llamadas *externalidades medioambientales* [25]. Dicha integración se podría realizar si se cuantificaran los aspectos medioambientales en términos monetarios [32], por ejemplo, si existe un pago o tasa real por la emisión de CO₂ o cuando existen costes asociados al cumplimiento de la legislación vigente en materia de construcción sostenible, como podrían ser los debidos al tratamiento de desechos al final de la vida útil de los productos de construcción.

En cuanto a los costes **sociales**, se podrían considerar, por ejemplo, los costes del usuario relacionados con la interrupción del servicio, total o parcialmente, durante las etapas de construcción y mantenimiento de la estructura.

O incluso otros impactos de aún más difícil valoración objetiva, como podrían llegar a ser las consideraciones estéticas en obras de rehabilitación de construcciones singulares con valor patrimonial, en las que evitar la afluencia de manchas en la superficie del hormigón debidas a los productos de corrosión puede llegar a ser una de las causas determinantes en la elección de una alternativa [33].

Para la **valoración medioambiental del ciclo de vida** (LCA - *Life-Cycle Assessment*) también existe normativa que recoge metodología estandarizada y criterios para su valoración. Se pueden citar como más representativas las normas UNE-EN ISO 14040 [34], [35], UNE-EN ISO 14044 [36], [37], [38] y UNE-EN 15804 [39], [40]. En nuestro caso, el objetivo sería valorar, para posteriormente decidir, las distintas alternativas de armado del hormigón teniendo en cuenta sus repercusiones medioambientales durante el ciclo de vida, planteando cada alternativa con suposiciones y contexto equivalentes. Para el análisis es necesario definir la unidad funcional del sistema y el periodo de referencia; así como prever el programa de mantenimiento y rehabilitación que necesitará cada opción de armado en función de los materiales empleados y el avance previsto de la corrosión, garantizando siempre estándares mínimos de funcionamiento. La metodología propuesta por las normas referenciadas detalla las distintas fases (que podrían ser iterativas) para la realización de un estudio completo y que consistirían en:

- Definición del **objeto** y del **alcance**. Para la temática que se plantea, sería la comparación de alternativas de armado desde el punto de vista de sus implicaciones medioambientales, considerando las mismas fases del ciclo de vida que se han planteado en el análisis económico, y preferiblemente también la misma unidad funcional y periodo de análisis. Dadas las dificultades de realizar este análisis en el ciclo completo de vida, principalmente por la dificultad de encontrar datos fiables y por las muchas incertidumbres que se pueden plantear, muchos estudios se limitan a las fases de producción de los materiales, transporte y construcción (*cradle to gate*) y es más difícil encontrar otros que incluyan además las fases de mantenimiento y fin de vida de la estructura (*cradle to grave*).
- Análisis del **inventario** del ciclo de vida, donde se trata de recopilar y validar los datos de entrada y salida del sistema. Dichos datos procederían de los flujos elementales e incluirían la utilización de recursos (consumo de materias primas: cemento, agua, etc. y consumo de energía: transporte, amasado del hormigón, etc.) y las emisiones al aire y los vertidos al agua y al suelo. Los flujos elementales se producirán durante todo el ciclo de vida y, una vez más, las alternativas que requieran mayores actuaciones de reparación tendrán que asumir flujos adicionales en determinados momentos del ciclo, debido a la demolición y reciclado de materiales dañados, a la producción y transporte de nuevos materiales y a la ejecución de las obras necesarias.
- Evaluación del **impacto** del ciclo de vida, indicando las categorías de impacto, sus indicadores y los modelos de caracterización. Se asignarían los resulta-

dos del inventario a cada categoría para calcular los resultados de cada indicador y poder conocer y evaluar los impactos potenciales, así como determinar cuáles son más significativos. Existen algunas referencias de estos estudios para comparar estructuras ejecutadas con distintos tipos de armaduras, que han recogido como categorías de impacto el calentamiento global, la formación de oxidantes fotoquímicos, la acidificación y la eutrofización; la reducción de la capa de ozono también se ha considerado en algún caso, pero, en general, resultando poco relevante en términos globales [22], [31].

- Interpretación del **análisis**, evaluando los resultados de las dos fases anteriores con relación al objetivo y alcance, para obtener conclusiones y poder emitir recomendaciones. Para establecer confianza en los resultados, la evaluación incluiría las verificaciones de los análisis de integridad, de coherencia y de sensibilidad. Normalmente, en el momento de la construcción, los impactos resultan mayores para armaduras no corrosibles, pero puede ser de modo muy poco significativo, contrariamente a lo que ocurriría con los costes, ya que el mayor peso de esos impactos se debe al propio hormigón (hasta el 93 % de los impactos) y no a las armaduras [31]. El hormigón en sí, además, podría ser medioambientalmente más sostenible, por ejemplo, cuando se emplea árido reciclado o incluso agua de mar junto a armaduras GFRP [28].

Teniendo en cuenta los beneficios de durabilidad y sostenibilidad que aportan las armaduras no corrosibles en las estructuras de hormigón, y los ahorros en operaciones de mantenimiento y rehabilitación que suponen, es previsible que para estas armaduras los impactos apenas aumenten desde el momento de la construcción, mientras que los aumentos sean muy notables en las armaduras que requieran mayor esfuerzo en estas operaciones; entre aproximadamente un 40 % [22] o más de un 70 % dependiendo de la categoría de impacto [31]. Este aumento de los impactos invierte el signo de la valoración del ciclo de vida para la mayoría de las categorías, previsiblemente en el momento en el que se produzcan las primeras operaciones importantes de rehabilitación, como ocurría también en el análisis económico.

Los resultados del análisis del ciclo de vida para cada estructura de hormigón con diferentes alternativas de armaduras pueden ser muy distintos y dispares entre sí, en beneficio de unas u otras alternativas según las distintas categorías de impacto; pero, en todo caso, las alternativas que necesiten mayores labores de mantenimiento y actuaciones extraordinarias de reconstrucción o rehabilitación verán aumentados considerablemente los valores de todos los indicadores de impacto a medida que dichas actuaciones van siendo necesarias.

La curva 1 de la figura 10 correspondería a una estructura ejecutada con armaduras corrosibles que necesitaran importantes labores de rehabilitación y además éstas se ejecutarían con el mismo tipo de armaduras, por lo que las intervenciones y reparaciones se sucederían a lo largo de todo el ciclo de vida. La curva 2 correspondería también a

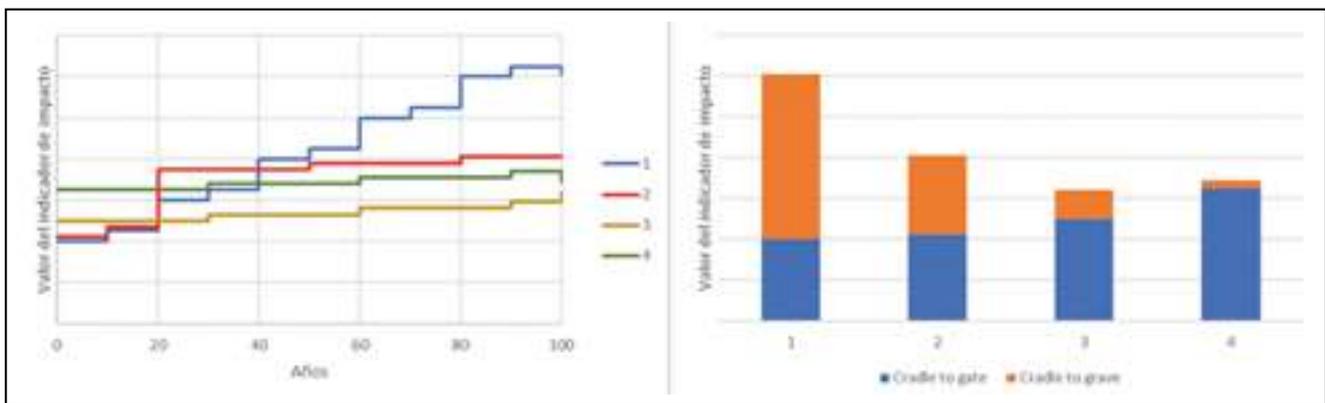


Figura 10. Ejemplo de gráficos comparativos de análisis LCA para una determinada categoría de impacto, de una estructura de hormigón con diferentes tipologías de armaduras y estrategias de mantenimiento y reparación.

una estructura ejecutada con armaduras corrosibles, pero en este caso la primera reparación importante se ejecutaría con armaduras resistentes a la corrosión. Las curvas 3 y 4 representarían estructuras ejecutadas con armaduras no corrosibles, que podrían suponer impactos mayores hasta la etapa de construcción, pero que apenas serían significativos en las etapas de uso.

El resultado de este tipo de estudios no es extrapolable de una construcción a otra, por lo que debe hacerse para cada caso particular incluyendo un análisis de sensibilidad para estimar el efecto sobre el resultado de los métodos y datos elegidos. Por último, debe indicarse que no existe base científica para reducir el análisis del ciclo de vida a un único valor o puntuación global, ya que la ponderación entre las categorías de impacto requeriría de juicios de valor o consideraciones subjetivas [34].

6. CONCLUSIONES

Se han expuesto las características de distintas tipologías de armaduras para el hormigón, diferentes a las de acero convencional, todas ellas con la característica común de aumentar la durabilidad de las estructuras, retrasando o incluso eliminando el fenómeno de la corrosión.

Dichas alternativas son económicamente más costosas, y dependiendo de las categorías de impacto que se consideren, podrían ser también más gravosas desde el punto de vista medioambiental en el momento de la construcción. Cuando se analiza la sostenibilidad de las mismas, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, para un análisis del ciclo de vida en un periodo de referencia medio-largo, las estructuras con armaduras no corrosibles, es decir, con mayor durabilidad, apenas ven incrementados sus costes e impactos, mientras que las otras lo llegan a hacer de modo muy significativo.

Las estructuras marítimas y costeras están singularmente expuestas a desarrollar fenómenos de corrosión a edades muy tempranas, por lo que el empleo de armaduras no convencionales puede mostrarse singularmente eficiente, incluso a corto plazo, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental. Parece claro que la incidencia mayor en el resultado de los estudios pertinentes se da cuando es necesaria una operación extraordinaria de reparación o rehabilitación de la estructura. Prever con la mayor exactitud y realismo esta circunstancia, es la clave para que los resultados sean válidos en la toma de

decisiones. Sería importante aprovechar datos históricos reales para parametrizar y ajustar los modelos de predicción de los daños por corrosión, ya que muchas estructuras se deterioran antes de lo previsto y no siempre los beneficios esperados de la protección del hormigón se cumplen en la realidad. Factores ajenos a los trabajos de investigación, relacionados con la elaboración, colocación y puesta en obra del hormigón, podrían estar detrás de estos fallos prematuros.

Se concluye que una planificación estratégica que garantice la sostenibilidad de las obras marítimas, y, en general, de todas aquellas estructuras de hormigón armado singularmente expuestas a la corrosión, requerirá análisis del ciclo de vida para evitar el traslado de las cargas económicas y medio ambientales a etapas posteriores a la de ejecución de la obra.

7. AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean agradecer a las personas, organismos e instituciones que han contribuido a la realización de este artículo. En primer lugar, a Puertos del Estado por el Encargo solicitado del cual ha surgido este escrito. Quisiéramos, asimismo, mostrar nuestra gratitud a las autoridades y otras entidades portuarias, a la Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG) y a la Asociación para la Investigación y Desarrollo del Acero Inoxidable (CEDINOX) por la información facilitada. Igualmente, queremos agradecer a los autores de la referencia [9] que nos hayan hecho llegar su informe y nos hayan permitido hacer uso del mismo.

8. REFERENCIAS

- [1] AENOR (2023). UNE-EN ISO 1461 Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero. Especificaciones y métodos de ensayo.
- [2] AENOR (2020). UNE-EN ISO 14713-2 Recubrimientos de cinc. Directrices y recomendaciones para la protección frente a la corrosión de las estructuras de hierro y acero. Parte 2: Galvanización en caliente.
- [3] AENOR (2006). UNE-EN 10080 Acero para el armado del hormigón. Acero soldable para armaduras de hormigón armado. Generalidades.
- [4] AENOR (2019). UNE-EN 10348-2 Acero para el armado del hormigón. Acero galvanizado para armaduras. Parte 2: Productos de acero galvanizado para armaduras.

- [5] MITMA (2021). *Código Estructural*.
- [6] Fib: CEB-FIP (2009). Corrosion protection of reinforcing steels, Bulletin nº 49.
- [7] EGGA (2023). Galvanized Reinforcement in Concrete Structures. An Introduction for Engineers and Designers. <https://www.galvanizingeurope.org/wp-content/uploads/2021/07/Version-2.1-Feb-2022.pdf>. [Último acceso: octubre 2023].
- [8] AENOR (2012). UNE 83992-2 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado.
- [9] Martínez, I., y Alonso, M.C. Estudio de la durabilidad de armaduras galvanizadas en estructuras portuarias de la Generalitat Valenciana. IETcc, CSIC.
- [10] Alonso, M.C., Martínez, I., Ibarra, V., y Molines, O. (2011). Empleo de armadura galvanizada para proteger frente a la corrosión en estructuras marítimas, de *XI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Gran Canaria, 5-6 de mayo*, 2011.
- [11] AENOR (2015). UNE-EN 10088-1 Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables.
- [12] AENOR (2017). UNE 36067 Alambres de acero inoxidable para armaduras de hormigón armado.
- [13] AENOR (2019). prEN 10370 Steel for the reinforcement of concrete - Stainless steel.
- [14] CEDINOX (2018). Extensión de Mónaco hacia el mar. *Acero Inoxidable*, nº 83, pp. 40-45.
- [15] Fib: CEB-FIP (2007). FRP reinforcement in RC structures, Bulletin nº 40.
- [16] AFGC (2021). Utilisation d'armatures composites (à fibres longues et à matrice organique) pour le béton armé.
- [17] ACI (2015). ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.
- [18] ACI (2022). ACI CODE-440.11-22 Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars – Code and Commentary.
- [19] ASTM (2022). D7957/D7957M-22 Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymers Bars for Concrete Reinforcement.
- [20] EOTA (2023). EAD 260023-00-0301 Carbon, glass, basalt and aramid Fibre Reinforced Polymer bars as reinforcement of structural elements.
- [21] Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P., y Nanni, A. (2020). Cost effectiveness of reinforcement alternatives for a concrete water chlorination tank. *Journal of Building Engineering*, Vol. 27, pp. 1-11.
- [22] Cadenazzi, T., Dotelli, G., Rossini, M., Nolan, S., y Nanni, A. (2020). Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4): pp. 787-802.
- [23] Jáuregui Pajares, M. (2021). Puerto de Cartagena. Recreido del espaldón del dique suroeste. *Revista del MITMA*, nº 718, pp. 56-65.
- [24] Comisión Europea (2014). Directiva 2014/24/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 26 de febrero de 2014 sobre contratación pública y por la que se deroga la Directiva 2004/18/CE.
- [25] Perelli, M., y Parra Ruiz, L. (2017). Aproximación del análisis del ciclo de vida (ACV) y del coste del ciclo de vida (CCV) al caso particular de los firmes de carretera. *Ingeniería Civil*, nº 186, pp. 23-38.
- [26] ISO (2017). ISO 15686-5 Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.
- [27] AENOR (2022). UNE-EN 17472 Sostenibilidad de las obras de construcción. Evaluación de la sostenibilidad de las obras de ingeniería civil. Métodos de cálculo.
- [28] Younis, A., Ebead, U., y Judd, S. (2018). Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement. *Construction and Building Materials*, Vol. 175, pp. 152-160.
- [29] Hamid, S., Naji, K., Younis, A., y Ebead, U. (2021). Material performance and cost effectiveness of seawater-mixed rubberized concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 15, pp. 1-11.
- [30] Val, D.V., y Stewart, M.G. (2003). Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments. *Structural Safety*, 25(4): pp. 343-362.
- [31] Mistry, M., Koffler, C., y Wong, S. (2016). LCA and LCC of the world's longest pier: a case study on nickel-containing stainless steel rebar. *International Journal Life Cycle Assess*, nº 21, pp. 1637-1644.
- [32] Dattilo, C.A., Negro, P., y Landolfo, R. (2010). An integrated approach for sustainability (IAS): life cycle assessment (LCA) as a supporting tool for life cycle costing (LCC) and social issues, de *Sustainable Building Affordable to All, Lisboa, 2010*.
- [33] Steputat, C.C., O'Connor, J., Arrants, M., Beech, J., y Nanni, A. (2022). GFRP-RC seawalls as a means of coastal fortification and extended service life. *Concrete International*, 44(11): pp. 36-42.
- [34] AENOR (2006). UNE-EN ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- [35] AENOR (2021). UNE-EN ISO 14040:2006/A1 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia. Modificación 1.
- [36] AENOR (2006). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- [37] AENOR (2018). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 1.
- [38] AENOR (2021). UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Modificación 2.
- [39] AENOR (2020). UNE-EN 15804:2012+A2 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.
- [40] AENOR (2021). UNE-EN 15804:2012+A2:2020/AC Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.

Caracterización ambiental de escorias de fundición de cobre mediante ensayos de lixiviación normalizados

Environmental Characterization of Copper Slags by Standardized Leaching Tests

David Ramos Pecharromán^{1*}, Julio Termenón Delgado², Laura Parra Ruiz³

Resumen

A partir de los resultados obtenidos en ensayos realizados sobre escorias de fundición de cobre, se demuestra la capacidad de los ensayos de lixiviación para identificar y, en su caso, cuantificar el impacto ambiental por liberación de sustancias peligrosas en materiales alternativos empleados en la construcción de firmes. Esta información deberá confirmar el beneficio ambiental neto derivado de la reutilización y el reciclado aportando confianza en estos materiales, conforme a los principios de Economía Circular.

Se propone el ensayo de percolación en columna de flujo ascendente como ensayo de caracterización ambiental básica para materiales granulares en aplicaciones no ligadas (sin uso de betún, cemento, o cal). Las condiciones de este ensayo permiten extrapolar la cantidad lixiviada en condiciones habituales de empleo, determinando si las sustancias se liberan de forma lenta o rápida. Se demuestra igualmente la validez del ensayo de lixiviación por lotes o de volteo como ensayo de conformidad, especialmente adecuado para controles intermedios y de proceso, dada la trazabilidad de sus resultados a los obtenidos en ensayos de caracterización básica de percolación en columna.

Los resultados que se recogen en este artículo han acompañado la solicitud de tramitación de una Orden Ministerial por el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico para regular la aplicación de la figura de Fin de Condición de Residuo (FCR) a Escorias de Fundición de Cobre (EFC).

Palabras clave: ensayos de lixiviación, materiales alternativos, caracterización ambiental, firmes, sustancias peligrosas, ley de residuos, materiales granulares, áridos.

Abstract

The results obtained in tests performed on copper slag, show the ability of leaching tests to identify and, where applicable, quantify the environmental impact of releasing dangerous substances in alternative materials used in pavement construction. This information must confirm an environmental net profit derived from reuse and recycling, by providing confidence in these materials, according to Circular Economy principles.

The up-flow column percolation test is proposed as a basic environmental characterization test for granular materials in unbound applications (without bitumen, cement, or lime). The conditions of this test allow to extrapolate the amount leached under typical use conditions, determining whether the substances are released slowly or quickly. The validity of the batch leaching test as a compliance test is also proven. It is especially appropriate for intermediate and process controls, considering the traceability of the results to those obtained in basic column percolation characterization tests.

The results reported in this article have been included in a Ministerial Order request addressed to the Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge for regulating the application of the End of Waste Condition to copper slags.

Keywords: Leaching test, alternative materials, environmental characterization, pavement, dangerous substances, waste law, granular materials, aggregates.

1. INTRODUCCIÓN

Ante una mayor sensibilidad de las consecuencias derivadas de la utilización de recursos no renovables, se ha

apostado por acciones en favor de la Economía Circular para ampliar la tipología, las aplicaciones y el volumen de los materiales alternativos potencialmente reutilizables. Estas iniciativas promueven la reutilización y el reciclado, favoreciendo el balance entre desarrollo económico y consumo de recursos, tratando de incorporar o mantener en el ciclo productivo el mayor tiempo posible recursos infrautilizados. Así, materiales residuales que suponen una carga para fabricante o poseedor y ocupan enormes extensiones de terreno afectando significativamente a recursos naturales del entorno se convierten en una oportunidad, generando un ahorro en costes de producción y sustituyendo recursos limitados no renovables.

* Autor de contacto: david.ramos@cedex.es

¹ Licenciado en Ciencias Químicas (especialidad Química Industrial). Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

² Licenciado en Ciencias Químicas (especialidad Química Inorgánica). Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

³ Ingeniera de caminos, canales y puertos. Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

Con esta intención, la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular de reciente aprobación, mejora la articulación de las figuras de subproducto y de FCR, elementos clave para la utilización efectiva de los materiales alternativos. Para ello, el Estado se apoya en la capacidad de las comunidades autónomas para agilizar los trámites administrativos de su declaración, asegurando una uniformidad de criterios en un mercado único nacional y estableciendo una serie de requisitos de calidad para este material.

Según la ley, un material alternativo puede acogerse a una de estas figuras y abandonar el régimen de residuos para convertirse en un producto, si cumple una serie de condiciones, como existir una seguridad en el uso del material, atender a una finalidad específica y existir una demanda real.

En el caso particular de las escorias, es evidente el interés de los poseedores en acogerse al régimen jurídico de producto, habiendo presentado los principales fabricantes nacionales solicitudes para distintas tipologías de escoria siderúrgica y aplicaciones para su consideración como FCR.

La solicitud presentada justifica la existencia de una demanda real de utilización de las escorias en diferentes aplicaciones en firmes de carretera, un mercado permanente y recurrente, donde los receptores han mostrado interés y capacidad para absorber este flujo. El sector de la construcción posee un gran potencial de circularidad siendo capaz de consumir una enorme cantidad de recursos naturales (absorbe de hecho alrededor del 50 % (Comisión Europea, 2014) del total de materia prima extraída). Este mercado estable ha propiciado el desarrollo de un marco normativo específico para la utilización de diferentes tipos de escoria siderúrgica en firmes de carretera (Dirección General de Carreteras, 2020). Varios decretos y resoluciones autonómicas (Decreto 64/2019 del País Vasco, Decreto 100/2018 de Cantabria, Resolución 20 septiembre 2022 de Asturias y Decreto 32/2009 de Cataluña) establecen valores límite para la lixiviación de sustancias peligrosas en escorias siderúrgicas a emplear en firmes de carretera, aunque por el momento no existe regulación ambiental a nivel nacional.

El uso de los materiales alternativos (en este caso las escorias) exige valorar técnicamente todas y cada una de las consecuencias derivadas de cada acción, confirmando que:

- Las propiedades mecánicas y funcionales de los materiales alternativos son equiparables a las de materias primas vírgenes que sustituyen.
- El material alternativo no libera sustancias peligrosas que puedan generar un impacto en el medio ambiente. La ley indica que su uso “no genere impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud... humana”.

La EFC es un subproducto obtenido durante la fundición y refinado del cobre. Por cada tonelada de cobre fabricada se producen entre 2 y 3 toneladas de EFC, lo que evidencia una elevada producción. La escoria se enfría rápidamente por medio de una inyección de agua generando el silicato de hierro o escoria de cobre. En el proceso de fabricación del cobre, cuando la escoria líquida se enfría lentamente, forma un producto cristalino duro y denso. La

densidad específica promedio en EFC es de aproximadamente $3,5 \text{ g / cm}^3$, lo que significa que es más densa que los áridos naturales ordinarios. En general, la absorción de agua de la escoria de cobre es muy baja (Shi *et al.*, 2008). Su composición específica depende del tipo de horno, el proceso metalúrgico que la produce y la composición del mineral extraído. Los compuestos químicos predominantes en la EFC cruda y envejecida son principalmente silicato de hierro y proporciones de silicatos de aluminio y calcio, junto con trazas de metales formando parte de minerales o incluidos en las fases de silicato. (Lim, 2006).

En relación con las aplicaciones conocidas para las EFC, tres son los campos de investigación más estudiados: áridos artificiales para la fabricación de hormigones, adiciones al clinker del cemento Portland y como sustitutivo del cemento Portland por las propiedades puzolánicas que posee (Cruz, 2014). Se constatan, no obstante, usos alternativos en obra civil como balasto para líneas de ferrocarril, relleno, capas granulares de firme y áridos para la fabricación de mezclas bituminosas. (Collins y Ciesielski, 1994).

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

Un material de construcción en estado sólido: árido natural, árido artificial, o material alternativo (reutilizado o reciclado) puede contener sustancias peligrosas solubles que, en contacto con el agua (de lluvia, superficial o subterránea), pueden ser liberadas en concentraciones que supongan una amenaza para el medio ambiente (Hidalgo López y Alonso, 2005). Este proceso se llama lixiviación. Los ensayos de lixiviación permiten evaluar esta capacidad de incorporación de sustancias peligrosas a aguas y suelos.

Se denomina eluato a la disolución obtenida en ensayos de lixiviación realizados a escala laboratorio, mientras que se denomina lixiviado a la obtenida en ensayos de lixiviación en campo por contacto del material con agua de lluvia, agua superficial o subterránea (CEN, 2021).

El contenido total presente de sustancias peligrosas en un material, en general, no es un factor decisivo para evaluar el impacto por lixiviación de un material dispuesto en un firme de carretera. Sí es relevante, sin embargo, la



Figura 1. Representación esquemática del proceso de lixiviación de productos de construcción.

capacidad de incorporación de estas sustancias a una fase acuosa o, lo que es lo mismo, su potencial de lixiviación.

A continuación, se indican los ensayos de lixiviación habitualmente empleados.

2.1. Ensayo de percolación de flujo ascendente en columna para residuos granulares

Es un ensayo de comportamiento específico para materiales granulares residuales, igualmente empleado de manera habitual en la caracterización ambiental de productos de construcción. “Es un ensayo muy completo que aporta toda la información necesaria para asegurar una “gestión segura de materiales de construcción granulares a corto y largo plazo” (AENOR, 2017).

El método de ensayo se recoge en la norma UNE-EN 14405:2017 (AENOR, 2017). La metodología de ensayo ha sido adaptada por el comité de normalización europeo CEN/TC 351 en el diseño de un método de ensayo horizontal para evaluar la liberación de sustancias peligrosas en productos de construcción (norma EN 16637-3) (CEN, 2021)). Asimismo, se está tratando de implementar este ensayo en las normas armonizadas de producto, con el objetivo de incluir la información de sustancias peligrosas en la Declaración de Prestaciones de Materiales de Construcción, en cumplimiento del Requisito Básico nº 3 “Higiene, seguridad y salud” del Reglamento de Productos de Construcción (Parlamento Europeo, 2011). El comité técnico europeo CEN/TC 154 “Aggregates”, por otro lado, ha puesto en marcha un proceso de consulta a los diferentes comités nacionales para elevar una propuesta a organismos de regulación europeos para incluir información sobre la liberación de sustancias peligrosas en áridos sometidos al Reglamento de Productos de Construcción en la Declaración de Prestaciones, estableciendo valores límite que definen clases y categorías de producto en base a los niveles de lixiviación de sustancias peligrosas.

En el ensayo se compacta la muestra en una columna de dimensiones normalizadas y se hace pasar en sentido ascendente el lixivante (agua desionizada de, al menos, grado 2 según norma UNE-EN ISO 3696 (AENOR, 1996))

a caudal constante, de manera que se mantiene el material en condiciones de saturación total. En la sección inferior de la columna se coloca un prefiltro (con diámetro de poro de 1,5 μm) y a continuación una capa de 1 cm de bolas de vidrio de 2 mm de diámetro que asegura un flujo de lixivante uniforme a lo largo de toda la sección. Previamente al llenado con material, se tara la columna para determinar la masa exacta de muestra, y se compacta a continuación la muestra en 5 capas, aplicando un método de compactación normalizado (altura de caída del compactador, peso del compactador y número de compactaciones por capa). Una vez llena la columna hasta los 30 ± 5 cm de altura se pesa y anota la masa de muestra. En la sección superior se coloca nuevamente una capa de bolas de vidrio, un prefiltro y un filtro de membrana (con diámetro de poro de 0,45 μm), de manera que se asegure un filtrado del eluato y se cierra la parte superior de la columna. Una vez preparada la columna, se conecta al dispositivo de llenado de lixivante y recogida de eluatos.

El ensayo está controlado por un *software* creado específicamente de acuerdo con los requisitos de la norma, que permite completar de manera automática el llenado de agua de la columna, así como la recogida de las distintas fracciones de eluato. Se recogen sucesivamente siete muestras de eluato para unas relaciones líquido-sólido (L/S) acumuladas de 0.1 - 0.2 - 0.5 - 1.0 - 2.0 - 5.0 - 10.0 l/kg, a diferente volumen de agua percolada o tiempo de elución. La relación L/S es un parámetro crítico en la lixiviación de sustancias. Cada eluato recogido representa la lixiviación promedio en cada intervalo. Posteriormente se determinan el pH y la conductividad eléctrica, así como el análisis de la composición de los eluatos mediante las técnicas instrumentales específicas para ello.

2.2. Ensayo de lixiviación por lotes o de volteo para residuos granulares

Por la sencillez y rapidez de su ejecución, el ensayo de volteo se utiliza habitualmente para controles intermedios en planta y comprobar que el material mantiene el mismo comportamiento frente a la lixiviación previamente



Figura 2. Dispositivos empleados en el ensayo de percolación en columna.

identificado mediante el ensayo de caracterización básica (columna). El método de ensayo se recoge en la norma UNE-EN 12457-4 (AENOR, 2003). En el ensayo, se someten a condiciones normalizadas de agitación (velocidad constante de 10 rpm durante 24 horas), 90 g de muestra, que ha de tener un tamaño de partícula inferior a 10 mm, y 900 ml de lixiviante (agua purificada de calidad al menos grado 3 según norma UNE-EN ISO 3696 (AENOR, 1996) alcanzando una relación líquido – sólido (L/S) de 10 l/kg de materia seca. Finalizado el proceso de volteo en un

dispositivo rotatorio como el que se muestra en la imagen, se recoge el eluato filtrado (con membrana de 0,45 µm) en un sistema de vacío. Finalmente se determina pH, conductividad eléctrica y concentración de sustancias de interés en eluatos.

Para la correcta interpretación de estos resultados en la figura 4 se comparan las condiciones experimentales de ensayos de percolación en columna, lixiviación por volteo y condiciones reales de empleo del material en un firme de carretera:



Figura 3. Dispositivo rotatorio empleado en el ensayo de volteo.

	Ensayo de volteo	Ensayo de percolación en columna
Cantidad material a ensayar	100 g	3-5Kg (función de humedad)
Duración	Rápido (24h)	Lento (30-45 días, en función de densidad)
Mecanismos lixiviación limitante	Disolución + Difusión	Disolución + Advección
Factor limitante	Contacto sólido-líquido	Permeabilidad
Condiciones del ensayo	Elevada saturación con alta relación L/S (10 l de lixiviante por kg de árido) y agitación constante durante 24 horas que facilita el contacto sólido-líquido y acelera la disolución de sustancias.	Árido confinado en el interior de la columna con cierto grado de compactación permitiendo el paso del flujo constante de agua a través de los huecos.
Similitud condiciones de empleo	Muy diferentes a las de empleo en carretera, salvo usos en zonas próximas al nivel freático, cauces de corrientes de agua o zonas inundables.	Cercanas a las de empleo en carretera de un árido sin ligante donde el agua de lluvia infiltrada de manera natural juega un papel relevante en el comportamiento frente a la lixiviación.
Resultados	Un único resultado para una relación L/S=10 l/kg. Visión puntual, incompleta para decidir por sí solo para la aceptación ambiental de un material al no considerar factores y condiciones de exposición que pueden afectar en ocasiones de manera considerable los resultados.	Siete valores a diferente nivel de infiltración o relación L/S (0.1 - 0.2 - 0.5 - 1.0 - 2.0 - 5.0 - 10.0 l/kg). Permite conocer la evolución del comportamiento frente a la lixiviación identificando que sustancias son liberadas de forma rápida (primeras fracciones) o lenta (últimas fracciones). Permite identificar patrones de comportamiento asociados a mecanismos de lixiviación dominantes.
Interpretación	Ensayo de conformidad (del tipo pasa o no pasa) centrado en parámetros clave identificados en ensayos de caracterización previos (en ensayos en columna). Permite clasificar el material en base a umbrales de lixivabilidad y confirmar que la muestra se ajusta a una población ensayada previamente en ensayos de caracterización básica. (UNE, 2017) (Król y Mizerka, 2016).	Permite estimar la cantidad de sustancias liberada en condiciones de utilización real a parte de densidad aparente (kg/m ³), espesor de capa (m.) y tasa de infiltración en mm/año (Hjelmur, 1990). El resultado final (relación L/S=10 l/kg) es representativo de situaciones reales de exposición a largo plazo en aplicaciones habituales de materiales de carretera (Van der Sloot y Dijkstra, 2004).

Figura 4. Factores que permiten diferenciar el ensayo de lixiviación por volteo y el ensayo de percolación en columna.

2.3. Técnicas analíticas para determinación de la concentración de sustancias en eluatos.

Las técnicas instrumentales para el análisis de eluatos son las indicadas por la norma UNE-EN 16192:2020 “Caracterización de residuos. Análisis de eluatos”:

- Para elementos inorgánicos en forma catiónica (excepto Hg): Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), según norma UNE-EN ISO 11885: 2010 (AENOR, 2010), equipo que se muestra en la figura 5.
- Para el mercurio: Espectrometría de fluorescencia atómica, según la norma UNE-EN ISO 17852:2008 (AENOR, 2008).
- Para elementos inorgánicos en forma aniónica: cromatografía iónica en fase líquida, determinada según norma UNE-EN ISO 10304-1:2009 (AENOR, 2009b).

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se explican los ensayos realizados sobre las muestras de EFC y se analizan los resultados obtenidos.

3.1. Ensayos complementarios

3.1.1. Determinación del valor de pH en eluatos

A la mayor brevedad posible después de recoger cada eluato, se determina el pH y se acidulan las muestras hasta un valor de pH entre 1 y 2, con el fin de limitar posibles fenómenos de precipitación o carbonatación que alteren el contenido en muestra durante su periodo de conservación, tal y como indica la norma UNE-EN ISO 5667-3:2019 (AENOR, 2019).

El valor de pH del eluato permite establecer una convención útil a la hora de interpretar las cantidades lixiviadas, facilitando la extrapolación de los resultados obtenidos en ensayos a escala laboratorio a condiciones reales de utilización del material. El pH es un parámetro relevante para la lixiviación.

Un valor constante en los valores de pH de los eluatos es indicativo de presencia de condiciones de equilibrio (equilibrio sólido – líquido). A lo largo del ensayo de lixiviación por volteo se pueden asumir a priori condiciones de equilibrio local. No así en el ensayo de percolación en columna donde en la práctica se alternan condiciones de equilibrio y ausencia de equilibrio (Bandow *et al.*, 2018).

En el caso de las EFC, como se muestra en la figura 7, las variaciones de pH del ensayo de percolación en columna son relativamente pequeñas a lo largo de las



Figura 5. Espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente.



Figura 6. Dispositivo para determinación de pH y conductividad eléctrica.

distintas fracciones, con una tendencia ligeramente descendente desde valores en torno a 7 en las dos primeras fracciones de eluato hacia valores próximos al pH del lixiviante (5,7). Esto indica que se mantienen de forma adecuada las condiciones de equilibrio a lo largo del ensayo.

En los siguientes apartados se mostrará cómo, para determinadas sustancias, es posible relacionar variaciones en el valor de pH con variaciones en las cantidades lixiviadas, facilitando la identificación de patrones de lixiviación asociados a los mecanismos de liberación implicados.

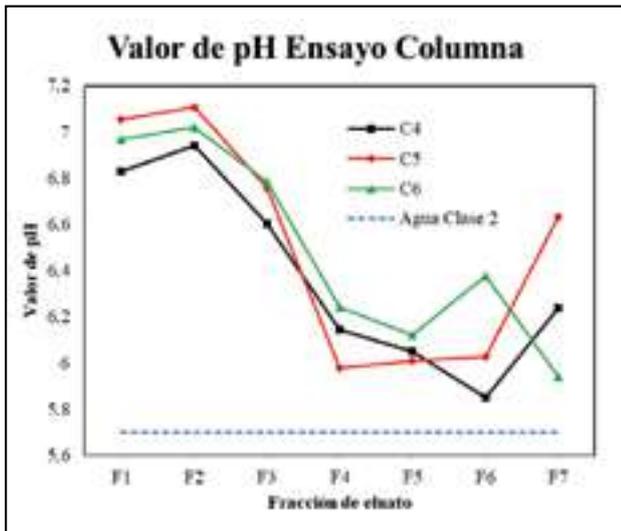


Figura 7. Valores de pH en diferentes fracciones de eluato del ensayo en columna.

3.1.2. Determinación de la conductividad eléctrica en eluatos

Para asegurar la ausencia de fenómenos de precipitación durante el periodo de conservación de las muestras (por presencia de altos niveles de concentración de sales disueltas) es necesario verificar que la conductividad eléctrica en los eluatos es inferior a 7.500 mS/m, procediendo en caso contrario a su dilución, como se indica en las normas de ensayo de referencia (AENOR, 2003 y 2017).

En cualquier disolución acuosa existe una correlación directa entre su conductividad eléctrica y la cantidad total de especies iónicas disueltas (catiónicas y aniónicas) presentes. En la tabla 1 se muestran los valores de conductividad en eluatos obtenidos en el ensayo de volteo y en la figura 8, en eluatos del ensayo en columna. Los valores de conductividad del ensayo de volteo son inferiores a los del ensayo en columna. Esto refleja una mayor cantidad de sustancias liberadas por el efecto de la percolación en el interior de la columna (especialmente en las dos primeras fracciones).

Tabla 1. Valores de conductividad en eluato del ensayo del volteo

Muestra	Conductividad (mS/m)
EFC-V1-Blanco	0,53
EFC-V2	1,19
EFC-V3	1,44
EFC-V4	1,61
Agua Clase 2	0,20

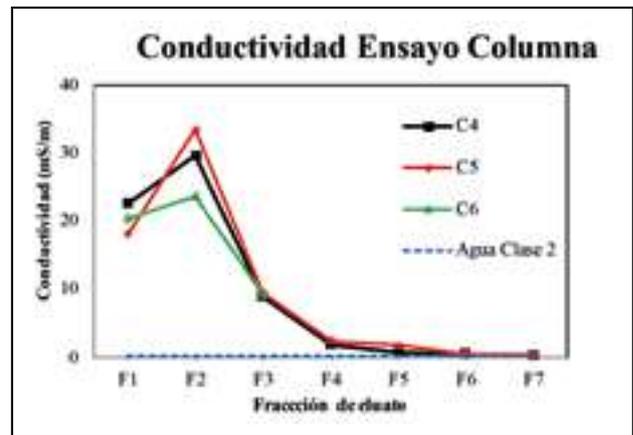


Figura 8. Valores de conductividad en diferentes fracciones de eluato del ensayo en columna.

3.1.3. Contenido de humedad en la muestra

La EFC analizada presenta un elevado contenido de humedad (5,39 % determinado según norma UNE-ISO 11465:2011 (AENOR, 2011). El alto contenido de humedad puede conducir, con el paso del tiempo, a una alteración o segregación de la muestra por procesos de disolución, lavado y decantado de sustancias.

3.1.4. Distribución granulométrica de la muestra

Como se aprecia en la figura 9, la muestra presenta un tamaño de partícula uniforme, con un alto porcentaje de partículas (85 %) con tamaño comprendido entre 0,5 mm y 2 mm.

No es necesaria la trituración adicional de la muestra a ensayar, al cumplir el requisito establecido en las normas de ensayo (UNE, 2003a, 2017) en relación al tamaño mínimo de partícula (que indica que un 95 % de las partículas deben tener un tamaño inferior a 10 mm). Se elimina, por tanto, posible contaminación cruzada por analitos contenidos en elementos de desgaste de equipos de tamizado, trituración o división de la muestra. Estudios consultados evidencian dispersión en los resultados del ensayo de lixiviación por volteo según norma UNE-EN 12457-2 asociadas a diferencias en la granulometría de la muestra. Se sabe que el tamaño de partícula determina la distancia a recorrer por la sustancia liberada (por medio de un mecanismo de difusión) desde el interior de la partícula hasta su superficie, para después ser incorporada a la fase acuosa circundante (Zandi *et al.*, 2007).

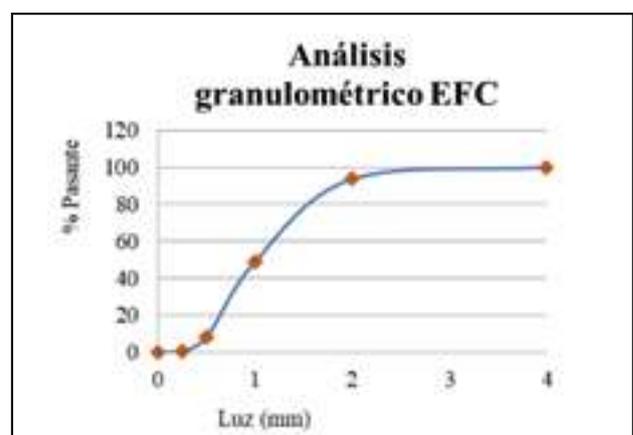


Figura 9. Análisis distribución granulométrica.

3.2. Criterios para evaluar la toxicidad de los eluatos

No existe a nivel nacional o europeo normativa que establezca valores límite ambientales que permitan validar la utilización de materiales alternativos en aplicaciones de construcción. En relación a la utilización de áridos en firmes de carretera como mezclas bituminosas, pavimentos de hormigón y zahorras, el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), establece de forma genérica que los materiales “no serán susceptibles a ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo”, garantizando que “no puedan dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan contaminar el suelo o corrientes de agua” y que se cumple en todo caso con “lo dispuesto en la legislación vigente en materia ambiental, de seguridad y salud”.

Además, deja abierto el camino para el desarrollo de estudios de caracterización específicos en el caso de áridos artificiales o reciclados indicando que “en materiales en los que, por su naturaleza, no exista suficiente experiencia sobre su comportamiento, deberá hacerse un estudio especial sobre su aptitud para ser empleado, que deberá ser aprobado por el Director de las Obras” y estableciendo que “el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese”.

Ante la ausencia de valores directamente aplicables, en los estudios de caracterización ambiental de materiales alternativos de construcción, habitualmente, se toman como referencia los valores límite para la clasificación como residuos inertes, no peligrosos o peligrosos, de acuerdo con la Decisión 2003/33/CE para la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, transpuesta a la legislación nacional por Real Decreto 646/2020. Conviene indicar que no parece oportuno decidir sobre la idoneidad ambiental de un material

alternativo en aplicaciones de carretera únicamente por comparación de manera directa con estos umbrales, ya que las especificaciones de colocación de esos materiales y las condiciones de contorno son diferentes. En todo caso, en ausencia de otros criterios, estos valores facilitan la evaluación ambiental al tener una referencia relativa a la capacidad de lixiviación de sustancias contaminantes procedentes de los materiales analizados, a partir de los resultados obtenidos en ensayos de lixiviación normalizados de percolación en columna y lixiviación por volteo.

La Decisión 2003/33/CE determina valores límite para la mayoría de las sustancias inorgánicas peligrosas en productos de construcción con cierta probabilidad de estar presentes en concentraciones que suponen un riesgo para suelo y agua dada su toxicidad, persistencia o posible bioacumulación: arsénico, plomo, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, zinc, bario, molibdeno, selenio, antimonio, cloruros, fluoruros y sulfatos. La clasificación de un material como inerte, conforme a la definición del término “inerte” contemplada en el artículo 2 del Real Decreto 646/2020 lleva implícito considerar que “deben presentar un contenido de contaminantes insignificante y, del mismo modo, el potencial de lixiviación de estos contaminantes, así como el carácter ecotóxico de los lixiviados debe ser igualmente insignificante. Los residuos inertes y sus lixiviados no deben suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas”.

3.3. Resultados del análisis de eluatos del ensayo de percolación en columna

En la tabla 2 se recogen los resultados del ensayo de percolación de flujo ascendente en columna según norma UNE-EN 14405:2017 (AENOR, 2017), expresados en forma de cantidad de sustancia liberada en peso (miligramos) por volumen de agua percolada (en litros), o lo que es lo mismo, partes por millón (ppm). Dada la variabilidad

Tabla 2. Análisis químico del contenido obtenido en la primera fracción de eluatos en el ensayo de percolación en columna (en miligramos de sustancia por litros de agua percolada) y valores límite de la Decisión 2003/33/CE para el mismo ensayo según norma UNE-EN 14405:2017

Nº Muestra	EFC-C4-F1	EFC-C5-F1	EFC-C6-F1	EFC-F1-Media	Valores Límite Decisión 2003/33/CE		
					Inertes	No Peligrosos	Peligrosos
As	< 0,0083	< 0,0083	0,012	0,009	0,06	0,30	3
Ba	0,052	0,050	0,043	0,048	4,00	20,00	60
Cd	0,002	0,001	0,001	0,001	0,02	0,30	2
Cr	< 0,0009	< 0,0009	< 0,0009	< 0,0009	0,10	2,50	15
Cu	0,722	0,358	0,459	0,513	0,60	30,00	60
Hg *	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,00	0,03	0
Mo	0,148	0,256	0,179	0,194	0,20	3,50	10
Ni	0,035	0,029	0,030	0,031	0,12	3,00	12
Pb	0,035	0,030	0,027	0,030	0,15	3,00	15
Sb	0,212	0,336	0,273	0,274	0,10	0,15	1
Se	0,006	0,005	0,005	0,005	0,04	0,20	3
Zn	0,374	0,299	0,323	0,332	1,20	15,00	60
Cloruro	16,700	11,800	9,460	12,653	460,00	8500,00	15000
Fluoruro	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	2,50	40,00	120
Sulfato	38,700	39,500	34,500	37,567	1500,00	7000,00	17000

Tabla 3. Análisis químico del contenido obtenido en la quinta fracción de eluatos en el ensayo de percolación en columna (UNE, 2017), en miligramos de sustancia por litro de agua percolada y valores límite de la Decisión Alemana

Nº Muestra	EFC-C4-F5	EFC-C5-F5	EFC-C6-F5	EFC-F5-Media	Valores límite declaración subproducto Alemania EFC (Decreto Alemán)
As	0,03	0,03	0,03	0,03	0,06
Cu	5,63	5,32	4,32	5,09	0,06
Mo	0,39	0,54	0,32	0,42	0,11
Sb	0,49	0,58	0,47	0,52	0,03

inherente al método de ensayo (con coeficiente de repetibilidad en ensayos de validación de la norma de 5 % y reproducibilidad de 14 %) es conveniente realizar el ensayo por triplicado tomando como valor representativo el promedio de los resultados.

Al igual que en el ensayo de lixiviación por volteo, se informa de resultados inferiores al límite de cuantificación (LQ) determinado y se valida el método de ensayo realizando un ensayo en blanco.

Como se aprecia, el contenido medio de sustancias peligrosas en eluatos obtenidos por triplicado en el ensayo de percolación de flujo ascendente en columna permitiría clasificar las EFC (en su hipotético depósito en vertedero) como residuo peligroso, al presentar un contenido medio de resultados obtenidos por triplicado de **antimonio** superior al valor límite para residuos no peligrosos e inferior al valor límite para la clasificación de residuos peligrosos.

Se detecta un contenido medio de resultados obtenidos por triplicado ligeramente inferior (en el mismo orden de magnitud) al valor límite para la clasificación de residuos inertes en las sustancias: **molibdeno** y **cobre**. Hay que indicar igualmente que se detectan valores puntuales en una de las repeticiones del ensayo por triplicado superiores al valor límite de residuos inertes (en molibdeno en ensayo en columna 5 y en cobre en ensayo en columna 4).

El contenido medio en ensayos por triplicado respecto al valor límite para la clasificación de residuos inertes es inferior en un orden de magnitud en sustancias como cadmio, níquel, plomo, selenio y cinc; y en dos o más ordenes de magnitud en sustancias como arsénico, bario, cromo, mercurio, cloruro, fluoruro y sulfato.

Sin embargo, los niveles de presencia de antimonio en los eluatos del ensayo de percolación en columna no permiten asegurar la ausencia de afección a aguas y suelos por la lixiviación de sustancias peligrosas en usos no ligados de EFC. Según los criterios de la decisión para la admisión de residuos en vertedero, no es posible clasificar las EFC como residuo inerte, ni tan siquiera como residuo no peligroso.

Estos resultados apuntan como sustancias críticas a controlar en las EFC el antimonio, además de molibdeno y cobre. En línea con esto, conviene señalar que Alemania ha definido valores límite para la validación ambiental de manera específica de EFC como materiales de construcción identificando precisamente cuatro sustancias críticas a controlar en EFC, entre las que se encuentran tres de las identificadas en el estudio (antimonio, molibdeno, cobre y arsénico).

Como se aprecia en la tabla 3, el contenido de cobre, molibdeno y antimonio supera (ampliamente en el caso de

antimonio y cobre) el valor límite de la Decisión de Alemania (Reglamento 566/17 del Consejo Federal) para la declaración de subproducto de EFC en aplicaciones de construcción. La decisión alemana adopta como ensayo de referencia el establecido en norma DIN 19528 (AENOR, 2009a) en el que se obtiene el eluato de manera análoga a la quinta fracción acumulada en el ensayo de percolación en columna según norma UNE-EN 14405:2017 (UNE, 2017), fracción con relación L/S acumulada de 2 l/kg, representativa de condiciones de exposición real habituales en materiales de firmes de carretera a escalas de tiempo intermedias (Bandow *et al.*, 2018).

El análisis del contenido total de sustancias (lixiviables y no) en EFC, mostrado en la tabla 4, confirma la presencia habitual de niveles reseñables de arsénico, plomo, antimonio y molibdeno. El principal componente en EFC es el silicato de hierro, junto a cierta proporción de silicato de aluminio, calcio y magnesio (Nazer *et al.*, 2016; Alter, 2005). Aunque rara vez la concentración de sustancias peligrosas en eluatos alcanza el nivel del contenido en estado sólido, es posible relacionar disponibilidad o contenido total de sustancias peligrosas con riesgo potencial de causar daños por su incorporación a aguas y suelo.

Tabla 4. Análisis del contenido de diferentes EFC

Óxido del elemento	Composición típica EFC % en peso (Nota A)	Composición típica EFC % en peso (Nota B)
SiO2	49	35
Fe2O3	18	40
CaO	14	3
Al2O3	8	3,5
MgO	1	2
ZnO	1,8	1,4
CuO2	0,7	1,5
As2O3	0,8	0,1
PbO	0,4	-
Sb2O3	0,2	0,2
MoO3	0,1	-
Cr2O3	-	0,2
Co3O4	0,07	0,09
Ag	-	0,05
Cd	-	0,01
Se	-	0,005
Hg	-	0,000

Nota A: Fuente Caracterización de EFC de fundiciones chilenas del Siglo XIX. Amin Nazera. 2016.

Nota B: Fuente The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention. Harvey Alter. 2004.

3.4. Mecanismos de lixiviación identificados

Si representamos gráficamente los resultados del ensayo de percolación en columna, es posible identificar patrones de lixiviación. Estos patrones de comportamiento facilitan la clasificación del material en relación con la respuesta previsible frente a la lixiviación (AENOR, 2017), señalando propiedades o características de calidad susceptibles de alterar o minimizar. Estos patrones están determinados por diferentes mecanismos de lixiviación dominantes. En general, los mecanismos de lixiviación se pueden clasificar en mecanismos químicos de disolución y mecanismos físicos de transporte de los constituyentes disueltos. A su vez, los mecanismos físicos de transporte (Sidorova *et al.*, 2014) pueden ser de advección, lavado superficial, difusión o agotamiento (Van der Sloot y Dijkstra, 2004).

En el caso de las EFC analizadas es posible identificar los siguientes patrones de lixiviación:

- a) **Patrón asociado a un mecanismo dominante de disolución.** La disolución es un fenómeno habitual en materiales granulares cuando el agua infiltrada se desplaza por diferencia de presión rodeando las par-

tículas del material, que arrastran y disuelven a su paso las sustancias contenidas. Este mecanismo de control de solubilidad conduce a mantener constante la liberación de sustancias a lo largo del ensayo (CEN, 2021). “En el ensayo de percolación en columna, la extracción se lleva a cabo sin agitación, favorecida únicamente por el flujo de lixiviante a través de las partículas. El flujo de lixiviante afecta a la efectividad del contacto líquido-sólido y, por tanto, al equilibrio entre fase líquida y fase sólida. Es posible monitorizar las condiciones de equilibrio químico a partir de variaciones en el valor de pH de los eluatos. Para determinadas sustancias, la alternancia en condiciones de presencia o ausencia de equilibrio químico contribuye decisivamente a variaciones en la cantidad lixiviada asociada a procesos de disolución” (Grathwohl y Susset, 2009). “En el mecanismo de disolución puede existir o no relación entre las cantidades lixiviadas y el valor de pH” (Hidalgo López y Alonso, 2005).

- Mecanismo de disolución dominante en relación con la cantidad lixiviada y el valor de pH. En la figura 10, observamos como existe una relación entre la evolución de las cantidades lixiviadas de sulfato y

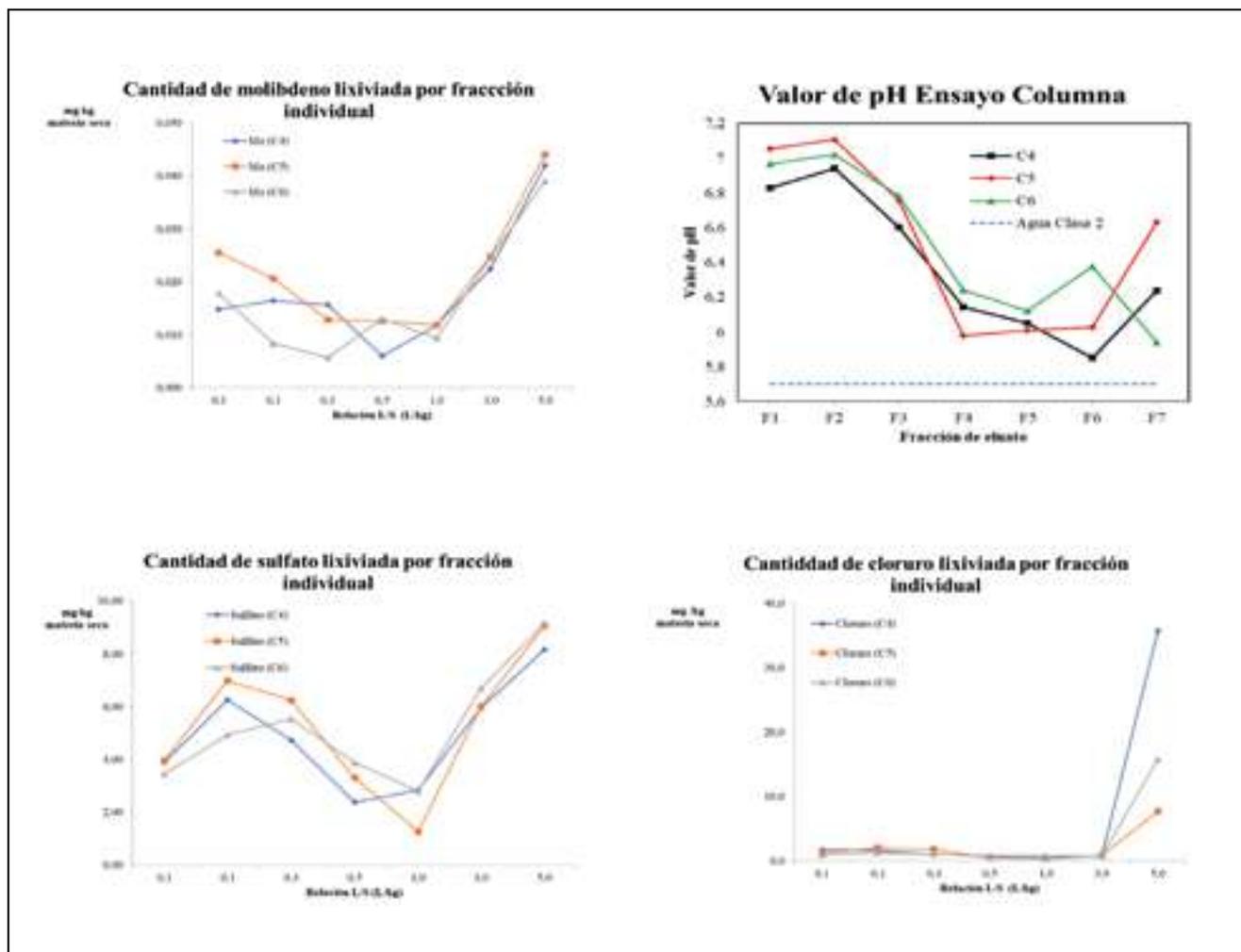


Figura 10. Evolución en las cantidades individuales lixiviadas de sulfatos, molibdeno y cloruros y valor de pH en ensayo de percolación en columna de EFC.

molibdeno y los valores de pH, con valores mínimos en fracciones 4 y 5 (L/S=0,5 y 1,0 l/kg).

- Mecanismos de disolución dominante sin relación entre cantidad lixiviada y valor de pH. Cuando un material contiene sustancias fácilmente solubles, su curva de lixiviación es independiente del pH y la concentración acumulada de sustancias en el eluato crece de forma relativamente lineal a lo largo del ensayo (Hidalgo López y Alonso, 2005). En la figura 11 se identifica este patrón en sustancias como arsénico, plomo, fluoruro, selenio y cinc.
- b) **Patrón asociado a un mecanismo de inicial de disolución seguido de agotamiento.** Después de un

determinado periodo de tiempo donde el mecanismo de disolución dominante es disolución (tiempo que puede llegar a ser largo en el caso de compuestos fuertemente absorbidos en la matriz sólida), puede tener lugar un proceso de agotamiento. Como puede verse en la figura 12, sustancias como níquel y cromo presentan un proceso de agotamiento en su liberación, con tendencia asintótica decreciente en la curva que representa cantidad de sustancia liberada acumulada.

- c) **Patrón asociado a un mecanismo inicial de lavado seguido de disolución.** En el proceso de lavado el lixivante circula de manera constante a

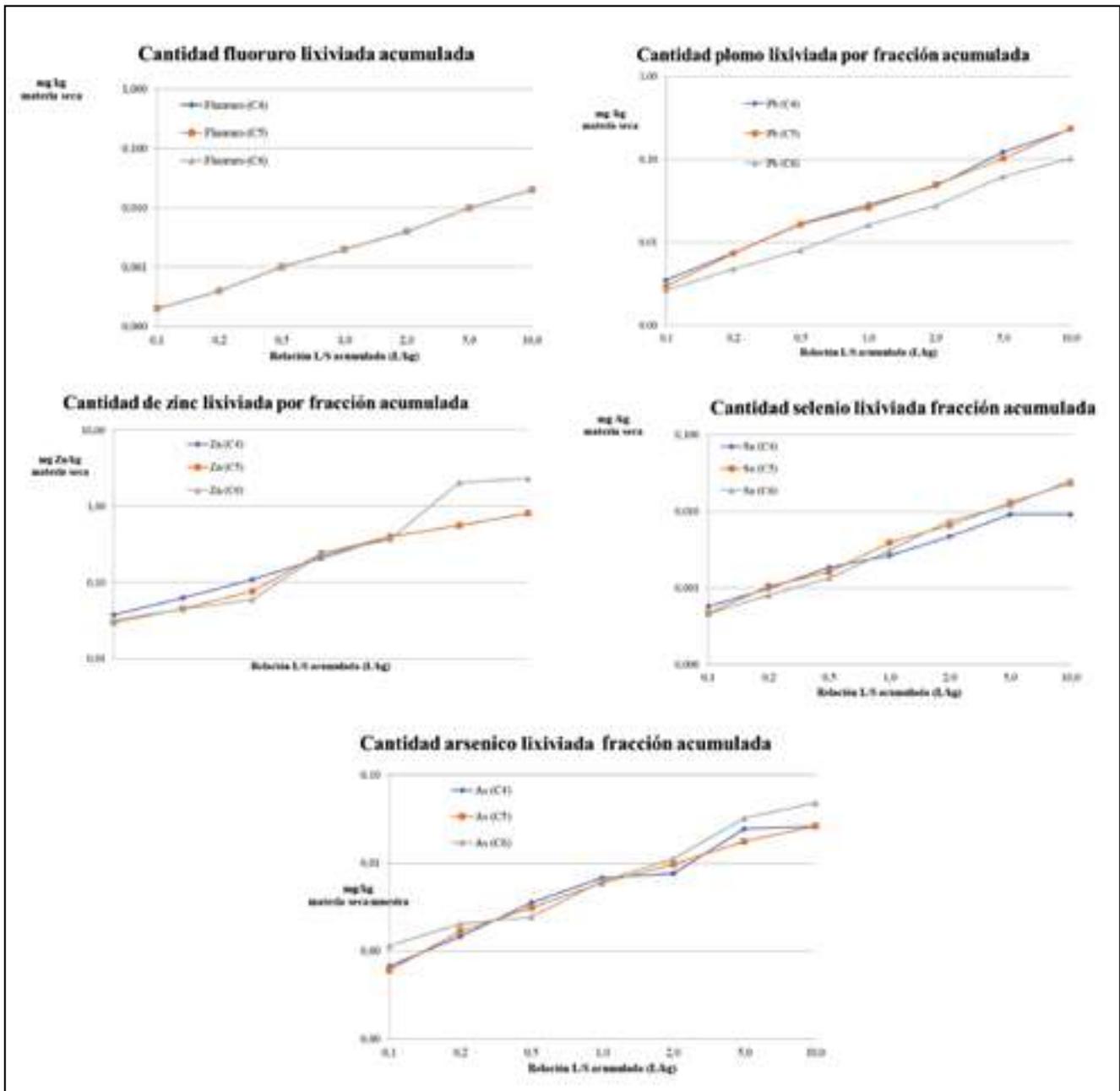


Figura 11. Evolución en la cantidad acumulada lixiviada de fluoruros, selenio, plomo, arsénico y zinc en ensayo de percolación en columna de EFC.

través de la columna de manera que, al renovarse continuamente el lixiviante, no se alcanza en ningún momento el límite de saturación de la disolución. Las sustancias contenidas en las partículas de la superficie del material son disueltas, arrastradas y liberadas por fenómenos de transporte. Durante este proceso de lavado inicial, la cantidad liberada aumenta rápidamente al no frenar la matriz del material la entrada y salida de lixivian- te. Finalizado el proceso de lavado, el mecanismo dominante pasa a ser disolución y aunque continua aumentando la cantidad lixiviada el régimen es inferior (Sidorova *et al.*, 2014). En la figura 13

es posible identificar este patrón de comporta- miento en sustancias como bario, cadmio, cobre y antimonio.

- d) **Patrón asociado a un mecanismo de difusión do- minante.** En materiales granulares, en general, el mecanismo de difusión contribuye poco a la lixi- viación de sustancias, salvo en el caso de materiales granulares de elevada porosidad. La difusión es un proceso lento que “tiene lugar cuando el líquido pe- netra en el interior del material a través de la red po- rosa, abierta al exterior y produce una disolución de los componentes del interior del material. Se produ- ce una circulación del líquido por gradiente de con-

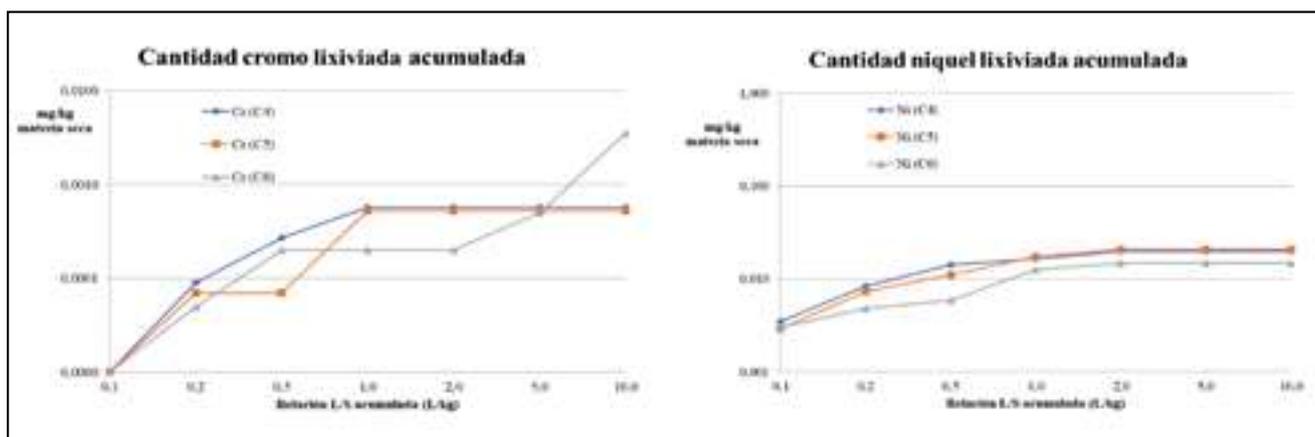


Figura 12. Evolución en la cantidad lixiviada de níquel y cromo en EFC.

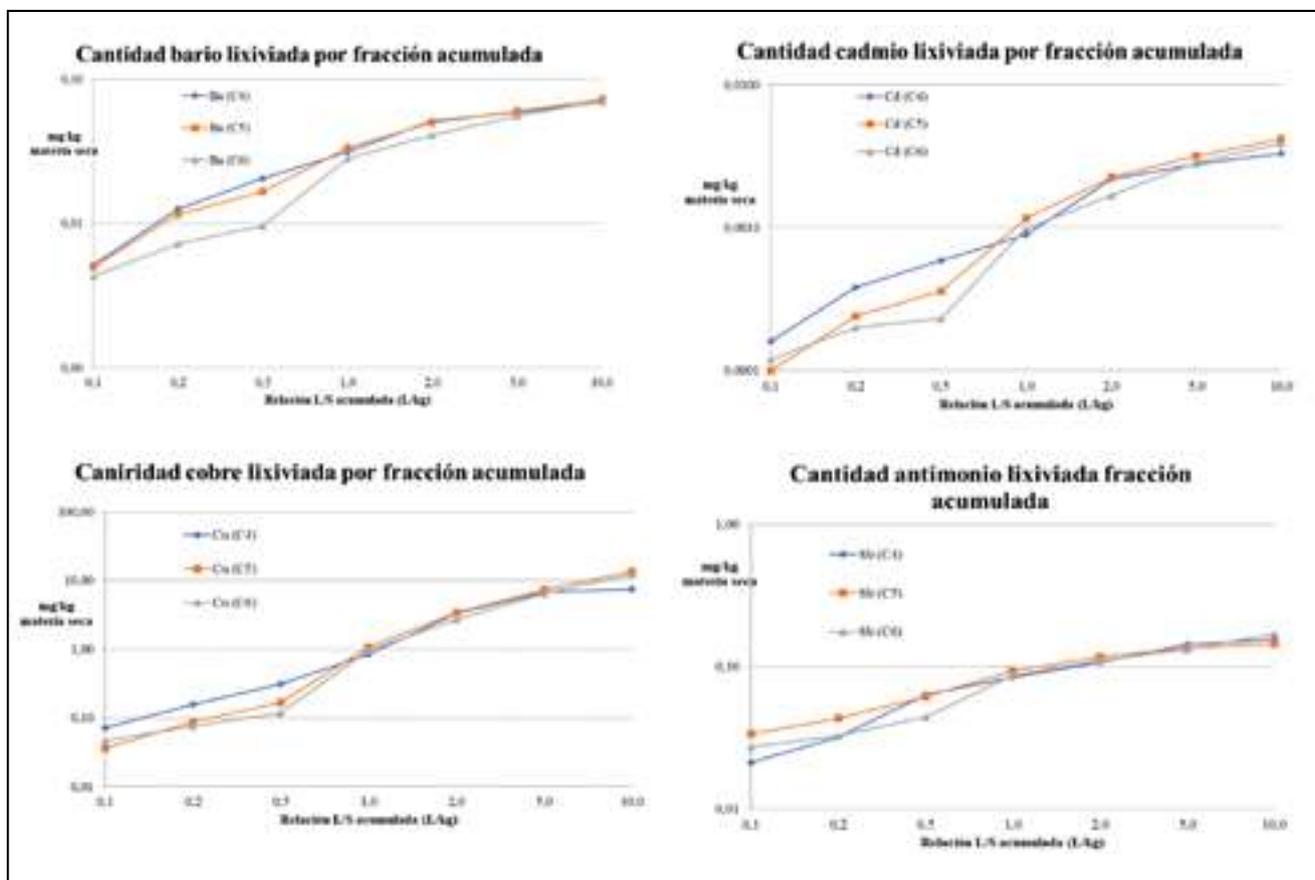


Figura 13. Evolución de la cantidad acumulada lixiviada de bario, cadmio, cobre y antimonio en ensayo de percolación en columna de EFC.

centraciones, de mayor a menor concentración, con tendencia a alcanzar el equilibrio”.

- e) **No es posible identificar patrón de comportamiento al presentar niveles de concentración nulos.** En ocasiones, las cantidades detectadas en eluatos son tan bajas y se sitúan tan cerca del límite de detección/cuantificación del método analítico que no es posible identificar patrón de comportamiento alguno (Bandow *et al.*, 2018). Es el caso de sustancias como el mercurio en las EFC analizadas.

3.5. Resultados del análisis de eluatos del ensayo de volteo

En la tabla 5 se recogen los resultados del ensayo de lixiviación por volteo expresados en forma de cantidad de sustancia liberada en peso (miligramos) por cantidad de muestra seca ensayada en peso (kilogramos). Como valor representativo de cada parámetro se toma el valor promedio de tres determinaciones realizadas sobre la muestra, según recomendaciones de (SETRA, 2011). La variabilidad asociada al ensayo, con coeficientes de repetibilidad del 3 % y de reproducibilidad del 8 % contemplados en la norma UNE-EN 12457-4:2003 (AENOR, 2003), determina la conveniencia de llevar a cabo el ensayo por triplicado. Los resultados inferiores al LQ del método analítico se informan indicando el valor de LQ determinado, precedido por el símbolo “<”. Se lleva a cabo un ensayo en blanco de acuerdo con lo indicado en la norma de referencia para descartar posible contaminación cruzada por reactivos o material.

Como se aprecia, el contenido de sustancias peligrosas en eluatos obtenidos en el ensayo de lixiviación por volteo permitiría clasificar las EFC (en su hipotético depósito en vertedero) como material inerte, al presentar:

- Un contenido medio en el mismo orden de magnitud, aunque ligeramente inferior, al valor límite para

la clasificación de inertes para las sustancias: antimonio, molibdeno y plomo. Existe cierta relación entre los resultados del ensayo de lixiviación por volteo y los de percolación en columna, como demuestra que en ambos casos se han identificado antimonio y molibdeno como sustancias críticas.

- Un contenido medio un orden de magnitud inferior al valor límite para la clasificación de inertes para las sustancias: arsénico, cobre, selenio y cinc.
- Un contenido medio inferior en dos o más ordenes de magnitud al valor límite para la clasificación de inertes en las sustancias: bario, cadmio, cromo, mercurio, níquel, cloruro, fluoruro y sulfato.

Se comparan los valores respecto a su orden de magnitud para escalar la criticidad relativa de cada sustancia, más allá de aceptar como razonable el valor numérico obtenido en un ensayo sometido inevitablemente a una determinada incertidumbre.

Aunque los valores límite del ensayo de lixiviación por volteo de la decisión para la admisión de residuos en vertedero se han incorporado con pequeñas adaptaciones a las diferentes normativas de aplicación autonómica que regulan la utilización de distintas tipologías de materiales residuales en firmas de carretera, no consideramos adecuado realizar ningún tipo de juicio de valor o evaluación sobre la aceptación ambiental por comparación directa y aislada con los valores límite del ensayo de lixiviación por volteo, sin un conocimiento completo de las circunstancias particulares de cada material y aplicación.

Como se ha mencionado, el ensayo de lixiviación por volteo para residuos granulares es un ensayo de control, indirecto y aplicable, en todo caso, conforme a la trazabilidad de estos resultados (para una misma tipología de material) a resultados obtenidos en ensayos previos de caracterización básica empleando el método de ensayo de percolación en columna. El ensayo de percolación en columna ha sido recientemente aprobado, con voto favorable del comité

Tabla 5. Análisis químico del contenido obtenido en eluatos en el ensayo de lixiviación por volteo (en miligramos de sustancia por kilogramos de materia seca ensayada) y valores límite de la Decisión 2003/33/CE para el mismo ensayo según norma UNE-EN 12457-4

Nº Muestra	EFC-V1	EFC-V2	EFC-V3	EFC-V-Media	Valores Límite Decisión 2003/33/CE		
					Inertes	No Peligrosos	Peligrosos
As	0,058	0,065	< 0,0083	0,044	0,50	2,00	25,00
Ba	0,038	0,035	0,031	0,034	20,00	100,00	300,00
Cd	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,04	1,00	5,00
Cr	0,002	< 0,0009	< 0,0009	0,001	0,50	10,00	70,00
Cu	0,296	0,245	0,299	0,280	2,00	50,00	100,00
Hg	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	< 0,00001	0,01	0,20	2,00
Mo	0,148	0,239	0,217	0,201	0,50	10,00	30,00
Ni	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	0,40	10,00	40,00
Pb	0,129	0,050	0,149	0,109	0,50	10,00	50,00
Sb	0,016	0,018	< 0,0022	0,017	0,06	0,70	5,00
Se	0,004	0,004	0,025	0,011	0,10	0,50	7,00
Zn	0,452	0,308	0,393	0,384	4,00	50,00	200,00
Cloruro	7,72	7,43	7,95	7,70	800,00	15000,00	25000,00
Fluoruro	0,018	0,018	0,018	0,018	10,00	150,00	500,00
Sulfato	26,79	15,65	28,78	23,74	1000,00	20000,00	50000,00

técnico nacional CTN 193, por el comité de normalización europeo CEN/TC 351 y será pronto publicado como norma EN 16637-3, como método de ensayo para evaluar la lixiviación de sustancias peligrosas en usos no ligados para materiales de construcción granulares.

4. CONCLUSIONES

Los resultados del ensayo de percolación en columna realizados en las EFC permiten identificar determinados patrones de comportamiento frente a la lixiviación, facilitando una estimación con cierto grado de certeza de las cantidades lixiviadas a corto y largo plazo en condiciones de exposición real. Se han identificado mecanismos de disolución con lavado inicial (en caso de sustancias como bario, cadmio, cobre y antimonio); disolución con agotamiento final (en níquel y cromo); disolución con dependencia del pH (en sulfatos, molibdeno y cloruros); y disolución sin dependencia del pH (en fluoruros, selenio, plomo, arsénico y zinc). Estos resultados apuntan a la conveniencia de seleccionar el ensayo de percolación en columna como el ensayo adecuado para la validación ambiental de materiales granulares alternativos en usos no ligados de carretera.

Los resultados del ensayo de volteo parecen confirmar las sustancias críticas (una vez identificadas en el ensayo de columna). Por ello, atendiendo a la rapidez y sencillez de ejecución, se podría usar el ensayo de volteo como ensayo de control, supeditado a la realización del ensayo de caracterización básica por percolación en columna.

A partir de los resultados de los ensayos de lixiviación realizados, no es posible asegurar, en aplicaciones de construcción no ligadas de EFC, la ausencia de impactos ambientales por lixiviación de sustancias peligrosas a suelos y aguas. El grado de peligrosidad de los eluatos de EFC (en usos no ligados), según los criterios de la decisión para la admisión de residuos en vertedero, no permite clasificar las EFC como residuo inerte (ni tan siquiera como residuo no peligroso) de acuerdo con los resultados del ensayo de caracterización básica de percolación en columna.

5. REFERENCIAS

AENOR (1996). UNE-EN ISO 3696. Agua para uso en análisis de laboratorio. Especificación y métodos de ensayo.

AENOR (2003). UNE-EN 12457-4. Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa para una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño).

AENOR (2008). UNE-EN ISO 17852. Calidad del agua. Determinación de mercurio. Método por espectrometría de fluorescencia atómica.

AENOR (2009a). DIN 19528 Leaching of solid materials - Percolation method for the joint examination of the leaching behaviour of inorganic and organic substances.

AENOR (2009b). UNE-EN ISO 10304-1. Calidad del agua. Determinación de aniones disueltos por cromatografía de iones en fase líquida. Parte 1. Determinación de bromuro, cloruro, fluoruro, nitrato, nitrito, fosfato y sulfato.

AENOR (2010). UNE-EN ISO 11885. Calidad del agua. Determinación de elementos seleccionados por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

AENOR (2011). UNE-ISO 11465. Calidad del suelo. Determinación de la materia seca y del contenido en agua en términos de masa. Método gravimétrico.

AENOR (2017). UNE-EN 14405. Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento en la lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente (bajo condiciones específicas).

AENOR (2019). UNE-EN ISO 5667-3. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua.

Alter, H. (2005). The composition and environmental hazard of copper slags in the context of the Basel Convention. *Resources, Conservation and Recycling*, 43(4): pp. 353-360.

Bandow, N., Gartiser, S., Ilvonen, O., y Schoknecht, U. (2018). Evaluation of the impact of construction products on the environment by leaching of possibly hazardous substances. *Environmental Sciences Europe*, 30, 14.

CEN (2021). DRAFT prEN 16637-3 Construction products: Assessment of release of dangerous substances - Part 3: Horizontal up-flow percolation test.

Collins, R.J., y Ciesielski, S.K. (1994). Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Comisión Europea (2014). Oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción. Documento 52014DC0445. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones /* com/2014/0445 final */

Cruz Carrasco, M. (2014). *Estudio de la resistencia y reología de hormigones con adición de Escorias de Cobre como sustituto del árido fino* [tesis doctoral]. Málaga: Universidad de Málaga.

Dirección General de Carreteras (2020). Nota Técnica 03/2020 Sobre el empleo de árido siderúrgico en firmes y pavimentos. Madrid: DGC-MITMA

Grathwohl, P., y Susset, B. (2009). Comparison of percolation to batch and sequential leaching tests: Theory and data. *Waste Management*, 29(10): pp. 2681-2688.

Hidalgo López, A., y Alonso, C. (2005). Evaluación del impacto medioambiental debido a la lixiviación de productos de base cemento. *I Jornadas de Investigación en Construcción* (Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, 2-4 junio 2005): Actas de las Jornadas. T. I, pp. 571-581.

Hjelmar, O. (1990). Leachate from land disposal of coal fly ash. *Waste Management & Research*, 8(6): pp. 429-449.

Ihobe, S. (2011). Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Bilbao: Ihobe S.A.

Król, A., y Mizerna, K. (2016). Directions of development of research methods in the assessment of leaching of heavy metals from mineral waste. *E3S Web of Conferences. 1st International Conference on Sustainable Energy and Environment Development (SEED 2016), Krakow, 17-19 de mayo 2016*.

Lim, T.T., y Chu, J. (2006). Assessment of the use of spent copper slag for land reclamation. *Waste Management & Research*, 24(1): pp. 67-73.

Nazer, A., Payá, J.J., Borrachero, M.V., y Monzó, J.M. (2016). Caracterización de escorias de cobre de fundiciones chilenas del siglo XIX. *Revista de Metalurgia*, 52(4), e083.

Parlamento Europeo (2011). Reglamento (UE) n° 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción.

Quevauviller, Ph., Van der Sloot, H.A., Ure, A., Muntau, H., Gomez, A., y Rauret, G. (1996). Conclusions of the workshop: Harmonization of leaching/extraction tests for environmental risk assessment. *Science of the Total Environment*, 178(1-3): pp. 133-139.

Saveyn, H., Eder, P., Garbarino, E., Muchova, L., Hjelmar, O., Van der Sloot, H., Comans, R., Van Zomeren, A., Hyks, J., y Oberender, A. (2014). Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive. EUR 26769. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union. JRC91036

SETRA (2011). Acceptability of alternative materials in road construction.

Shi, C., Meyer, C., y Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 52(10): pp. 1115-1120.

Sidorova, A., Vázquez Ramonich, E., Barra Bizinotto, M., Roa Rovira, J.J., y Jiménez Piqué, E. (2014). Study of the recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interface and ITZ. *Construction and Building Materials*, 68, pp. 677-684.

Van der Sloot, H., y Dijkstra, J. (2004). Development of horizontally standardized leaching tests for construction materials: a material based or release based approach?: Identical leaching mechanisms for different materials. Petten: ECN.

Zandi, M., Russell, N.V., Edyvean, R.G., Hand, R., y Ward, P. (2007). Interpretation of standard leaching test BS EN 12457-4: is your sample hazardous or inert? *Journal of Environmental Monitoring*, 9(12): pp. 1426-1429.

Herramienta de estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos para la gestión portuaria. Proyecto Samoa 2

Air Pollutant Dispersion Study Tool for Port Management. Samoa 2 Project

Laura Crespo García^{1*}, José M.^a Terrés-Nícoli², Fernando Jiménez Arroyo³, Christian Mans², Javier García Valdecasas-Bernal², Alberto Gil Tomás⁴, Susana Pérez Rubio⁵, Enrique Álvarez Fanjul⁶

Resumen

Las actuales recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud son contundentes en la alarma con respecto a la contaminación atmosférica. Los puertos son sistemas fundamentales en la logística y estrategia de transporte de la Unión Europea. Sin embargo, son enclaves geográficos normalmente próximos a núcleos de población en los que es necesario vigilar los niveles de calidad del aire. Las Autoridades Portuarias integrantes de este proyecto que han sido encuestadas son conscientes de esta necesidad. Por ello, se hace necesaria una herramienta de apoyo a la gestión portuaria que permita el análisis bajo demanda y en tiempo real de la evolución espacio temporal de los niveles de contaminación atmosférica. Esta dispersión de contaminantes, forzada principalmente por la acción del viento, se anida en el modelo de muy alta resolución del Cuadro de Mando Ambiental de Puertos del Estado. Este artículo presenta los detalles de la metodología e información obtenida de las encuestas realizadas a las Autoridades Portuarias participantes.

Palabras clave: modelado de viento, dispersión de contaminantes en atmósfera, calidad del aire, entorno portuario, gestión portuaria.

Abstract

Current guidelines of international organizations are clear warning regarding atmospheric pollution. Ports are essential systems to the logistics and transport strategy of the European Union. However, they are geographical enclaves normally close to settlements where relevant emissions are concentrated. Port Authorities surveyed are fully aware of this issue. Thus, a tool is important to support port management to allow for on-demand and real-time analysis of the space-time evolution of concentrations. This dispersion of pollutants, forced mainly by wind action, is nested in the very high-resolution model within the Environmental Control Dashboard of Puertos del Estado (PdE). This article presents the methodology details and outcomes of the surveys carried out among the participating Port Authorities.

Keywords: Wind modelling, wind-induced pollutant dispersion, air quality, port environment, port management.

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) alerta sobre los efectos en la salud humana de la contaminación atmosférica en su informe “Air quality in Europe” en su capítulo “Health impacts of air pollution in Europe, 2021” (EEA, 2021c). Éste actualiza los efectos de tres contaminantes claves determinantes en la salud de los ciudadanos: partículas finas, dióxido de nitrógeno y ozono troposférico.

El análisis de AEMA pone en relieve la necesidad de mejorar la calidad del aire hasta los niveles recomendados recientemente por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que podría prevenir más de la mitad de las muertes prematuras causadas por la exposición a partículas finas.

El Pacto Verde Europeo, junto con el Plan de Acción “Contaminación Cero” de la UE, establece el objetivo de reducir antes de 2030 el número de muertes prematuras debido a la exposición de partículas finas en más de un 55 %, en comparación con los niveles de 2005. La UE está en vías de alcanzar su objetivo, invirtiendo en formas limpias de movilidad, climatización de edificios, en nuevos procesos de producción industrial y agraria, que mejoren la salud, la productividad y en general en la calidad de vida de todos los europeos, con una mirada más social, regenerando los espacios urbanos, barrios, ciudades y pueblos más vulnerables.

Mejorar la gestión de los espacios portuarios y su relación con la ciudad en cuestiones ambientales y, más en particular, mejorar la calidad del aire deben ser una tarea clave de los responsables con competencias en esta materia. Hoy las ciudades y sus áreas metropolitanas concentran el 55 % de la población, y en concreto, las ciudades portuarias

* Autora de contacto: laura.crespo@cedex.es

¹ Ingeniera agrónoma. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

² Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. Oritia & Boreas.

³ Licenciado en Ciencias Ambientales. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

⁴ Ingeniero de caminos, canales y puertos. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

⁵ Licenciada en Ciencias Físicas. Puertos del Estado.

⁶ Doctor en Ciencias Físicas. Puertos del Estado, actualmente en Mercator Ocean International.

cada día están tomando mayor protagonismo como grandes polos de tracción y como centros neurálgicos de actividad económica y cultural, como se puede ver en todas las ciudades costeras. Según el Observatorio de la Movilidad Metropolitana, el 55 % de la población española reside en áreas metropolitanas de las cuales el 63 % son costeras (OMM 2020). Por esta razón, se ha de gestionar con más conocimiento las actividades que se ubican en estos entornos para avanzar en los objetivos marcados por el Pacto Verde Europeo, y el Plan de Acción “Contaminación Cero” de la UE, haciendo de estos espacios lugares de convivencia de muy diferentes actividades económicas, con elevados estándares de calidad de vida.

En España, la ejecución de los compromisos de carácter ambiental, quedan claramente definidos en el reparto competencial que establece la Constitución. De esta forma, las administraciones competentes en la “regulación y monitorización” de la calidad del aire son las comunidades autónomas y entidades locales, estableciendo límites de emisión e inmisión de contaminantes atmosféricos, y en particular corresponde a las comunidades autónomas otorgar la “Autorización de Actividad Potencialmente Contaminadora de la Atmósfera”, prevista en la Ley 34/2007, y, en consecuencia, son los titulares de las “actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera” quienes deben cumplir con las condiciones que las CC. AA. hayan establecido en sus correspondientes autorizaciones y desarrollar las campañas de medida de sus emisiones.

Así, de acuerdo con el marco competencial descrito y el objeto de este artículo, se debe destacar que las Autoridades Portuarias no tienen competencias en materia de regulación ni control de parámetros de calidad del aire. Sus funciones en esta materia se limitan a la regulación operativa de la actividad portuaria; en este sentido, podrán en su caso:

- Establecer condiciones sobre los medios materiales que deben utilizar los operadores, y sobre la operativa que deben seguir estos, dirigidas a minimizar emisiones que puedan afectar a otras operaciones, a las instalaciones, o al entorno.
- Regular la ubicación de las actividades mediante autorizaciones temporales de ocupación, zonas de uso común, así como los momentos óptimos de desa-

rollo de dichas actividades, dirigidas, nuevamente, a minimizar emisiones que puedan afectar a otras operaciones, a las instalaciones, o al entorno.

En ningún caso estas funciones de regulación de las AA. PP., sobre las operaciones desarrolladas en el puerto, podrán interpretarse como deber de garantizar el cumplimiento de objetivos de calidad ambiental en el entorno, ligados a la actividad del puerto; ni suplantando la relación de las comunidades autónomas con los operadores portuarios, a efectos del cumplimiento efectivo de los objetivos de calidad establecidos para el entorno del puerto.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO SAMOA 2 DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

El Organismo Público Puertos del Estado, consciente de que los puertos tienen que buscar soluciones para mejorar las relaciones con su entorno próximo en materia de calidad del aire (relación puerto – ciudad), pone en marcha el proyecto SAMOA 2 de dispersión de contaminantes atmosféricos para dar respuesta a esta necesidad.

La primera tarea, orientada a conocer el origen de la contaminación de los entornos portuarios, fue investigar los focos de emisión de los entornos portuarios y el peso de las actividades generadoras de emisiones con aporte de contaminantes atmosféricos globales en el conjunto del recinto portuario. Se podría entender esta fase de búsqueda de información como una aproximación en la elaboración de un inventario de emisiones atmosféricas de actividades incluidas en dicho recinto.

El siguiente paso consiste en la caracterización del medio físico, conocimiento de la fisonomía del tejido urbano (altura y volúmenes de las edificaciones portuarias), espacios colindantes al puerto, vegetación, cultivos y distintos aprovechamientos existentes en las inmediaciones portuarias. En esta fase también se incluye la caracterización del viento, con un modelo de muy alta resolución incluido en el proyecto SAMOA 2. Este modelo combina la física de modelos meso-meteorológicos de gran capacidad predictiva a escalas de kilómetros y horaria, con modelos propios de la dinámica de fluidos computacional con alta capacidad resolución espacio temporal, metro/segundo. Así, es capaz de reproducir adecuadamente la turbulencia

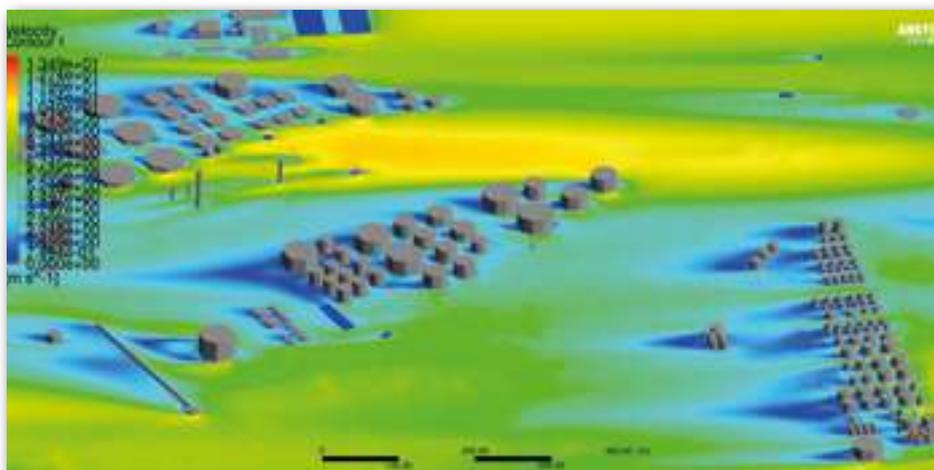


Figura 1. Ejemplo de tinglados portuarios y volumetrías aerodinámicas representativas consideradas en todos los enclaves portuarios analizados.

atmosférica teniendo en cuenta el efecto de las infraestructuras y la topografía, determinantes en la estructura de la turbulencia atmosférica que controla los fenómenos de interés en operaciones portuarias y la dispersión de contaminantes.

Estas dos componentes, la caracterización de los focos de emisión de contaminantes atmosféricos y el conocimiento del medio dispersante de la contaminación, junto con la ayuda de un modelo de dispersión, permiten conocer la concentración de contaminantes atmosféricos en cada porción del territorio que se desea controlar y evaluar los niveles de calidad del aire. Conocer cuál es el comportamiento del medio físico del entorno portuario en cuanto a la dispersión de contaminantes atmosféricos se construye a partir de:

- La digitalización del territorio circundante del puerto.
- Un modelo de viento de alta resolución.

El resultado permite conocer en cada celda del territorio los niveles de calidad del aire asociados, condicionados por los focos de emisión próximos al espacio control, las operaciones portuarias y el medio dispersante. Los contaminantes objeto de estudio son: dióxido de azufre (SO_2), material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$), óxidos de nitrógeno (NO_x) y Compuestos Orgánicos Volátiles No Metánicos (COVNM).

Con todo ello se describe la contaminación atmosférica en tiempo real, descrita en rangos de concentración, en unos mapas por defecto elaborados para cada puerto con información de todos estos focos de emisión y con la información de operaciones de muelles, parvas y acopios de graneles declarados en las memorias de sostenibilidad de cada puerto y confirmados en las reuniones preparatorias de este trabajo mantenidas con las autoridades portuarias (AA. PP.). Otra funcionalidad de la aplicación son los estudios de retro trayectorias, que permiten conocer cuál es el foco emisor origen de una concentración elevada de contaminantes en un punto sensible, alejado del foco emisor y que sufre los efectos de contaminación que se quieren investigar.

Con la experiencia acumulada en el uso del proyecto SAMOA 2 en cada puerto se podrían definir umbrales en puntos de control de ciertas zonas sensibles, que se quieren proteger por los responsables del puerto de forma especial.

Ayudaría a promover cambios en el comportamiento de la gestión portuaria, analizando cuáles son actividades no indispensables, en cuanto a que permiten prestar servicios a la ciudadanía, sin posibilidad de poderse llevar a cabo por otro medio. Se puede pensar en postponer aquellas actividades no indispensables en el momento que se produce una dirección dominante de viento en el sentido de un núcleo de población.

Ciertos puertos han ubicado puntos de control de la contaminación, identificando puntos sensibles en el funcionamiento portuario. La ubicación de los puntos se corresponde con Puntos (POI) en Áreas Operativas de Interés establecidas a partir del estudio de detalle y la consulta con los correspondientes Departamentos de Operaciones y Medioambiente de las Autoridades Portuarias.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA DIGITALIZAR EL MEDIO FÍSICO Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE VIENTO DE ALTA RESOLUCIÓN

3.1. Descripción del procedimiento para digitalizar el medio físico

El modelo de muy alta resolución tiene por objetivo reproducir adecuadamente los efectos locales del viento debido a la infraestructura portuaria y la topografía de los dominios de estudio. Por ello, como punto de partida, se hace necesario modelizar con un alto grado de detalle y fidelidad el medio físico en todo el dominio de estudio.

Se ha tenido en cuenta la información sobre los límites espaciales del dominio, la línea de costa, los modelos digitales del terreno de alta resolución y la información catastral, incluyendo la posibilidad de fijar la altura de parcelas que son conocidas.

Para ello, se ha desarrollado un software que es capaz de generar de forma semiautomatizada los modelos tridimensionales del dominio. La información catastral ha sido utilizada para determinar la altura correspondiente de cada uno de los edificios incluidos en el dominio. Esto ha sido posible gracias al atributo "CONSTRU" que ofrecen los *shapefiles* proporcionados por la Dirección General del Catastro. Este atributo indica el número de plantas y sótanos de las que dispone un edificio y, por lo tanto, permite estimar la altura asumiendo una altura media de 3 m por planta. En el caso de conocerse con precisión la altura de

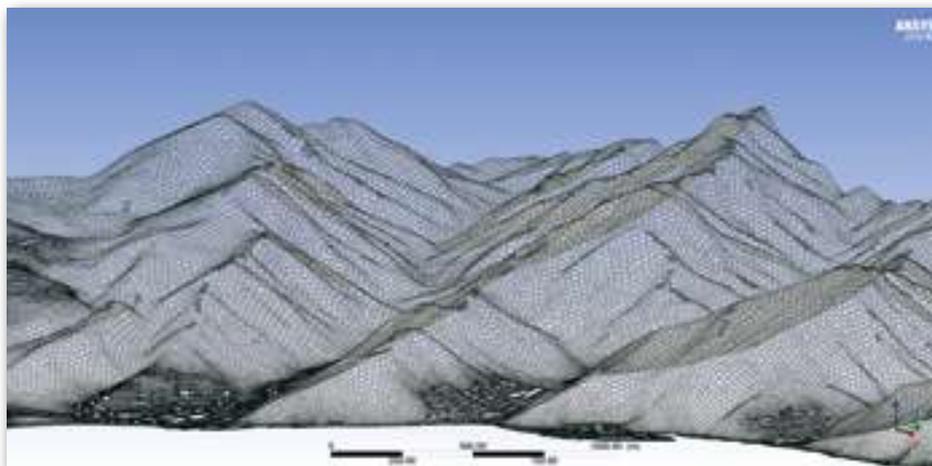


Figura 2. Ejemplo de mallado en topografía compleja. Tenerife.

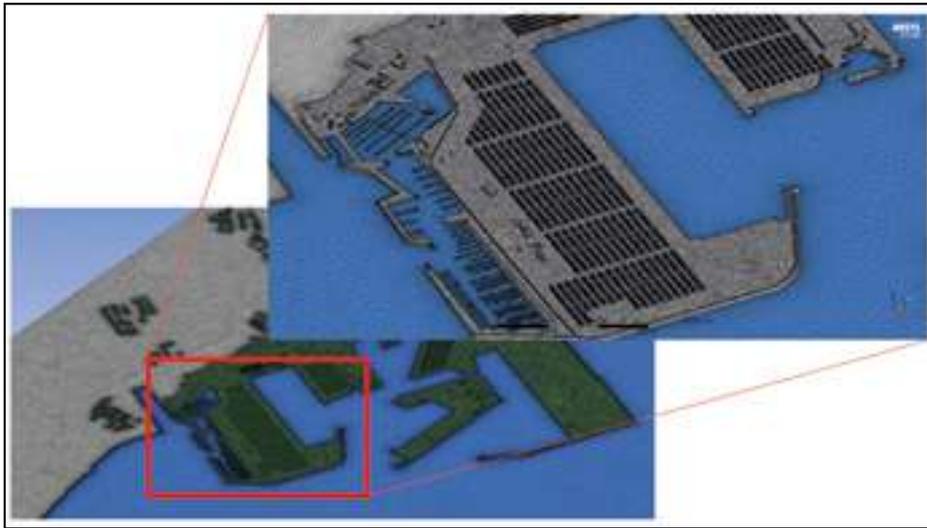


Figura 3. Ejemplo de modelado 3D de estructuras influyentes en el microclima portuario.

algunas de las parcelas, el *software* permite su personalización a través de un archivo .CSV donde se indica la altura asociada a una referencia catastral.

Una vez que se han generado los edificios, la línea de costa y la topografía, el *software* realiza una unión *booleana* que permite generar un único sólido rígido que puede ser importado por los distintos *software* de simulación computacional de fluidos (CFD).

El siguiente paso, para digitalizar correctamente el medio físico, es determinar la rugosidad del terreno en la malla de estudio y en la zona externa a cada uno de los dominios de estudio. Los perfiles medios de viento, la energía turbulenta y la tasa de disipación en los contornos se estiman en función de la rugosidad del terreno a barlovento del dominio numérico. Estas rugosidades del suelo se han calculado analizando el mapa CORINE de la European Environmental Agency (EEA), de 250 m de resolución.

La resolución de los elementos del modelo 3D se ha seleccionado teniendo en cuenta la calidad de la malla resultante, incluyendo únicamente aquellas estructuras u elementos que pueden influir en el microclima del dominio portuario. En este sentido, y con el objetivo de optimizar los tiempos de cálculo, la resolución de los elementos que componen el modelo digital del medio físico es variable. Aquellas zonas que se encuentran alejadas del puerto se modelizan de forma simplificada, permitiendo así optimizar la malla computacional y reduciendo los tiempos de cálculo del modelo CFD.

3.2. Descripción del modelado del viento de alta resolución

El modelo de muy alta resolución que ha sido desarrollado en el marco del proyecto SAMOA 2 permite resolver la turbulencia con una precisión de metros debido a la topografía y la infraestructura portuaria. Esto ha sido posible mediante un algoritmo que permite inferir el campo de viento a partir de un catálogo de simulaciones CFD. El modelo predictivo resultante ofrece predicciones con una resolución de 50 m que mejoran las realizadas por los modelos mesoescala disponibles en Puertos del Estado.

El primer paso consiste en definir el catálogo de casos a simular en el modelo CFD a partir de un conjunto de datos históricos de viento en los dominios de interés. A tal

efecto, se ha hecho uso de un modelo WRF con una resolución espacial de 15 km, 28 niveles verticales y una extensión temporal de 36 años (1979-2014). Este modelo se ha ejecutado a partir de los datos de reanálisis meteorológico global ERA-Interim del Centro Europeo de Predicciones a Medio Plazo (ECMW).

Este catálogo de casos seleccionados se simula haciendo uso de un modelo de volúmenes específico integrado en el software ANSYS-Fluent que permite determinar con precisión el movimiento y comportamiento del fluido, así como la transferencia de calor y la turbulencia.

Las consideraciones básicas de partida de las simulaciones son:

- La masa de un fluido se conserva.
- La variación de la cantidad de movimiento es igual a la suma de las fuerzas que actúan en una partícula del fluido: segunda ley de Newton.
- La variación de la energía es igual al calor aportado a una partícula de fluido y al trabajo realizado sobre la misma: primera ley de la termodinámica.

Las simulaciones numéricas implementaron un modelo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) en régimen estacionario. Se trabajó con dos modelos de turbulencia en función de las correspondientes calibraciones contra un *hindcast* y medidas de estaciones anemométricas, modelo k-ε estándar y el k-ε RNG. Finalmente se implementó el modelo de turbulencia RNG k-ε para todas simulaciones con una función de pared $y^+ = 0,5$. El acoplamiento presión-velocidad se hizo mediante el método semi-implícito para ecuaciones ligadas a la presión (método SIMPLE). La discretización espacial utilizada para la presión, el momento, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta se realizó mediante *upwind* de segundo orden. Los residuos para continuidad, velocidad x, velocidad y, velocidad z, k y εpsilon son $1e-07$.

Por último, con el fin de integrar la capacidad predictiva del sistema de forma operacional, se anida el modelo anterior a un modelo meso-meteorológico. De forma específica, y mediante un motor tensorial de inferencia se anida el modelo CFD al modelo HARMONIE-AROME 2,5 km. Para mejorar la eficacia del algoritmo y la resolución de las

predicciones se procede a un escalado estadístico previo a 1 km mediante *splines*.

Como resultado de la integración de los elementos aquí descritos, la herramienta permite obtener predicciones de dispersión de contaminantes a muy alta resolución espacio temporal.

4. LAS ENCUESTAS COMO HERRAMIENTA PARA CONOCER LA PROBLEMÁTICA DEL PUERTO EN CUANTO EMISIONES A LA ATMÓSFERA Y DETERMINACIÓN DE LOS FOCOS DE EMISIÓN E INVENTARIO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

El Organismo Público de Puertos del Estado plantea la necesidad y conveniencia de diseñar una encuesta dirigida a crear un canal de diálogo en materia de calidad del aire y de emisiones a la atmósfera de los entornos portuarios, como técnica que permite obtener información de estos entornos, conocer la gestión que desempeña la Autoridad Portuaria, profundizar en el tipo de manipulación de las diferentes mercancías y si existe presión generada por el puerto en el interfaz puerto-ciudad. Este procedimiento de encuesta permite llegar a cualquier tipo de destinatario y añade capacidad para estandarizar datos, lo que ayuda a su tratamiento informático y análisis estadístico, para con posterioridad sacar conclusiones y si fuera necesario definir un plan de trabajo para corregir las deficiencias planteadas o propuestas de mejora de futuro.

4.1. Descripción de encuestas para caracterizar la problemática del puerto en cuanto emisiones a la atmósfera

El objetivo de las encuestas es mejorar y avanzar en el conocimiento de la problemática a la que se enfrentan diariamente las distintas Autoridades Portuarias para dar respuesta en las cuestiones de materia de calidad del aire de los entornos portuarios que gestionan y que entre sus objetivos están los de optimizar operaciones de tráfico de buques. Al mismo tiempo se quiere brindar una oportunidad a los gestores de los puertos para abrir un diálogo distendido que permita describir circunstancias y cuestiones operativas del día a día que puedan en alguno de los casos superar su ámbito de acción y conocimiento en esta materia y quieran ser compartidas.

Para ello, se formula un conjunto de preguntas organizadas para conocer el discurso y el sentir de las AA. PP. en varios frentes:

- Nivel de sensibilización en relación con los problemas de calidad del aire del puerto y su repercusión en la salud pública.
- Conocimiento de la calidad del aire del entorno portuario, relación puerto-ciudad.
- Control y seguimiento de la calidad del aire en el entorno portuario.
- Propuestas para corregir la calidad del aire: mejora del conocimiento y buenas prácticas en estos entornos.
- Comunicación a la ciudadanía, administraciones públicas y agentes sociales en temas de calidad del aire del entorno portuario.

Al mismo tiempo que se realizan las encuestas, se aprovecha para presentar el proyecto SAMOA 2 de dispersión de contaminantes atmosféricos, y se definen con los responsables de la gestión del puerto los puntos operativos de interés (POI) en las Áreas Operativas de Interés (AOI) donde se publicarán los resultados del estudio de viento en la aplicación Cuadro de Mando Ambiental (CMA, Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras, Puertos del Estado, 2017) de Puertos del Estado. Se contrastan las ubicaciones de los puntos de control y su número, para tener controladas las operaciones portuarias a proteger.

Las preguntas del cuestionario se dirigen en todo momento a conocer la percepción de los responsables en la gestión de los puertos sobre las emisiones atmosféricas que condicionan estos espacios, ya que concentran un elevado número de actividades generadoras de contaminación atmosférica. Estas emisiones tienen su origen tanto en fuentes naturales como antropogénicas, y pueden incidir en la salud de las personas, en la degradación de materiales que integran el patrimonio cultural arquitectónico del puerto y espacios colindantes, en los seres vivos y en el funcionamiento de los ecosistemas.

Estas actividades son de naturaleza diversa y tendrán mayor o menor peso dependiendo del puerto. Entre estas actividades se encuentran el tráfico de buques y el tráfico auxiliar del puerto, los remolcadores, que pueden suponer una fuente importante de emisiones, dependiendo de las características del entorno portuario. Las emisiones procedentes de buques se caracterizan por ser el origen de contaminantes atmosféricos como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado y compuestos orgánicos volátiles, entre otros contaminantes. A estas emisiones se han de añadir las procedentes del tránsito de mercancías en los entornos y recintos portuarios y las de manipulación de mercancías.

Estas operaciones, sobre todo las de manipulación de graneles sólidos, acopios de material pulverulento, suponen una fuente de emisión de material particulado, en el momento en el que tiene lugar la carga y descarga de camiones y barcos, aunque se cuenta con medios sofisticados de manipulación que van desde pantallas para interceptar el avance de las partículas procedentes de manipulación de graneles, el riego de materiales pulverulentos mediante pulverización, aspersión y sellado, recubrimientos con tolvas protectoras del material de trasiego (cargador con tolva telescópica de cascada y tolva telescópica con aspiración concéntrica), e incluso el caso más controlado y costoso como es la manipulación de estos materiales en naves cerradas o su transporte a través de tuberías. Estas operaciones son consideradas por todos los gestores como la segunda causa del deterioro de la calidad ambiental del puerto: agua y sedimentos y atmósfera (PdE, 2015).

En lo relativo a las actividades relacionadas con la industria, en los entornos portuarios se pueden encontrar muchos tipos de complejos industriales que se sitúan precisamente alrededor de ellos para aprovechar las posibilidades que estos brindan como grandes nodos de comunicación. Por ejemplo, grandes instalaciones petroquímicas, donde se hace un uso energético y no energético de los combustibles fósiles, como es el caso del puerto de Tarragona, que sustenta uno de los complejos

petroquímicos más importantes de Europa, o el puerto de Huelva, con su refinería.

En Asturias encontramos también otros tipos de puertos especializados en la industria siderúrgica y del cemento y en centrales térmicas de carbón; estas últimas próximas a una reconversión por inminente cierre o su transformación en centrales térmicas alimentadas con gases de aprovechamiento siderúrgico, gas natural o biomasa, como son los casos del puerto de Avilés y el puerto de Gijón. El peso de la siderurgia en muchas cuencas puede afectar a varios entornos portuarios, como Avilés y Gijón. Esta actividad tiene mucho peso en emisiones a la atmósfera.

La presencia de los contaminantes atmosféricos depende, por tanto, del peso de estos focos de emisión y del medio dispersante. Otro ejemplo de foco de emisión potente lo representa el puerto de Cartagena, que ha convertido la dársena de Escombreras en el centro operativo de diversas empresas del sector energético.

Esta variabilidad en el origen de las emisiones producidas en los entornos portuarios, unida al hecho de que las condiciones meteorológicas y de dispersión de contaminantes (condiciones del medio físico) son diferentes en cada uno de ellos, hace que cada uno tenga una problemática concreta en términos de calidad del aire. Por ello, en todos los casos se hace necesario el uso de herramientas tipo SAMOA que permiten gestionar las actividades, optimizando distintas operaciones una vez modelizados los comportamientos en materia de calidad del aire.

Describir en este apartado toda la información recabada en las encuestas alargaría este artículo perdiendo el objeto fundamental de describir los fundamentos de apoyo del modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Es por ello por lo que en otro artículo de la revista *Ingeniería Civil* se tratarán con mayor profundidad los resultados de las encuestas.

4.2. Determinación de los focos de emisión e inventario de emisiones a la atmósfera

Previa a la reunión con las distintas AA. PP. para comentar los contenidos de la encuesta, se hizo un trabajo de campo para caracterizar los distintos ámbitos portuarios. El estudio parte de una descripción física del recinto portuario y de su entorno (infraestructuras de las que dispone el puerto, accesos por carretera, comunicación interna en el recinto portuario, condiciones de viento predominante en el puerto y ubicación de los núcleos de población más cercanos al puerto), realizada con datos publicados por la Autoridad Portuaria en la memoria estadística correspondiente al año de referencia establecido para este estudio (2018), así como otras fuentes de datos publicados por entidades locales.

En la caracterización del entorno se analiza la Red de Control de la Calidad del Aire de competencia de la comunidad autónoma para revisar si en algún momento se han producido superaciones de los indicadores de calidad del aire en las estaciones representativas del territorio en el que el puerto está ubicado.

El análisis de las actividades portuarias con influencia en la contaminación atmosférica como el tráfico portuario de buques, pesca y deportivo y tráfico terrestre asociado a la carga y descarga de mercancías en el puerto se ha realizado en base a los datos publicados por cada Autoridad Portuaria en la memoria anual del año de referencia establecido. Asimismo, también se incluyen las actividades industriales con peso en la generación de emisiones a la atmósfera (aunque no sean concesionadas) y con influencia en la calidad del aire del puerto por su proximidad al mismo (datos publicados en el Registro Estatal de Fuentes Contaminantes (PRTR)).

Con toda la investigación se elabora un cuadro resumen de emisiones atmosféricas más relevantes de cada entorno portuario desglosado en las diferentes actividades que las generan.

4.2.1. Emisiones atmosféricas asociadas a tráfico de mercancías por el entorno portuario, tráfico terrestres, en camión y ferrocarril.

Cálculo de emisiones atmosféricas asociadas al tráfico de camiones

Para ello se parte de la información obtenida del *Anuario Estadístico de Puertos del Estado 2018*, PdE (2020) (año al que se data toda la información), que describe las diferentes tipologías de tráfico de mercancías que mueve cada puerto. A esta información se añade la distribución de dichos tráfico entre los distintos modos de transporte disponibles en el puerto, información obtenida de la Fundación Ferrocarriles Españoles, año 2020 (OFE, 2021) y, por último, la distribución pormenorizada de los tipos de tráfico según sus modos de transporte en los distintos puertos es de elaboración propia a partir de los datos publicados en la memoria anual del puerto.

Para cada tipo de mercancía se ha considerado un tipo de camión adecuado a las características de la mercancía que carga. Las características relativas a la carga útil de estos camiones se han obtenido a partir del informe de octubre de 2018 del Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera (MF, 2018), publicado por el entonces Ministerio de Fomento, hoy de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. A pesar de que en dicho informe el porcentaje de recorridos en carga es variable, mayor del 70 % para todos los tipos de camiones

Tabla 1. Ejemplo de descripción de emisiones atmosféricas más relevantes del entorno portuario por actividad

Actividad	Emisiones NO _x (kg)	Emisiones SO ₂ (kg)	Emisiones COVNM (kg)	Emisiones PM10 (kg)
Grandes Instalaciones Industriales	456,00	0,00	0,00	0,00
Transporte Terrestre	76,51	0,00	1,81	0,20
Transporte Marítimo	602.319,60	21.914,10	25.220,10	18.063,90

Tabla 2. Factores de emisión de contaminantes atmosféricos de tráfico de camiones (Fuente: EEA (2021b). Tier 2)

Tipo de vehículo pesado	Tecnología	NOx (g/km)	SO2* (g/km)	COVNM (g/km)	PM2,5=PM10=PST** (g/km)
Gasóleo > 32 t	Convencional	12,8	-	0,534	0,491
	Euro I -91/542/EEC I	9,04	-	0,510	0,358
	Euro I -91/542/EEC II	9,36	-	0,326	0,194
	Euro III - 2000	7,43	-	0,308	0,151
	Euro IV - 2005	4,61	-	0,012	0,0268
	Euro V - 2008	2,63	-	0,012	0,0268
	Euro VI A/B/C	0,507	-	0,012	0,0013
	Euro VI D/E	0,507	-	0,012	0,0013

* Las emisiones de SO2 de los camiones son prácticamente despreciables porque los combustibles utilizados están desulfurados.

** Partículas Sólidas Totales.

considerados en el cálculo, se ha partido del supuesto de que el recorrido en carga es del 50 % para todos, pues dentro del recinto portuario realizan tareas de carga y descarga de mercancía.

El recorrido medio estimado que hace un camión en un viaje de ida y vuelta dentro del puerto es variable para cada puerto, por lo que se calcula la distancia media estimada que hay teniendo en cuenta los viales de acceso a todos los muelles en los que se carga y descarga mercancía.

Los factores de emisión de gases contaminantes para camiones de más de 32 t, camiones referenciados en MF (2018) como el tipo más común para este entorno, son de última tecnología, fabricado con la norma Euro VI.

Teniendo en cuenta los datos del total de kilómetros recorridos en el recinto portuario y los factores de emisión para los distintos contaminantes, NO₂, PM10 y COVNM, obtenemos las emisiones brutas asociadas al tráfico de camiones en el año 2018.

Esta información obtenida para un año se prorratea por horas para incluir el factor de emisión en el modelo operativo del proyecto SAMOA 2 de dispersión de contaminantes para trabajar en los mapas por defecto de cada puerto.

Cálculo de las emisiones asociadas al transporte de mercancías por ferrocarril

Para realizar una estimación de las emisiones contaminantes asociadas al tráfico de ferrocarriles en el año 2018, se partió de los datos del tráfico de mercancías del puerto y de los datos de la distribución de los tráficos según su modo de transporte en el puerto. Una vez obtenida la información del total de mercancías transportadas por ferrocarril y, considerando la distancia media de recorrido en el interior del puerto en km, se calcula el consumo total de combustible asociado a este tráfico. El indicador utilizado para el cálculo se ha obtenido de OFE (2021), para ello se ha asimilado al consumo de tráficos análogos descritos en el Observatorio del Ferrocarril de España (OFE) a las características de los puertos españoles (consumo medio de combustible Gasóleo A, 0,0195 l/t neta-km). Para traducir estos consumos de combustible a emisiones contaminantes se utilizan los factores de emisión de contaminantes

atmosféricos para el transporte por ferrocarril, información obtenida de EEA (2019).

Tabla 3. Factores de emisión de contaminantes atmosféricos asociados al ferrocarril [Fuente: EEA (2019). Tier 2]

Contaminantes (kg/t comb)	Valor	Referencia
NOx	52,4	Método Tier 2 Agregado
SO ₂	-	No estimado
COVNM	4,65	Guía (2006)
PST	1,52	Método Tier 2 Agregado
PM10	1,44	Método Tier 2 Agregado
PM2,5	1,37	Método Tier 2 Agregado

La densidad del gasóleo considerada es de 0,845 g/l.

Con todo ello se obtienen el total de las emisiones de contaminantes atmosféricos para el año 2018. Estas emisiones anuales, para ser traducidas a emisiones por hora, se prorrataan para estimar las emisiones e incluirlas en los mapas por defecto, a plantear en los puertos que cuentan con transporte de ferrocarril.

4.2.2. Emisiones atmosféricas asociadas al tráfico de buques en el entorno portuario: zonas I y II

Para realizar la estimación y ponderación de las emisiones atmosféricas de gases contaminantes del tráfico de buques en la zona portuaria y en la zona de fondeo del puerto en el conjunto de las actividades portuarias se utiliza la herramienta Shiplocus¹ desarrollada por Puertos del Estado, con la colaboración del CEDEX y de la empresa de servicios informáticos y de programación, GMV. La herramienta cuenta con datos validados de los meses de marzo, abril, mayo y junio del año 2022. Por ello, y a falta de la información del resto del año, se extrapola este valor hasta completar el año, con el sesgo que ello supone.

Para el caso de incluir los factores de emisión de los buques según su tipología se tendrá en cuenta lo que marca EEA (2021b), Tier 1, de manera que cada puerto en función de la información que disponga de los buques, potencia de

¹ Para acceder a esta herramienta se necesita contactar con Puertos del Estado.

motores que soliciten entrada al puerto, introduzca los factores de emisión según proceda.

4.2.3. Emisiones atmosféricas de grandes instalaciones industriales incluidas en el ámbito de la directiva IPPC: inventario de emisiones PRTR próximas al puerto

Para todos los puertos incluidos en el proyecto se registran las emisiones atmosféricas de gases contaminantes de las grandes instalaciones industriales incluidas en la Directiva IPPC, y en el inventario de emisiones PRTR, próximas al puerto en un radio aproximado de 4 km.

Por último, se añade un análisis del porcentaje de emisiones de las actividades desarrolladas en el entorno portuario como herramienta de gestión. Una vez identificados todos los posibles focos de emisión de gases contaminantes en las inmediaciones de los distintos puertos y entornos portuarios, se analiza la influencia que las distintas actividades del entorno portuario tienen en las emisiones atmosféricas de este espacio. Este análisis ayuda en la aproximación y diagnóstico para conocer la importancia de las actividades portuarias en la generación de contaminantes atmosféricos, de forma que se obtenga mayor precisión en aquellas que tenga un mayor peso.

4.2.4. Factores de emisiones asociados a la manipulación de graneles sólidos y acopios de material pulverulento. Proyecto HADA

En el marco de trabajo del proyecto HADA, donde participó Puertos del Estado, diferentes AA. PP. y el CIEMAT se desarrollaron distintos tipos de actividades relacionadas con los entornos portuarios. En concreto se llevaron a cabo distintas campañas de caracterización química, morfológica, granulométrica y mineralógica de muestras obtenidas de diferentes operaciones de carga y descarga de *clinker*, tapioca, fosfato, harina de soja, cenizas de piritita, mineral de manganeso, carbón de coque, fino de silico-manganeso, alfalfa, carbón de hulla, andalucita, maíz y mandioca.

Como resultado de esas campañas se han obtenido los factores de emisión asociados a la manipulación de graneles sólidos y acopios de material pulverulento que pueden producirse en los entornos portuarios. Estos factores de emisión se pueden usar por defecto, si el puerto no cuenta

con información adaptada a las características del material de graneles sólidos manipulados.

En las preguntas de las encuestas relacionadas con el control y seguimiento de la calidad del aire en el entorno portuario, la mayoría de las AA. PP. refieren la manipulación de graneles sólidos como las operaciones más contaminantes en el puerto. Según datos de tráfico portuario del año 2021 de Puertos del Estado los graneles sólidos representan el 15,62 % del total de mercancías que se mueven en el sistema portuario español, lo cual es un indicador de su importancia a la hora de manipular y tomar medidas para evitar los problemas derivados de la emisión de material particulado. Según el Sistema Español de Inventarios a la Atmósfera, el material particulado procedente de la carga y descarga y manipulación de graneles sólidos (2.A.5.c Storage, handling and transport of mineral products) supone en PM_{2,5} un 0,02 %, en PM₁₀ un 0,15 % y en PST 0,22 % del total de material particulado procedente de diferentes fuentes emisoras (quema de residuos, sector residencial, canteras, agricultura y ganadería, instalaciones de combustión, transporte terrestre, etc.), lo que apunta a que a escala nacional es una actividad que no tiene mucho peso, sin embargo se ha de vigilar por la importancia que tiene a nivel local, cuando la dirección del viento es dominante con efectos en los núcleos de población más próximos.

Con el propósito de facilitar el uso de la herramienta se han previsto valores por defecto de distintos parámetros determinantes como la humedad (húmedo o seco), pulverulencia (baja, media o alta) y la experiencia del operador en la descarga del granel (baja, media o alta). En aquellos casos en los que se disponga de información específica de detalle, el usuario podrá introducir sus propios factores de emisión.

4.3. Medidas de control de la calidad del aire en las proximidades de la zona portuaria

Para analizar las medidas que se han implementado en los distintos recintos portuarios para la mejora de la calidad se ha buceado en toda la información, estrategias de desarrollo sostenible y estrategias territoriales, que el puerto ofrece a las autoridades ambientales estatales, autonómicas y locales. Se pretende hacer partícipe a la sociedad de los proyectos cuyo objetivo es la definición de soluciones técnicas que palien en gran medida las afecciones

Figura 4. Ejemplo de parámetros por defecto y configurables en la manipulación de los graneles sólidos.

detectadas. Un ejemplo de esto se materializa en los puertos donde la población está sensibilizada por la presencia de material particulado. En estos entornos se plantean estudios sobre el comportamiento “fluidodinámico de la emisión de partículas por los acopios de graneles en el recinto portuario” y se ponen en marcha planes de medidas correctoras a implantar en distintas fases del proyecto. Muchas de estas medidas pueden estar incluidas en el “Plan de mejora de la calidad del aire en la zona portuaria”, donde la Autoridad Portuaria adquiere distintos compromisos, por ejemplo, ejecutar apantallamientos y otras medidas en la zona portuaria para la mejora de la calidad del aire y proteger a las poblaciones aledañas frente a las posibles molestias ambientales por emisión de material particulado.

Por todo esto se concluye que para la mejora de la calidad del aire de los entornos portuarios no hay una única manera de proceder, y lo adecuado es conocer con anticipación las condiciones del medio físico y gestionar las necesidades adecuadamente, por lo que se recomienda el uso de la herramienta del proyecto SAMOA 2 de dispersión de contaminantes para anticiparse a posibles episodios de mala calidad de aire.

5. ELABORACIÓN DE MAPAS POR DEFECTO DE CADA PUERTO

Para cada puerto se elabora un mapa por defecto que permite recoger de manera sintética los principales focos de emisión que se han detectado como resultado de estudio de cada puerto, disponible en su página *web*, de la preocupación trasladada en las encuestas y entrevistas y de la información del Inventario de grades instalaciones industriales, Inventario IPPC. Estos focos de emisión ubican todas las instalaciones industriales más significativas en un radio de acción del entorno portuario. También se describen los muelles con parvas de manipulación de graneles sólidos, los viales interiores en el recinto portuario y el trazado de línea de ferrocarril.

Sobre este mapa se modelizarán la dispersión de los contaminantes atmosféricos del entorno portuario asociados a las actividades que se quieren controlar. Para ello se programan por defecto la dispersión de contaminantes de los focos de emisión de las grandes instalaciones industriales (instalaciones IPPC), los transportes terrestres (ferrocarril y carretera) y permite modelar el comportamiento

Tabla 4. Valores límite del “Índice de calidad del aire” utilizados para definir los niveles de concentración de contaminantes*

	Buena	Razonablemente Buena	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable	Extremadamente Desfavorable
NO _x	<40	40-90	90-120	120-230	230-340	>340
SO ₂	<100	100-200	200-350	350-500	500-750	>750
PM10	<20	20-40	40-50	50-100	100-150	>150
PM2,5	<10	10-20	20-25	25-50	50-75	>75
COVNM	0-15	15-25	25-35	35-50	50-100	>100

* Resolución de 20 de septiembre de 2020 de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental por la que se modifica el Anexo de la Orden TEC/351/2019 de 18 de marzo.



Figura 5. Ejemplo de mapa por defecto. Puerto de Gijón.



Figura 6. Ejemplo de mapa de dispersión de contaminantes. Óxidos de nitrógeno, puerto de Gijón.

del tráfico marítimo con valores por defecto por tipología de buque o bien que el operador introduzca los parámetros específicos si dispone de ellos. Se puede simular también las operaciones de carga y descarga y manipulación de graneles sólidos, fuente del material particulado (PM-10 y PM-2,5).

El mapa, por defecto, recoge los niveles de concentración de contaminantes (SO₂, NO₂, PM-10, PM-2,5 y COVNM) en una gradación cromática que describe una horquilla de concentraciones de mayor a menor concentración con niveles marcados por los valores límite que fija el “índice de calidad del aire”.

En la representación gráfica de la dispersión de contaminantes se toma como referencia los valores límite que marca el RD 102/ 2011 de evaluación y gestión de la calidad del aire. Siendo conscientes de que el RD marca valores límite de calidad del aire que el ciudadano debe respirar en condiciones propias de ambiente urbano o semiindustrial con influencia de tráfico rodado, no contempla la posibilidad de operaciones portuarias que en casos pueden propiciar mayores niveles de contaminación por material particulado, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. Sin embargo, estos niveles permiten al gestor tener referencias para modular las operaciones de gestión portuaria y poder proteger los núcleos urbanos cuando se pronostique una dirección del viento dominante con incidencia en la ciudad próxima.

El producto final se ha implementado en el CMA (Cuadro de Mando Ambiental). La interfaz permite al usuario, de forma sencilla y sobre un mapa, definir las variables para lanzar una simulación bajo petición (tipo de contaminante, ubicación, duración de la emisión, etc.).

Los resultados de la simulación se presentan en dos modalidades: (a) evolución gráfica de las plumas de la concentración de los contaminantes como mapa interactivo; y (b), la serie temporal en determinadas zonas de interés, con opciones de exportar los resultados en varios formatos.

6. CONCLUSIONES Y MEJORAS DE FUTURO AL PROYECTO SAMOA 2

Los trabajos aquí descritos han permitido poner en funcionamiento una herramienta de previsión de la dispersión de contaminantes atmosféricos en entornos portuarios. Este servicio operacional se encuentra disponible en 16 puertos del Sistema Portuario de Interés General a través de la herramienta Cuadro de Mando Ambiental (CMA, <https://cma.puertos.es>). Gracias a la disponibilidad de predicciones atmosféricas de muy alta resolución, así como de la estimación de las emisiones generadas en la zona, los usuarios de la herramienta pueden consultar y generar simulaciones. Las mismas permiten obtener la dispersión de contaminantes atmosféricos cuyo origen proviene de determinados focos. Es posible utilizarla como una herramienta de prevención y apoyo en la toma de decisiones asociadas a los problemas de contaminación atmosférica.

El desarrollo de la herramienta ha requerido una serie de trabajos previos entre los que se incluye la elaboración de encuestas y el análisis de toda la información disponible para identificar los focos de emisión y poder hacer una estimación de las emisiones generadas en cada puerto. El análisis del porcentaje de emisiones de las actividades desarrolladas en el entorno portuario permite

comparar el peso de las diferentes actividades desarrolladas en el puerto tomando como referencia los contaminantes atmosféricos. De este análisis se concluye que para la mayoría de los contaminantes la actividad con mayor peso como foco emisor es la industrial, de grandes instalaciones (IPPC), seguido a mucha distancia de las operaciones de tráfico marítimo en el entorno portuario. Las operaciones de carga/descarga y manipulación de graneles sólidos tienen mucho peso en las emisiones de material particulado con lo que la mejor forma de evitar sus efectos es gestionar adecuadamente estas operaciones, confinándolas todo lo posible o gestionar su manipulación en los momentos más propicios con menor impacto para los núcleos urbanos próximos.

Con el fin de estimar los valores de los contaminantes atmosféricos, se han prorrateado los cálculos de las emisiones anuales utilizando estimaciones genéricas, así como valores promediados en intervalos de tiempo de una hora. La herramienta aquí presentada podría permitir en un futuro incluir las emisiones de contaminantes atmosféricos en tiempo real, del Inventario de Emisiones Atmosférica PRTR de las instalaciones IPPC. Por otra parte, el servicio existente de Puertos del Estado Shiplocus, conectado al AIS, proporciona las estimaciones de emisiones atmosféricas derivadas de la combustión en los buques de Puertos del Estado. Su integración en la herramienta desarrollada en SAMOA 2, permitiría ajustar mejor la información de mayor relevancia de los entornos portuarios.

7. REFERENCIAS

Comisión Europea (2019). El Pacto Verde Europeo. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>

Comisión Europea (2021). Plan de Acción de la UE: “Contaminación cero para el aire, el agua y el suelo”. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0400>

European Environment Agency (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Part B: Sectoral guidance chapters; 1.A.3.c Railways. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-c-railways/view>

European Environment Agency (2021a). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Part B: Sectoral guidance chapters; 1.A.3.d Navigation (Shipping). <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-d-navigation/view>

European Environment Agency (2021b). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook. Part B: Sectoral guidance chapters; 1.A.3.b.i-iv Road Transport. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>

European Environment Agency (2021c). Air quality in Europe 2021 report. Chapter: Health impacts of air pollution in Europe. Web Report. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021>

Ministerio de Fomento (2018). Informe de octubre de 2018. Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera. Ministerio de Fomento (MF). https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/listado/recursos/observatorio_de_costesoctubre2018.pdf

Observatorio de Movilidad Metropolitana (2020). Informe del Observatorio de Movilidad Metropolitana 2018. Octubre 2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/health-impacts-of-air-pollution#:~:text=Air%20pollution%20is%20a%20major,lung%20diseases%20and%20lung%20cancer>

Observatorio del Ferrocarril de España (2021). Informe 2018. https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/ferroviario/observatorio/ofe_2020.pdf

Puertos del Estado (2015). Guía de buenas prácticas en manipulación y almacenamiento de graneles sólidos en Instalaciones Portuarias. Puertos del Estado (PdE). Ministerio de Fomento. https://www.puertos.es/es-es/calidad/Documents/Guia_BP_Graneles_Solidos_Bres.pdf

Puertos del Estado (2020). Anuario estadístico 2018 del sistema portuario de titularidad estatal. Puertos del Estado (PdE). Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. https://www.puertos.es/anuario_estadistico/anuario_estadistico2018/anuario-puertos-2018.pdf

Santos, F.J., *et al.* (2017). Algeciras SafePort: nuevas herramientas Met-Ocean para el diseño y explotación portuaria. *XIV Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Alicante, Universitat Politècnica de València, 2017.* <http://hdl.handle.net/10902/18802>

Leonardo Torres Quevedo, ingeniero de caminos ... y mucho más^a

Leonardo Torres Quevedo, Civil Engineer ... and Much More

Francisco A. González Redondo^{1*}, Daniel González Fernández²

Resumen

Leonardo Torres Quevedo es el ingeniero español más universal. Formalmente sólo era ingeniero de caminos, pero su obra se desarrolló también en los ámbitos de la ingeniería aeronáutica, naval, industrial, matemática, informática o de telecomunicaciones. En este artículo se presenta una novedosa y completa síntesis de su obra ingenieril, desde sus inicios en el mundo de los ferrocarriles y su transición de las vías terrestres hacia las vías aéreas con su *transbordador*, hasta la concepción y materialización, de naturaleza a la vez teórica y práctica, de su Automática con los *ajedrecistas* y el *aritmómetro electromecánico*, pasando por la invención del mando a distancia con el *telekino*, el diseño, patente, desarrollo y comercialización de los dirigibles *autorrígidos* desde Francia, y hasta la concepción de la *binave*, el primer catamarán moderno. Un recorrido por la obra de un ingeniero civil a caballo entre el siglo XIX y el XX que puede considerarse que fue el “ingeniero total”.

Palabras clave: Leonardo Torres Quevedo, ingeniería de caminos, ingeniería industrial, ingeniería aeronáutica, ingeniería naval, informática, telecomunicaciones.

Abstract

Leonardo Torres Quevedo is the most universal Spanish engineer. Formally, he was only a civil engineer, but his work covered many other engineering fields: Aeronautics, naval construction, mechanics, mathematics, computer science, telecommunications, etc. In this article a new and complete synthesis of his work in engineering is presented, from the beginning of his career in the world of railways and his transition to multi-wire cableways with his transbordador, to the conception and materialization, of both theoretical and practical nature, of his Automatics with his automatic chess-players and the electromechanical arithmometer; from the invention of remote control with his telekino, to the design, patent, development and commercialization of his airships from France, and the creation of the binave, the first modern catamaran. A trip through the work of a civil engineer whose life bridged the 19th and 20th centuries and who can be considered the “total engineer”.

Keywords: Leonardo Torres Quevedo, civil engineering, mechanical engineering, aeronautical engineering, naval engineering, computer science, telecommunications.

1. LEONARDO TORRES QUEVEDO, INGENIERO DE CAMINOS

El ilustre ingeniero y matemático español Leonardo Torres Quevedo, caracterizado en 1930 por Maurice d’Ocagne (presidente de la Sociedad Matemática Francesa) como “el más prodigioso inventor de su tiempo”, ha pasado a la historia por la relevancia internacional de su contribución a la ingeniería aeronáutica, industrial, naval, informática o de telecomunicaciones. Sin embargo, su vida se encuentra marcada, desde su nacimiento, por la ingeniería de caminos en general y por el ferrocarril en particular (González Redondo y González Fernández, 2021).

Efectivamente, su padre, Luis Torres Urquijo (figura 1), ingeniero de caminos natural de Bilbao, entre 1841 y 1847 estuvo inicialmente destinado por la Dirección General de Obras Públicas en la provincia de Santander

(dependiente del Distrito de Burgos), trabajando en obras en el puerto de la capital y en diferentes tramos de carreteras por la provincia, hasta que en enero de 1848 fue destinado a Palencia (dependiente del Distrito de Valladolid) encargándose de la construcción de la segunda sección de la carretera general de Madrid a Santander ... la que pasaba por el valle de Iguña, donde conoció a Valentina Quevedo de la Maza (figura 1), con la que se casaría en 1850 (Sáenz Ridruejo, 1999).



Figura 1. Luis Torres Urquijo y Valentina Quevedo de la Maza.

Pero en julio de 1851 D. Luis consiguió que lo destinaran otra vez en Iguña, en esta ocasión para colaborar en

* Autor de contacto: faglezr@ucm.es

^a Este trabajo ha contado con la colaboración del proyecto de investigación PID2020-114249GB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

¹ Profesor titular. Facultad de Educación. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

² Honorary Research Fellow. School of Civil, Aerospace and Mechanical Engineering. Universidad de Bristol (Reino Unido).

el trazado de la línea del Ferrocarril de Isabel II que debía unir Alar del Rey y Santander a su paso por el valle. Estaría a las órdenes de su mentor, el ingeniero jefe santanderino Calixto Santa Cruz Ojangoiti, responsable en 1844, junto con Juan Subercase y su hijo José, de redactar las condiciones generales para las empresas ferroviarias y de establecer las características de la futura red de ferrocarriles españoles. Y el 28 de diciembre de 1852, el día que nació su segundo hijo, Leonardo, don Luis se encontraba trabajando en el diseño del ferrocarril.

A principios de 1853 la familia se trasladó a vivir a Bilbao, donde nacería en 1855 el hermano pequeño, Luis (la mayor, Joaquina, había nacido en Santa Cruz de Iguña en 1851). Allí estudiará su Educación Primaria y Secundaria el joven Leonardo, que volvería a Iguña durante las vacaciones de verano. Y, en efecto, a pesar de los cambios de destino del cabeza de familia, los Torres Quevedo mantuvieron su residencia en Bilbao por lo menos hasta 1856. Ese año Luis Torres fue nombrado Jefe del Distrito de Cáceres, y, tras unos meses, profesor en la Escuela de Ingenieros de Caminos en Madrid. En 1858 pasó al servicio de la empresa del Ferrocarril de Jerez a Trocadero, en la provincia de Cádiz, trasladando el domicilio familiar a las “Casas de Pavón” en el Puerto de Santa María.

Durante estas ausencias de sus padres motivadas por los trabajos ferroviarios de D. Luis por distintos lugares de España, de los que tenemos constancia por su Hoja de Servicios en el Ministerio de Fomento, el niño Leonardo quedaba a cargo de Pilar Barrenechea Lapaza, pariente lejana de su padre. Este hecho se dio muy especialmente entre 1857 hasta 1867, mientras cursaba la primera parte de sus estudios de Bachillerato en el Instituto Vizcaíno [el Instituto de Enseñanzas Medias de Bilbao], dando lugar a una relación familiar que marcaría el futuro de nuestro inventor (Aramberri y González Redondo, 2023).

Con la herencia recibida al fallecer la última de los Barrenechea, Torres Quevedo completaría su Bachillerato en París y, como su padre, estudiaría la carrera de ingeniero de Caminos, Canales y Puertos entre 1872 y 1876, graduándose el cuarto de una promoción de siete de la que fue número uno su primo hermano Luis Torres-Vildósola. El primer año de prácticas lo pasó trabajando como ayudante en el tramo que pasaba por Niebla del ferrocarril Sevilla-Huelva, pero lo dejó a los pocos meses renunciando a entrar en el Cuerpo de Ingenieros de Caminos (Gómez Hidalgo, 1922). Viajó por Europa y colaboró con su padre, Director General de los Ferrocarriles del Noroeste, hasta que, en torno a 1880, decidió retirarse a su valle de Iguña natal “a pensar en sus cosas” ... y trascender de las vías de ferrocarril a los caminos aéreos por cable.

2. LOS CAMINOS AÉREOS: EL TRANSBORDADOR

Desde la Antigüedad se tiene constancia del uso de fibras vegetales para el transporte de bultos, sobrevolando dificultades orográficas, en China, Japón y la India. En Europa, sin embargo, la primera descripción de un funicular para materiales conocida se encuentra en un manuscrito de Johann Hartlieb de 1411 conservado en la Biblioteca de Viena. Por otro lado, la primera referencia fidedigna de un transbordador para personas sería el instalado en Venecia por Fausto Verantino en 1617 (González Redondo, 1994).

Hay evidencias de la construcción de una vía aérea para el transporte de tierras en Dantzig por parte de Adam Wybe en 1644 y también se conservan los croquis del primer sistema monocable continuo para el transporte de piedras dibujados por Jacob Leopold en 1714. Todo ello, condicionado por la utilización de cuerdas y la falta de estudios ingenieriles que garantizasen un uso seguro para personas, constituiría la prehistoria de los teleféricos.

La protohistoria de los teleféricos empezaría en 1834, con la invención del cable de acero por parte del ingeniero de minas alemán Wilhelm Albert, y su posterior perfeccionamiento, fabricación y comercialización por parte de empresas como la también alemana Felten & Guillaume.

La mayor resistencia del acero frente a la cuerda permitiría la generalización del transporte por cable en explotaciones mineras y forestales. Para ello se adaptarían elementos ya existentes, como las poleas y los contrapesos, a las innovaciones de inventores como Franz Fritz von Dücker y, sobre todo, Adolf Bleichert, a quien se debe la introducción del “sistema alemán”, bicable, en el que se independizaban los cables soporte y tractor, frente al “sistema inglés”, monocable, propuesto por Charles Hodgson.

Sin que las autoridades pudieran certificar aún la seguridad de las instalaciones, y antes de que Torres Quevedo iniciara en 1885 los ensayos de sus transbordadores en el valle de Iguña y patentara su sistema, se utilizaron ocasionalmente diferentes instalaciones mineras para transportar trabajadores. También se utilizaron primitivos sistemas de “teleféricos” para bajar técnicos a inspeccionar las turbinas en las cataratas del Rin en Shaffhausen, en 1866, o para intentar abrir breve e infructuosamente un primer servicio para pasajeros en Gjesbach (también en Suiza) en 1879 (Schmoll, 1999).

Con posterioridad a los ensayos iguñeses, pero sin la consideración aún tampoco de verdaderos “teleféricos”, funcionaron diversas instalaciones temporales, a modo de atracciones de feria, en las Exposiciones de Milán (1894), Viena (1898) y Turín (1898). Y es que, para que empiece de verdad la historia de los teleféricos, habría que esperar a la contribución de D. Leonardo.

En efecto, terminada su breve etapa de algo menos de un año (1876-1877) como ingeniero del ferrocarril Sevilla-Huelva, emprende un viaje de estudios por Europa para conocer las últimas novedades científicas. A su vuelta, establece su estudio de ingeniería en su casa natal en Santa Cruz de Iguña y realiza las primeras gestiones con la compañía alemana Felten & Guillaume con vistas a comprar los cables de acero necesarios para ensayar el que sería su primer invento: el *transbordador*.

Tras casarse con Luz Polanco Navarro en 1885, traslada su estudio de Santa Cruz a la casona de la familia de su mujer en Portolín (también en el municipio de Molledo), desde donde hará los primeros ensayos y preparará su primera patente. En los esquemas que la acompañarían (figura 2) pueden verse los perfiles de los cables soporte y tractor (representadas como figuras 1 y 2) del *transbordador de Portolín*, junto a la casa de los Polanco (que se conocerá como casa de doña Jimena, la hermana de doña Luz), con una luz de 200 m y una diferencia de altura de 40 m, pasando por encima del camino a Santián. En la patente también aparece el perfil (figura 3) del *transbordador sobre el Río*

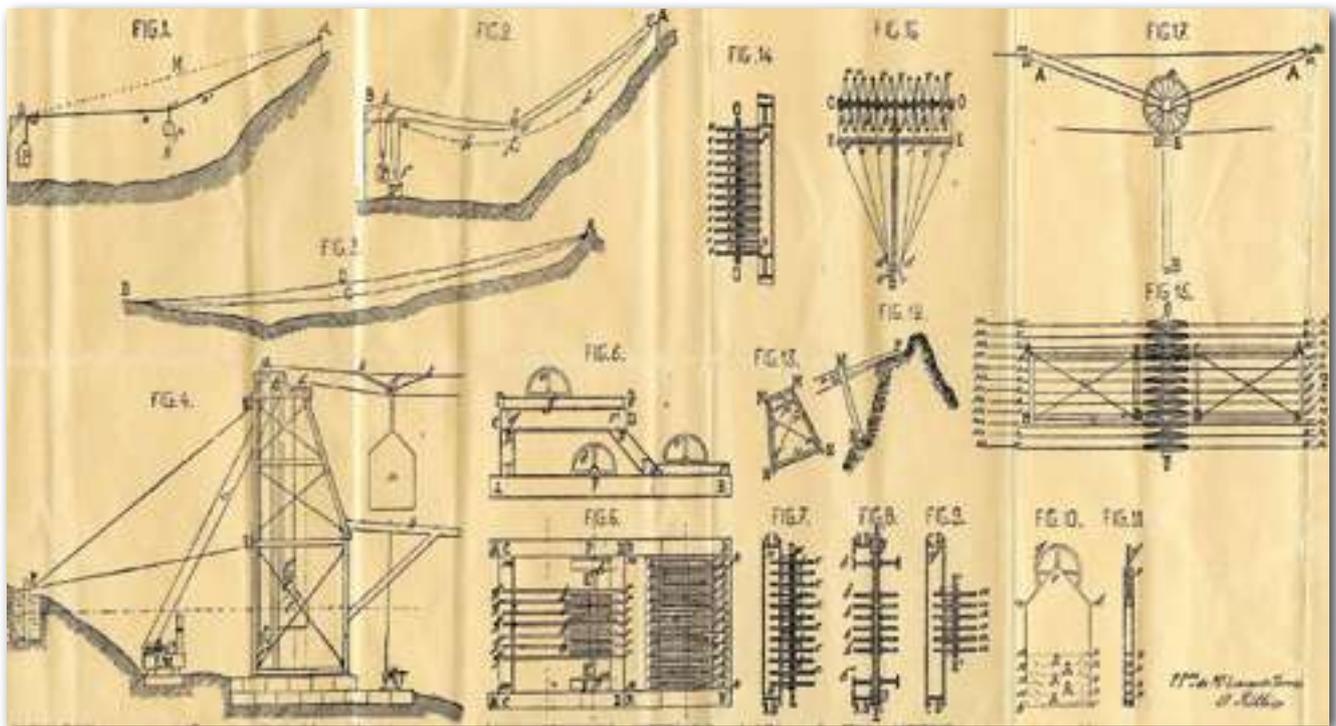


Figura 2. Esquemas de la patente del transbordador, 1887.

León, con una luz de 2032 m y un desnivel de 283 m, entre el Cueto de Pando, en las proximidades de San Martín de Quevedo, y Los Picones, en la carretera que sube desde Bárcena de Pie de Concha al embalse de Alsa.

El título de la patente describe perfectamente lo que se plantea en la invención: “Un sistema de camino funicular aéreo de alambres múltiples”. Por un lado, se describe el funcionamiento de cada uno de los cables soporte (un número par, de 6 a 12 en la patente) que, fijados en una de las estaciones, pasan por una polea en la otra hasta terminar en un contrapeso que determina la tensión que debe soportar cada uno de ellos, calculada de antemano por el constructor. En el improbable caso de rotura de alguno de estos cables soporte, simplemente aumentaría la flecha de los restantes, pero no la tensión que tendrían que soportar. Por otro lado, el cable tractor (motorizado) pasa también por un sistema doble de poleas y contrapesos que fijan su tensión y garantizan su resistencia.

Todos sus biógrafos recuerdan cómo, al terminar la carrera, Torres Quevedo utilizó la herencia recibida de la familia Barrenechea para viajar por Europa (Francia, Suiza, Alemania, etc.), donde tomaría conciencia de la necesidad de resolver el problema del transporte por cable de personas garantizando su seguridad. Y, de hecho, nuestro inventor entendió que el proyecto de *transbordador*, concebido, construido y ensayado en el valle de Iguña, y con el que quedaría resuelto el problema del transporte por cable, podía tener una dimensión internacional.

Así, dos semanas antes de que solicitara la patente española desde Portolín (el 17 de septiembre de 1887), los agentes de patentes habían solicitado en su nombre la patente (redactada en alemán) en Austria (el 6 de septiembre) y en Alemania (9 de septiembre), y un mes más tarde harían lo propio (en inglés) en los EE. UU. (el 12 de octubre). Transcurridos apenas seis meses, solicitó también la patente (redactada en francés) en Francia (el 14 de marzo) y en el Reino de Italia (17 de marzo), habiéndola solicitado

antes (en inglés) en el Reino Unido (el 16 de marzo) (González Redondo, 2009).

Aunque no consta que el inventor montañés iniciara las gestiones para construir su primer *transbordador* en ninguno de esos países, sin embargo, sí está documentado que en 1888 presentó un detallado proyecto para construir, en las proximidades del lago Lucerna (Suiza), el que podía haber sido el primer teleférico abierto al público del mundo. Debía unir los hoteles situados en la cima del Monte Pilatus (el Bellevue o el Pilatus), a los que se accedía por un tren de cremallera inaugurado el año anterior, con el nuevo hotel construido junto a la capilla del Klimsenhorn, situado en una colina unos trescientos metros más abajo del Pilatus, y al que solamente podía accederse tras una caminata de varias horas ascendiendo desde Kriens (González Fernández y Redondo Alvarado, 2015).

Concedida en Suiza la patente (1889), obtenidos unos primeros permisos, e iniciadas las obras, ingenieros, empresarios y autoridades cantonales orquestaron una campaña en contra del proyecto, incluyendo caricaturas y artículos despreciando el proyecto en la prensa, haciendo que la iniciativa terminara constituyendo en 1896 el que Francisco González de Posada (1992) bautizó como el [transitorio] “fracaso suizo” de D. Leonardo. El mundo tendría que esperar a 1907 para disponer del primer teleférico para personas. Y sería nuestro insigne inventor el que lo construyera.

En efecto, el éxito en las pruebas del *telekino* (el primer mando a distancia completo de la historia, inventado también por D. Leonardo) teledirigiendo el bote *Vizcaya* en el Abra de Bilbao, en septiembre de 1906, animó a un grupo de empresarios (prioritariamente, bilbaínos) a crear la *Sociedad de Estudios y Obras de Ingeniería*, con el objeto estatutario de “estudiar y experimentar los proyectos o inventos que le sean presentados por D. Leonardo Torres Quevedo” (Alonso y Juaristi, 1993).

La iniciativa principal sería la construcción del primer teleférico para personas del mundo, transcurridos 20 años desde los ensayos igüeses, eligiendo para su ubicación el monte Ulía de San Sebastián. Con este objeto, además, el inventor prepararía una nueva patente actualizando su sistema de cables soporte múltiples de 1887 y solicitando privilegio de invención, en diciembre de 1907, por el nuevo tipo concebido de barquilla “en abanico” con el que se alcanzaba prácticamente el ideal de resistencia estructural (figura 3).

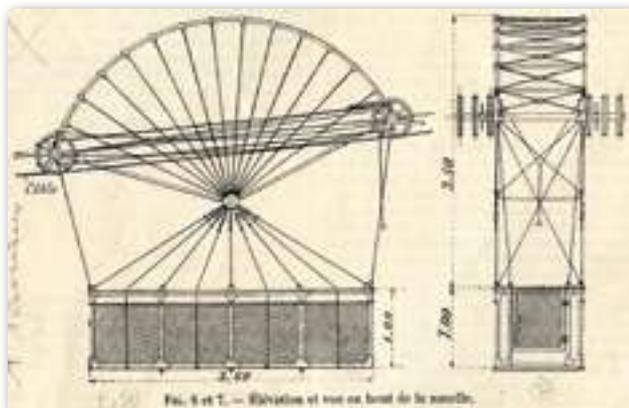


Figura 3. Barquilla del transbordador del monte Ulía.

El transbordador del monte Ulía tenía un recorrido de 280 metros, salvando un desnivel de 28 metros entre la estación inferior, próxima a los andenes de llegada del tren eléctrico, y la estación superior, situada en las inmediaciones del Tiro de pichón. La barquilla, en la que podían viajar hasta 18 personas, se desplazaba sobre seis cables soporte, tres a cada lado, con las poleas y los respectivos contrapesos para cada uno de ellos situados en la estación superior, mientras el cable tractor era accionado desde un motor eléctrico situado en la estación inferior (Espitallier, 1909).

La ceremonia de inauguración tuvo lugar el 30 de septiembre de 1907 bajo una intensa lluvia, abriéndose al público al día siguiente con tanta aceptación que durante sus primeros seis años de funcionamiento viajarían en él más de 60.000 pasajeros. El éxito del transbordador del monte Ulía (figura 4) animó a Torres Quevedo a estudiar otros proyectos en Suiza (por ejemplo, entre Caux y Les Avants, en el Lago Lemán), que no se materializarían. Por otro lado, la solución del problema del transporte por cable de personas con seguridad, demostrada por D. Leonardo en San Sebastián en 1907, haría que otros ingenieros consiguieran permisos de las autoridades para poner en marcha los primeros teleféricos en Austria (el “Kohlerer”, inaugurado el 29 de junio de 1908), Suiza (“Wetterhorn”, 27 de julio de 1908), Italia (“San Vigilio-Vigilhoch”, 31 de agosto de 1912), Brasil (“Pan de Azúcar”, 27 de octubre de 1912), Francia (“Col du Midi”, 16 de julio de 1924), etc. (Schmoll, 1999).

El inicio de la construcción del funicular que iba a dar acceso al nuevo parque de atracciones concebido en el Monte Igüeldo, al otro extremo de la bahía de La Concha, precipitaría la clausura del tren eléctrico, y, consecuentemente, el fin de Ulía como destino preferente para el ocio donostiarra. Así, en 1911, mientras disfrutaba aún del éxito del transbordador del monte Ulía, pero se avizoraba el previsible cierre de la instalación, Torres Quevedo viajó a



Figura 4. Postal ilustrando la ascensión del transbordador del monte Ulía.

Canadá, en compañía de Valentín Gorbeña, para estudiar la posibilidad de construir un segundo transbordador, ahora sobre el río Niágara (Aramberri y González Redondo, 2011).

En 1913 se concedieron los permisos y en 1914 se registró en Canadá la empresa española *The Niagara Spanish Aerocar Company Limited*. Con capital español (prácticamente los mismos capitalistas bilbaínos que en San Sebastián), proyecto español (de D. Leonardo), ingeniero constructor español (Gonzalo, su hijo), administrador español (Antonio Balzola) y futura explotación comercial española, la construcción del Aerocar comenzaría en 1915 y la inauguración en pruebas tendría lugar el 15 de febrero de 1916 (Person, 1916; Juaristi y Alonso, 1993; González Redondo, 2009).



Figura 5. El transbordador del Niágara en la actualidad.

Con un recorrido de 550 metros entre Colt's Point y Thompson's point, ambos en la orilla canadiense, a 76 metros de altura sobre el Whirlpool (remolino) que forma el río, sobrevolando aguas territoriales de los EE. UU., el *transbordador del Niágara* se convertiría en el primer teleférico para personas de toda Norteamérica. Se inauguró oficialmente el 8 de agosto de 1916, comenzando una explotación comercial muy complicada por los efectos de la I Guerra Mundial, en la que estaba participando Canadá y en la que entrarían los EE. UU. al año siguiente.

Tras la inauguración del *transbordador del Niágara*, nuestro ingeniero recibió propuestas para estudiar nuevos teleféricos de su sistema de Casa Blanca a La Habana (Cuba), del Parque del Pintor Rosales a la Casa de Campo (Madrid), para subir a la Alhambra desde el Albaicín (Granada), para unir el Monte Iguelo con el Monte Urgull (San Sebastián), sobre el río Ebro (Zaragoza), etc., pero ninguno llegaría a concretarse (Aramberri y González Redondo, 2011).

En Niágara, aunque se superaron los problemas iniciales (y los ocasionados por la crisis de 1929), los efectos de la II Guerra Mundial hicieron que la sociedad española fuera subcontratando la atracción turística a compañías canadienses hasta que, en 1961, se vendió al empresario A. Blake Robertson, para ser adquirida en 1968 por *The Niagara Parks Commission*, entidad pública del estado de Ontario que explota el *transbordador* desde entonces.

En 1984 la *Commission* sustituyó la tienda por una nueva (la que sigue existiendo actualmente) en la que se adquieren los billetes, se venden los suvenires, etc.; también programó la revisión periódica de cables y maquinaria; adaptó la barquilla a las nuevas normas de seguridad ... y decidió pintarla con los colores rojo y amarillo de la bandera de España que sigue llevando hoy, transcurridos más de cien años desde su inauguración, durante los cuales no ha tenido ningún accidente (figura 5).

La estructura en abanico utilizada tanto en el *transbordador del monte Ulía* como en el *transbordador del Niágara*, que había patentado también en 1907 para reactivar la primera patente de 1887, inspiraría años después la cubierta del Museo de Historia de Hamburgo, por la que su autor, el ingeniero alemán Jörg Schlaich, obtendría en 1990 la *IStructE Gold Medal* de la *Institution of Structural Engineers* (González Redondo y Cubría Piris, 2019).

Por otra parte, como muy bien había adelantado Torres Quevedo, a lo largo del siglo XX los teleféricos se generalizarían por todo el mundo (especialmente en Austria y Suiza) como un sistema seguro para el transporte de personas. En general, tendrían cabinas cerradas y reducirían a uno solo el número de cables soporte, aunque, en la actualidad, están teniendo mucho éxito sistemas "cabrio", con barquillas-terrazas abiertas (como las de los *transbordadores* de Ulía y Niágara). Y, para dar más estabilidad, los cables soporte aparecen duplicados (incluso en los laterales de las barquillas, como en los torresquevedianos) en muchas de las nuevas instalaciones, lo que permite su utilización muchos más días al año, incluso con vientos moderados.

En España, aparte de numerosos telesillas en las estaciones de esquí y telecabinas como las de la Casa de Campo (Madrid), Benalmádena (Málaga), Sierra Nevada (Granada), Montjuic (Barcelona) o Cabárceno (Cantabria), se pueden realizar viajes en teleférico en el Monasterio de

Montserrat y el Puerto (Barcelona), Fuente Dé (Cantabria), El Teide (Tenerife), Sallente (Lérida) y Gibraltar.

3. INGENIERÍA MATEMÁTICA: LAS MÁQUINAS ALGÉBRICAS

En 1889, mientras emprendía el proyecto del *Transbordador del Monte Pilatus* en Lucerna, Torres Quevedo centra su atención en la mecanización del cálculo mediante *máquinas algébricas*. El problema que se planteaba resolver quedaba precisado en su "Noticia de algunas máquinas calculadoras" (1893):

"Cualquier aparato que permite provocar a voluntad un fenómeno cuya ley está expresada en una fórmula algébrica, puede teóricamente servir para obtener valores simultáneos de todas las variables contenidas en esta fórmula. Pero claro es que esta verdad teórica no tiene, en general, ningún valor práctico. No es fácil producir un fenómeno cuya ley sea la fórmula que interesa calcular, ni medir con exactitud suficiente sus elementos, ni hacer que estos varíen entre límites bastante amplios, ni ...".

En este nuevo ámbito establecerá la metodología que caracterizará toda su obra. Por un lado, la concepción, redacción y publicación del marco teórico sistemático para las nuevas máquinas de su invención, que se plasmaría en su *Memoria sobre las máquinas algébricas* (1893-1895) y sometería al juicio de la Academia de Ciencias de París y de la Asociación Francesa para el Progreso de las Ciencias en su Congreso de Burdeos. Por otro, la construcción efectiva de unos primeros modelos de demostración que materializasen sus consideraciones teóricas.

Las máquinas de calcular pueden clasificarse en: *máquinas analógicas*, si se utilizan variables continuas, y *máquinas digitales*, si se utilizan variables discretas. Las *calculadoras* o *computadoras analógicas* son máquinas de cálculo en las que los números se representan mediante cantidades de una(s) determinada(s) magnitud(es) física(s). Estas magnitudes físicas pueden ser de muy diferente naturaleza: longitudes, desplazamientos, rotaciones de ejes...

En las computadoras de este tipo, unas ecuaciones matemáticas (*algébricas*) se transforman en un proceso operacional de cantidades físicas que resuelve un problema físico análogo (o analógico), cuya solución numérica –la medida de la cantidad de otra magnitud (o de la única puesta en juego)- es la solución de la ecuación matemática. En resumen, un problema matemático se resuelve mediante un modelo físico (González de Posada, 1993).

Presentadas sus concepciones teóricas y los primeros modelos de demostración en París y Burdeos (figura 6), Torres Quevedo dedica los años 1896 a 1900 a estudiar, perfeccionar, concebir detalladamente sus máquinas y construir alguna. Y, en febrero de 1900, envía a la Academia de Ciencias de París la memoria *Machines à calculer*, en la que, en síntesis, el inventor español plantea la cuestión general "¿Podrá construirse una fórmula cualquiera?".

El "Rapport" preparado por la *Académie* concluiría reconociendo que D. Leonardo había dado "una solución

teórica, general y completa, del problema de la construcción de relaciones algebraicas y trascendentes mediante máquinas”. Reconocían, además, que había “construido, efectivamente, máquinas de manera cómoda para la resolución de algunos tipos de ecuaciones algebraicas que se presentan frecuentemente en las aplicaciones” (Deprez, Poincaré y Appell, 1900, p. 3).



Figura 6. Máquina algébrica para resolver ecuaciones de segundo grado.

Tres órganos esenciales (concebidos teóricamente y contruidos de manera práctica) componen las máquinas algébricas: el generador de cantidades o *aritmóforo*; el generador de monomios o *tren epicicloidal*; y el generador de sumas o *husillo sin fin*, el órgano fundamental, que permite calcular el logaritmo de la suma como suma de logaritmos resolviendo el problema de su representación mecánica (Hernando González, 1996; Gómez Jáuregui *et al.*, 2022).

En la cima del reconocimiento internacional al comenzar el siglo XX, la etapa de dedicación intelectual de Torres Quevedo a las máquinas analógicas, de hecho, concluiría con su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, del 19 de mayo de 1901. Supuso el colofón de su pensamiento científico en el ámbito de las *máquinas algébricas* y se publicaría en 1902 en Lovaina (Bélgica), traducido al francés, en la *Revue des Questions Scientifiques*.

La *máquina algébrica* (de tecnología mecánica) efectiva para resolver ecuaciones de grado ocho, cuya solución teórica presentó en estos trabajos de 1900-1901, no se pudo



Figura 7. Máquina algébrica para resolver ecuaciones de grado ocho.

realizar entonces. Según su hijo y colaborador Gonzalo Torres-Quevedo, comenzó a construirse en 1910 y se concluyó en torno a 1914 (figura 7), cuando el sabio español había pasado a desarrollar su *Automática*, con máquinas de demostración (*ajedrecista*, *aritmómetro*) contruidas con una nueva tecnología electro-mecánica.

4. AERONÁUTICA: LOS DIRIGIBLES AUTORRÍGIDOS

El 21 de noviembre de 1783 François Pilatre de Rozier y el Marqués d'Arlandes efectuaron en París el primer vuelo tripulado de la historia en un globo de aire caliente contruido por los hermanos Montgolfier. Por otro lado, el 1 de diciembre de ese mismo año, Jacques Charles y Marie-Noël Robert realizaron la primera ascensión en un globo lleno de hidrógeno. El 27 de diciembre Antoine de Lavoisier adelantaba en la *Académie des Sciences* el siguiente paso que debía darse para resolver el problema de la navegación aérea: pasar del globo al dirigible (González de Posada y González Redondo, 2007).

A lo largo del siglo XIX los globos evolucionaron hacia las formas ahusadas actuales y se aplicaron los primeros motores, destacando el de vapor de Henri Giffard de 1852 y el eléctrico de Gaston Tissandier de 1883. Pero la Aerostación dirigida nacería cuando el dirigible con motor eléctrico “La France” de Charles Renard y Arthur Krebs completara en 1884 una trayectoria cerrada, con retorno al punto de partida.

Mientras en España se creaba en 1896 el *Servicio de Aerostación Militar* en Guadalajara, centrado en el ensayo y uso militar de los globos aerostáticos, Alberto Santos Dumont continuaba en París la senda abierta por los pioneros militares franceses experimentando con dirigibles flexibles. Para que no se doblasen por el peso del motor, los pasajeros, etc., estos modelos debían tener barquillas casi tan largas como la envuelta y cuerdas de suspensión a lo largo de toda ella. En suma, eran desinflables y elásticos, pero también inestables de forma, y, por tanto, en vuelo.

Otros inventores, como Ferdinand von Zeppelin, propusieron dirigibles rígidos, con una estructura cilíndrica de aluminio (o madera) cubierta por una lona, encerrando en su interior varias celdas independientes conteniendo el hidrógeno. Resolvían el problema de la estabilidad, pero ni se podían desinflar ni su estructura rígida admitía impactos.

Reuniendo elementos de uno y otro sistema, Henri Julliot diseñó en Francia, para los hermanos Lebaudy, dirigibles semirrígidos, con una quilla metálica en la parte inferior de la envuelta, de la que colgaría la barquilla, pero no solucionaba los defectos de los sistemas flexible y rígido.

Mientras en el Reino Unido, Rusia, Austria o EE. UU. se ensayaban también diferentes modelos de dirigibles flexibles, sucesivos accidentes, como los que terminaron con las vidas de los inventores Augusto Severo y Ottokar Bradsky, demostraban en 1902 que el problema de la navegación aérea seguía sin estar resuelto.

Alcanzado el reconocimiento internacional con sus *máquinas algébricas*, al comenzar el siglo XX D. Leonardo se embarca en la solución del problema. Sus estudios se concretarían, en mayo de 1902, en la patente francesa “Perfectionnements aux aérostats dirigeables” (figura 8) que, acompañada de una Nota complementaria, presenta ante las Academias de París y Madrid.

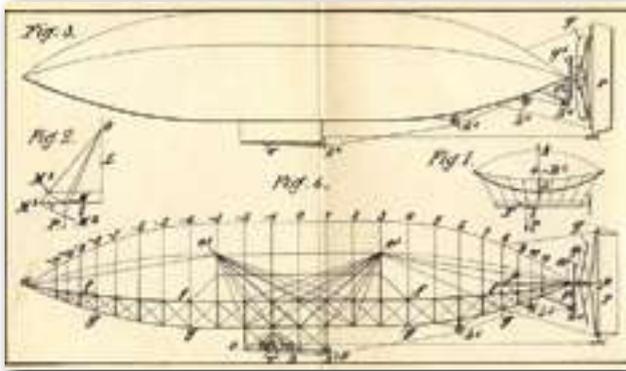


Figura 8. Esquemas de la patente del dirigible de 1902.

Reuniendo las ventajas de los sistemas rígido, flexible y semirrígido, eliminaba sus principales defectos proponiendo un dirigible con una envuelta trilobulada con tres cables de proa a popa unidos a ella en las intersecciones de los lóbulos. En su interior, una viga-quilla formada por triángulos de cuerda, cortinas de lona, algunos cables metálicos y dos largueros se autorrigidizaría por la presión del gas. Una vez inflado, funcionaría como si fuera rígido, distribuyéndose los pesos por la viga (González Redondo, 2011).

Adelantándose a los avisos de las autoridades británicas, resolvía el problema del control remoto presentando en ese año 1902 el *telekino* para proteger las vidas humanas en los ensayos con dirigibles. Y, en julio de 1906, solicitaría la patente definitiva por “Un nuevo sistema de globos fusiformes deformables”, el sistema *autorrigido*, en el que se eliminaban los elementos metálicos de la viga interior, formada ahora ya únicamente por triángulos de cuerda. Pero D. Leonardo aportó una solución completa al problema de la navegación aérea. En primer lugar, además de inventar el mando a distancia (adelantándose al concepto “dron”), en 1911 también patentó el “Poste de amarre” para la acampada de los dirigibles al aire libre (González Redondo y Campin, 2015).

Por otro lado, entendió que Náutica y Aeronáutica podían operar juntas mediante la instalación del “Poste de amarre” a bordo del “Buque campamento” (porta-dirigibles), patentado en 1913 (González Redondo, 2017). Ese mismo año propuso al Ministerio de Fomento un “Cobertizo inflable” que, aunque no llegó a construirse ni ensayarse, convierte a Torres Quevedo en pionero de la Arquitectura inflable. Y en 1914 patentaría un nuevo sistema de “Dirigible indeformable” con viga interior metálica de sección triangular. Finalmente, en 1919, presentaría el proyecto de dirigible trasatlántico *Hispania*, también semirrígido, pero que tampoco llegaría a concretarse.

Ante el éxito cosechado en la *Académie des Sciences* de París en 1902 por el proyecto del dirigible y en 1903 con el primer modelo del *telekino*, en enero de 1904 el Gobierno español creó el *Centro de Ensayos de Aeronáutica* y lo puso bajo la dirección de Leonardo Torres Quevedo, quien fijó la sede en el antiguo frontón Beti-Jai de Madrid (González Redondo y Cubría Piris, 2019).

A partir de marzo de 1905 empezaría a colaborar Alfredo Kindelán Duany como Auxiliar Técnico del *Centro*. Instalaría una cubierta de lona para el frontón y comenzaría la construcción del primer dirigible español: despiezando y cosiendo las telas que debían conformar la envuelta de 640 m³ y preparando la viga funicular (de cuerdas) interior

que debía aportar la *autorrigidez* al globo (González Redondo, 2009).

Terminada la construcción, el 26 de junio se procedería a su inflado en el Gasómetro de Madrid y el 11 de julio se solicitaría la nueva patente. En julio de 1906 Kindelán procedió al traslado del globo al Polígono del *Servicio de Aerostación Militar* en Guadalajara, y en septiembre se hicieron nuevas pruebas de inflado, ahora con hidrógeno. Recibidos los motores y las hélices, y construida la barquilla, durante el 12 de septiembre el *Torres Quevedo 1* volaría con los motores en marcha, guiado desde tierra con las cuerdas de maniobra. Pero al día siguiente la porosidad de la envuelta obligaría a suspender los ensayos y a decidir su sustitución por una nueva.

La construcción de la nueva envuelta, más impermeable, que debía acometerse a propuesta de Kindelán a las órdenes de D. Leonardo, aconsejó el aumento del volumen del nuevo dirigible *Torres Quevedo 2* hasta los 980 m³. Finalmente, entre el 8 y el 11 de julio de 1908 tendrían lugar las exitosas pruebas con el dirigible, en el que viajarían D. Leonardo, Kindelán, Pedro Vives y varios oficiales del *Servicio de Aerostación Militar* (figura 9). Sin embargo, al publicarse la Real Orden del Ministerio de Fomento bautizando al dirigible con el nombre de su inventor, Alfredo Kindelán presentó su dimisión como Auxiliar, por lo que el *Centro* se vería obligado a abandonar Guadalajara (González de Posada y González Redondo, 2007). Constatada la imposibilidad de continuar los ensayos en Madrid, Torres Quevedo dirigiría la mirada hacia el lugar donde había comenzado a resolver el problema de la navegación aérea: París.



Figura 9. Pruebas del *Torres Quevedo 2* en Guadalajara en 1908.

En efecto, tras el desencuentro con los militares que le obligó a salir de Guadalajara, en 1909 Torres Quevedo retomó el ofrecimiento que ya había recibido de Edouard Surcouf en 1901, y trasladó el *Torres Quevedo n.º 2* a un hangar de la casa *Astra* en Sartrouville (París) con la colaboración del nuevo Auxiliar del *Centro*, el capitán de ingenieros José M^a Samaniego. Realizadas las pruebas en octubre de 1909, en febrero de 1910 D. Leonardo firmó con la casa *Astra* el contrato de cesión de las patentes francesa e inglesa del sistema *autorrigido*. A cambio, recibiría un canon de 3 francos por metro cúbico de dirigible construido y el compromiso de fabricar una primera unidad a cargo de la empresa francesa: el *Astra-Torres n.º 1* de 1.600 m³.

El éxito de este primer dirigible de *Astra* abriría el camino a la comercialización del sistema. Así, constatado el escaso desarrollo de los dirigibles en el Reino Unido, el Almirantazgo británico encargó a la casa *Astra* la construcción del *Astra-Torres XIV* de 8.000 m³, que batiría el record mundial de velocidad (83,2 km/h con viento en contra) en los ensayos de recepción efectuados en septiembre de 1913. Un año más tarde, comprobada la eficacia del *Astra-Torres XIV* (rebautizado *HMA* - "His Majesty's Airship" - no.3) durante los primeros meses de la I Guerra Mundial, el Almirantazgo adquiriría a través de *Airships Ltd*, la filial británica de *Astra*, el *Astra-Torres XVI* (*HMA* no.16), *Astra-Torres XVII* (*HMA* no.10) y *Astra-Torres XIX* (*HMA* no.8). Ante el éxito del *Astra-Torres n° 1* en Francia y del *Astra-Torres XIV* en el Reino Unido, el Ejército Francés encargó el *Astra-Torres XV-Pilatre de Rozier* de 23.000 m³ (tan grande como los zeppelines de la época), que se transformaría en 1916 en el *Pilatre de Rozier II*, gemelo del *Alsace* de 14.000 m³, que se había entregado en 1915 (González Redondo, 2009). Tanto uno como otro, utilizados durante la I Guerra Mundial en tareas de reconocimiento y bombardeo en el frente, serían pronto derribados, transfiriéndose el nuevo *La Flandre* de 16.000 m³ a la Marina para realizar labores de vigilancia de costas y lucha antisubmarina, en las que los dirigibles demostrarían ser mucho más útiles y menos vulnerables.

En 1916 el Almirantazgo británico decidió comenzar la fabricación de dirigibles del sistema Torres Quevedo al margen de las casas *Astra* y *Airships Ltd.*, y sin pagar royalties a D. Leonardo. Construyeron más de sesenta dirigibles, de tres series sucesivas, para el Royal Naval Air Service: 27 *Coastal* de 4.810 m³, 10 *Coastal Star* de 5.960 m³ y 18 *North Sea* de 10.190 m³. Se vendieron además 4 *Coastal* a Rusia, otro a Francia y un *North Sea* a los EE. UU. Todos ellos se utilizaron en tareas de escolta de convoyes, vigilancia costera, detección de minas y lucha antisubmarina desde bases que controlaban la costa suroccidental de Inglaterra

(Mullion), el Canal de la Mancha (Kingsnorth, Capel, Polegate, Pulham, Howden), el Mar de Irlanda (Pembroke, Anglesey) y el Mar del Norte (Longside, East Fortune).

Durante la I Guerra Mundial la casa *Astra* fabricaría para la Marina Francesa los *AT-1* a *AT-4* de 6.500 m³, los *AT-5* a *AT-9* de 7.600 m³, los *AT-10* a *AT-17* de 8.300 m³ (figura 10) y el *AT-18* de 10.700 m³. Operarían en tareas de escolta y lucha antisubmarina desde bases en el Golfo de Vizcaya (Rochefort-sur-mer), Bretaña (Brest-Guivapas, Montebourg), Canal de la Mancha (Le Havre, Boulogne-Marquise), Marsella (Aubagne, Cuers-Pierrefeu), Argelia (Orán la Sénia, Argel Baraki) y Túnez (Bizerta Sidi Ahmed). También debe dejarse constancia de que en 1918 se transfirieron a la US Navy los *AT-1*, *AT-13*, y *AT-18*, que operarían desde Paimboueuf (Bretaña) (González Redondo, 2009).

Terminada la contienda, en 1920 *Astra* entregaría el *AT-19* a la Marina Francesa y, en 1922, el último dirigible por el que Torres Quevedo cobraría royalties, el *AT-47* (*Astra* quiso destacar que el n° 20 de los *AT* llevaba la envuelta n° 47) para la Marina del Japón, ambos de 10.700 m³. Finalmente, en 1925 *Astra* fabricaría el *AT-24* (al acabar la guerra, los *AT-20* a *AT-23*, no llegarían a entregarse) de 12.500 m³ para la Marina Francesa y se intentaría poner en marcha una línea comercial entre Marsella y Argel. Durante los años siguientes, y hasta 1936, se irían renovando las envueltas de los siete antiguos *AT* aún operativos, rebautizándolos *E-1* a *E-7*.

Entre 1931 y 1937, mientras la casa *Astra* proporcionaba las últimas envueltas de repuesto para los antiguos *Astra-Torres*, la casa *Zodiac* fabricaba para la Marina Francesa las "vedettes" (dirigibles "pequeños") *V-11*, de 3.400 m³, y *V-12* de 4.020 m³. En 1977 *Zodiac* empezó el desarrollo, para el Servicio Meteorológico Francés, del *Dino-saure* de 3.350 m³, un catamarán aéreo teledirigido con dos envueltas autorrigidas doblemente trilobuladas del sistema Torres Quevedo, del que sólo se llegó a ensayar en 1978 un

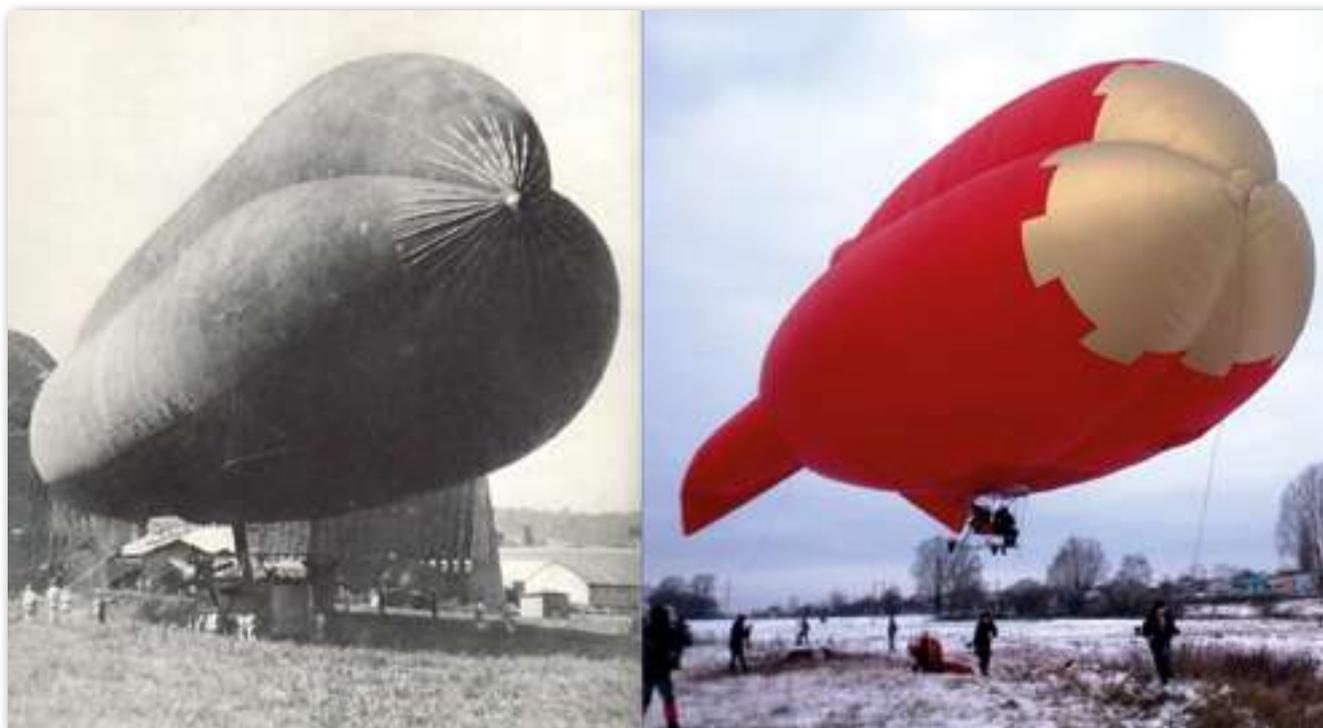


Figura 10. Dirigible francés *AT-16* en 1918 y dirigible ruso *DZ-E1* en 2018.

modelo de 47 m³. El sistema híbrido del *Dinosaure* une suspensión aerodinámica a la suspensión aerostática propia de cualquier dirigible. Sirvió de antecedente para dos proyectos mucho más ambiciosos de dirigibles híbridos trilobulados, el de la empresa norteamericana *Lockheed Martin* y su *P-791* de unos 8.000 m³ (ensayado en 2006), y el de los británicos *Hybrid Air Vehicles* y el *HAV 304/Airlander 10* de 38.000 m³ (construido y ensayado entre 2012 y 2017). Este último ha sido elegido por *Air Nostrum* para líneas comerciales de pasajeros con dirigibles en España (González Redondo, 2022).

El sistema de suspensión interior mediante cuerdas y cortinas desde la envuelta, patentado en 1902 y perfeccionado en 1906, fue simplificado y adaptado a los nuevos materiales por *Goodyear* en 1931. Se ha ido adoptando a lo largo del siglo XX en todos los dirigibles no-rígidos del mundo. Por otra parte, el “Poste de amarre”, patentado por D. Leonardo en 1911, sigue siendo el sistema estándar hoy, bien entrado el siglo XXI, para el amarre de los dirigibles al aire libre (González Redondo y Camplin, 2015).

En 1997 el conglomerado de empresas *Zeppelin* radicadas en Friedrichshafen (Alemania) empezaron la construcción de los *Zeppelin NT*. Utilizan el apellido del Conde, pero con un nuevo sistema semirígido, caracterizado por el uso de una viga rígida de sección triangular. Se trata de un diseño próximo a las soluciones de Torres Quevedo y totalmente distinto de las estructuras interiores de los antiguos zeppelines. Por su parte, en 2012, redescubriendo las potencialidades de las envueltas polilobuladas para la suspensión de la barquilla, la casa francesa *Voliris* construyó el dirigible tetralobulado *V901C*, mientras desde 2016 está desarrollando el dirigible pentalobulado *V902RC*.

Finalmente, en 2013, siguiendo los diseños de D. Leonardo, la *Sociedad Aeronáutica Rusa* y la empresa checa *Balony Kubicek* construyeron el dirigible trilobulado autorrigido *RFR-1* e hicieron unos primeros ensayos en Ucrania junto con la *Sociedad Aeronáutica de Kiev*. Trasladado el dirigible a Rusia en 1914 y rebautizado como *DZ-E1* (figura 10), a partir de 2018 ha continuado operando desde su nueva base en Moscú (González Redondo, 2022).

5. DEL TELEKINO A LA AUTOMÁTICA

Si el proyecto de dirigible había merecido, en mayo de 1902, el informe favorable de la *Académie des Sciences* de París, las revistas británicas *Nature*, *Aeronautical Journal* y *Literary Digest* desaconsejaban los ensayos tripulados tras el fallecimiento de varios inventores en accidentes ocurridos probando sus dirigibles. Motivado por la sugerencia, el 10 de diciembre de ese mismo año de 1902 Torres Quevedo presentó en Francia la solicitud de patente por “*Système dit Télékine pour commander à distance un mouvement mécanique*”, el primer sistema efectivo para el control remoto de sus dirigibles sin arriesgar las vidas de pilotos humanos. Aprobada la patente francesa en marzo de 1903, en junio pedía el privilegio de invención en España, y en diciembre hacía lo propio en el Reino Unido y los EE. UU., solicitando en Francia, además, mejoras mediante una primera adición. Completados los diseños con el “contacto retardado”, por primera vez se podían “transmitir mandatos en cualquier número y para cualquier cambio de mecanismos o de efectos o de sentidos del movimiento” (Arrillaga, 1916)

y podía comenzar la construcción de los primeros *telekinos* en la sede del *Centro de Ensayos de Aeronáutica* en el frontón Beti-Jai (González de Posada y González Redondo, 2022).

El *telekino* constaría de dos unidades, un “emisor” y un “receptor”, sin que ningún cable los uniese. Desde el emisor de ondas hertzianas se enviarían diferentes posibles colecciones de pulsos mediante un manipulador telegráfico estándar. El receptor iría almacenando esas señales hasta que pasasen cinco segundos sin recibirlas (el equivalente al “intro”); entonces, retomaría de su “memoria artificial” ese grupo de señales y las “interpretaría”, decidiendo el *telekino*, por sí sólo, qué acción estaba implícita en esas señales y dando las órdenes a los servomotores correspondientes para ejecutarla. El proceso se podría repetir tantas veces como se quisiera, enviando diferentes colecciones de señales, con una pausa entre ellas, y el *telekino* iría ejecutando sucesivamente las diferentes operaciones implícitas: encendido o apagado del motor, giro a izquierda o a derecha -a babor o a estribor-, aumento o reducción de la velocidad, etc. (González de Posada, González Redondo y Hernando González, 2021).

Construidos en 1904 dos *telekinos*, en febrero de 1905 se realizaron las primeras pruebas teledirigiendo un coche (un triciclo) ante el alcalde de Bilbao, ensayos que se repetirían en marzo, con gran éxito, ante profesores y alumnos de la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid. En noviembre tenían lugar pruebas privadas en el Abra de Bilbao con el segundo *telekino* teledirigiendo el bote *Vizcaya* desde el Club Marítimo, y en junio de 1906 se efectuaban nuevos ensayos con el primer *telekino* en una lancha en el lago de la Casa de Campo de Madrid ante miembros del Ateneo y de la Academia de Ciencias. Las pruebas se completarían en Bilbao en septiembre, en presencia del rey Alfonso XIII (figura 11) y de un gran público congregado en el Abra, con el *telekino* instalado en el bote *Vizcaya*. Conocedor de la invención desde los primeros momentos, José Echegaray (1903, p. 1) ya había destacado que era un autómata de “cierta inteligencia, no consciente, pero sí disciplinada”.

Redimensionado así el *telekino* en tanto que verdadero autómata electromecánico más allá que como simple mando a distancia, D. Leonardo entendió en 1910 que “es posible construir un autómata que ejecute una serie determinada de cálculos por complicados que sean, sin auxilio



Figura 11. Pruebas del *telekino* en Bilbao, en 1906, en presencia de Alfonso XIII.

de operador alguno”, y presentaba en Argentina los diseños de una máquina en la que “basta inscribir los datos para que el autómata calcule -e imprima si se quiere- los resultados” (Torres Quevedo, 1911, p. 227). En síntesis, continuando con la cita, había presentado la primera computadora digital electromecánica de la historia: “algunas consideraciones generales sobre los procedimientos de automatización mecánica que permiten sustituir, con frecuencia, el trabajo inteligente del obrero, por el trabajo puramente mecánico de una máquina” (González de Posada, González Redondo y Hernando González, 2021).

A su vuelta a España, se centraría en el diseño y la construcción de los “modelos de demostración” ... y en el enunciado del nuevo marco teórico-conceptual (la nueva Ciencia) para las nuevas máquinas: la Automática. Este nuevo “cuerpo de doctrina” (en palabras del inventor recogidas en notas manuscritas conservadas en su archivo) tendría como objeto resolver un “problema fundamental”: “construir un autómata que tenga en cuenta todas las circunstancias que deben influir en sus operaciones y adapte a ellas sus actos según reglas formuladas arbitrariamente de antemano”. En mayo de 1911 el Ministerio de Fomento autorizaba el cambio de denominación del Laboratorio de Mecánica Aplicada por el de Laboratorio de Automática y Torres Quevedo empezaba a redactar sus *Ensayos de/sobre Automática*.

En enero de 1914 veían la luz, finalmente, en la *Revista de la Real Academia de Ciencias*, los *Ensayos sobre Automática*. El primer subtítulo, *Su definición*, anunciaba que hacía falta definir una sección especial de la “teoría de las máquinas” (una nueva ciencia), la Automática, “que examinara los procedimientos que pueden aplicarse a la construcción de autómatas dotados de una *vida de relación* más o menos complicada”. El segundo subtítulo, *Extensión teórica de sus aplicaciones*, adelantaba que en los *Ensayos sobre Automática* Torres Quevedo (1914, p. 394) intentaba “demostrar, desde un punto de vista puramente teórico, que *siempre es posible construir un autómata* cuyos actos, todos, dependan de ciertas circunstancias más o menos numerosas, obedeciendo a reglas que se pueden imponer arbitrariamente en el momento de la construcción” (Hernando González, 1996; González de Posada, González Redondo y Hernando González, 2021).

Y, como destacaba D. Leonardo (1914, p. 418) en sus *Ensayos*, “el estudio del *telekino* es el que me encaminó en esta dirección”; añadiendo acto seguido que “durante la construcción de los diversos modelos del *telekino* que ensayé, tuve ocasión de apreciar prácticamente la gran facilidad que dan para estas construcciones los aparatos electromecánicos, y pensé que se les podía aplicar con éxito a las máquinas de calcular”.

Los *Ensayos* comienzan precisando el concepto de “autómata”, distinguiendo entre los que imitan los movimientos del hombre de los que imitan sus acciones; también entre aquellos que actúan “de modo continuo” y los que lo hacen “por intermitencias”. Pero, sobre todo, el “objeto de la Automática” serán los autómatas dotados de “discernimiento”, aquellos que “puedan en cada momento, teniendo en cuenta las impresiones que reciben, y también, a veces, las que han recibido anteriormente, ordenar la operación deseada” (Torres Quevedo, 1914, p. 393).

Para solucionar (teóricamente) el problema de su construcción recurriría al método electromecánico propio

del *telekino*. Y, como ejemplo para ilustrar sus explicaciones, escogería el diseño de una “máquina analítica” (manteniendo el nombre que le puso Babbage): autómata que “ejecuta una por una todas las operaciones indicadas en la fórmula que se trata de calcular”, que procede “en todo como un ser inteligente que sigue ciertas reglas”, y, sobre todo, “en el momento en que hay que escoger un camino en cada caso particular” (Torres Quevedo, 1914, p. 399).

En junio de 1913, con motivo del Congreso de Madrid de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, el *Laboratorio de Automática* presentaba el *ajedrecista* (figura 12), descrito en el catálogo de la exposición como un “modelo de ensayo y demostración” de ese “cuerpo de doctrina que podría llamarse Automática” que estudiaría “las condiciones en que la automatización puede efectuarse”, incluso “en la determinación de los actos del autómata” en los que “ha de intervenir la inteligencia”.

El *ajedrecista* juega un final de partida de rey y torre blancos (que maneja la máquina) contra el rey negro. El autómata analiza en cada movimiento la posición del rey (que maneja el humano), “piensa” y va moviendo “inteligentemente” su torre o su rey, dentro de las reglas del ajedrez y de acuerdo con el “programa” introducido en la máquina por su constructor hasta, indefectiblemente (si el humano no hace trampas, de las que se apercibiría y avisaría la máquina), dar el jaque mate.

Con el *ajedrecista* quedaba demostrada de forma práctica la posibilidad de la Inteligencia Artificial: las máquinas podían “poseer un órgano análogo a un cerebro”. Los titulares en la portada del diario *Le Matin* del 24 de mayo de 1914, al presentar el *ajedrecista* en París, fueron explícitos: “Un autómata que sabe jugar al ajedrez. La máquina puede realizar el trabajo cerebral del hombre”. Al año siguiente, el 6 de noviembre de 1915, *Scientific American Supplement* publicaba un artículo en su n° 2079 (pp. 296-298) sobre “Torres y sus destacados dispositivos automáticos” destacando en el subtítulo que D. Leonardo “sustituiría con máquinas a la mente humana”.

El 25 de junio de 1923, cumplidos los setenta años por D. Leonardo, su hijo Gonzalo presentaba en Salamanca el *segundo ajedrecista*, en el que se introducían diferentes mejoras con respecto al primer modelo. En este caso, el tablero está ya en posición horizontal, y, mediante electroimanes, la máquina desliza las piezas de unos a otros escaques. Además, el autómata no solo “piensa”, sino que también “habla” mediante un gramófono, con el que anuncia los jaques y el jaque mate.

El segundo *ajedrecista* (figura 13) sería su última gran obra. Fallecido Torres Quevedo, su hijo Gonzalo lo presentaría en el I Congreso Internacional de Cibernética de París de 1951, en la Exposición “Montres et Bijoux” de Ginebra de 1952, etc.

La construcción de una “máquina analítica”, tal como adelantó Torres Quevedo en 1911 y desarrolló en 1914 en los *Ensayos sobre Automática*, era una tarea compleja. De hecho, tendría que esperar hasta el otoño de 1917 para completar un *aritmómetro electromecánico* que, hasta la primavera de 1919, no funcionaría a la perfección. D. Leonardo llevó por primera vez su *aritmómetro*, en septiembre de 1919, al Congreso de Bilbao de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, pero, dedicado como estaba entonces al proyecto del dirigible transoceánico

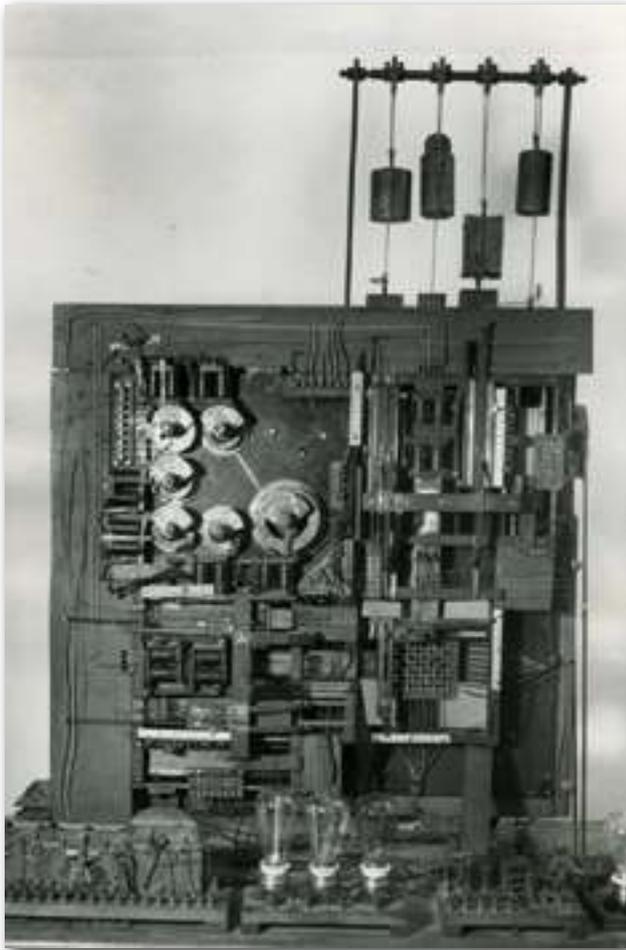


Figura 12. Imagen del primer *autómata ajedrecista* de 1913.

Hispania, no explicó su funcionamiento al público. Volvió a exhibirlo en el Congreso Nacional de Ingeniería celebrado en noviembre de 1919 en Madrid, pero sólo le dedicó unas breves palabras durante el acto inaugural de la exposición ante el rey Alfonso XIII.

Como sucediera con el *primer ajedrecista*, Torres Quevedo esperaba el momento y el auditorio especializado para mostrar oficialmente su *aritmómetro*



Figura 13. Imagen actual del segundo *autómata ajedrecista* de 1923.

electromecánico en público. Lo haría en junio de 1920, y de nuevo en París, donde, como de costumbre, presentaría un trabajo científico teórico original y el “aparato de demostración” operativo, en el Congreso de la Société d’Encouragement pour l’Industrie Nationale, conmemorativo del Centenario del *aritmómetro* (mecánico) de Thomas de Colmar.

El *aritmómetro electromecánico* (figura 14) es una calculadora digital que realiza las cuatro operaciones elementales. Incluye unidades de memoria para realizar los cálculos intermedios y tiene capacidad condicional para poder realizar la división de modo automático. Consta de un teclado (una máquina de escribir) para la introducción de los datos y las operaciones a realizar, y una unidad de proceso con “memoria artificial” que almacena la información enviada y la retoma cuando se pulsa el espaciador del teclado. Realizadas las operaciones por el *aritmómetro* sin ninguna participación humana, la calculadora envía el resultado al órgano de salida, la propia máquina de escribir, que imprime el resultado de las operaciones ordenadas. Con el *aritmómetro electromecánico* Torres Quevedo demostraba de forma práctica las posibilidades teóricas de su Automática (Hernando González, 1996; González de Posada, González Redondo y Hernando González, 2021).



Figura 14. El *aritmómetro electromecánico* de 1920.

6. INGENIERÍA DE CAMINOS, NAVAL E INDUSTRIAL

Hasta ahora hemos recorrido las aportaciones más significativas del ingeniero universal, pero no podemos olvidar otros ámbitos ingenieriles en los que también hizo aportaciones reseñables. En primer lugar, acostumbrado desde niño a vivir en ciudades como Bilbao, París y Madrid, Torres Quevedo presentó en 1896, en las páginas de *Le Genie Civil* y *Madrid Científico*, un sistema para facilitar la navegación urbana de los ciudadanos con el nombre de *indicadores coordinados*, que patentaría en España, Reino Unido, Francia y Bélgica entre 1900 y 1901. Se podría aplicar al plano de cualquier ciudad, que quedaría cuadrículado con filas (numeradas de arriba a abajo) y columnas (de izquierda a derecha), de modo que cada dirección quedase determinada por las coordenadas de la cuadrícula de intersección, además de por el nombre y número de la calle. Situando en farolas dentro de esas cuadrículas unas placas (orientadas al norte) con los números de la fila y la columna, el transeúnte simplemente tendría que marchar tantas posiciones a la derecha o a la izquierda, adelante o hacia atrás, como fuese necesario para alcanzar el destino buscado.

En esos mismos años, entre las muchas iniciativas científico-empresariales en las que colaboró con su hermano pequeño, Luis, se encuentra el proyecto de un salto de agua y canal de desvío en la cuenca alta del río Saja (Cantabria), para el que nuestro ilustre ingeniero presentaría en 1899 un estudio completo de la ubicación, planos, memoria económica, etc. Aunque la instalación para proporcionar electricidad a una futura industria no llegaría a construirse, sí serviría para constatar que Leonardo también ejerció brevemente como ingeniero hidráulico (González Fernández y González Redondo, 2021).

En 1918, mientras realizaba los últimos ajustes en el *aritmómetro electromecánico* y disfrutaba de los royalties por la comercialización de sus dirigibles, Torres Quevedo

volvió a interesarse por el mundo de los ferrocarriles en 1918. Habían pasado cuarenta años desde que se graduó como ingeniero de caminos, empezó a trabajar en el tendido de la vía del tren Sevilla-Huelva por Niebla y colaboró con su padre en la construcción de los Ferrocarriles del Noroeste antes de iniciar su carrera como inventor retirado en el valle de Iguña.

Pues bien, el 11 de marzo de ese año, D. Leonardo presentaba la patente de los “Enclavamientos TQ”, un sistema clasificado dentro de los de tipo “funicular”, como los de Henning y Bachman, que completaba el ideado por los ingenieros ingleses Saxby & Farmer, introducidos en España en 1882 por la *Compañía del Ferrocarril de Tarragona a Barcelona* (González Redondo y González Fernández, 2021). En síntesis, si el aparato central consta de un cierto número de palancas (las de señal, que sirven para manejar los discos, y las de maniobra, que sirven para manejar las agujas), los enclavamientos establecen entre todas las palancas relaciones mecánicas que impiden automáticamente cualquier maniobra que pueda ocasionar el choque entre trenes. Los ideados por Torres Quevedo se instalaron por primera vez en 1919 en la red de la *Compañía de Madrid a Zaragoza y a Alicante* (Mendizábal, 1920).

Junto a estos nuevos datos, también podemos revisar, desde otras perspectivas complementarias, algunas de sus invenciones más conocidas. Así, cuando el alcalde de Bilbao asistió, en febrero de 1905, a las pruebas del *telekino* teledirigiendo el triciclo eléctrico en la pista del frontón Beti-Jai, Torres Quevedo le enseñó también la barca, con baterías y motor eléctrico, que estaba construyendo allí en los talleres del *Centro de Ensayos de Aeronáutica* para realizar pruebas en Madrid. Autorizado por R.O. de la Dirección General de Obras Públicas del 17 de abril de 1905, se constituyó la Comisión del *Telekino*, para organizar las pruebas en Bilbao. Con los fondos reunidos, la Comisión compró en Alemania un bote, bautizado como *Vizcaya*,

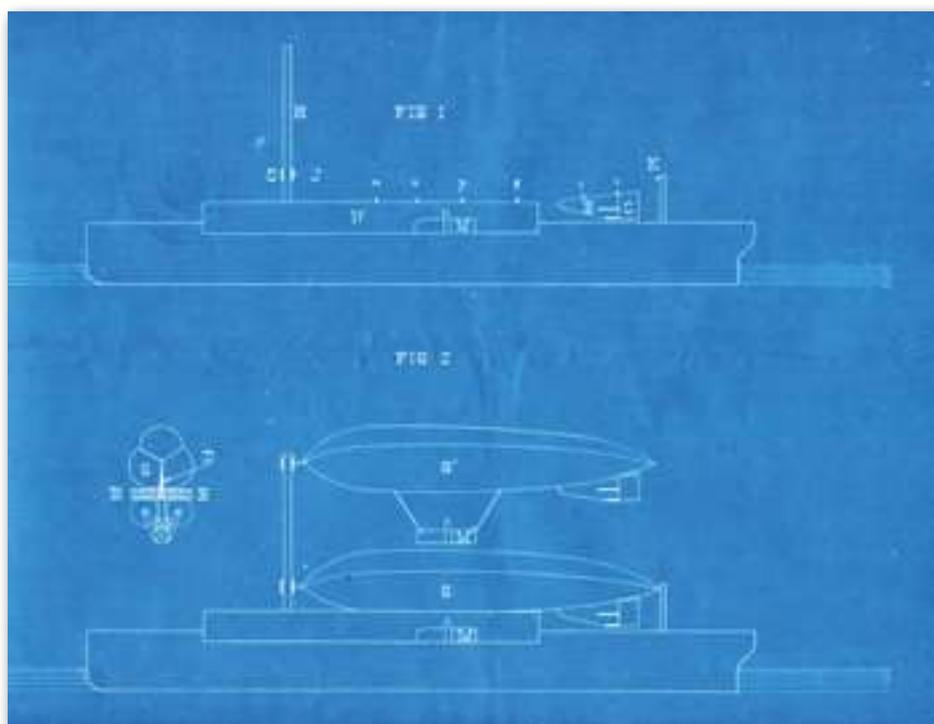


Figura 15. Esquemas de la patente del *buque campamento* de 1913.

al que se dotó de una batería de acumuladores, un motor eléctrico para la hélice, otro para el timón y dos servomotores destinados a que el *telekino* gobernase por sí solo los dos motores principales. Teledirigidos por primera vez el bote, en noviembre de 1905, en el Abra de Bilbao, desde la terraza del Club Marítimo, y la barca eléctrica construida en el Beti-Jai, en junio de 1906, en el lago de la Casa de Campo de Madrid, Torres Quevedo también se iniciaba en el campo de la ingeniería naval.

Desde esta perspectiva puede destacarse también cómo, habiendo resuelto el problema de la navegación aérea con sus dirigibles *autorrígidos*, en 1913 presentó la patente del “Buque campamento” (figura 15), un barco concebido, específicamente, para operar con los *Astra-Torres*. Ofrecido a las Armadas de España, Francia y el Reino Unido, se materializaría en 1922 en la parte de proa de la *Estación Transportable de Aeronáutica Naval* (el primer *Dédalo*) de la Armada española (González Redondo, 2017).

Finalmente, y también en este mundo de la ingeniería naval, debe recordarse que el 25 de noviembre de 1916 Torres Quevedo solicitó en España la patente “Una nueva embarcación que se denominará *Binave*”, concedida el 12 de diciembre de 1916 con el nº 63.383, y que un año más tarde, el 23 de noviembre de 1917, presentaba la solicitud en el Reino Unido con el título “Improvements in Ships”.

Constaba de dos cascos (flotadores) fusiformes paralelos y de igual tamaño, capacitados como espacios de tanques y cámaras de máquinas. Un armazón los unía rígidamente y sobre él se habilitaba la estructura para carga, tripulación y pasajeros. Fue montada en los *Astilleros Euskalduna* entre 1917 y 1918 (figura 16) y probada en los alrededores del puerto de Bilbao, con varias salidas efectuadas en septiembre de 1918, destacándose el exitoso viaje de ida y vuelta Santurce-Santoña el 28 de ese mes. Sin embargo, aunque las pruebas se retomarían en 1919, durante el Congreso de la Asociación Española para el Progreso de las Ciencias, donde presentó el proyecto del *Hispania*, su propuesta no encontraría eco, y ya fuera de España, hasta varias décadas después. En cualquier caso, podemos constatar que esta embarcación constituye el origen del catamarán moderno (Pérez Fernández y González Redondo, 2022).

Otra creación menor de Torres Quevedo, ahora desde la perspectiva de la ingeniería industrial, fue el *dianemólogo*. En efecto, como se destacaba más arriba, completadas las pruebas del *telekino* en Bilbao, en septiembre de 1906, la Comisión constituida al efecto se disolvió y un grupo de industriales bilbaínos decidió financiar la puesta en marcha de las nuevas invenciones de Torres Quevedo desde la *Sociedad de Estudios y Obras de Ingeniería*. Mientras preparaba para la *Sociedad* los planos del *Transbordador del Monte Ulía*, el 6 de febrero de 1907 presentaba la patente del *dianemólogo*, una máquina concebida para copiar un discurso sin necesidad de acudir a la taquigrafía. El aparato iría dividiendo (la palabra “dianemo” quiere decir distribuir en porciones) mecánicamente el discurso (el “logos”) entre cuatro copistas, a medida que se pronunciaba, de tal manera que cada uno de ellos tendría tiempo para transcribir las partes que le correspondieran. El *dianemólogo* se construyó en la sede del *Laboratorio de Mecánica Aplicada*, en la calle Manuel Silvela nº 1 de Madrid, y se ensayó en el Ateneo (García Santesmases, 1980).



Figura 16. La *Binave* en los astilleros Euskalduna de Bilbao en 1918.

Finalmente, entre 1922 y 1926, mientras fabricaba aparatos en el *Laboratorio de Automática* para otros investigadores como Santiago Ramón y Cajal, Blas Cabrera, Ángel del Campo o Juan Negrín (González de Posada, 1992), presentó cuatro nuevas patentes con “Perfeccionamientos en las máquinas de escribir”, inspiradas por las modificaciones efectuadas en el teclado/impresora del *aritmómetro electromecánico*, y otras dos patentes con un nuevo procedimiento para la “Paginación marginal de libros”.

7. CONSIDERACIONES FINALES

El 28 de diciembre de 1927 Torres Quevedo cumplía 75 años, y, en enero de 1928, cedía a la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid todas sus máquinas para su mantenimiento y exhibición en público. En 1930, mientras Maurice d’Ocagne le dedicaba en *Le Figaro* la frase “el más prodigioso inventor de nuestro tiempo”, con la que quedará caracterizado para siempre, D. Leonardo presentaba las patentes de sus dos últimos inventos, dedicados a facilitar las tareas expositivas del profesorado. En primer lugar, el *Puntero proyectable*, que consiste en un brazo articulado que proyecta una sombra móvil que sirve de puntero para destacar un punto en la proyección luminosa que utilice el profesor, combinado con un dispositivo de grabación de la lección en discos de gramófono. Lo completaría con el *Proyector didáctico*, dispositivo que aportaba un mecanismo para cambiar con facilidad las transparencias e, incluso, permitiría sustituirlas por una cinta cinematográfica continua.

Pero su vida como inventor tocaba a su fin. Durante los años siguientes, y hasta su fallecimiento en 1936, simplemente disfrutaría de honores y condecoraciones que le confirmarían como el ingeniero español más universal. En suma, ingeniero aeronáutico, matemático, industrial, naval, informático o de telecomunicaciones ... además de ingeniero de caminos.

8. REFERENCIAS

Alonso Antoranz, J.A., y Juaristi Zaldueño, S. (1993). La Sociedad de Estudios y Obras de Ingeniería. En F. González de Posada et al. (eds.), *Actas del II Simposio “Leonardo Torres Quevedo: su vida, su tiempo, su obra”* (pp. 251-264). Madrid: Amigos de la Cultura Científica.

Aramberri, J., y González Redondo, F.A. (2011). Innovación y tecnología: los transbordadores de Torres Quevedo. *Fabrikart: arte, tecnología, industria, sociedad*, 10, pp. 26-45.

Aramberri, J., y González Redondo, F.A. (2023). Leonardo Torres Quevedo. Entre el valle de Iguña y Bilbao. *Los Cántabros*, 23, pp. 40-63.

Arrillaga, F. (1916). *Solemne entrega de la Medalla Echegaray al Excmo. Sr. D. Leonardo Torres Quevedo*. Madrid: Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

D'Ocagne, M. (1930). Machines à calculer. De Blais Pascal à Torres Quevedo. *Le Figaro*, 25 de mayo de 1930, p. 5.

Deprez, M., Poincare, H., y Appell, P. (1900). Rapport sur un Mémoire de M. Torres intitulé: *Machines à calculer*. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 130, pp. 1-3.

Echegaray, J. (1903). Inventos del señor Torres Quevedo. El Telekino. *El Imparcial*, 6 de noviembre de 1903, p. 1.

Espitallier, G. (1909). Le transbordeur funiculaire à voyageurs du Mont Ulia, près de Saint-Sebastien (Espagne). *Le Génie Civil*, 1408, pp. 105-108.

García Santesmases, José (1980). *Obra e inventos de Torres Quevedo*. Madrid: Instituto de España.

Gómez Hidalgo, F. (1922). ¿Cómo y cuándo ganó usted la primera peseta? Madrid: Librería Renacimiento.

Gómez Jáuregui, V. et al. (2022). Torres Quevedo's mechanical calculator for second-degree equations with complex coefficients. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 172, 104830.

González de Posada, F. (1990). Leonardo Torres Quevedo. *Investigación y Ciencia*, 166, pp. 80-87.

González de Posada, F. (1992). *Leonardo Torres Quevedo*. Madrid: Fundación Banco Exterior.

González de Posada, F. (1993). El concepto de analogía. Breve ensayo en torno a las máquinas algébricas de Leonardo Torres Quevedo. En F. González de Posada et al. (eds.), *Actas del II Simposio "Leonardo Torres Quevedo: su vida, su tiempo, su obra"* (pp. 83-98). Madrid: Amigos de la Cultura Científica.

González de Posada, F., González Redondo, F.A., y Hernando González, A. (2021). Leonardo Torres Quevedo: Pioneer of Computing, Automatics and Artificial Intelligence. *IEEE Annals of the History of Computing*, 43(3): pp. 22-43.

González de Posada, F., y González Redondo, F.A., et al. (2007). *Leonardo Torres Quevedo y la conquista del aire*. Madrid: Amigos de la Cultura Científica.

González de Posada, F., y González Redondo, F.A. (2022). *La obra de Leonardo Torres Quevedo*. Santander: Editorial Los Cántabros-Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

González Fernández, D., y González Redondo, F.A. (2022). La presa de Los Tojos. El proyecto hidráulico del ingeniero total. *Enlaza Cantabria*, 11, p. 22.

González Fernández, D., y González Redondo, F.A. (2022). Leonardo Torres Quevedo: el ingeniero total. En I.D. Medina-Ruiz et al. (eds.), *Los ingenieros en la Europa del Sur (siglos XVIII-XX)* (pp. 227-248). Valencia: Tirant lo Blanch.

González Fernández, D., y Redondo Alvarado, M.^a D. (2016). El proyecto del transbordador entre el Monte Pilatus y el Klimesenhorn (Lucerna, Suiza). Una primera aproximación. En F. González Redondo (coord.), *Ciencia y Técnica entre la Paz y la Guerra. 1714, 1814, 1914*. Vol. 2 (pp. 1273-1280). Madrid: Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas.

González Redondo, F.A. (1993). Noticias históricas de transbordadores (funiculares aéreos) pre-torresquevedianos. En F. González de Posada et al. (eds.), *Actas del II Simposio "Leonardo Torres Quevedo: su vida, su tiempo, su obra"* (pp. 207-212). Madrid: Amigos de la Cultura Científica.

González Redondo, F.A. (2009). *Leonardo Torres Quevedo*. Madrid: AENA.

González Redondo, F.A. (2011). The contribution of Leonardo Torres Quevedo to Lighter-than-air science and technology. *The International Journal for the History of Engineering and Technology*, 81(2): pp. 212-232.

González Redondo, F.A. (2017). Del *Buque-campamento* de Torres Quevedo (1913) al *Dédalo* (1922) de la Armada Española. *Revista General de Marina*, 273, pp. 645-656.

González Redondo, F.A. (2022). El retorno de *Airlander 10* (que no es un Zeppelin) a sus orígenes en España. *El Diario Montañés*, domingo 13 de noviembre de 2022, p. 47.

González Redondo, F.A., y Camplin, G. (2015). The controversial origins of the Mooring mast for airships. *ICON. Journal of the International Committee for the History of Technology*, 21, pp. 81-108.

González Redondo, F.A., y Cubria Piris, M. (2019). El frontón Beti-Jai entre Joaquín Rucoba y Torres Quevedo. *Los Cántabros*, 18, pp. 70-97.

González Redondo, F.A., y González Fernández, D. (2021). Leonardo Torres Quevedo, ingeniero de Caminos: del ferrocarril al teleférico. *Ábaco*. Revista de cultura y ciencias sociales, 108-109, pp. 148-157.

Hernando González, A. (1996) *Leonardo Torres Quevedo, precursor de la Informática* [tesis doctoral inédita]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Juaristi Zaldueño, S., y Alonso Antoranz, J.A. (1993). La Sociedad española The Niagara Spanish Aerocar Company. En F. González de Posada et al. (eds.), *Actas del II Simposio "Leonardo Torres Quevedo: su vida, su tiempo, su obra"* (pp. 265-276). Madrid: Amigos de la Cultura Científica.

Mendizábal, D. (1920). Organización del servicio de instalación y conservación de enclavamientos en la Compañía de Madrid a Zaragoza y Alicante. *La Energía Eléctrica*, 22(22), pp. 257-262.

Pérez Fernández, R., y González Redondo, F.A. (2022). On the origin, foundational designs and first manufacture of the modern catamaran. *International Journal of Maritime History*, 34(3): pp. 467-493.

Person, C.W. (1916). Over the Whirlpool by Aerial Cable. *Scientific American*, 114(13): pp. 330-337.

Registro de la Propiedad Industrial (1988). *Patentes de invención de don Leonardo Torres Quevedo*. Madrid: Ministerio de Industria y Energía.

Sáenz Ridruejo, Fdo. (1999). El padre de Leonardo Torres Quevedo. Vida y obra de Luis Torres Vildósola (1818-1891). En F. González de Posada y F.A. González Redondo (eds.), *Actas del III Simposio "Leonardo Torres Quevedo: su vida, su tiempo, su obra"* (pp. 59-67). Madrid: Amigos de la Cultura Científica.

Sáenz Ridruejo, Fdo. (2005). *Una historia de la Escuela de Caminos. La Escuela de Caminos de Madrid a través de sus protagonistas*. Madrid: Ministerio de Fomento-Fundación Agustín de Betancourt.

Schmoll, H.D. (1999). *Welt Seilbahn Geschichte. Band I*. Salzburgo (Austria): Steidl Verlag.

Torres Quevedo, L. (1911). Sobre un Nuevo Sistema de máquinas de calcular electromecánicas. *Revista de Obras Públicas*, Año LIX, nº 1857, pp. 227-233, y nº 1860, pp. 274-278.

Torres Quevedo, L. (1914). Ensayos sobre Automática. Su definición. Extensión teórica de sus aplicaciones. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 12, pp. 391-419.

Geotecnia

Líneas de Actividad

Geotecnia de Carreteras

Geotecnia de Infraestructuras
Ferroviarias

Geotecnia de Obras Portuarias
y Costas

Geotecnia de Obras
Hidráulicas

Geotecnia Ambiental

Ensayos Geotécnicos de
Laboratorio

Técnicas Geofísicas Aplicadas
a la Geotecnia

Ensayos Geotécnicos In Situ e
Instrumentación

Difusión del Conocimiento y
Transferencia Tecnológica

Actividades de Normalización

.....

Fields of Activity

Road Geotechnics

Railway Geotechnics

*Harbour and Coastal
Geotechnics*

*Geotechnics for
Hydraulic Works*

Environmental Geotechnics

Geotechnical Laboratory Tests

*Geophysical Techniques
Applied to Geotechnics*

*In Situ Geotechnical Tests and
Instrumentation*

*Knowledge and Technology
Transfer*

Standardization Activities

Más información en
<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas



Verificación de los estados límite últimos por métodos numéricos en el marco de la segunda generación del Eurocódigo 7

Verification of the Ultimate Limit States Using Numerical Methods in the Framework of the Second Generation of Eurocode 7

Jorge Ibarra Pérez^{1*}

Resumen

Los proyectos geotécnicos han de satisfacer los condicionantes de diseño contando con un resguardo suficiente de seguridad ante el fallo. Existen distintas metodologías para realizar estas comprobaciones, como los métodos analíticos, los métodos empíricos o los métodos numéricos.

Los métodos numéricos están ampliamente difundidos en el ámbito geotécnico para la realización de los cálculos requeridos en las comprobaciones de los estados límite, ya sean los de servicio, que son aquellos que de superarse dan lugar a situaciones que exceden los criterios de diseño de funcionalidad, estética o durabilidad, o los últimos, que son aquellos que de ser superados causan el colapso del elemento analizado. Los valores de no excedencia vienen definidos en las diversas normas geotécnicas, que pueden o no hacer diferenciaciones en función del método de cálculo empleado.

En este sentido, la futura segunda generación del Eurocódigo 7 recogerá reglas específicas para el empleo de métodos numéricos en la verificación del cumplimiento de los requisitos de diseño. Esta incorporación resulta especialmente relevante en la comprobación de los estados límite últimos por sus notables diferencias con los cálculos analíticos clásicos.

Palabras clave: Eurocódigo 7, estados límite últimos, métodos analíticos, métodos numéricos plasticidad asociada.

Abstract

Geotechnical design projects must satisfy the design conditions with sufficient safety against failure. There are different methodologies to perform these checks, such as analytical methods, empirical methods or numerical methods.

Numerical methods are widely used in geotechnics to carry out the calculations required in the verification of the limit states, either the serviceability limit states, which are those that, if exceeded, lead to situations that overcome the design criteria of functionality, aesthetics or durability, or the ultimate limit states, which are those that, if exceeded, cause the collapse of the element under analysis. The non-exceedance values are defined in the various geotechnical standards, which may or may not make differentiations depending on the calculation method used.

In this sense, the future second generation of Eurocode 7 will include specific rules for the use of numerical methods in the assessment of design requirements. This incorporation is particularly relevant in the verification of ultimate limit states because of their notable differences with classical analytical calculations.

Keywords: Eurocode 7, ultimate limit states, analytical methods, numerical methods, associated flow rule.

1. INTRODUCCIÓN

El cálculo numérico presenta ciertas diferencias a destacar respecto del procedimiento tradicional analítico para la verificación de los estados límites últimos en las estructuras geotécnicas. En el cálculo tradicional mediante fórmulas se realizan comprobaciones independientes de una serie de situaciones de rotura tipificadas (deslizamiento, hundimiento, vuelco, etc.), y cada una de ellas puede requerir unos requisitos de seguridad distintos. Este procedimiento presenta como desventaja que el modo de fallo crítico del sistema puede no corresponderse con un modo canónico, por lo que no se estaría contemplando ni, por tanto, comprobando. Por el contrario,

con los métodos numéricos puede obtenerse automáticamente la situación más crítica de fallo, independientemente del problema analizado o del modo de fallo que se presente, que puede o no corresponderse con alguno de los modos de fallo tipificados en el cálculo tradicional que, por su parte, resultan difíciles o sencillamente imposibles de reproducir.

Otra gran diferencia entre ambos métodos reside en cómo se aplican los factores de seguridad, pues, en general, en la resolución numérica únicamente se actúa directamente *a priori* sobre los datos de entrada (las acciones y parámetros resistentes del modelo) o *a posteriori* sobre los resultados del cálculo (los efectos de las acciones), pero no sobre estadios intermedios del cálculo (por ejemplo, los empujes del terreno), algo que sí es habitual en los cálculos analíticos donde se hace de forma directa.

La actual primera generación del Eurocódigo 7 permite el empleo de los métodos numéricos, pero en ella no se

* E-mail: jjbarra61@alumno.uned.es

¹ Ingeniero de caminos, canales y puertos.

establecen procedimientos ni se hacen distinciones entre este tipo de cálculos y los métodos analíticos. En la actualidad está en proceso la preparación de su segunda generación, que incluye una cláusula con recomendaciones para realizar las comprobaciones geotécnicas empleando métodos numéricos. Según Lees (2019), de adoptarse en la versión final de la segunda generación del Eurocódigo 7 las especificaciones referentes a los métodos numéricos que aparecen en la versión borrador, entonces se estaría ante la primera normativa de diseño geotécnico general que incorpore reglas específicas para la verificación empleando métodos numéricos.

2. ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS

Un estado límite último geotécnico se corresponde con una situación ficticia que se consigue actuando sobre los parámetros resistentes del terreno [M], sobre las acciones [A] (o los efectos de estas [E]) o sobre las resistencias que se derivan de la oposición a las acciones [R]. Una vez configurado el estado último de esta forma, si se comprueba que es estable implicará que el diseño real verifica el criterio de seguridad requerido por la normativa. Por tanto, un estado límite último geotécnico es un estado extremo ficticio que no se corresponde con un incremento monótono del estado tensional que parta de una situación inicialmente estable hasta que deje de serlo, puesto que es un estado prefijado, estacionario, no un estadio de un proceso.

Con el método clásico basado en la obtención de un factor de seguridad global, sin aplicar factores a los elementos que configuran el sistema analizado, se obtiene el modo de fallo “correcto”, que puede no coincidir con el modo resultado de aplicar estos factores parciales previamente a realizar el cálculo, si bien como indican Simpson y Junaideen (2013) con el método de los factores parciales no se busca obtener el modo de fallo “correcto” sino verificar el sistema frente a fallos en circunstancias extremas.

Un estado límite último podría estar suficientemente alejado del colapso, si bien un diseño optimizado ajustará, en general, sus características al valor mínimo requerido por la normativa, sin holguras. Por ello, habitualmente el diseño acorde a los estados límite últimos se corresponderá con una situación de colapso plástico inminente. Es en estas situaciones cuando los problemas derivados de considerar una ley de fluencia no asociada (ángulo de dilatación menor que el

ángulo de rozamiento interno) pueden prevenir de obtener una única solución, por la localización de la deformación en bandas de corte que es sinónimo de variaciones en el modo de fallo conforme evoluciona el proceso.

Por el contrario, si se considera plasticidad asociada se garantiza la unicidad de la solución, aunque ello implica que en el momento del fallo se está asumiendo que se produce un cambio de volumen extremo con un valor del ángulo de dilatación igual al ángulo de rozamiento y, en realidad, el comportamiento observado de los suelos no responde a esta condición.

3. MÉTODO DE LOS FACTORES PARCIALES

El Eurocódigo 7 es la normativa europea que trata los aspectos geotécnicos que han de satisfacer los proyectos de ingeniería civil y de edificación. Las verificaciones que hay que realizar se basan, como en el resto de Eurocódigos, en el conocido método de los estados límite, que requiere la verificación de los estados límite últimos [ELU] y los estados límite de servicio [ELS].

Existen distintos conjuntos de los factores A, M y R, cuyo significado se recoge en la tabla 1, cada uno con sus coeficientes asociados, que se pueden combinar de distintas formas, dando lugar a los distintos casos de verificación que describen la forma en que se han de aplicar los factores parciales para la verificación de los estados límite. En general, se aplican factores parciales mayores que uno a dos de estos elementos y no se actúa sobre el tercero. Los casos de verificación contemplados en el borrador del nuevo Eurocódigo 0 se muestran en la tabla 2.

Tabla 1. Procedimientos para la aplicación de factores parciales

Tipo	Actúa sobre	Factor a considerar
A (Acciones)	Las acciones de proyecto (o el efecto que producen las acciones).	Aumentar las cargas desfavorables y minorar las favorables por un factor γ_1 o γ_2 .
M (Materiales)	Las propiedades geomecánicas del terreno.	Reducir los parámetros resistentes por un factor γ_a .
R (Resistencias)	La resistencia del terreno.	Reducir las resistencias calculadas por un factor γ_a .

Tabla 2. Factores parciales a aplicar a las acciones o a los efectos de las acciones según el borrador de la segunda generación del Eurocódigo 0 para las situaciones persistentes o transitorias

Acción o efecto				Factores parciales γ_1 y γ_a				
Tipo	Grupo	Sim	Efecto resultante	Resistencia estructural	Equilibrio estático y flotación		Diseño geotécnico	
Situación persistente o transitoria								
Caso de verificación				VC1	VC2(a)	VC2(b)	VC3	VC4
Fórmula				(8.4)	(8.4)	(8.4)	(8.4)	(8.5)
Acciones permanentes [G ₁]	Todas (excepto presión agua)	γ_G	Desfavorable/destabilizador	1,35·k _d	1,35·k _d	1	1	G ₁ no se aplican factores
	Agua (niv el freático)	γ_{Gw}		1,2·k _d	1,2·k _d	1	1	
	Todas (excepto presión agua)	γ_{Gstb}	Estabilizador	No se emplea	1,15	1	No se emplea	
	Agua (olas, corrientes)	γ_{Gwstb}		1	1	1		
Todas	γ_{Gstb}	Favorable	1	1	1	1		
Acciones variables [Q ₁]	Todas	γ_Q	Desfavorable	1,5·k _d	1,5·k _d	1,5·k _d	1,3	$\gamma_Q \cdot \gamma_{Q1}$
	Agua	γ_{Qw}		1,35·k _d	1,35·k _d	1,35·k _d	1,15	1
	Todas	γ_{Qstb}	Favorable	0	0	0	0	0
Efectos de las acciones [E]	γ_E	Desfavorable	No se aplican factores					1,35·k _d
	γ_{Estb}	Favorable						1

4. VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS POR MÉTODOS ANALÍTICOS SEGÚN EL BORRADOR DE LA SEGUNDA GENERACIÓN DEL EUROCÓDIGO

Para la verificación de los estados límite últimos referidos al terreno, el borrador del nuevo Eurocódigo 7 indica que se debe emplear el enfoque MFA (*Material Factor Approach*), que consiste en aplicar factores a las propiedades de los materiales, o el enfoque RFA (*Resistance Factor Approach*), que consiste en aplicar factores a las resistencias calculadas, según sea el tipo de estructura geotécnica de las contempladas en la parte 3.

Las acciones [A] y los efectos de las acciones [E] se agrupan en cuatro casos de verificación, denominados VC1 a VC4, de los cuales VC3 y VC4 se corresponden con el diseño geotécnico, mientras que VC1 responde al diseño estructural (y también al diseño geotécnico en ciertos casos) y VC2 al equilibrio estático y flotación. Los factores parciales para algunos de estos casos de verificación incluyen un factor de consecuencia de fallo k_F que adopta, para edificios, puentes y estructuras geotécnicas relacionadas, los valores 1,1; 1,0; o 0,9 en función de si la clase de consecuencia es CC3 (alta), CC2 (normal) o CC1 (baja), respectivamente (anexo A EN 1990).

Para el caso de verificación VC4, el factor correspondiente a las acciones variables desfavorables se obtiene a partir de la relación entre el factor de las acciones variables desestabilizadoras correspondientes al caso de

verificación VC1 y el factor de las acciones permanentes desestabilizadoras también del caso de verificación VC1. Por tanto, en el caso general, adoptará el valor $\gamma_{Q,1}/\gamma_{G,1}=1,5/1,35\approx 1,11$.

Los factores a aplicar a las propiedades de los materiales [M] se agrupan en dos casos, denominados M1 y M2, cuyos valores se definen en la tabla [4.8] de la primera parte del futuro Eurocódigo 7, si bien son parámetros de determinación nacional (NDP) y, por tanto, podrán variar. Estos factores parciales se muestran en la tabla 3.

El factor de consecuencia k_M adopta los valores 1,1; 1,0; o 0,9 en función de si la clase de consecuencia es CC3 (alta), CC2 (normal) o CC1 (baja), respectivamente (tabla [4.7] prEN 1997-1:202x).

Para los casos en que se empleen métodos numéricos con modelos constitutivos complejos, la tabla incluye el factor a aplicar a la resistencia al corte en análisis en tensiones efectivas (τ_p). Se distinguen entre valores residuales y de estado crítico, con factores distintos.

En lo que respecta a los factores a aplicar a las resistencias [R], estos dependen del tipo de problema que se esté analizando. En la tabla 4 se muestran, de forma simplificada, las combinaciones de A, M (en el caso MFA, con $\gamma_R=1$) y R (en el caso RFA, con $\gamma_M=1$) a adoptar para la verificación de los estados límite últimos en situaciones persistentes y transitorias en los ocho tipos de estructuras que se incluyen en la parte 3 del futuro Eurocódigo 7. No se han incluido las situaciones accidentales ni los factores parciales para los estados límite de servicio.

Tabla 3. Factores parciales a aplicar a las propiedades del modelo del terreno

Propiedades del terreno	Símbolo	M1		M2	
		Persistente Transitoria	Accidental	Persistente Transitoria	Accidental
Parámetros del suelo y relleno					
Resistencia al corte en análisis en tensiones efectivas (τ)	γ_{τ}	1,0		1,25 k_M	1,1
Coefficiente de rozamiento pico ($\tan \phi'_p$)	$\gamma_{\tan \phi'_p}$	1,0		1,25 k_M	1,1
Cohesión efectiva pico (c'_p)	$\gamma_{c'_p}$	1,0		1,25 k_M	1,1
Coefficiente de rozamiento en estado crítico ($\tan \phi'_{cr}$)	$\gamma_{\tan \phi'_{cr}}$	1,0		1,1 k_M	1,0
Coefficiente de rozamiento residual ($\tan \phi'_r$)	$\gamma_{\tan \phi'_r}$	1,0		1,1 k_M	1,0
Cohesión efectiva residual (c'_r)	$\gamma_{c'_r}$	1,0		1,1 k_M	1,0
Resistencia al corte en análisis en tensiones totales (c_u)	γ_{c_u}	1,0		1,4 k_M	1,2
Resistencia a la compresión simple no confinada (q_u)	γ_{q_u}	1,0		1,4 k_M	1,2
Parámetros de la roca					
Resistencia al corte	γ_{τ}	1,0		1,4 k_M	1,2
Coefficiente de rozamiento a lo largo de las discontinuidades	$\gamma_{\tan \phi}$	1,0		1,4 k_M	1,2
Resistencia a la compresión simple no confinada	γ_{q_u}	1,0		1,4 k_M	1,2
Parámetros de la interfaz					
Coefficiente de rozamiento de la interfaz terreno/estructura ($\tan \delta$)	$\gamma_{\tan \delta}$	1,0		1,25 k_M	1,1

Tabla 4. Factores parciales para la verificación analítica de los ELU según el borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7

Factores parciales para la verificación analítica de los estados límite últimos								
Situaciones persistentes y transitorias								
Estructura		MFA [$\gamma_{af}=1$]			RFA [$\gamma_{af}=1$]			
[4] Laderas, desmontes y terraplenes		VC3+M2			[Solo MFA]			
[5] Cimentaciones superficiales		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)		
		VC1+M1	VC3+M2	VC1+M2	VC1 $\gamma_{af}=1,4$ $\gamma_{af}=1,1$	VC4 $\gamma_{af}=1,4$ $\gamma_{af}=1,1$		
[6] Pilotes	Resistencia axial a compresión	[Solo RFA]			Pilote			
					Terreno			
					VC1			
					$\gamma_{af}=1,35$			
					Desplazamiento completo		$\gamma_{af}=1,2$	$\gamma_{af}=1,2$
					Desplazamiento parcial		$\gamma_{af}=1,0$	$\gamma_{af}=1,05$
	Recemplazo		$\gamma_{af}=1,2$	$\gamma_{af}=1,3$				
	Sin clasificar		$\gamma_{af}=1,0$	$\gamma_{af}=1,05$				
	Resistencia axial a tracción		[Solo RFA]			VC1		
	Desplazamiento completo					$\gamma_{af}=1,2$	$\gamma_{af}=1,4$	
	Desplazamiento parcial					$\gamma_{af}=1,0$	$\gamma_{af}=1,15$	
	Recemplazo					$\gamma_{af}=1,35$	$\gamma_{af}=1,5$	
	Sin clasificar		$\gamma_{af}=1,25$	$\gamma_{af}=1,25$				
	Resistencia transversal		(a)	(b)	[Solo MFA]			
		VC3+M1 [EFA]	VC3+M2					
[7] Estructuras de contención		(a)	(b)	VC4 [EFA]				
		VC4+M1	VC3+M2	Piloteo $\gamma_{af}=\gamma_{af}=1,4\gamma_{af}$				
[8] Anclajes [ULS]	Resistencia	[Solo RFA]			Test 1	Test 3		
					$\gamma_{af}=1,1$	$\gamma_{af}=1,1$		
[9] Estructuras de suelo reforzado	Arrancamiento	[Solo RFA]			$\gamma_{af}=1,25$			
	Fallo por la interfaz				$\gamma_{af}=1,25$			
	Fallo por tracción del refuerzo				$\gamma_{af}=1,1 / 1,25$ (según material)			
	Fallo en conexiones entre elementos				$\gamma_{af}=1,25 / 1,35$ (según material)			
Fallo en conexión con el revestimiento	$\gamma_{af}=1,35$							
[10] Elementos de suelo reforzado	Anclajes	[Solo RFA]			Estructura EN 1993-1 Arrancamiento $\gamma_{af}=1,5$			
	Soclo claveteado				Estructura EN 1993-1 Arrancamiento $\gamma_{af}=1,5$			
	Mallas				Estructura EN 1993-1 Arrancamiento $\gamma_{af}=1,5$			
[11] Mejoras del terreno		(a)	(b)					
	Resistencia a compresión	VC1+M1	VC3+M2	Según corresponda				
	Inclusiones rígidas	VC4+M1	VC3+M3	VC1 γ_{af} [cla. 5 / 9] $\gamma_{af}=1,4$				
Resistencia transversal	VC4+M1 [EFA]	VC3+M2	[Solo MFA]					

5. VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS POR MÉTODOS NUMÉRICOS SEGÚN EL BORRADOR DE LA SEGUNDA GENERACIÓN DEL EUROCÓDIGO 7

5.1. Ideas generales

Los métodos numéricos se definen en el borrador del nuevo Eurocódigo 7 como “aquellos modelos de cálculo que emplean aproximaciones numéricas para obtener así las soluciones al problema analizado”.

La primera generación del Eurocódigo 7 permite el empleo de métodos numéricos para realizar los cálculos, si bien no establece reglas concretas sobre cómo se han de emplear. Son de aplicación los mismos enfoques de proyecto que en el método analítico, según establezca el Anejo Nacional correspondiente, si bien la aplicabilidad de uno u otro enfoque con los métodos numéricos es muy distinta y cuestionable.

En un cálculo empleando formulas analíticas, a partir de los datos conocidos (las acciones y los parámetros resistentes del modelo constitutivo empleado) se pueden obtener los efectos de estas acciones (por ejemplo, los empujes del terreno) incluso antes de proceder a realizar las comprobaciones requeridas. Por ello, para verificar la seguridad, es posible emplear estrategias que apliquen factores que aumenten o minoren, no sólo a las acciones o a las propiedades del terreno conocidas mediante un enfoque de tipo MFA, sino también a las resistencias resultantes mediante enfoques de tipo RFA.

Puede haber problemas en los que se conozca el modo de fallo, pero también casos más complejos sobre los que a priori no se pueda determinar. Con los cálculos analíticos esto no supone ninguna diferencia, puesto que en cualquier caso se ha de comprobar toda una serie de modos de fallo tipificados que, además, en los casos en los que se emplee el enfoque RFA a similitud con el cálculo clásico con

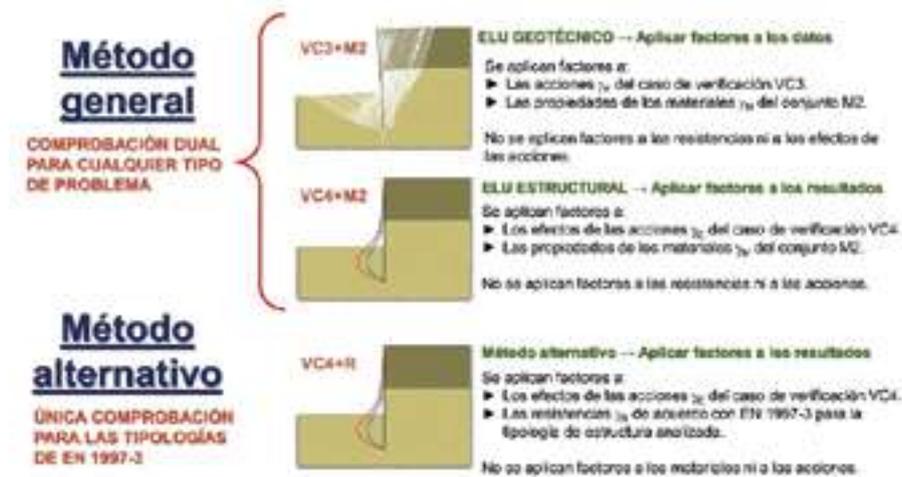


Figura 1. Verificación de ELU por métodos numéricos según el borrador del nuevo EC-7 (adaptado de Smith, 2022).

un coeficiente global, tendrán factores parciales distintos según el ELU analizado.

En general, en un cálculo numérico se introducen al programa de cálculo los datos conocidos (las acciones y las propiedades del terreno) y se obtiene automáticamente el resultado correspondiente al modo de fallo crítico. Se pueden aplicar factores a los valores introducidos (como en un enfoque de tipo MFA), mientras que los efectos de estas acciones son el resultado del cálculo. Es decir, en general, sólo será posible aplicar factores antes del cálculo o al final de este, pero no durante el cálculo. Es más, aunque se pudieran aplicar durante el cálculo, podría resultar que con esos factores sobre los efectos el sistema no estuviera en equilibrio, por lo que el cálculo no podría llevarse a cabo al ser el equilibrio una condición *sine qua non* de los métodos numéricos. Esto quiere decir que el enfoque de tipo RFA no es de aplicación directa a los cálculos numéricos, salvo en casos muy simples (por ejemplo, una zapata con una carga vertical centrada).

El borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7 distingue entre los enfoques que hay que adoptar en la verificación de los proyectos geotécnicos cuando se empleen métodos numéricos de los enfoques para la verificación por métodos analíticos o empíricos: con los métodos numéricos se adopta como procedimiento general el aplicar factores a los datos (tipo MFA) para la verificación de la seguridad geotécnica en todos los casos, junto con su comprobación complementaria (de tipo EFA), en la que se aplican factores a los efectos de las acciones, para la verificación de la seguridad estructural, mientras que, para los métodos analíticos, en función del tipo de estructura analizada, se prescriben enfoques MFA o RFA. No obstante, el nuevo Eurocódigo 7 también contempla un método alternativo al método general de cálculo numérico con un enfoque en el que se aplican factores a los efectos de las acciones y a las resistencias resultantes (tipo RFA). En la figura 1, adaptada de Smith (2022), se muestra el método general y el método alternativo.

La aplicación de los factores a los datos (según el enfoque MFA) posibilita el empleo de los métodos numéricos de forma directa, puesto que se actúa sobre los datos conocidos a priori y no los resultados que se obtienen en fases intermedias del cálculo. En la comprobación complementaria

(equivalente a un enfoque de tipo EFA) se actúa sobre los resultados que se obtienen al finalizar el cálculo (los efectos de las acciones, tales como, por ejemplo, los momentos flectores en una pantalla). En ninguno de los dos enfoques se actúa sobre el modelo de cálculo (puesto que no es posible actuar sobre resultados internos del cálculo, además de que con ello puede que se viole el equilibrio). El esquema de la figura 2, basado en Smith (2022), refleja el proceso de verificación general empleando métodos numéricos.



Figura 2. Proceso de verificación con métodos numéricos.

En el nuevo Eurocódigo 7 para los métodos numéricos, en lugar de emplear la denominación MFA, EFA o RFA, se ha optado por la más general de “input factoring” cuando se aplican factores a los datos y “output factoring” cuando se hace a los resultados del cálculo. El motivo de esta diferente denominación es evitar confusiones con los enfoques de tipo MFA y EFA indicados en EN 1997-3 puesto que además del enfoque dual general el nuevo Eurocódigo 7 también permite como alternativa calcular teniendo en cuenta los factores de las resistencias allí indicados (enfoque tipo RFA). En la tabla 5 se recoge la definición de las combinaciones para los cálculos numéricos según el método general y el alternativo.

El enfoque dual que establece el borrador del nuevo Eurocódigo 7 como procedimiento general para la verificación por métodos numéricos requiere realizar dos cálculos independientes para verificar tanto los ELU geotécnicos, en los que se aplican factores a las acciones y a los parámetros resistentes de los materiales en el modelo antes de realizar el cálculo (“input factoring”), como los ELU estructurales, en los que se aplican factores a los efectos resultantes de las acciones (“output factoring”). No obstante, en los casos en los que se tenga la certeza de que una de las dos verificaciones resulte menos limitante que otra se puede omitir su comprobación. También se contempla la posibilidad de que en el Anejo Nacional se especifiquen casos en los que

Tabla 5. Verificación de los estados límite últimos por métodos numéricos por los procedimientos “input factoring” y “output factoring”, de acuerdo con el borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7

Verificación de los ELU por métodos numéricos				
PROCEDIMIENTO GENERAL [DUAL]	Aplicar factores a los datos (comprobación geotécnica)		Aplicar factores a los resultados (comprobación estructural)	
	Factores a las acciones	Factores a las propiedades de los materiales	Factores a los efectos de las acciones	Factores a las propiedades de los materiales
	γ_s (VC3) (EN-1990-1 Anexo A)	γ_m (M2) (Tabla 4.8 EC7-1) (o Anexo Nacional)	γ_s (VC4) EN-1990-1 (Anexo A)	γ_m (M1) (coeficientes unitarios) (Tabla 4.8 EC7-1) (o Anexo Nacional)
MÉTODO ALTERNATIVO	Aplicar factores a los resultados			
	Factores a los efectos de las acciones		Factores a las resistencias	
	γ_s (VC4) EN-1990-1 (Anexo A)		γ_R EN-1997-3	

únicamente sea necesaria una de las dos comprobaciones (“input factoring” o “output factoring”).

Con el procedimiento alternativo se realiza un único cálculo en el que únicamente se aplican factores a los resultados del cálculo (“output factoring”), tanto a los efectos de las acciones como a las resistencias resultantes. Los factores γ_R a emplear son los indicados en la tabla 4 para las situaciones persistentes y transitorias de los tipos de estructuras que se incluyen en la parte 3 del futuro Eurocódigo 7, a excepción de las laderas, desmontes y terraplenes que no se abordan con enfoques tipo RFA. Este método requiere particularizar para el tipo de problema analizado puesto que en el “output factoring” los factores parciales son específicos del mecanismo de fallo, mientras que el “input factoring” emplea factores parciales que no son específicos de un modo particular de fallo.

La verificación aplicando factores a los datos, con la que se satisfacen los ELU geotécnicos (el crítico que arroja el cálculo), se realiza o bien empleando el procedimiento de reducción de parámetros resistentes (enfoque recomendado), o bien un cálculo elastoplástico para ver si el sistema es estable (enfoque alternativo).

La verificación aplicando factores a los resultados requiere que se realice un cálculo elastoplástico, similar a una verificación de tipo ELS (la única diferencia en el cálculo es que las acciones variables desfavorables se incrementan por un factor parcial de valor habitual 1,5/1,35 \approx 1,11), del que se obtienen unos esfuerzos similares a los de servicio (efectos de las acciones) a los que posteriormente se les aplican los correspondientes factores parciales, siendo estos esfuerzos ampliados el resultado de la verificación de tipo “output factoring”. Como resultado de la verificación por métodos numéricos se adoptan los esfuerzos más desfavorables de ambas verificaciones.

Mientras que para la verificación de los ELU de forma analítica no se requieren los parámetros de rigidez, sí que

son necesarios con los métodos numéricos para la verificación que aplica factores a los resultados, que se asemeja a una comprobación de tipo ELS, y también para la verificación alternativa de aplicar factores a los datos.

Sobre el motivo por el que es necesario realizar dos cálculos independientes, Lees (2017) indica que la comprobación de aplicar factores a los datos no es suficiente por sí sola para obtener los valores de proyecto de los esfuerzos estructurales porque en un suelo no plastificado aplicar un factor parcial a la resistencia del terreno podría no tener efecto en los resultados de los esfuerzos estructurales, mientras que una mayor plastificación puede tener efectos inconsistentes dado que, dependiendo del caso específico, se podrían obtener tanto esfuerzos estructurales máximos como mínimos. Sin embargo, hay casos en los que un terreno menos resistente de lo esperado puede tener efectos significativos en los esfuerzos estructurales y ello no vendría recogido en un cálculo en el que se aplican factores a los resultados. Lees (2017) pone como ejemplo el cálculo de un muro de contención en un talud estable que arrojaría valores de los esfuerzos estructurales bajos o nulos cuando los factores que se aplican a las resistencias del terreno son de valor uno, puesto que el talud es estable. Sin embargo, para asegurar que el muro tiene la resistencia adecuada para el caso en que la resistencia del terreno fuese menor y el muro tuviese que sostener efectivamente el talud, también se requiere obtener las fuerzas de proyecto empleando la combinación de aplicar factores a los datos.

Los valores de los factores a aplicar para la verificación de los estados límite últimos empleando métodos numéricos se resumen en la tabla 6.

El borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7 incluye la cláusula 8.2 sobre cómo se ha de proceder con un cálculo numérico, donde se abordan cuestiones como el requisito de verificar únicamente el modo de fallo crítico o cómo se podrían comprobar modos de fallo particulares.

Tabla 6. Factores parciales para la verificación por el procedimiento general de los estados límite últimos por métodos numéricos de acuerdo al borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7

Aplicar factores a los datos [VC3+M2]			
Acciones [VC3]	Permanentes	γ_G	1.0
	Variables desfavorables	γ_Q	1.30
Materiales [M2]	Resistencia al corte en análisis en tensiones efectivas (τ_i)	$\gamma_{\tau i}$	1.25- $K_{\tau i}$
	Coefficiente de rozamiento pico ($\tan \phi'_{p,i}$)	$\gamma_{\phi'_{p,i}}$	1.25- $K_{\phi'_{p,i}}$
	Cohesión efectiva pico ($c'_{p,i}$)	$\gamma_{c'_{p,i}}$	1.25- $K_{c'_{p,i}}$
	Coefficiente de rozamiento en estado crítico ($\tan \phi'_{c,i}$)	$\gamma_{\phi'_{c,i}}$	1.1- $K_{\phi'_{c,i}}$
	Coefficiente de rozamiento residual ($\tan \phi'_{r,i}$)	$\gamma_{\phi'_{r,i}}$	1.1- $K_{\phi'_{r,i}}$
	Cohesión efectiva residual ($c'_{r,i}$)	$\gamma_{c'_{r,i}}$	1.4- $K_{c'_{r,i}}$
	Resistencia al corte en análisis en tensiones totales (c_a)	γ_a	1.4- K_a
	Resistencia a la compresión simple no confinada (q_u)	γ_u	1.25- K_u
	Coefficiente de rozamiento interfaz terreno/estructura	$\tan \delta$	1.25- K_{δ}
	Factor de consecuencia [CC3/CC2/CC1]	K_{cc}	1.1/1.0/0.9
Aplicar factores a los resultados [VC4+M1]			
Acciones [VC4]	Permanentes	γ_G	1.0
	Variables desfavorables	γ_Q	1.11 [$\gamma_{Q1,i}/\gamma_{Q2,i}$]
Efectos de las acciones [VC4]	Desfavorables	γ_I	1.35- K_I
Factor de consecuencia [CC3/CC2/CC1]		K_{cc}	1.1/1.0/0.9
Materiales [M1]	Resistencia al corte en análisis en tensiones efectivas (τ_i)	$\gamma_{\tau i}$	1.0
	Coefficiente de rozamiento pico ($\tan \phi'_{p,i}$)	$\gamma_{\phi'_{p,i}}$	1.0
	Cohesión efectiva pico ($c'_{p,i}$)	$\gamma_{c'_{p,i}}$	1.0
	Coefficiente de rozamiento en estado crítico ($\tan \phi'_{c,i}$)	$\gamma_{\phi'_{c,i}}$	1.0
	Coefficiente de rozamiento residual ($\tan \phi'_{r,i}$)	$\gamma_{\phi'_{r,i}}$	1.0
	Cohesión efectiva residual ($c'_{r,i}$)	$\gamma_{c'_{r,i}}$	1.0
	Resistencia al corte en análisis en tensiones totales (c_a)	γ_a	1.0
	Resistencia a la compresión simple no confinada (q_u)	γ_u	1.0
	Coefficiente de rozamiento interfaz terreno/estructura	$\tan \delta$	1.0

5.2. Procedimiento para el cálculo por métodos numéricos

En la tabla [8.1] del borrador prEN 1997-1:202x se esquematizan los procedimientos a seguir para efectuar la comprobación del estado límite último con un método

numérico, que requiere realizar una verificación en la que se afectan los datos junto con otra en la que se afectan los resultados. Esta tabla se presenta en la tabla 7, si bien el futuro Anejo Nacional podría adoptar otros valores al tratarse de parámetros de definición nacional (NDP).

Tabla 7. Procedimientos para el cálculo por métodos numéricos (tabla [8.1] del borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7-1)

		Enfoque para la aplicación de factores				
		Afectar resultados VC4+M1	Afectar datos VC3+M2			
			Recomendado	Alternativo		
FASE DE CONSTRUCCIÓN I (CS1)	PASO 1		Paso 1 (representativo)	Paso 1 (representativo)	Paso 1	
	Datos	Nivel freático	Valores representativos			No es de aplicación (vaya directamente al Paso 2)
		Propiedades del terreno	Valores representativos			
		Elementos estructurales	Valores representativos			
		Acciones externas	Valores representativos			
	Resultados	Desplazamientos	(válido para comprobaciones ELS)			
		Esfuerzos en estructuras	(válido para comprobaciones ELS)			
	PASO 2		Paso 2 (verificación ELU)	Paso 2 (verificación ELU)	Paso 2 (verificación ELU)	
	Datos	Nivel freático	Nivel de diseño			
		Propiedades del terreno	Valores de proyecto Combinación M1	Factores M2 (normalmente para obtener valores de diseño por el método SRM)	Valores de proyecto Combinación M2	
Elementos estructurales		Valores representativos				
Acciones externas		Valores de proyecto Combinación VC4	Valores de proyecto Combinación VC3			
Resultados	Verificación del fallo del terreno	8.2(9)* 8.2(10)*	Se verifica el ELU si se logra el equilibrio del terreno sin fallo estructural			
	Verificación del fallo estructural	Se aplica γ_i a los resultados del cálculo para obtener valores de proyecto $[E_d]$	Valores de proyecto $[E_d]$ obtenidos directamente de los resultados del cálculo			
CS2	Continúese de la misma forma para las fases sucesivas (CS2, CS3...)					

En la comprobación existen distintos pasos en los que se han de emplear los valores representativos (valores adoptados sin aplicar factores) y otros en los que se emplean los valores de proyecto (valores resultantes de aplicar los factores). Estos dos tipos de valores se definen como:

- **Valores representativos:** valores nominales o característicos de las propiedades del terreno, obtenidos del informe de investigación geotécnica, que se emplean para las comprobaciones de los estados límite por el método de los factores parciales.
- **Valores de proyecto:** valores de las propiedades del terreno que se establecen a partir de los valores representativos y se emplean para la comprobación de los estados límite por el método de los factores parciales.

Para la verificación del enfoque de aplicar factores a los datos existen dos procedimientos distintos, el procedimiento recomendado y otro alternativo, mientras que para la verificación del enfoque de aplicar factores a los resultados existe un único procedimiento. Estos procedimientos se describen a continuación.

Procedimiento recomendado para la verificación aplicando factores a los datos

Para realizar la verificación “geotécnica” en la que se aplican factores a los datos se recomienda emplear el procedimiento de reducción de parámetros resistentes con los valores representativos, es decir, sólo se aplican los factores parciales a las acciones (con la combinación VC3), pero las propiedades del terreno permanecen con sus valores representativos. De este cálculo se obtiene un valor que representa el margen de seguridad con el que cuenta el sistema, con el que se obtienen valores reducidos que han de ser superiores a los valores de proyecto con la combinación M2 para que se verifique el ELU.

Los esfuerzos obtenidos como resultado del cálculo se emplean directamente para la verificación de las estructuras, cálculo que se complementa con los esfuerzos obtenidos del cálculo complementario aplicando factores a los resultados.

El párrafo 8.2(8) indica que este cálculo de reducción de la resistencia de los parámetros del terreno se puede combinar con un cálculo de reducción de la resistencia de las estructuras para identificar mecanismos de colapso críticos de fallos combinados de estructura y terreno.

Procedimiento alternativo para la verificación aplicando factores a los datos

Con este procedimiento alternativo, para realizar la verificación “geotécnica” el cálculo se acomete con los valores de proyecto, es decir, se aplican los factores M2 al inicio del cálculo. Para que se verifique el ELU el sistema ha de permanecer en equilibrio sin que se produzca el fallo de la estructura. El empleo de este procedimiento requiere que se considere el efecto de emplear valores de proyecto durante el cálculo al evaluar la exactitud de las simulaciones (cláusula 8.2[7]).

En cuanto al procedimiento concreto de cálculo, en principio sería posible emplear tanto el método de

reducción de parámetros resistentes, cuyo resultado tendría que ser igual o superior a uno para que el problema resultase estable, como un cálculo elastoplástico (enfoque directo).

Procedimiento para la verificación aplicando factores a los resultados

Al igual que con el procedimiento recomendado para la verificación aplicando factores a los datos, esta verificación se realiza con los valores representativos de las propiedades de los materiales y se aplican los factores parciales a las acciones, en este caso con la combinación VC4.

Pero, a diferencia con esa comprobación, esta verificación “estructural” es similar a la comprobación de un estado límite de servicio, proporcionando esfuerzos “realistas” a los que a posteriori se les aplican los factores parciales correspondientes a los efectos de las acciones (γ_e), obteniendo de esta forma los valores de proyecto para la comprobación de las estructuras.

Por ello, el procedimiento concreto de cálculo sería un cálculo elastoplástico como corresponde a un análisis de tipo ELS. Con otro tipo de análisis, como el de reducción de parámetros resistentes, no se obtendrían los esfuerzos realistas buscados.

Fases constructivas

En el contexto de un cálculo elastoplástico por fases, la tabla [8.1] del nuevo Eurocódigo 7 recoge que para cada fase de construcción se han de realizar las verificaciones descritas para los casos de aplicar factores a los datos o a los resultados.

5.3. Verificación del modo de fallo crítico

Una diferencia notable con respecto a los métodos analíticos o empíricos es que con el procedimiento general de cálculo con métodos numéricos del nuevo Eurocódigo 7 únicamente será necesario verificar el estado límite crítico que resulte del cálculo con el enfoque dual adoptado para los métodos numéricos, frente a la tradicional verificación de los diversos estados límite teóricos.

En este sentido, el párrafo 4 de la cláusula 8.2 del borrador de la futura segunda generación del Eurocódigo 7 establece que “cuando se emplee un modelo numérico que implícitamente determine el mecanismo de fallo crítico, se podrá omitir la verificación explícita de mecanismos de fallo específicos”.

5.4. Verificación de modos de fallo particulares

El borrador del Eurocódigo 7 indica que con el método de aplicar factores a los datos se verifica el estado límite último geotécnico, pero no se proporciona necesariamente el mismo grado de seguridad frente a la ocurrencia de mecanismos de fallo particulares. En los casos en los que se requiera verificar un modo de fallo particular, se pueden comparar los valores de proyecto de los resultados del cálculo con las resistencias geotécnicas. Para ello se propone que se obtengan las resistencias geotécnicas forzando a las estructuras geotécnicas a que fallen por el mecanismo

particular buscado, si bien esto sólo se puede realizar en algunos casos. En los casos en que sí sea posible, la diferencia entre el estado actual y el estado límite último se considera una medida del factor de seguridad.

Si bien el concepto es claro, la forma en que se ha de realizar no siempre resulta evidente o posible. Lees (2013) diferencia entre aquellas estructuras sobre las que se aplican cargas exteriores, como pueden ser las zapatas en las que se puede forzar el fallo de una forma relativamente directa, de aquellas estructuras sobre las que mayoritariamente actúan cargas geotécnicas (por ejemplo, sería el caso de los empujes de tierra en muros enterrados), en las que no queda claro dónde aplicar esa fuerza o desplazamiento virtual que ocasione el modo de fallo buscado.

6. ASPECTOS QUE HAY QUE DESTACAR EN LA VERIFICACIÓN DE LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS POR MÉTODOS NUMÉRICOS

Salgado (2020) analiza algunas de las decisiones tomadas en la fundación de la ingeniería geotécnica como disciplina, cuyas implicaciones resultan relevantes para la práctica geotécnica. Estas medidas son el uso de los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y de Tresca para modelizar la resistencia a corte, el empleo de una ley de fluencia asociada en estos modelos y no considerar el fenómeno de localización de las deformaciones.

Estos aspectos tienen en común que son los que se consideran recurrentemente en los cálculos realizados por métodos clásicos, pese a que suponen fuertes restricciones que tienen una influencia directa en el resultado. Esto plantea la siguiente cuestión respecto a los cálculos numéricos: si los estados límite últimos, como situaciones ficticias que son, contemplan estos aspectos como incertidumbres recogidas en los factores parciales, entonces es válido realizar su verificación con esas simplificaciones o, por el contrario, si para la verificación de los estados límite últimos es preferible emplear modelos más avanzados sin esas limitaciones aunque, de resultas de mantener los mismos factores parciales, los diseños queden más del lado de la seguridad que lo exigido normativamente.

Bajo este epígrafe se analiza cómo estas y otras cuestiones influyen en la verificación de los estados límite últimos.

6.1. Modelo constitutivo

El empleo de métodos numéricos permite utilizar modelos constitutivos más avanzados, no obstante, en el borrador del futuro Eurocódigo 7-1 se indica que los modelos simples pueden proporcionar resultados más fiables que los modelos complejos (nota a la cláusula 7.1.4[2]), puesto que en ellos también influye la calidad de los valores representativos adoptados como parámetros de entrada.

En cualquier caso, no es posible modelizar el comportamiento real de un suelo empleando un modelo elástico lineal-plástico perfecto con criterio de rotura de tipo Mohr-Coulomb (o Tresca) con una ley de fluencia asociada. Sin embargo, en general, estas son las hipótesis que se contemplan en las formulaciones analíticas clásicas. Por otro lado, la consideración de una ley no asociada llevaría consigo una serie de escollos no menores, como son la no unicidad de la solución y la proclividad a la localización de las deformaciones.

6.2. Ley de fluencia no asociada

Algunos autores plantean que la ley de fluencia afecta principalmente a problemas con un alto “grado de confinamiento cinemático”, si bien no establecen cómo se ha de cuantificar este confinamiento. Así, Houlsby (1991) indica que, cuanto más cinemáticamente confinado esté el suelo, más importante será la dilatación. Y, de forma similar, Vermeer y Borst (1984) señalan que, en los problemas cinemáticamente confinados, un material más dilatante implica una mayor carga de hundimiento, puesto que si el material puede fluir libremente a una superficie adyacente se observará un comportamiento más rígido para el material más dilatante, pero virtualmente no afectará a la carga última.

En realidad, de acuerdo con Krabbenhøft *et al.* (2012), la ley de fluencia siempre tiene un efecto significativo en la carga última y la consideración de plasticidad asociada o no asociada afecta consecuentemente al resultado que se obtenga.

La reducción de la resistencia última que se produce al introducir la no asociatividad se puede asimilar a considerar un factor parcial adicional al requerido por la normativa. Puesto que la normativa formula, en general, las comprobaciones analíticas para la verificación de los estados límite últimos geotécnicos sobre la base de un criterio de rotura de Mohr-Coulomb (o Tresca), con plasticidad asociada, es razonable considerar que esta circunstancia esté recogida y los valores de los factores parciales ya lo contemplen, sin necesidad de aumentar su valor, pues de otro modo se obtendría una solución excesivamente conservadora con respecto al requisito normativo y, por tanto, daría lugar a diseños antieconómicos.

Así, mientras que para la verificación de los ELS se debe recurrir a un modelo constitutivo que produzca resultados realistas, para la verificación de los ELU geotécnicos empleando los factores parciales indicados por la normativa es razonable emplear un modelo más sencillo coherente con los métodos analíticos o semiempíricos de resolución que proponen las normas geotécnicas, pues es basándose en los principios con los que se definen estos métodos que se establecen los factores parciales. En concreto, la consideración de plasticidad asociada en todos esos métodos refuerza la idea, por coherencia con los valores de los factores parciales, de que también se realice la verificación de los ELU con esta consideración.

Sin embargo, la combinación complementaria en la verificación de los estados límite últimos, en la que se aplican factores a los resultados, es equivalente a un análisis de tipo ELS, siendo entonces posible adoptar dos modelos distintos para la verificación de los estados límite últimos por métodos numéricos, uno con plasticidad asociada para la verificación en la que se afectan los datos y otro con plasticidad no asociada para la verificación en la que se afectan los resultados, a similitud con el cálculo en servicio. El mismo modelo constitutivo que se emplee para la verificación del estado límite de servicio para obtener resultados realistas se emplearía para la verificación del enfoque de afectar los resultados, mientras que para la verificación del enfoque en el que se afectan los datos se puede emplear un modelo en rotura más sencillo, como podría ser el de Mohr-Coulomb.

Por tanto, y a diferencia con la verificación de los estados límite últimos empleando métodos analíticos, para

realizar esta verificación con métodos numéricos es necesario conocer también los parámetros de rigidez, puesto que así lo requiere el enfoque de afectar los resultados.

6.3. Localización y no unicidad de la solución

La localización es el fenómeno por el cual, al someter a una muestra a un estado tensional creciente, se produce una concentración de deformaciones en unas bandas (similares a superficies de deslizamiento), denominadas bandas de corte o de deformación tangencial, en lugar de obtenerse un campo homogéneo de tensiones. Se trata de un fenómeno conocido que se empezó a estudiar a mediados de los años setenta del pasado siglo en artículos como los de Rice (1976) o Vardoulakis *et al.* (1978).

Desde el punto de vista matemático, considerar una ley de fluencia no asociada provoca que, en un estado tensional característico, las ecuaciones de gobierno viren de un problema elíptico a uno hiperbólico. De acuerdo con Vardoulakis (2006), antes de que se produzca la localización, las ecuaciones son elípticas y excluyen las soluciones discontinuas, mientras que al comienzo de la localización las ecuaciones cambian a ser de tipo hiperbólico. Desde el punto de vista físico, esta pérdida de elipticidad refleja una inestabilidad por la evolución de un modo de deformación homogéneo a uno localizado definido por una o más bandas de corte (Krabbenhøft *et al.*, 2012).

Estas bandas de deformación intensa no son planos, puesto que tienen un espesor finito, es decir, contienen un cierto número de partículas de suelo (macroescala) que interactúan entre sí de acuerdo al comportamiento constitutivo del suelo. Aunque es un tema ampliamente investigado a partir de los años 70, como orden de magnitud, se puede indicar de acuerdo con Salgado (2020) que este espesor, para el caso de arenas, es del orden de 5 veces el tamaño medio de las partículas en el caso de estructuras con interfaces rugosas y del orden de 10 veces en el caso de bandas de corte contenidas íntegramente en el terreno.

La localización es un fenómeno que se observa en la naturaleza y se ha reproducido en laboratorio en ensayos

biaxiales. Por ejemplo, Alshibli y Sture (2000) analizan en distintas muestras de arena cómo el comportamiento tenso-deformacional depende fuertemente de la densidad, la presión de confinamiento, la textura del grano y también del modo último de fallo resultante, y se manifiesta en los diferentes grados de reblandecimiento que se obtienen como respuesta en varios niveles de deformación axial. En la figura 3 se muestran algunos resultados de estos ensayos con diferentes niveles de deformación.

Cuando se emplea una ley de fluencia no asociada no se puede garantizar la unicidad de la solución (Pietruszczak, 2010), por lo que existirán múltiples soluciones, y si bien todas ellas satisfacen las ecuaciones de gobierno, cada una implica una carga límite diferente asociada a una banda de corte (Krabbenhøft, 2019). En consecuencia, en las curvas tensión-deformación obtenidas por métodos numéricos basados en mecánica del continuo clásica considerando una ley de fluencia no asociada se observa en un cierto momento un reblandecimiento aparente que es consecuencia directa de emplear una ley no asociada y no un reblandecimiento del material ni un problema numérico.

Para que un modelo numérico diera lugar a anchos de banda de cortante y curvas tensión-deformación (o fuerza-desplazamiento) físicamente realistas sería necesario introducir en dichos modelos los conceptos asociados a la llamada mecánica del continuo de alto orden. La mecánica del continuo de alto orden incluye una escala de longitud del material relacionada con la estructura granular del material. Ejemplos de este tipo de mecánica del continuo son los modelos de Cosserat y de gradiente o los modelos no locales. En Vardoulakis (2006) aparecen múltiples referencias a trabajos que han utilizado mecánica del continuo de alto orden.

En la figura 4 se esquematiza la curva tensión-deformación correspondiente a la modelización de un ensayo biaxial con un modelo constitutivo que emplea una ley de fluencia no asociada, donde se han representado diferentes posibilidades de localización de deformaciones en bandas. El fenómeno de la localización se manifiesta conforme progresan las tensiones de corte con una bifurcación

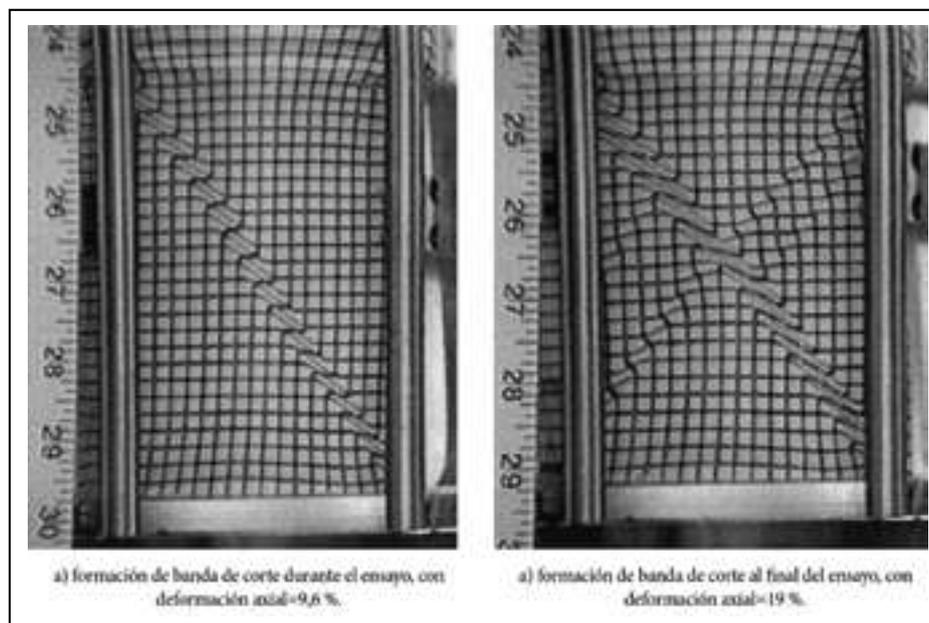


Figura 3. Formación de bandas de corte en ensayos biaxiales (Alshibli y Sture, 2000).

en la rama plástica que provoca una caída súbita de la resistencia, a modo de un reblandecimiento aparente, asociada con un modo de deformación que es no-homogéneo en una macroescala por el que se originan las mencionadas bandas de corte (Pietruszczak, 2010). Conforme siguen evolucionando las tensiones de corte, el suelo tenderá a debilitarse en la localización donde se ha iniciado el proceso (Salgado, 2020).

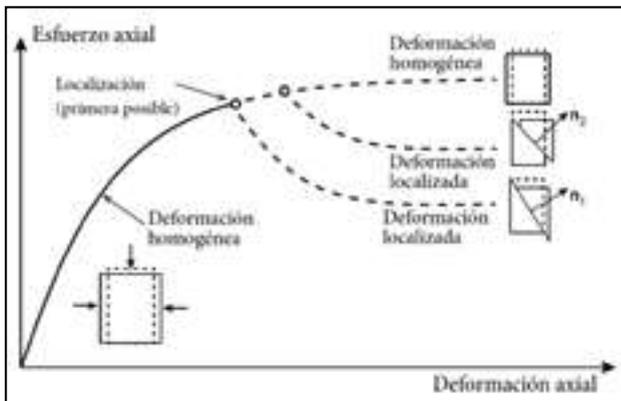


Figura 4. Formación de bandas de corte (adaptado de Krabbenhøft, 2019).

Por ejemplo, Nordal (2008) analiza el caso del empuje de tierras con un modelo Mohr-Coulomb con plasticidad asociada y no asociada y encuentra que en este último caso el mecanismo de fallo no es único, sino que va variando

conforme se avanza en el proceso de carga, como se muestra en la figura 5.

Lamentablemente, no existe una relación entre el fenómeno natural de localización y el numérico en medios continuos, pues su generación responde a distintos motivos, como pueden ser las imperfecciones a macroescala en el caso de una muestra real o la estructuración o alineación de la malla en el caso numérico. Por tanto, aunque matemáticamente se produzca localización, cuantitativamente no es comparable con lo observado en los experimentos, por lo que se puede decir que esta localización “numérica” obtenida por métodos numéricos no simula la localización que se produce en la naturaleza.

Existen otros métodos numéricos, como los modelos con partículas, que, a diferencia de las formulaciones clásicas del método de los elementos finitos basadas en la hipótesis de continuidad del medio, permiten modelizar de forma realista los medios discretos como son los materiales granulares. El objetivo de estos métodos es disminuir el grado de abstracción que suponen los medios continuos, pasando de la macroescala (continuo) a la mesoescala o incluso a la microescala (grano). Esto se consigue recurriendo a la representación matemática de la superficie de partículas de contorno arbitrario, como es el caso de los granos de arena. Con el empleo del método DEM (*Discrete Element Method*) es posible simular las bandas de corte, véase por ejemplo en Chen *et al.* (2011) la comparación entre los resultados experimentales y numéricos, como se muestra en la figura 6.

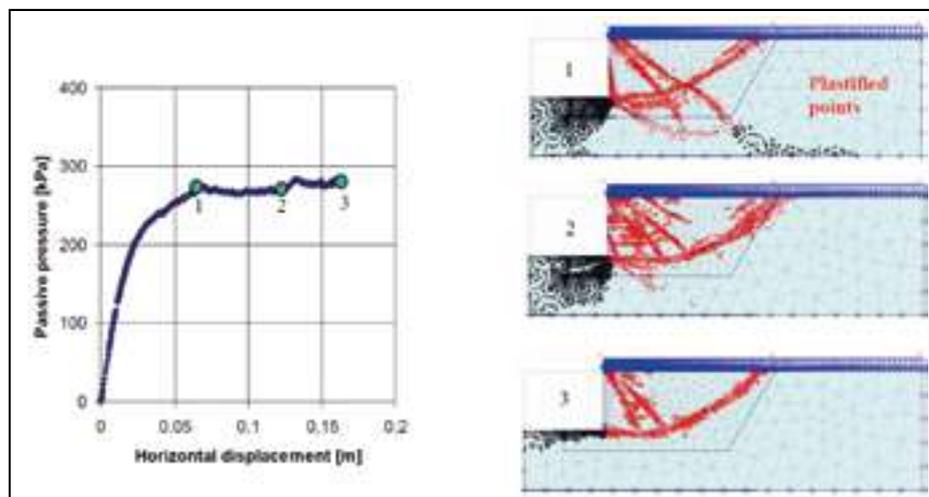


Figura 5. Variación del mecanismo de fallo en un modelo con plasticidad no asociada (Nordal, 2008).

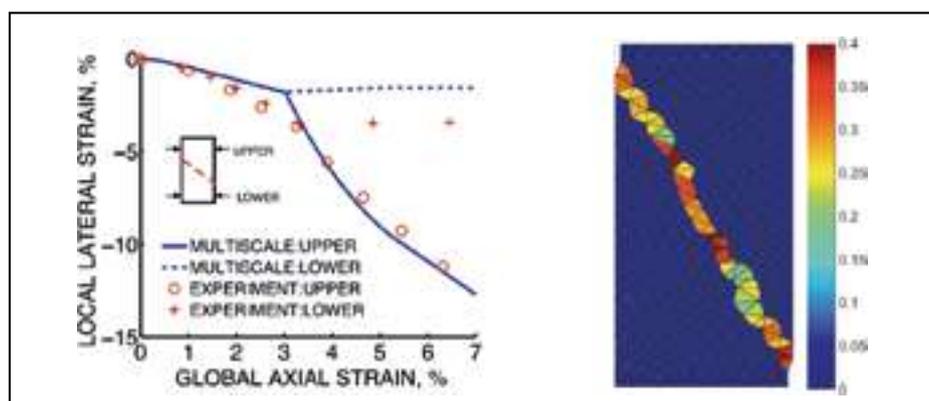


Figura 6. Simulación de un ensayo con el método de elementos discretos (Chen *et al.*, 2011).

6.4. Reducción en la carga de hundimiento al considerar plasticidad no asociada

La ley de fluencia tiene una influencia muy relevante en la determinación de la carga última, cuya reducción es debida, según Krabbenhøft (2019), a dos motivos, como son:

- La tendencia de las leyes de fluencia no asociadas a inducir localización, que implica, en general, que los estados límite últimos vendrán gobernados por estados de tensión y deformación altamente localizados.
- La ley de fluencia impone ciertas restricciones en la cinemática de las bandas de corte que en los casos no asociados da lugar a una reducción en la capacidad de soporte.

En el caso del criterio de rotura de Mohr-Coulomb, la reducción en la carga última depende de la diferencia entre el ángulo de rozamiento y el ángulo de dilatancia (denominada grado de no-asociatividad, $\Lambda = \phi' - \psi$), al igual que de la magnitud de ambos ángulos. De esta forma, la reducción se hace mayor conforme el grado de no asociatividad aumenta y, para una diferencia dada, la reducción normalmente aumenta con valores mayores de estos ángulos. Por ejemplo, el par de valores $\{\phi', \psi\} = \{40^\circ, 10^\circ\}$ da lugar a una mayor reducción en la capacidad de soporte que el conjunto $\{\phi', \psi\} = \{30^\circ, 0^\circ\}$ (Krabbenhøft, 2019).

Para ver cómo el efecto de la no asociatividad induce que la localización de las bandas de corte se desplace durante el proceso de carga, lo que tiene su reflejo en una cuña de rotura oscilante en el cálculo de la capacidad

de soporte, se muestra en la figura 7 el problema de una cimentación corrida en la configuración denominada “problema N_c ” (terreno sin peso específico y sin sobrecarga lateral), donde se observa (Krabbenhøft *et al.*, 2012):

- Que la solución asociada es más rígida, exceptuando el primer tramo inicial donde la respuesta es puramente elástica.
- Que la no asociatividad conduce a una disminución significativa en la carga última.
- Que la respuesta carga-desplazamiento en el caso no asociado presenta un comportamiento oscilatorio más allá de un cierto valor del desplazamiento. Estas oscilaciones son una consecuencia de la no-unicidad de la solución del problema y se manifiestan como variaciones en el modo de fallo a partir del momento en que se agota por primera vez la capacidad de carga de la estructura (en la figura se corresponde aproximadamente con $u=0,05$).

Loukidis y Salgado (2009) analizan el “problema N_γ ” (material con peso específico, sin cohesión y sin sobrecarga lateral) y el “problema N_q ” (material sin peso específico, sin cohesión y con sobrecarga lateral) para establecer los efectos que en la carga de hundimiento supone la no asociatividad y concluyen que las soluciones tradicionales de la carga de hundimiento para arenas sin cohesión que consideran $\psi = \phi'$ producen resultados inseguros (figuras 8 y 9), con diferencias que alcanzan incluso el 45 % con ángulos de rozamiento elevados.

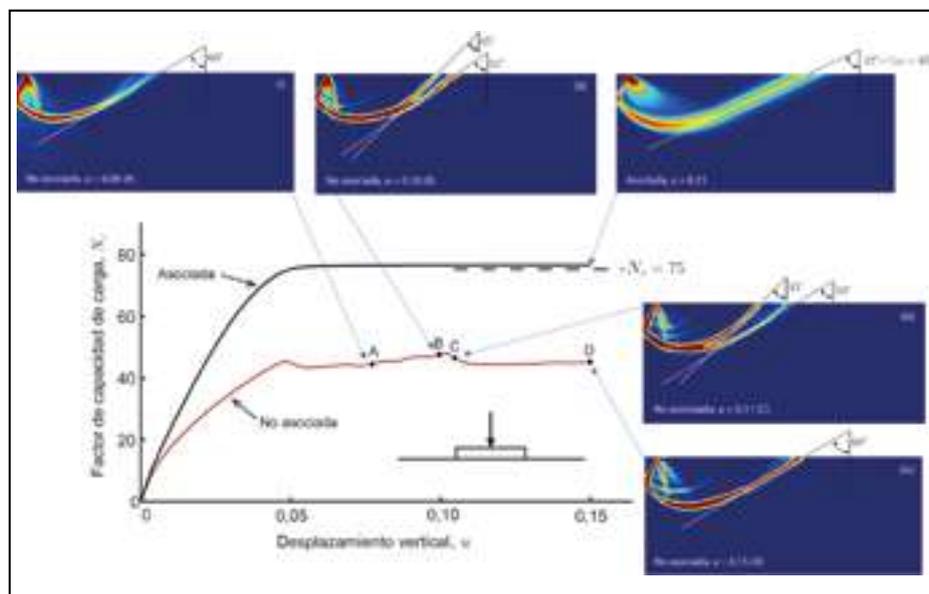


Figura 7. Formación de bandas de corte en el proceso de obtención de la carga última de un problema tipo N_c ($\gamma=0$; $\phi'=40^\circ$; $\psi=10^\circ$) (adaptado de Krabbenhøft *et al.*, 2012).

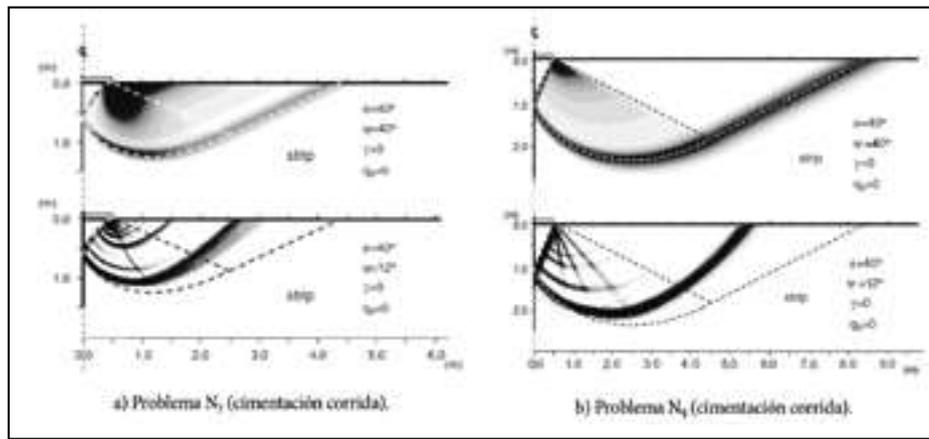


Figura 8. Efecto de la no asociatividad en la obtención de la carga última en problemas tipo N_γ y N_q . La línea de puntos discontinuos muestra la solución con plasticidad no asociada obtenida por el método de las características (Loukidis y Salgado, 2009).

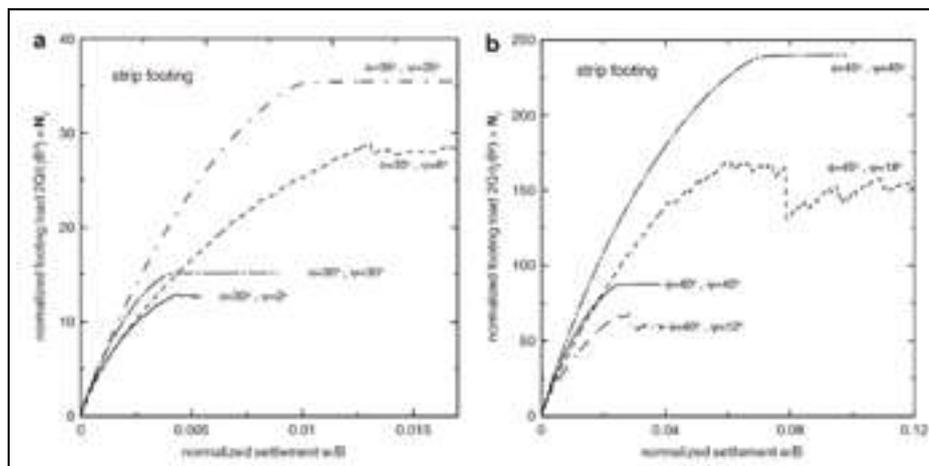


Figura 9. Efecto de la no asociatividad en la obtención de la carga última de un problema tipo N_γ para diferentes valores de ϕ' y ψ , cimentación corrida (Loukidis y Salgado, 2009).

Parámetros reducidos: corrección de Davis

Una forma de evitar la localización y la consecuente falta de unicidad en la solución consiste en emplear unos parámetros resistentes reducidos tales que al introducirlos en un cálculo considerando una ley de fluencia asociada el resultado que se obtenga sea teóricamente comparable al de un cálculo con los parámetros originales y plasticidad no asociada.

La expresión que obtiene Davis (1968) del factor de corrección β con el que hay reducir el ángulo de rozamiento interno y la cohesión en el caso de un modelo de rotura Mohr-Coulomb es función del ángulo de dilatación ψ y del ángulo de rozamiento interno ϕ' y se expresa como:

$$\beta = \frac{\cos \psi \cdot \cos \phi'}{1 - \sin \psi \cdot \sin \phi'} \quad [1]$$

A partir de esta expresión, los valores corregidos c^* y ϕ^* de los parámetros resistentes efectivos c' y ϕ' se obtienen como:

$$c^* = \beta \cdot c' \quad [2]$$

$$\tan \phi^* = \beta \cdot \tan \phi'$$

El valor de β se reduce conforme disminuye el valor de ψ , tiene un valor uno en el caso de plasticidad asociada ($\psi = \phi'$) y menor de uno en el resto de casos. De este modo, la corrección de Davis, que aplica por igual a ϕ' y a c' , se podría asimilar a introducir en el cálculo un factor parcial de seguridad adicional al del material indicado por la normativa.

La variación del valor del factor de corrección β en función del ángulo de rozamiento interno y del grado de no-asociatividad se muestra en la figura 10.

Si se considera un material granular y se adopta el criterio habitual en el cálculo numérico para definir el ángulo de dilatación cuando no se tienen datos, esto es, considerándolo treinta grados menor que el ángulo de rozamiento interno, con un valor mínimo de cero:

$$\psi = \max\{(\phi' - 30); 0\} \quad [3]$$

se observa que la relación entre el ángulo de rozamiento interno y el ángulo de rozamiento con la corrección de Davis es aproximadamente constante con un valor 1,128 para valores iguales o superiores a 30°, como se muestra en la tabla 8.

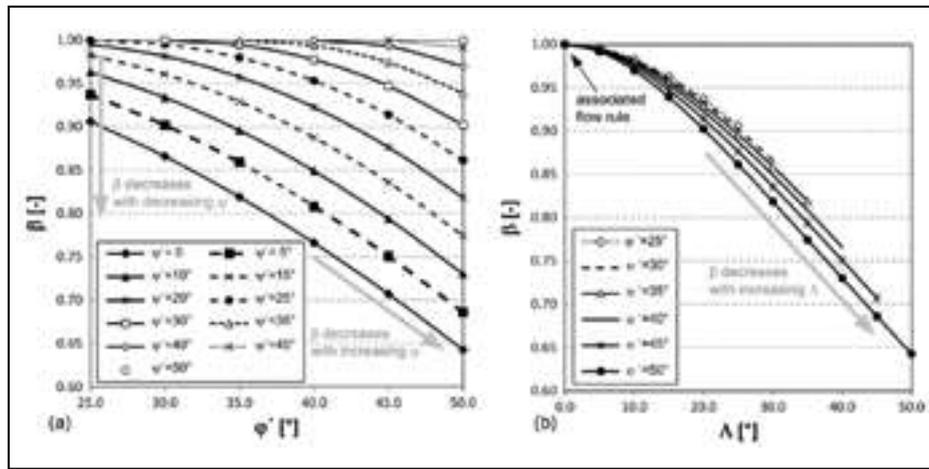


Figura 10. Variación del factor de corrección de Davis (Tschuchnigg *et al.*, 2015b).

Tabla 8. Relación entre el ángulo de rozamiento interno y el corregido de acuerdo con Davis

SIN CORRECCIÓN DAVIS			CON CORRECCIÓN DAVIS			
ϕ' [°]	$\tan \phi'$ [-]	$\psi = \phi' - 30$ [-]	β [-]	$\tan \phi^*$ [-]	ϕ^* [°]	ψ^* [°]
45	1.0000	15	0.8360	0.8360	39,90	39,90
40	0.8391	10	0.8492	0.7126	35,47	35,47
35	0.7002	5	0.8590	0.6015	31,03	31,03
30	0.5774	0	0.8660	0.5000	26,57	26,57
25	0.4663	0	0.9063	0.4226	22,91	22,91
20	0.3640	0	0.9397	0.3420	18,88	18,88
15	0.2679	0	0.9659	0.2588	14,51	14,51

6.5. Empleo de plasticidad no asociada en el método de reducción de parámetros resistentes

Sobre el problema de la estabilidad de taludes empleando el método de reducción de parámetros resistentes, Tschuchnigg *et al.* (2015a, b y c) realizan una serie de artículos relacionados con su cálculo considerando plasticidad asociada o no, y el empleo de la corrección de Davis como una forma de tener en cuenta la no asociatividad en cálculos con plasticidad asociada. De los resultados que obtienen concluyen que, cuando se emplea una ley de fluencia no asociada, la superficie de rotura tiende a propagarse a lo largo de los límites de los elementos y se producen fuertes oscilaciones del factor de seguridad durante el proceso de reducción de parámetros, lo que es consecuencia de la no unicidad del mecanismo de fallo, haciendo difícil o sencillamente imposible definir un factor de seguridad único. En la figura 11 se muestra la variación que obtienen del

factor de seguridad conforme aumenta el grado de no-asociatividad, $\Lambda = \phi' - \psi$.

Parámetros reducidos: corrección de Davis

Al igual que se analizó para el caso de la carga de hundimiento, la consideración de una ley de fluencia no asociada se puede simular en un cálculo con plasticidad asociada empleando los parámetros reducidos derivados de la corrección de Davis (1968).

Si se considera por simplicidad la expresión de Fellenius original, según la cual el factor de seguridad de la estabilidad de un talud se define como:

$$FS_k = \frac{\sum_i [c'_{k,i} \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_{k,i}]}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad [4]$$

Al introducir la corrección de Davis la expresión quedaría:

$$FS^* = \frac{\sum_i [c_i^* \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi_i^*]}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad [5]$$

siendo c^* y ϕ^* los valores corregidos de los parámetros resistentes originales c' y ϕ' .

Suponiendo la simplificación habitual que en cada paso del cálculo ϕ' , c' y ψ son constantes en todo el dominio, resulta:

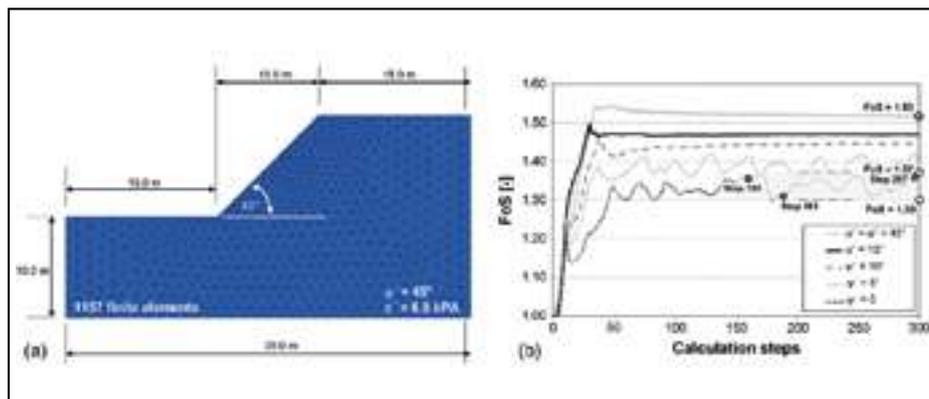


Figura 11. Factor de seguridad obtenido variando el grado de no-asociatividad (Tschuchnigg *et al.*, 2015b).

$$FS_k = \frac{FS^*}{\beta} = \frac{\sum_i [c'_{k,i} \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi'_{k,i}]}{\sum_i W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad [6]$$

De esta expresión se desprende que al introducir la no asociatividad el factor de seguridad siempre se reduce, salvo en el caso $\beta=1$, es decir, cuando $\phi'=\psi$, de acuerdo con los valores de β obtenidos en la figura 10.

Por tanto, aunque algunos autores indican que el cálculo de la estabilidad de taludes se corresponde con un problema con un bajo “grado de confinamiento cinemático”, en el que supuestamente la no asociatividad tendría una influencia menor, o lo asocian con una pendiente más o menos pronunciada, en realidad, el introducir una ley de flujo no asociada reduce siempre el factor de seguridad. Además, una ley tal previene la unicidad de la solución por la localización de la deformación, por lo que resulta difícil establecer con certeza el factor de seguridad del problema.

6.6. Elección del ángulo de rozamiento interno

Las características resistentes y de rigidez de los materiales granulares cargados en deformación plana pueden ser considerablemente diferentes de los que se observan en ensayos triaxiales convencionales (axisimétricos), siendo estos ensayos una simplificación del estado *in situ* del terreno (Alshibli y Sture, 2000).

En general, si se emplean parámetros resistentes obtenidos de ensayos triaxiales axisimétricos en cálculos en deformación plana, se tendrán resultados del lado de la seguridad. Existen diferentes propuestas para corregir el ángulo de rozamiento triaxial cuando se emplea en cálculos de tensión plana, como la de Kulhawy y Mayne (1990) que consideran que en los materiales granulares el ángulo de rozamiento en deformación plana es un 12 % mayor que un triaxial en compresión.

Cuando se analizó la corrección de Davis para tener en cuenta la no-asociatividad en cálculos con plasticidad asociada, se vio que para valores del ángulo de rozamiento interno iguales o superiores a 30° manteniendo el ángulo de dilatación 30° menor era equivalente a reducir el ángulo de rozamiento por un valor de 1,128. Este valor es similar al que supone, según Kulhawy y Mayne (1990), la corrección del ángulo de rozamiento para los cálculos en deformación plana cuando se emplea el valor obtenido en un ensayo triaxial en compresión, que cuantifican en un 12 % superior, por lo que si se introducen ambos efectos en un cálculo se anularían entre sí. En cualquier caso, es una indicación de que el orden de magnitud que supone no considerar una ley de fluencia no asociada puede ser equivalente al que resulta de emplear un ángulo procedente de un ensayo triaxial en un cálculo de deformación plana.

Por tanto, es importante que en los cálculos (numéricos y analíticos) se adopte el valor del ángulo de rozamiento interno correcto, en función del tipo de ensayo que se emplee para su estimación, ya que no hacerlo puede suponer una diferencia similar a la de adoptar una ley de fluencia asociada.

7. CONCLUSIONES

El procedimiento general que recoge el borrador de la segunda generación del Eurocódigo 7 para verificar los

estados límite últimos por métodos numéricos contempla que únicamente sea necesario comprobar el modo de fallo crítico que se obtiene automáticamente del cálculo. Se requiere realizar dos verificaciones independientes, una que, en general, gobernará el diseño geotécnico, en la que introducen factores a las acciones y a los parámetros resistentes de los materiales presentes en el modelo previamente a realizar el cálculo mediante el procedimiento recomendado de reducción de parámetros resistentes o el alternativo en el que el sistema tiene que seguir estando en equilibrio cuando se realice el cálculo de tipo elastoplástico con los factores aplicados *a priori*, y otra complementaria, que en general gobernará el diseño estructural, en la que se introducen *a posteriori* factores a los efectos de las acciones resultantes del cálculo realizado como si se tratase de un estado límite de servicio.

Si bien el procedimiento general que hay que seguir queda perfectamente definido, no obstante, existe una serie de circunstancias derivadas de tener que llevar al sistema a un estado de colapso plástico inminente que han de tenerse en cuenta. Una de ellas es la elección del modelo constitutivo y su ley de fluencia, puesto que adoptar una ley no asociada lleva aparejada la no unicidad de la solución por la localización de la deformación en distintas bandas de corte variando el modo de fallo conforme el proceso evoluciona de uno elíptico a otro hiperbólico con bifurcaciones en la rama plástica. Por otro lado, el adoptar una ley de fluencia asociada no responde al comportamiento real de los suelos y se obtienen valores del lado de la inseguridad respecto a los equivalentes resultantes de un cálculo considerando una ley de fluencia no asociada, si bien es la hipótesis que subyace en las verificaciones analíticas de los estados límite últimos, en las que se adoptan otra serie de simplificaciones que condicionan el resultado, como son el adoptar un criterio de rotura tipo Mohr-Coulomb o ignorar la localización por formación de bandas de corte.

Los coeficientes de seguridad son un reflejo de nuestras incertidumbres. Sus valores normativos se han establecido teniendo en mente la aplicación de soluciones analíticas (o semianalíticas) clásicas (es el caso de las cimentaciones o las estructuras de contención), o métodos simples de equilibrio límite (en el caso de taludes), puesto que son los métodos tradicionalmente empleados y que consideran como criterio de rotura el de Mohr-Coulomb (o Tresca) con plasticidad asociada. Puesto que los diseños han de satisfacer lo estipulado en las normas, en la comprobación de los estados límites últimos geotécnicos empleando métodos numéricos parece lícito considerar una ley de fluencia asociada, pues de otro modo, en general, se obtendría una solución que quedaría muy del lado de la seguridad con respecto al requisito normativo, lo que daría lugar a un diseño excesivamente conservador y antieconómico.

Consecuentemente, con el procedimiento general propuesto en el borrador del Eurocódigo 7 para la comprobación de los estados límite últimos por métodos numéricos, para la verificación geotécnica en la que se afectan los datos resulta razonable realizar el cálculo adoptando un modelo constitutivo con un criterio de rotura de Mohr-Coulomb y una ley de fluencia asociada, con la que se obtendrán resultados comparables a los analíticos (para el mismo caso de verificación), mientras que para la verificación estructural complementaria en la que se afectan los resultados se

ha de emplear un modelo constitutivo que prediga desplazamientos más realistas, con una ley de fluencia no asociada, puesto que se busca aumentar los esfuerzos obtenidos en un cálculo similar a una verificación de un estado límite de servicio.

8. AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer a Kristian Krabbenhøft sus comentarios sobre algunos aspectos clave de este trabajo, a José Estaire sus sugerencias referentes al Eurocódigo 7 y a Diego Manzanal y a José Manuel Gesto su implicación en la elaboración del artículo.

9. REFERENCIAS

Alshibli, K.A., y Sture, S. (2000). Shear Band Formation in Plane Strain Experiments of Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6): pp. 495-503. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:6\(495\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:6(495))

Chen, Q., Andrade, J.E., y Samaniego, E. (2011). AES for multiscale localization modeling in granular media. *Computers Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(33-36): pp. 2473-2482. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.04.022>

Davis, E.H. (1968). Theories of plasticity and the failure of soil masses. En: I.K. Lee (Ed.) *Soil Mechanics: Selected Topics* (pp. 341-380). Oxford: Butterworths.

Houlsby, G.T. (1991). *How the dilatancy of soils affects their behaviour*. Report Number OUEL 1888/91, Soil Mechanics Report Number 121/91. Oxford: University of Oxford, Department of Engineering Science.

Krabbenhøft, K. (ed.) (2019). OptumG2: Theory, Optum Computational Engineering. *Optum Computational Engineering*, Copenhagen.

Krabbenhøft, K., Karim, M.R., Lyamin, A.V., y Sloan, S.W. (2012). Associated computational plasticity schemes for non-associated frictional materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 90(9): pp. 1089-1117.

Kulhawy, F.H., y Mayne, P.W. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Report EPRI EL-6800s (p. 308). Electric Power Research Institute. Ithaca: Cornell University.

Lees, A.S. (2013). Using numerical analysis with geotechnical design codes. En P. Arnold, G.A. Fenton, M.A. Hicks, T. Schwec-kendiek y B. Simpson (eds.), *Modern Geotechnical Design Codes of Practice. Implementation, Application and Development* (pp. 157-170). Amsterdam: IOS Press.

Lees, A.S. (2017). Use of geotechnical numerical methods with Eurocode 7. *Engineering and Computational Mechanics*, 170(4): pp. 146-153. <https://doi.org/10.1680/jencm.17.00004>

Lees, A.S. (2019, September 1-6). Tomorrow's geotechnical toolbox: EN 1997-1:202x Numerical methods. *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Geotechnical Engineering, foundation of the future, Reykjavík, Iceland*.

Loukidis, D., y Salgado, R. (2009). Bearing capacity of strip and circular footings in sand using finite elements. *Computers and Geotechnics*, 36(5): pp. 871-879. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.01.012>

Nordal, S. (2008, October 1-6). Can we trust numerical collapse load simulations using non-associated flow rules? *The 12th International Conference of International Association for Compu-*

ter Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, pp. 755-762.

Pietruszczak, S. (2010). *Fundamentals of Plasticity in Geomechanics*, Vol. 1. Boca Raton: CRC Press.

Rice, J.R. (1976). The Localization of plastic deformation. *Proceedings of the 14th International Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Delft, 1976*, W.T. Koiter (ed.), Vol. 1, pp. 207-220.

Salgado, R. (2020). Forks in the Road: Rethinking Modeling Decisions that Defined the Teaching and Practice of Geotechnical Engineering. *International Conference on Geotechnical Engineering Education 2020 (ISSMGE 2020), Athens, Greece, 23-25 June 2020*.

Simpson, B., y Junaideen, S.M. (2013, May 29-31). Use of Numerical Analysis with Eurocode 7. *Proceedings of the 18th Southeast Asian Geotechnical Conference (18SEAGC) & Inaugural AGSSEA Conference (1AGSSEA), Singapore*.

Smith, C. (2022, July 7). Guidance on use of numerical methods in next generation of Eurocode 7. *The 2nd ISSMGE ERCTC10 Webinar on Numerical Methods in the next generation of Eurocode 7*.

Tschuchnigg, F., Schweiger, H.F., y Sloan, S.W. (2015b). Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part I: Numerical studies considering non-associated plasticity. *Computers and Geotechnics*, Vol. 70, pp. 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.06.018>

Tschuchnigg, F., Schweiger, H.F., y Sloan, S.W. (2015c). Slope stability analysis by means of finite element limit analysis and finite element strength reduction techniques. Part II: Back analyses of a case history. *Computers and Geotechnics*, Vol. 70, pp. 178-189.

Tschuchnigg, F., Schweiger, H.F., Sloan, S.W., Lyamin, A.V., y Raissakis, I. (2015a). Comparison of finite-element limit analysis and strength reduction techniques. *Géotechnique*, 65(4): pp. 249-257. <https://doi.org/10.1680/geot.14.P022>

Vardoulakis, I. (2006). Localization in geomechanics. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 3663-3668). Rotterdam: IOS Press.

Vardoulakis, I., Goldscheider, M., y Gudehus, G. (1978). Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2(2): pp. 99-128. <https://doi.org/10.1002/nag.1610020203>

Vermeer, P.A., y de Borst, R. (1984). Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, 29(3): pp. 1-64.

Normativa Técnica

prEN1990-2:202x (2020) prEN 1990-Sept-2020-Draft.
 prEN1997-1:202x (2019) CEN-TC250-SC7_N1330_
 prEN_1997-1_Geotechnical_design-General.
 prEN1997-2:202x (2020) CEN-TC250-SC7_N1376_
 prEN_1997-2_Geotechnical_design-Ground.
 prEN1997-3:202x (2019) CEN-TC250-SC7_N1373_
 prEN_1997-3_Geotechnical_design-Geotec.

La construcción de los túneles del proyecto Américo Vespucio Oriente 1 en Santiago de Chile

The Construction of the Tunnels of the Américo Vespucio Oriente 1 Project in Santiago de Chile

Manuel de Cabo^{1a*}, José M. Galera^{2a}, Daniel Santos^{3a}, Rodrigo Richmagüi^b, Luis Eusebio Íñigo^c, Luis Felipe García^c, Pedro Gómez^d, Martín Fernández^d, Alejandro Barrera^d, Juan Manuel Molina^d, María Marcos^d, José Vicente Cañas^d, José Ramón Alcalá^d, Antonio Escribano^d

Resumen

La “Concesión Américo Vespucio Oriente, tramo Av. El Salto-Príncipe de Gales” (AVO I) forma parte del ambicioso programa de asociación público-privado, impulsado por el Gobierno de Chile, a través del Ministerio de Obras Públicas, de cerrar en modalidad de autopista el Anillo de Circunvalación Américo Vespucio. AVO I, tras una década de análisis, incorporó en su diseño parte de las demandas e intereses de la comunidad de su área de influencia, trabajo realizado con municipios y organizaciones de la sociedad civil que se mantiene hasta el día de hoy.

El proyecto aborda el desafío de integrar en un espacio urbano una autopista subterránea de tres carriles por sentido, en una longitud de tronco de 8.278 m, de los que 7.678 m discurren en túnel. Considerando además la longitud de los ramales de conexión, el proyecto supone un total de más de 10 km de túnel urbano que se excavan principalmente en las gravas aluviales del río Mapocho.

La Sociedad Concesionaria Vespucio Oriente S.A -conformada por ALEATICA, S.A. y SACYR Concesiones Chile, Spa-, es la encargada de materializar la nueva vía expresa, que beneficiará a más de 50.000 usuarios diarios, al disminuir los tiempos de desplazamiento entre las comunas de Huechuraba y La Reina de 40 a 10 minutos en horario punta. Además, se contempla el rediseño del parque Vespucio, revitalizando esta área verde para todos los habitantes de la ciudad de Santiago.

AVO I, cuyo contrato de construcción lo abordan SACYR y OHLA, es, sin duda, la iniciativa de infraestructura pública más importante en ejecución, no sólo por su magnitud, sino también porque combina una serie de distintos métodos constructivos: viaducto, túnel artificial en trinchera cubierta, túnel minero y túnel híbrido, estos últimos a cargo de Subterra Ingeniería en lo que respecta a la ingeniería y asistencia técnica.

Las obras de construcción comenzaron en noviembre de 2017 y su puesta en servicio se realizó en junio de 2022.

Palabras clave: túnel urbano, túnel en suelo, sostenimiento, NATM, sistema constructivo, convergencia.

Abstract

The Américo Vespucio Oriente, section El Salto-Príncipe de Gales P3 project (AVO I) is part of an ambitious public-private partnership program, promoted by the Government of Chile, through its Ministry for Public Works, consisting of closing the Américo Vespucio ring road. After a decade-long assessment, AVO I incorporated part of the demands and requests of the communities within the project's influence area, a joint effort with the local administrations and civil society organizations still withstanding today.

This project tackled the challenge of integrating an underground highway with three lanes in each direction into an urban space, with a trunk length of 8,278 m, of which 7,678 m run in tunnels. Including the extension of secondary accessways, the project involved over 10 km of urban tunnels, mainly concentrated in the alluvial deposits of the Mapocho River.

The Vespucio Oriente S.A. P3 company (ALEATICA, S.A. and SACYR Concesiones Chile, Spa) is responsible for building the new expressway, that will impact the lives of over 50,000 daily users, by reducing travel times between Huechuraba and La Reina, from 40 to 10 minutes in rush hour. The project also included the redesign of Vespucio Park, revitalizing this garden space for all citizens of Santiago.

AVO I, a construction project by SACYR and OHLA, is undoubtedly the most important public infrastructure initiative in operation, not only for its scope, but also for the wide range of construction methods involved: Viaduct, cut and cover artificial tunnels, mine tunnels, and hybrid tunnels. The latter were executed by Subterra Ingeniería in the engineering and technical assistance regard.

Construction works started in November 2017, and the project was delivered in June 2022.

Keywords: Urban tunnel, underground tunnel, tunnel support, NATM, building techniques, convergence.

1. INTRODUCCIÓN

La “Concesión Américo Vespucio Oriente, Tramo Av. El Salto-Príncipe de Gales” (AVO I) forma parte del ambicioso programa de asociación público-privado,

impulsado por el Gobierno de Chile, a través del Ministerio de Obras Públicas, de cerrar en modalidad de autopista el Anillo de Circunvalación Américo Vespucio. La figura 1 muestra una planta general de situación del proyecto AVO I.

El proyecto aborda el desafío de integrar en un espacio urbano una autopista subterránea de tres carriles por sentido, en una longitud de 8.278 m, de los que 7.678 m discurren en túnel.

Desde el punto de vista de la tipología constructiva de las obras subterráneas, se pueden diferenciar los siguientes tres tramos:

- **Cruce del Cerro:** 2.100 m del túnel de La Pirámide y 415 m del túnel ramal Mapocho. Se trata de dos túneles en mina de 2 y 3 carriles y una caverna de bifurcación situados bajo el cordón del Cerro San Cristóbal. El túnel de La Pirámide cruza bajo el cauce del río Mapocho y la salida del ramal va adosada a las defensas del río. En esta zona, conectando con el túnel principal se ubica un pozo o pique de ventilación de 15 m de diámetro y 32,5 m de profundidad.
- **Tramo urbano en falso túnel:** 2.891 m de falso túnel en trinchera de pilotes habilitando dos niveles de plataforma subterráneos emplazados a lo largo de la bandeja central del bulevar que configura el actual parque central de la avenida Américo Vespucio. En este tramo se ubican siete ramales de entrada y salida en la concesión.
- **Tramo urbano en sección híbrida:** 2.687 m del túnel híbrido, configurado con un túnel con NATM en el nivel -1 y mediante pantalla de pilotes en el nivel -2. En este tramo se ubican dos ramales de salida y cinco de entrada, que se construyen principalmente en mina.



Figura 1. Planta de situación del Proyecto AVO1 (Fuente: Elaboración propia).

La figura 2 muestra un esquema con la distribución de estas tres tipologías constructivas adoptadas en el proyecto AVO I.

El proyecto supone un total de más de 10 km de túnel urbano que se excavan principalmente en las gravas aluviales del río Mapocho. Únicamente se interceptan materiales rocosos bajo el cerro San Cristóbal, constituidos por tobas y andesitas del Cretácico.

Las obras comenzaron en noviembre de 2017 y su puesta en servicio se realizó en junio de 2022.



Figura 2. Esquema general de la concesión AVO1 (Fuente: Elaboración propia).

* Autor de contacto: mdecabo@subterra-ing.com

¹ Ingeniero técnico de obras públicas.

² Doctor ingeniero de minas.

³ Ingeniero de caminos, canales y puertos.

^a Subterra Ingeniería.

^b MOP.

^c Sociedad Concesionaria AVO.

^d Constructora Vespucio Oriente (OHLA-SACYR).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto de la concesión AVO I abarca un conjunto de obras subterráneas muy diverso, con diferentes secciones tipo de túneles en mina y trincheras. El gálibo estándar del proyecto se podría identificar como aquel asociado a una plataforma de 3 carriles y que cuenta con 13,20 m de anchura. También la geología, geotecnia e hidrogeología del proyecto configuran diferentes escenarios a lo largo del trazado, como un macizo rocoso terciario en el paso a través de un cerro, el cruce bajo el río Mapocho o los materiales cuaternarios presentes en la zona más urbana del proyecto.

Se describen a continuación las principales características de las obras subterráneas del proyecto.

2.1. Datos geológicos

La ciudad de Santiago está emplazada principalmente en un llano conocido como "cuenca de Santiago". Esta cuenca forma parte de la Depresión Intermedia y está delimitada claramente por el cordón de Chacabuco por el norte, la Cordillera de los Andes por el este, las angosturas de Paine por el sur y la Cordillera de la Costa por el oeste.

En las zonas circundantes a la cuenca de Santiago, se pueden distinguir varias zonas de relieves pre-andinos pronunciados. El túnel de La Pirámide se emplaza en uno de estos relieves, conocido como el Cordón del Cerro San Cristóbal en el que se pueden distinguir (Aguirre, 1960) varios tipos de rocas volcánicas y continentales estratificadas de la Formación Abanico (Cretácico superior a Oligoceno). También están presentes algunos depósitos de rocas intrusivas del Mioceno. Finalmente, existen algunos depósitos cuaternarios no consolidados (aluvial, glacial, ceniza volcánica, sedimentos lacustres, etc.). Los tramos en trincheras de pilotes y la sección híbrida se emplazan en estos sedimentos, concretamente en la Unidad de Gravas del río Mapocho, formados por gravas de origen fluvial, pudiendo contener intercalaciones de depósitos volcánicos y destacando su elevada capacidad de soporte debido a su elevada compacidad y unión mecánica de partículas. Esta unidad tradicionalmente se ha dividido en dos niveles, la "2ª depositación" y la "1ª

depositación", siendo la principal diferencia entre ambas la mayor plasticidad de la fracción fina en el caso de la "1ª depositación", más antigua.

En la figura 3 se muestra el perfil geológico longitudinal del túnel.

Chile es uno de los países con mayor sismicidad del planeta, al encontrarse en el contacto de las placas de Nazca y Sudamericana, donde se produce la subducción de la primera bajo la segunda.

Para la cuantificación de las acciones sísmicas de diseño se han considerado las normas NCh 433-Of-96 y NCh 2475, así como el Manual de Carreteras, Volumen 3 (Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas). La Aceleración Máxima del Suelo obtenida es $A_0 = 0,3 \text{ g}$ y se ha considerado una Desangulación Sísmica de Diseño para las obras subterráneas de $\theta_s = 2,5 \times 10^{-4}$ para el túnel de La Pirámide y de $\theta_s = 3,5 \times 10^{-4}$ para las trincheras y sección híbrida.

Finalmente, el contexto hidrogeológico de la traza se encuentra conformado por la posición del nivel freático de Santiago, ubicada por debajo de la rasante de la traza, y por la existencia de niveles discontinuos de napas colgadas asociadas a niveles de gravas arcillosas en torno a los 20 a 25 m de profundidad. En la zona de cruce de la traza bajo el río Mapocho, el nivel freático también se ubica por debajo de la misma, existiendo una recarga natural del río al acuífero, pero de poca entidad dado que el cauce en esta zona se encuentra revestido.

2.2. Datos geotécnicos

Como se ha comentado, los materiales presentes en el emplazamiento se encuentran constituidos por un macizo rocoso convencional (Unidad Abanico) y por los depósitos cuaternarios de las Gravas del Mapocho. Para estimar las propiedades del macizo rocoso atravesado por el túnel se ha empleado la metodología habitual, consistente en la determinación de las propiedades de la roca intacta de todos los litotipos existentes para posteriormente minorarlas según distintos rangos de calidad geomecánica.

Respecto a las propiedades geotécnicas de las Unidades de Gravas del Mapocho de 1ª y 2ª depositación, se han

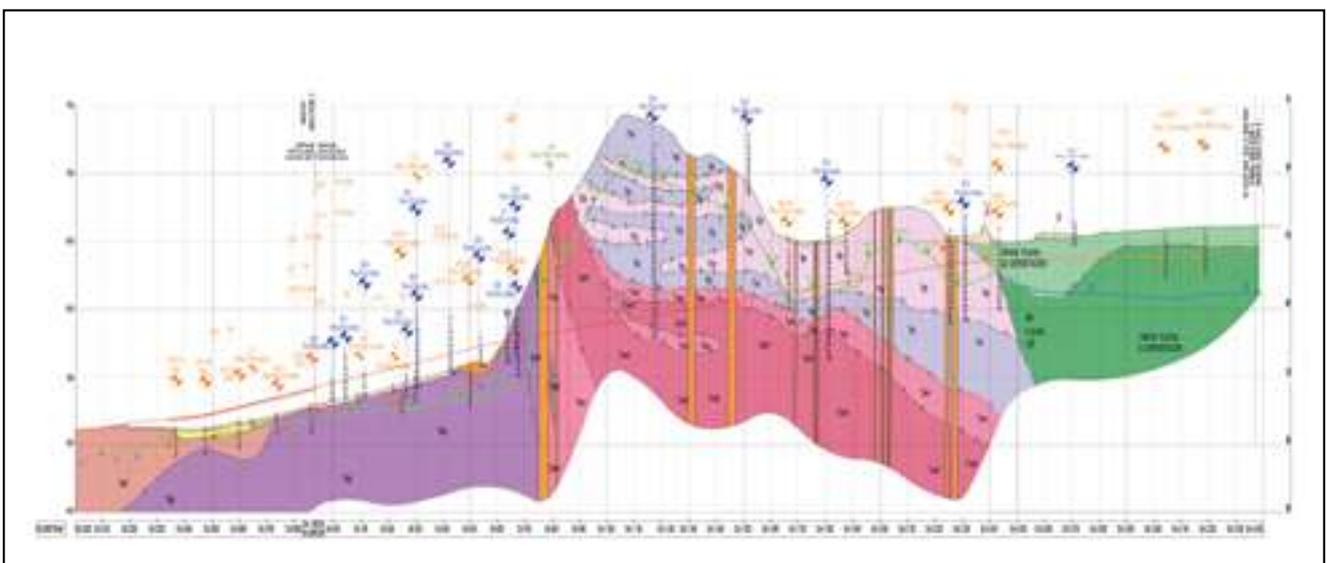


Figura 3. Perfil geológico longitudinal AVO1 (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 1. Parámetros geotécnicos. Unidades rocosas

Unidad	Coficiente Empuje K_0	Densidad kN/m^3	Módulo MPa	Cohesión kPa	Ángulo fricción
Rellenos	0,5	17,0	20	10	33
2ª Deposit.	0,65	22,5	100 ($Z \leq 5$) $42 \cdot Z^{0,55}$ ($5 < Z < 17$)	25	45
1ª Deposit.	0,65	22,5	$55 \cdot Z^{0,53}$ ($Z \geq 17m$)	35	48

Tabla 2. Parámetros geotécnicos. Suelos ($Z =$ profundidad)

RMR	Cobertera	Densidad kN/m^3	Módulo MPa	Cohesión MPa	Ángulo fricción
>65	155	25,5	5.522	1,7	55
55-65	155	25,5	3.168	0,9	50
45-55	120	25,5	1.291	0,4	41
35-45	110	25,5	838	0,3	38
<35	50	25,5	521	0,2	44

considerado las propiedades consensuadas en las numerosas publicaciones existentes acerca del Ripio de Santiago

Las tablas 1 y 2 muestran los parámetros geotécnicos considerados para cada unidad.

2.3. Descripción de soluciones constructivas

A lo largo de los 8 km de longitud de la concesión, los condicionantes, geométricos, geotécnicos, sociales, ambientales, etc., son muy diferentes. Por ello, incluso en lo referente a las obras subterráneas, las soluciones constructivas diseñadas adoptan muy diversas tipologías en lo que es el resultado de una interacción intensa entre las áreas de ingeniería y construcción. A continuación, se expone la configuración de las diferentes soluciones constructivas del proyecto.

2.3.1. Cruce del cerro

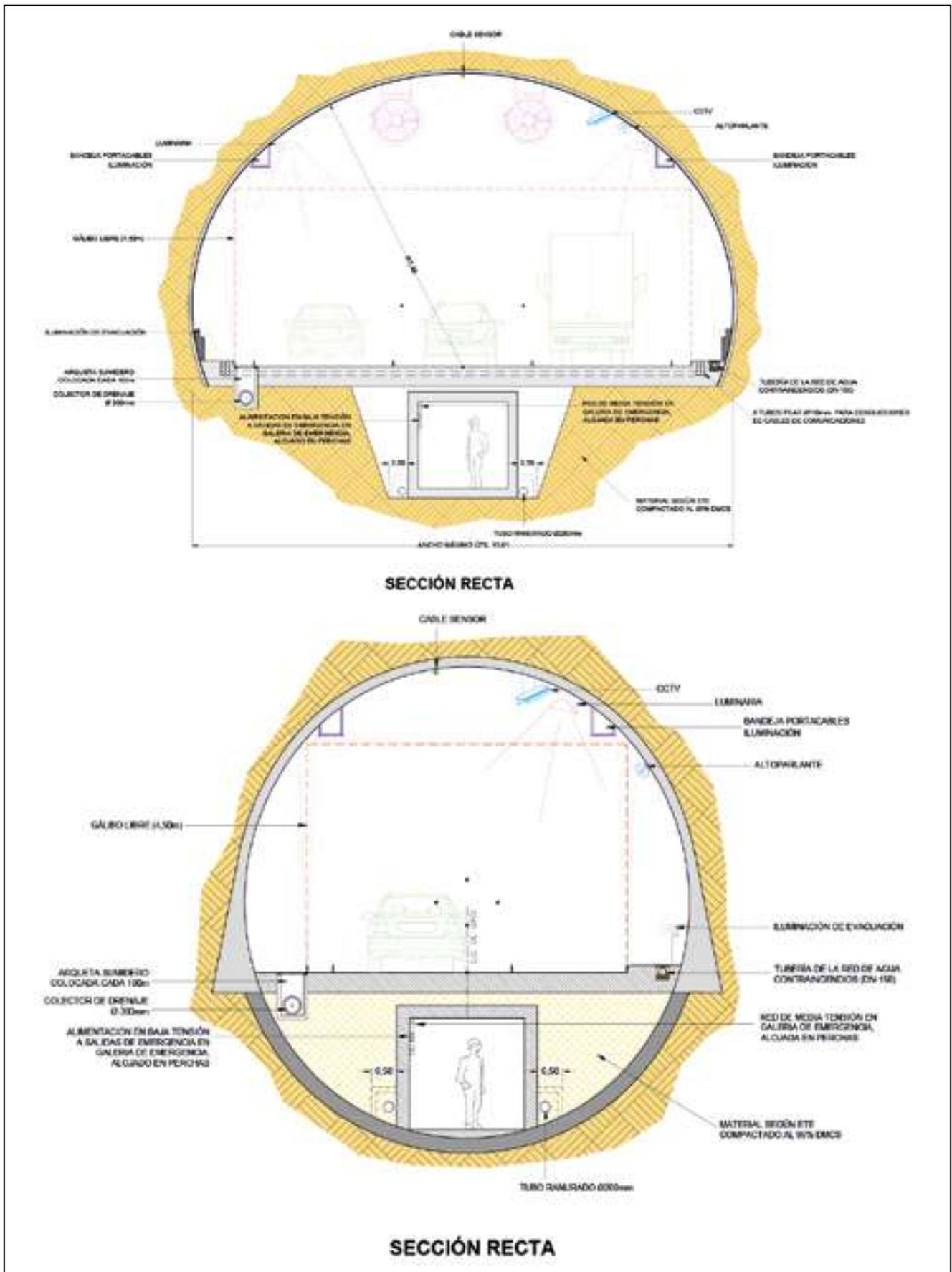
El paso bajo el cerro San Cristóbal supone atravesar un macizo rocoso de calidad media con recubrimientos máximos en el entorno de los 150 m y sin apenas presencia de edificaciones. Por ello, la solución constructiva adoptada corresponde a la de túnel en mina.

La sección funcional del túnel de La Pirámide aloja tres carriles de circulación de 3,50 m, arceles de 0,50 m y

aceras de 0,75 m, lo que configura una anchura útil total de 13,0 m. La sección funcional del túnel ramal del Mapocho aloja un carril de circulación de 3,50 m de ancho, bermas de 0,50 y 2,25 m de ancho y una acera 0,75 m., lo que configura una anchura útil total de 7,0 m. Se ha respetado un gálibo libre de 4,5 m. En las figuras 4 y 5 se muestra la sección funcional del túnel de La Pirámide y del túnel ramal del Mapocho.

La caverna de bifurcación se ha estructurado mediante cinco secciones tipo que proveen, de manera escalonada, el espacio necesario para alojar las dimensiones de la bifurcación entre las plataformas del tronco y del ramal. La sección más amplia presenta una anchura de 27,35 m., permitiendo comenzar la excavación independiente de ambos túneles. En la figura 6 se muestra la sección máxima de la caverna de bifurcación.

La seguridad del túnel en cuanto a su evacuación se estructura a través de una galería peatonal ubicada bajo las plataformas del túnel principal y del ramal. Se han previsto nichos de acceso a la galería espaciados cada 250 m. En función de la calidad geomecánica del terreno atravesado, la implantación de esta galería en la sección se efectuará a través de una trinchera o mediante el cierre de una contra-bóveda estructural.



Figuras 4-5. Sección funcional del túnel de La Pirámide y del ramal Mapocho.

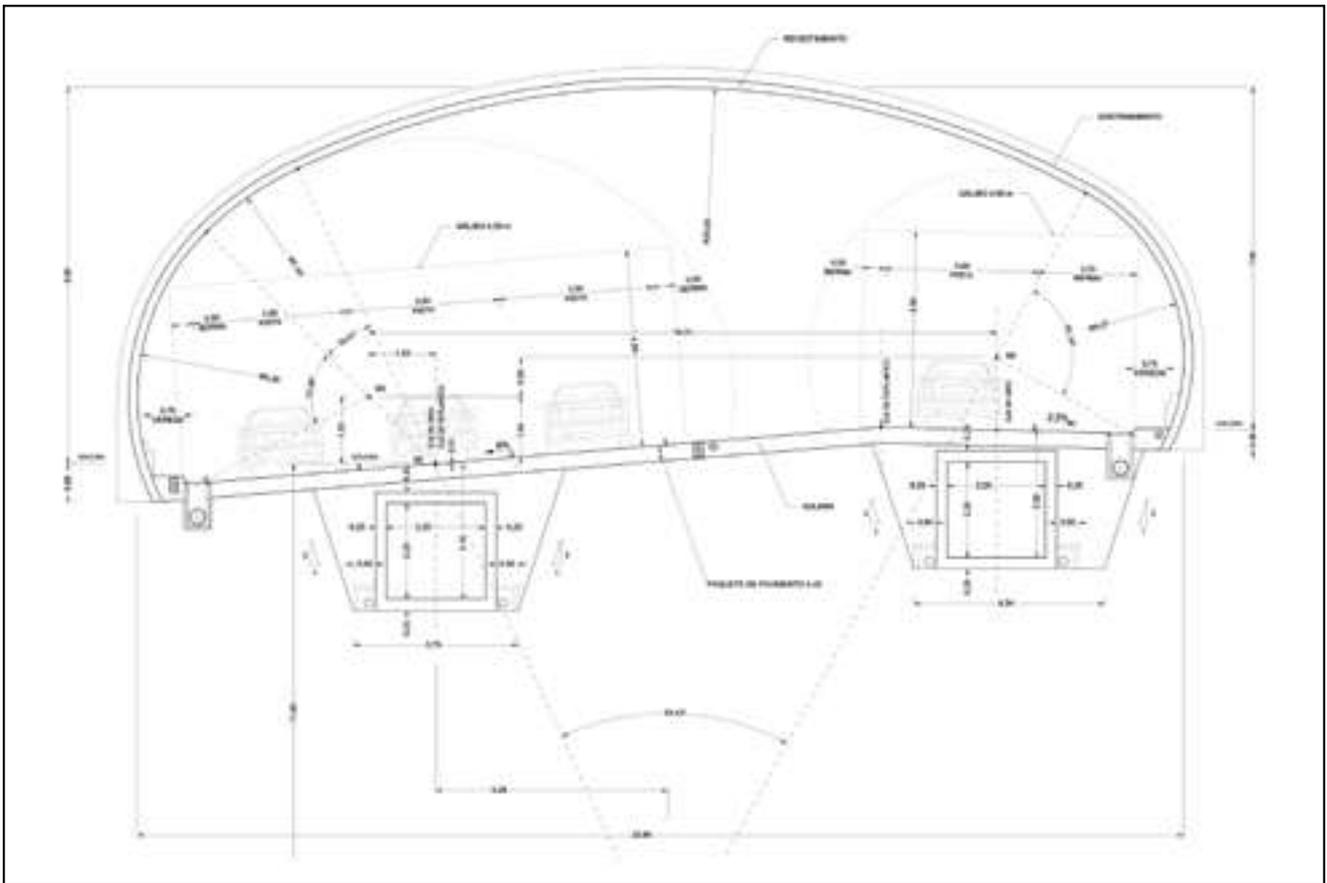


Figura 6. Sección funcional de la caverna de bifurcación.

2.3.2. Tramo urbano en falso túnel

En la zona comprendida entre el portal del túnel de La Pirámide y el nudo Apoquindo, el trazado atraviesa una zona muy densamente poblada. El trazado discurre bajo el bulevar central de la avenida Vespucio, que posee anchura suficiente para que la construcción de un túnel en trinchera no suponga un corte en el tráfico de la misma, limitado por los servicios existentes de las comunas de Vitacura y Las Condes. Además, la existencia de una cantidad abordable de necesidades de desvíos de servicios ha posibilitado este tipo de solución.

La sección funcional en las trincheras debe habilitar dos sentidos de circulación a diferente nivel. Conserva el ancho de 3 carriles descrito anteriormente, añadiendo 0,10 m a cada lado para acabados y 1,5 m en la altura para señalética y ventilación con lo que se alcanzan unas dimensiones de 13,20 x 6,0 m. La anchura en las trincheras va siendo variable debido al desdoble de carriles de bifurcación para habilitar las conexiones de la concesión con las vialidades locales de superficie.

La configuración de falso túnel es la siguiente: la contención de tierras se resuelve mediante pilotes de 1 o 1,2 m de diámetro con separaciones que oscilan entre 2 y 5 diámetros. Estas alineaciones de pilotes quedan acodaladas por la losa de cubierta y la losa del nivel -1 y, cuando es necesario, por niveles de estampidores de hormigón armado. La plataforma del nivel -2 no es estructural. La contención del espacio entre pilotes se resuelve mediante un muro forro. Las losas, que en algunas zonas alcanzan los 21 m de luz, en la mayoría de los casos son aligeradas y postensadas. La losa de cubierta se sitúa a 2 m bajo la superficie del bulevar

con el objeto de permitir la restitución del arbolado original. En la figura 7 se muestra una sección tipo de trinchera troncal.

Cada 225 m se han previsto pozos adosados que habilitan salidas de emergencia a la superficie. Asimismo, se prevén varios pozos de ventilación.

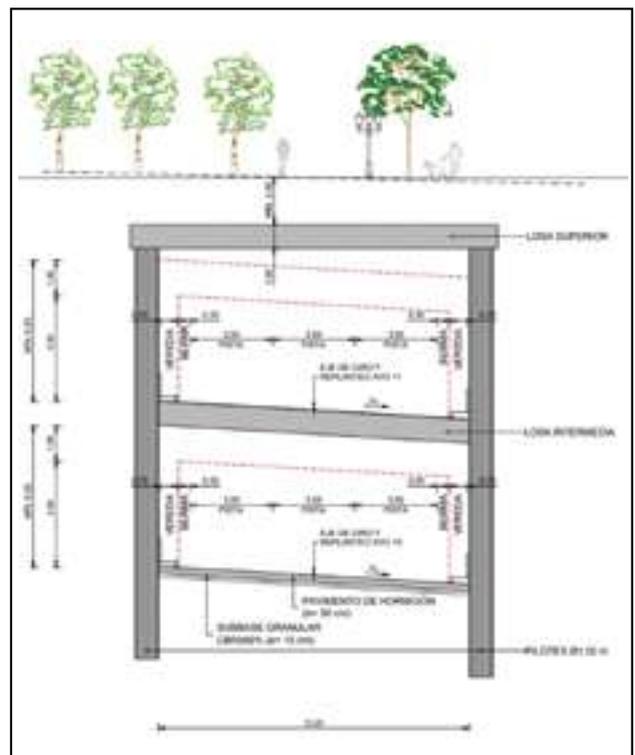


Figura 7. Sección funcional trinchera bulevar.

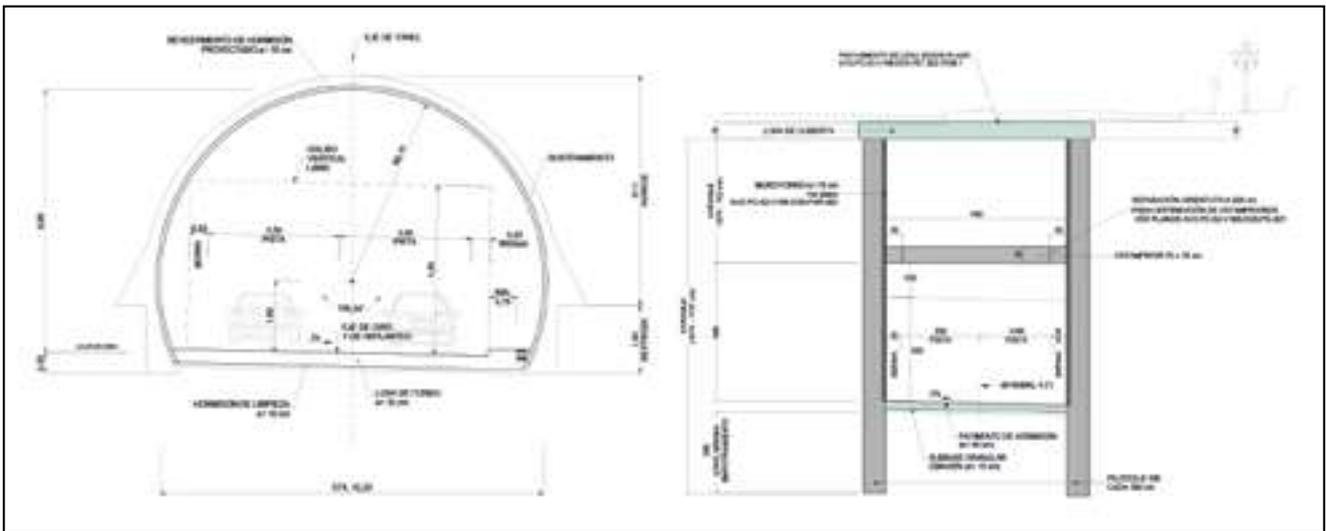


Figura 8. Secciones funcionales ramales. Trinchera y túnel.

Los ramales de salida adoptan soluciones tipo túnel o trinchera de pilotes en función de la profundidad y de la presencia de servicios. En la figura 8 se muestra una sección tipo de ramal en túnel y en trinchera.

2.3.3. Tramo urbano en sección híbrida

En el tramo comprendido entre el nudo Apoquindo y la intersección con la avenida Príncipe de Gales (final de la concesión), el trazado atraviesa las comunas de Las Condes y La Reina, una zona muy densamente poblada en donde la avenida Vespucio interseca con varias arterias importantes de la ciudad (avenidas Apoquindo, Cristóbal Colón, Isabel la Católica, Francisco Bilbao y Príncipe de Gales). Esto, en añadido sobre una notable existencia de servicios existentes, ha condicionado la necesidad de asumir una solución en subterráneo minimizando las afectaciones en superficie, además de la conexión con el siguiente tramo perteneciente a la concesión AVO 2, el cual se encuentra a una profundidad de aproximadamente 35 m. En base al

conjunto de condicionantes se ha diseñado una solución en sección híbrida de túnel que permite habilitar los anchos de plataforma asociados al tronco, así como cada una de las conexiones con los ramales del proyecto. Las anchuras y alturas de gálibos corresponden al mismo esquema comentado anteriormente.

El gálibo asociado a la plataforma del nivel -1 se resuelve mediante una estructura de túnel en mina convencional mientras que el nivel -2 se resuelve mediante una estructura tipo trinchera cubierta convencional mediante pilotes de 1,00 x 1,00 m con distintas separaciones y un empotramiento mínimo de 3,5 m que quedan acodalados en cabeza mediante losas postensadas que a su vez constituyen la plataforma del nivel -1. El espacio entre pilotes se refuerza mediante un muro forro.

En esta solución el sistema de evacuación se articula mediante nichos de conexión entre niveles ubicados también cada 225 m. Igualmente, se prevén tres pozos de ventilación que mediante pilotes y galerías conectan la superficie con cada plataforma de circulación.

En la figura 9 se muestra una sección tipo de túnel híbrido.

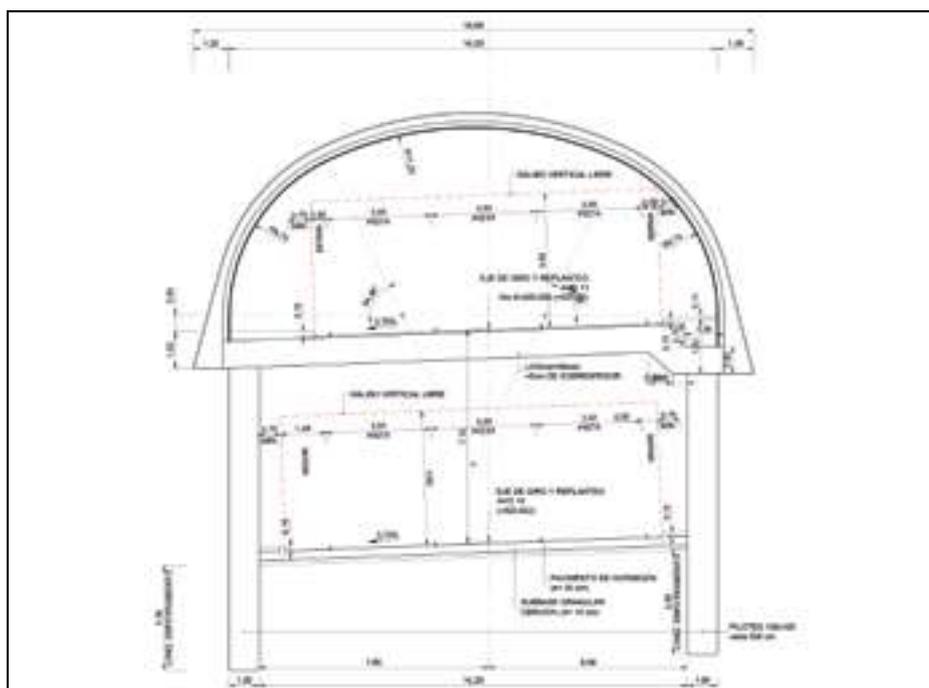


Figura 9. Sección funcional. Túnel híbrido.

2.3.4. Nudo Kennedy

La concesión de Américo Vespucio Oriente se cruza a la altura de la avenida Presidente Kennedy con la concesión de Santiago Centro Oriente (SCO), formando el enlace Kennedy, entre el Dm 4+647 y el Dm 5+000 del eje AVO NS. Este enlace constituye una zona de gran complejidad, tanto desde el punto de vista de trazado como estructural.

Para el cruce del enlace, el trazado de los dos niveles de circulación de Américo Vespucio discurre por debajo de los distintos ejes que configuran el nuevo Enlace Kennedy (y que pertenecen a la concesión de Santiago Centro Oriente), utilizando parte de las estructuras que dejó ejecutadas esta concesión.

Ha habido que tener en cuenta la relación geométrica y estructural entre las obras a construir por AVO y las ejecutadas por SCO. Una vez construidas las obras por parte del proyecto Santiago Centro Oriente, el concesionario de AVO ha podido construir en el interior de esa configuración, el resto de las trincheras en dos niveles o simples sin necesidad de afectar las obras del primer proyecto que se encontrarán habilitadas al tránsito público, así como los ramales en túnel minero proyectados en el enlace. En la figura 10 se muestra una planta de este enlace donde se indica con distintos colores, las estructuras de trincheras existentes previamente al paso de AVO.



Figura 10. Planta del nudo Kennedy con la ubicación de las estructuras SCO existentes (Fuente: SACYR).

El tronco principal (núcleo central) de Américo Vespucio aprovechó las pantallas laterales de pilotes que la concesión de Santiago Centro Oriente dejó construidas, salvo un tramo que se ejecutará en túnel minero bajo las pistas existentes de la avenida Kennedy y los puentes de Vespucio-Enlace Kennedy SCO.

El enlace se completa con diferentes ramales de conexión que conectan las dos concesiones, que son:

- **Ramal 1C:** que permitirá la conectividad de los flujos expresos de Kennedy dirección al oriente hacia AVO expresa dirección al sur.
- **Ramal 5:** que permite la conectividad de la Expresa de AVO con sentido sur-norte, hacia la Expresa de CS.
- **Ramal 5A:** que es una derivación del ramal 5 que permitirá conectar la Expresa de Vespucio Oriente, en dirección al norte con la Expresa de Kennedy en dirección a oriente.

- **Ramal A:** en las cercanías de la calle El Tamarugo, se origina el ramal de conexión hacia el sur (ramal A) pasando en mina bajo todas las estructuras proyectadas para las calzadas de la avenida Kennedy. Una vez que cruza las estructuras de Kennedy, el túnel se transforma en una trinchera adosada a la estructura de la trinchera de AVO, mediante la estructura E19, empalmándose al nivel -2 de ésta con dirección al sur.
- **Ramal A1:** este ramal se desarrolla en túnel a partir de la sección especial de túnel descrita para el Ramal A en el punto anterior, desplazándose bajo las calzadas locales tanto de Kennedy como de Américo Vespucio, para una vez que la separación entre ambas estructuras aconseje cambiar a estructura adosada, esta se transformó en una trinchera cubierta adosada empalmándose al nivel -1 de la trinchera cubierta de AVO con dirección al norte.

En las figuras 11, 12, 13 y 14 se muestra cómo se desarrollan los principales movimientos de estos ramales.



Figura 11. Ramal 1C.



Figura 12. Ramal 5 y 5ª.



Figura 13. Ramal A.

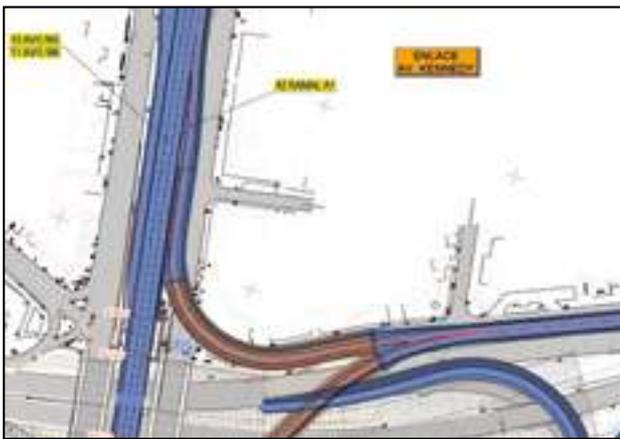


Figura 14. Ramal A1.

2.3.5. Nudo Apoquindo

El inicio del tramo en sección híbrida se ubica en el entorno del nudo de AVO con Apoquindo en donde si cabe las dificultades y singularidades constructivas del proyecto alcanzan su mayor grado, ya que en esta zona el trazado discurre bajo dos estacionamientos subterráneos de tres plantas, dos subcentros comerciales subterráneos y cruza el viaducto de la calle Apoquindo y la línea 1 del Metro de Santiago. Adicionalmente se materializan dos conexiones de entrada y salida con la calle Los Militares. En la figura 15 se muestra este nudo con la ubicación de los elementos citados.

En este tramo el tronco de AVO adopta la configuración en sección híbrida de túnel. Cabe incidir en que es en esta zona del trazado que discurre bajo los aparcamientos donde se produce el entronque con los ramales de Los

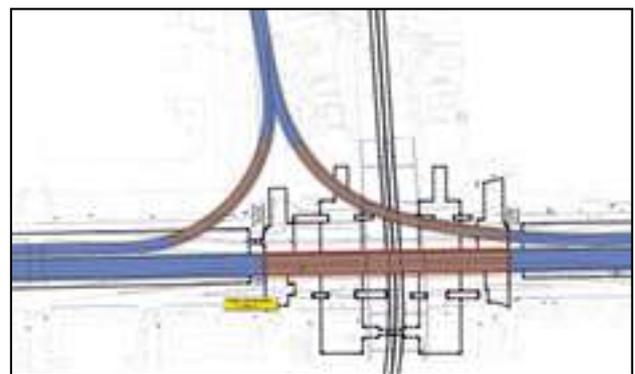


Figura 15. Planta del nudo Apoquindo.

Militares, adoptando pues el estándar de máximas anchuras de excavación del proyecto (25 m).

Adicionalmente el cruce bajo los aparcamientos se ha efectuado, en la zona más crítica, con una distancia mínima de 3,5 m entre la cimentación del aparcamiento y la bóveda de la caverna.

Los ramales de Los Militares se unen con el tronco en una sección de túnel de un carril y confluyen en una caverna de bifurcación para finalmente conectar con la superficie mediante una estructura de trinchera de pilotes.

En la figura 16 se muestran dos de los modelos de cálculo tridimensionales realizados para analizar el cruce bajo la línea 1 del Metro de Santiago y los dos centros comerciales, y el paso bajo uno de los estacionamientos.

En las figuras 17 y 18 se muestran las secciones de los túneles en este nudo que, como se ha indicado para el tronco, poseen la tipología de túnel híbrido y que para los ramales alcanza cavernas de más de 25 m de anchura de excavación.

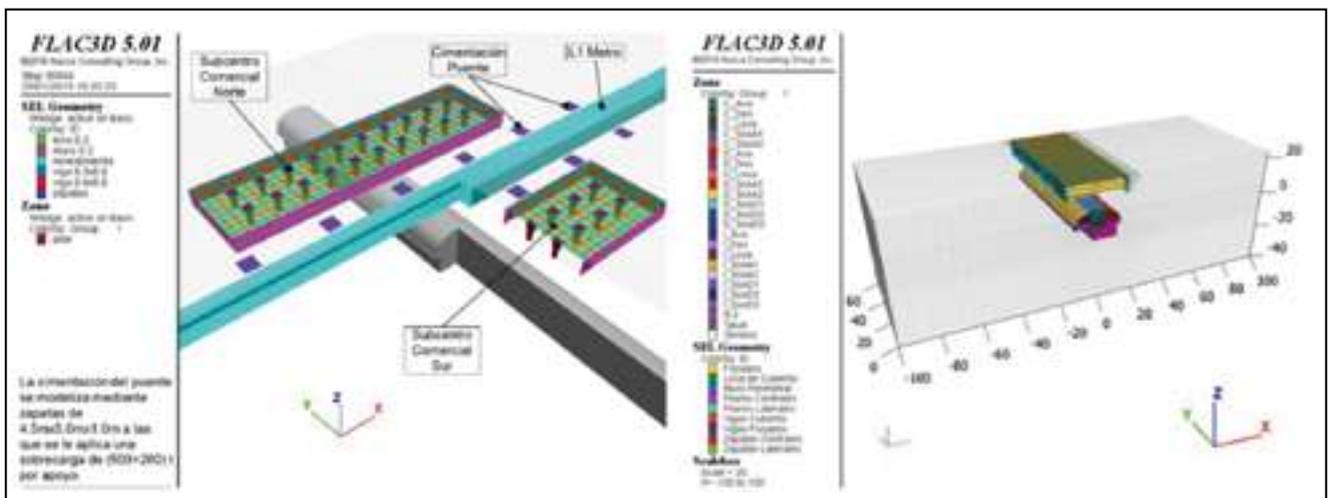


Figura 16. Modelos 3D empleado en el nudo Apoquindo para el cruce bajo el Metro y bajo los estacionamientos subterráneos existentes.

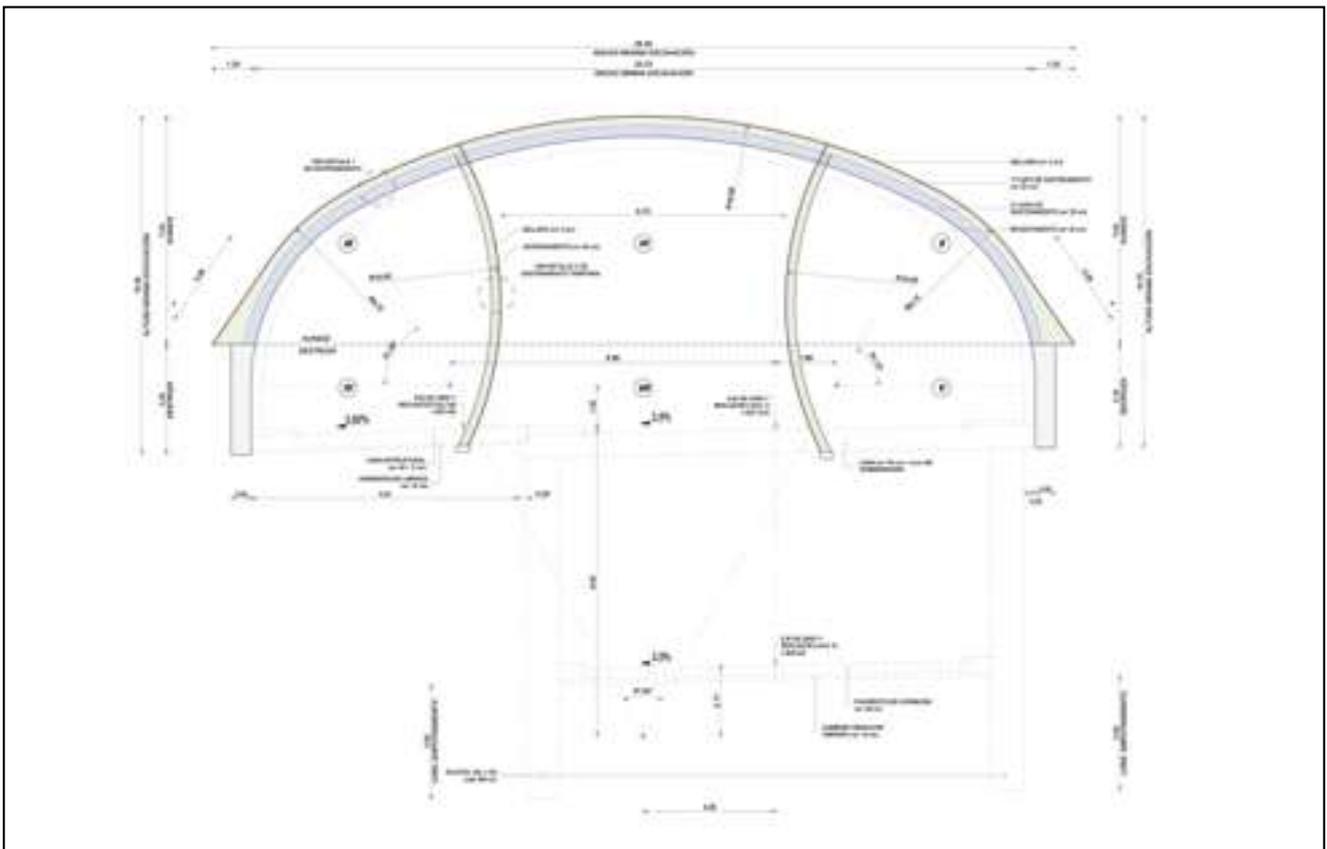


Figura 17. Sección híbrida en cruce bajo aparcamientos.

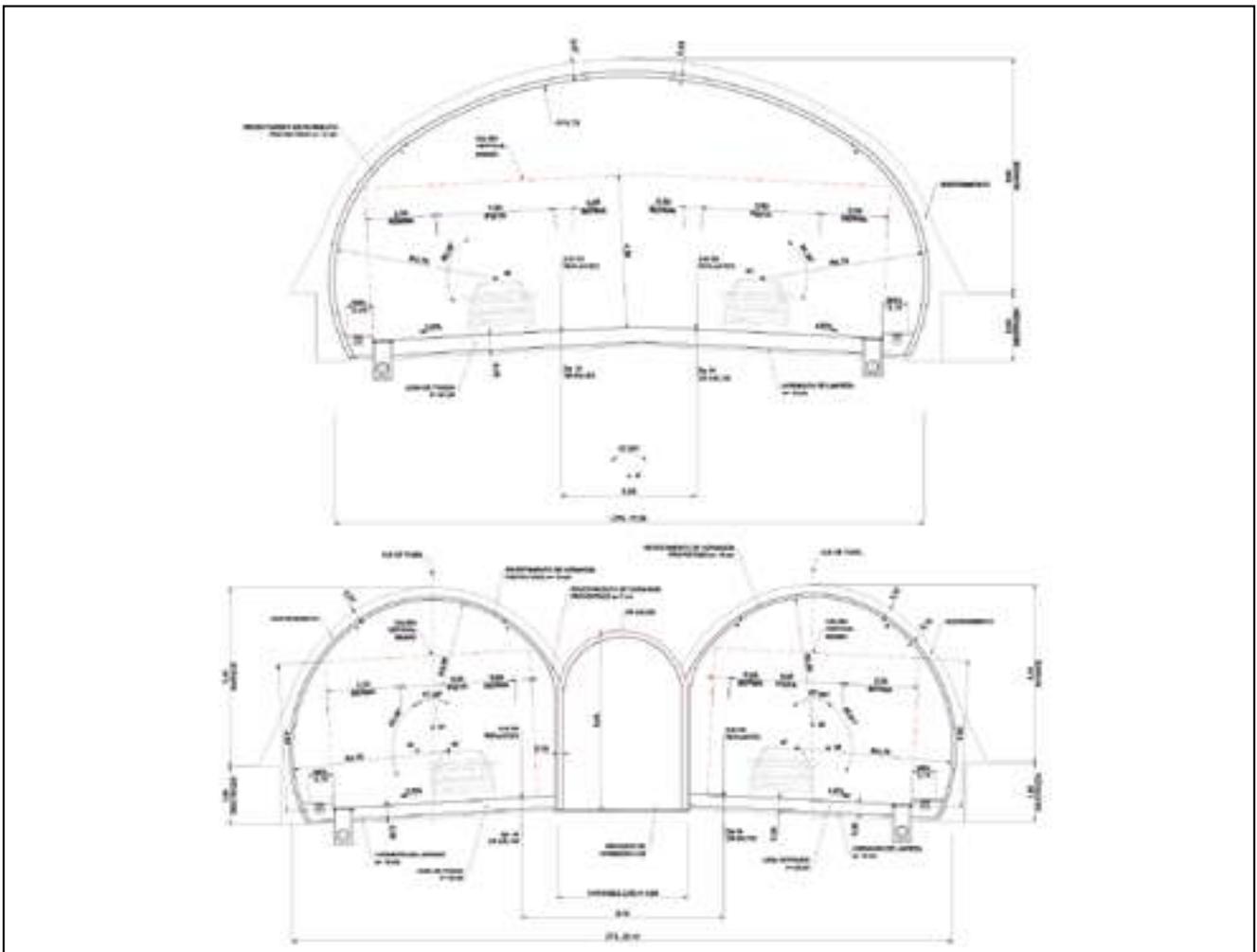


Figura 18. Secciones de bifurcación del ramal de Los Militares.

2.4. Descripción de los métodos constructivos

Las diferentes soluciones constructivas diseñadas conllevan diferentes procesos constructivos y medios necesarios para su ejecución. A continuación, se exponen estos aspectos para cada zona del proyecto.

2.4.1. Cruce del cerro

Los túneles que atraviesan el cerro interceptarán formaciones rocosas de calidad variable, así como terrenos tipo suelo. Estos terrenos resultan propicios para su excavación y refuerzo por medios convencionales mediante la aplicación de sostenimientos flexibles basados en hormigón proyectado, pernos y marcos metálicos, siguiendo la filosofía constructiva conocida como *Nuevo Método Austriaco*. La excavación se lleva a cabo mediante explosivos en las zonas de terreno más resistentes, y mediante medios mecánicos en los terrenos más blandos y de peor calidad geotécnica.

Las secciones de los túneles presentan unas dimensiones muy notables siendo necesario abordar su excavación por fases.

Para el túnel de La Pirámide:

- En terrenos de RMR superior a 45 puntos la excavación se realiza en 3 fases, avance, destroza y zanja para galería de evacuación.
- Para RMR entre 35 y 45 puntos la excavación se realiza en 4 fases, avance, destroza en dos bancos desfasados y zanja para galería de evacuación.
- Para RMR inferior a 35 puntos la excavación se realiza en 5 fases, avance y destroza en tres etapas, primero una zanja central y posteriormente los laterales manteniendo siempre un desfase entre ambos. Finalmente se excava la contrabóveda.

Para el ramal del Mapocho se han previsto dos fases de excavación en todo su trazado, avance y destroza.

Para la caverna de bifurcación, la sección de mayores dimensiones supera los 250 m² con una anchura de excavación de 27 m y una altura de 9 m. Estas dimensiones exigen subdividir la excavación hasta en un máximo de 8 fases.

La figura 19 muestra las fases constructivas previstas para el túnel de La Pirámide y la figura 20, las fases constructivas de la sección mayor de la caverna.

Las longitudes de pase de avance varían en función de la calidad geotécnica del terreno oscilando entre 6 y 0,75 m.

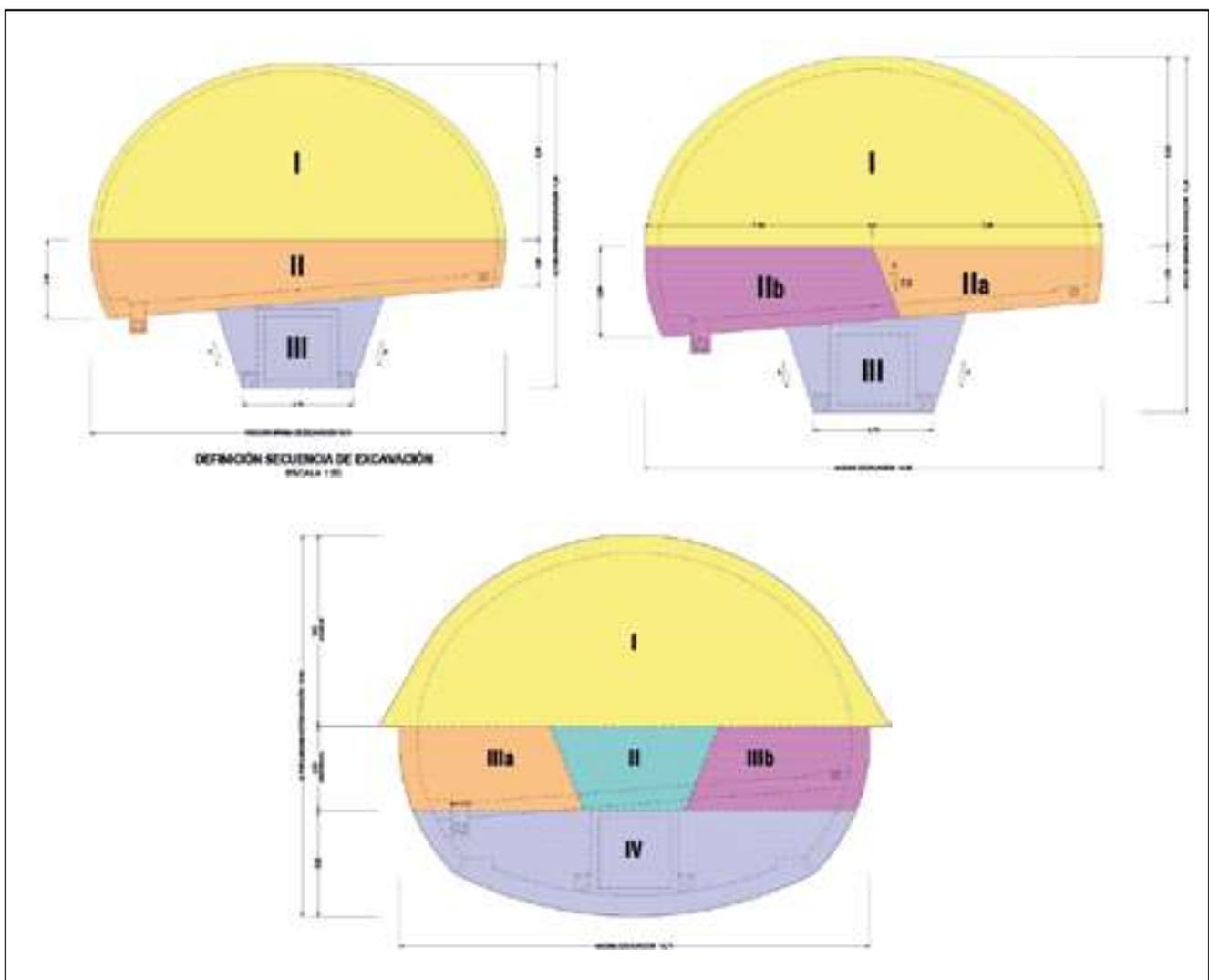


Figura 19. Fases constructivas túnel de La Pirámide. RMR>45 / RMR 35-45 / RMR <35.

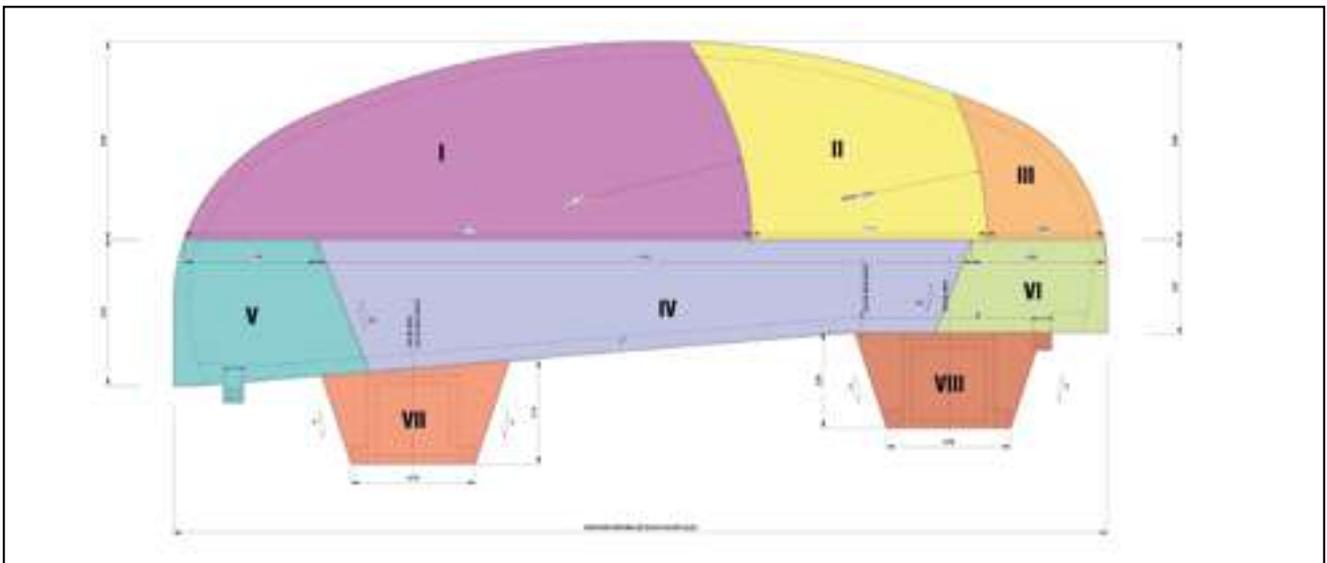


Figura 20. Fases constructivas de la caverna.

2.4.2. Tramo urbano en falso túnel

En los tramos de falso túnel en la zona urbana se ha implementado un proceso constructivo que minimice los espacios y los tiempos de afección a la superficie. La secuencia constructiva prioriza la construcción de pilotes y losa superior para, en la medida de lo posible, devolver cuanto antes el espacio urbano ocupado y, en su caso, reinstaurar el tráfico en las vialidades afectadas. A continuación, a través de los accesos que proveen los ramales de conexión se desarrolla la excavación en falso túnel y se procede a la ejecución de las losas de nivel -1.

2.4.3. Tramo urbano en sección híbrida

En la zona de la sección híbrida la afección a superficie se reduce a mínimos, los frentes de trabajo se desarrollan desde el portal que constituye el final del tramo en trinchera, desde los accesos que proveen los ramales de conexión y desde la conexión. También, se han implementado sendos frentes de avance desde un tramo en trinchera intermedio que constituye un pozo de ventilación.

En función de las diferentes dimensiones que adopta la sección de excavación en el nivel -1, se ha subdividido la sección en diferentes etapas. La secuencia constructiva para la sección de mayores dimensiones sigue las siguientes etapas:

- Excavación y sostenimiento de avance del *side drift* 1 (primera fase) en pases de 0,75 m.
- Con un desfase mínimo de 10 m excavación y sostenimiento de avance de *side drift* 2 en pases de 0,75 m.
- Con un desfase mínimo de 20 m respecto al avance del *side drift* 1, excavación y sostenimiento de destroza de *side drift* 1 en pases de 1,5 m.
- Con un desfase mínimo de 10 m respecto a la destroza del *side drift* 1, excavación y sostenimiento de destroza de *side drift* 2 en pases de 1,5 m.

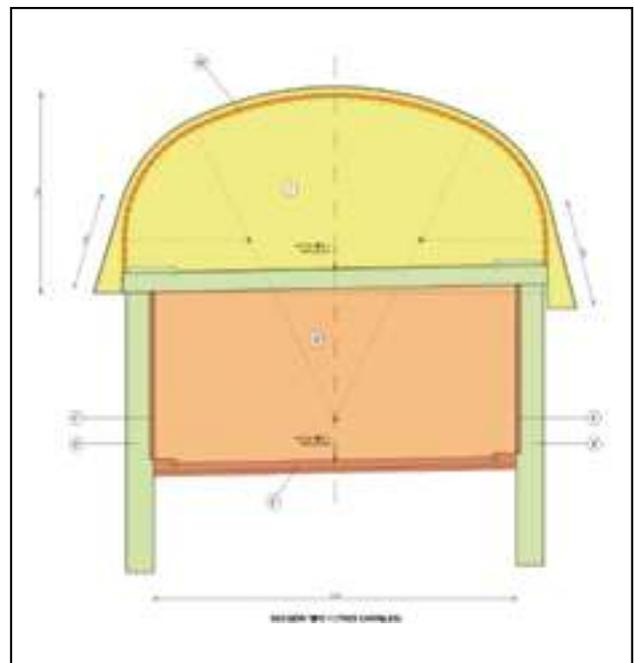


Figura 21. Fases constructivas de sección típica (3 pistas).

- Con un desfase mínimo de 20 m respecto a la destroza del *side drift* 2 (segunda fase) excavación y sostenimiento de avance de galería central en pases de 0,75 m.
- Con un desfase mínimo de 10 m excavación de destroza de galería central.
- Demolición del tabique temporal en pases de 1,5 m e instalación de la segunda capa.
- Ejecución de losa de nivel -1 y pilas pilote.
- Excavación de nivel -2.
- Instalación del revestimiento.

La figura 21 muestra las fases constructivas previstas para el túnel híbrido de 3 carriles y la figura 22, las fases constructivas de la sección mayor de la caverna.

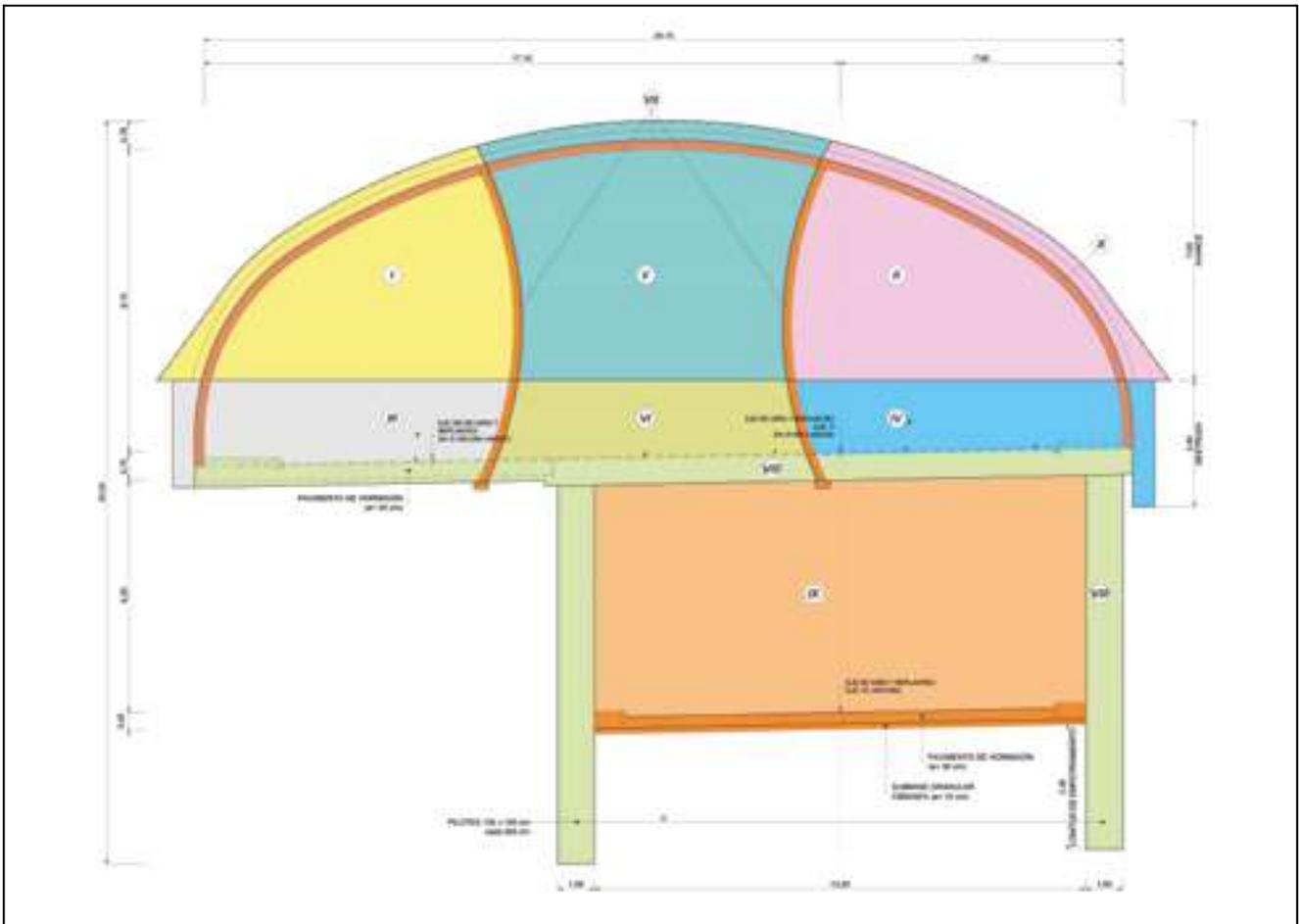


Figura 22. Fases constructivas sección caverna de nivel -1.

2.4.4. Nudo Apoquindo

La reducida cobertera con la que la sección híbrida atraviesa la cimentación de los aparcamientos condicionó la necesidad de efectuar un tratamiento de mejora intenso mediante columnas de *jet grouting*. Las columnas se ejecutaron a modo de corona desde el tercer nivel subterráneo del aparcamiento. Durante toda la duración de la obra, las plantas de los sótanos -1 y -2 permanecieron en servicio, no registrándose ninguna otra afección sobre su explotación.

La subdivisión de la sección de excavación siguió los esquemas concebidos para la sección híbrida adaptándose los

sostenimientos a los requerimientos estructurales obtenidos en los modelos de cálculo, tal como se muestra en la figura 23.

El tronco cruza bajo el subcentro comercial, el viaducto y la línea 1 del Metro en sección tipo híbrida de 3 carriles. En estas zonas, y con el objeto de limitar las deformaciones inducidas, se subdividió la sección mediante un *side drift*, y en el momento de su demolición se dispuso una segunda capa de sostenimiento reforzando toda la bóveda, tal como se aprecia en la figura 24.

Respecto al proceso constructivo de la caverna de bifurcación de Los Militares, se procedió según criterios de subdivisión de la sección de excavación similares a los

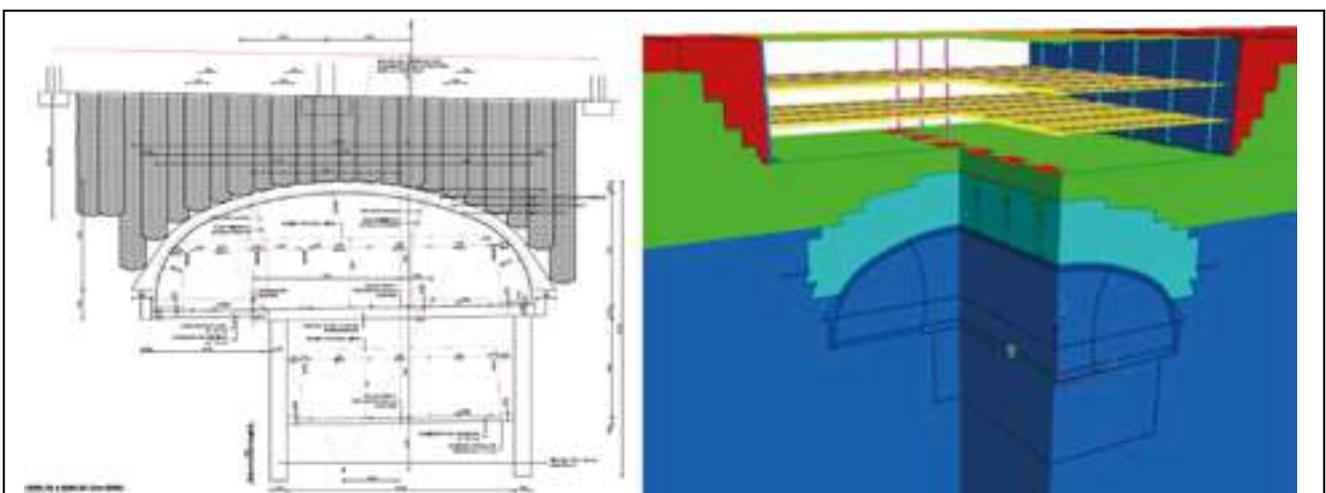


Figura 23. Tratamiento del terreno con *jet grouting* bajo el aparcamiento subterráneo y modelo de cálculo.

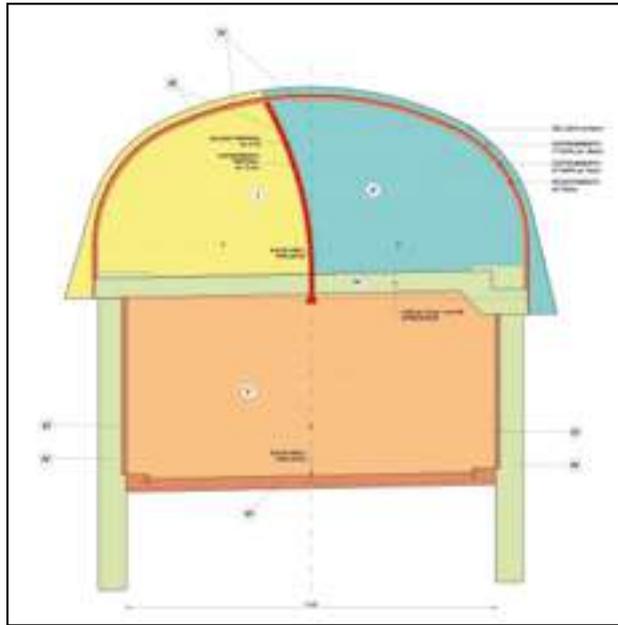


Figura 24. Fases constructivas en el cruce bajo el Metro.

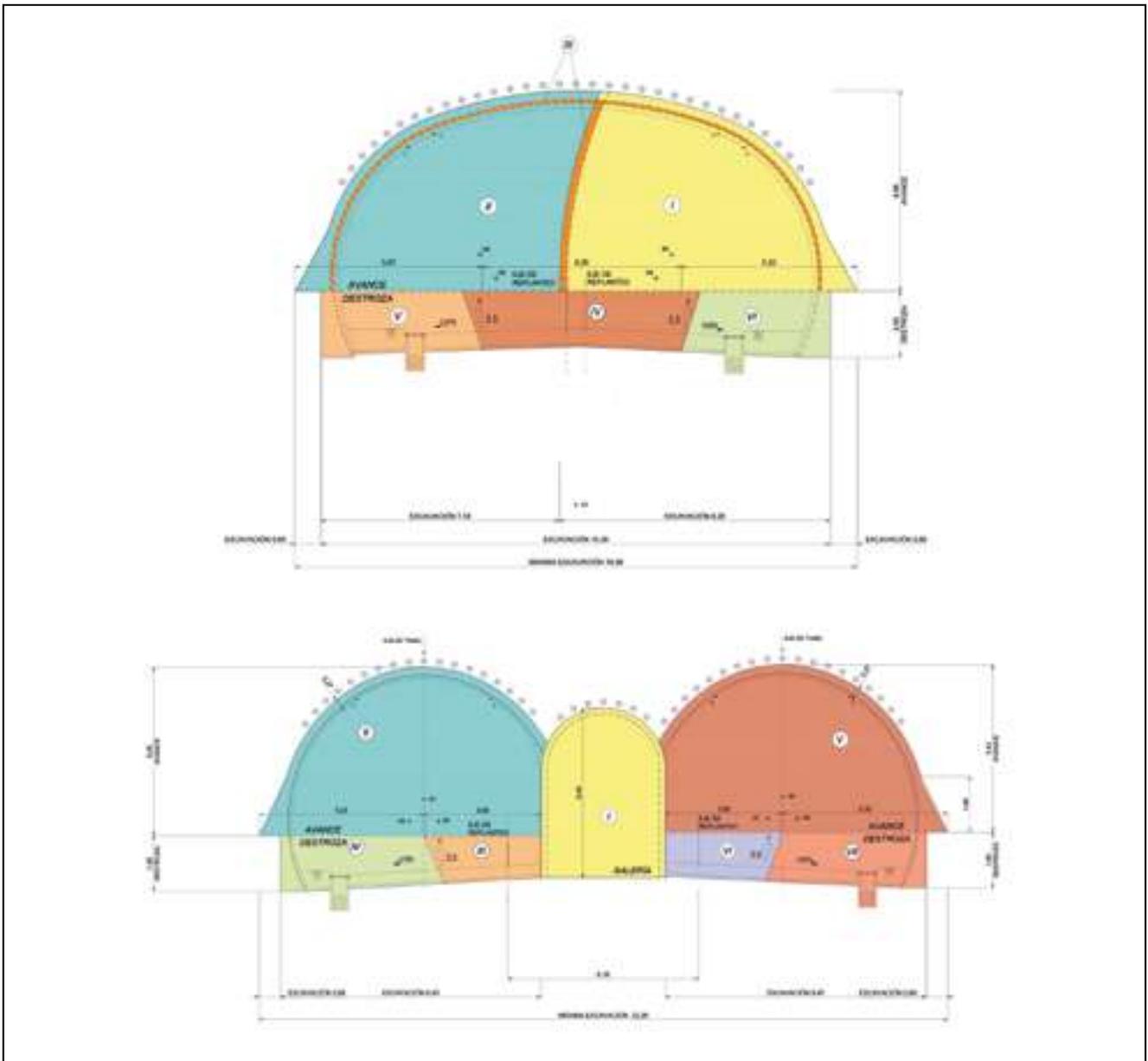


Figura 25. Fases constructivas de la bifurcación de Los Militares.

adoptados en el resto de los túneles en suelos. La zona límite de bifurcación constituye una situación singular en donde inicialmente se excava una galería que se maciza mediante hormigón pobre y que constituye, posteriormente, el punto de apoyo de los hombros de las secciones de túneles ya independizadas. En la figura 25 se muestran dos secciones de la caverna de bifurcación entre el ramal nororiental y el ramal sudoriental.

3. DATOS CLAVE DE LA CONSTRUCCIÓN

Las obras de construcción comenzaron en noviembre de 2017 y su puesta en servicio se realizó en junio de 2022.

Atendiendo a lo especificado en las cláusulas administrativas del contrato de la concesión, la maquinaria empleada en la ejecución de los túneles debía cumplir Tier III y Euro IV, es decir, ser de nueva adquisición.

La obra ha dispuesto de dos plantas de hormigón estratégicas para mejorar los ciclos, una de ellas ubicada en el sector norte y la otra (exclusiva de hormigón proyectado) en el punto intermedio de la obra (bajo trinchera, nivel -1).

A continuación, se realiza un breve repaso de los puntos singulares y/o más representativos descritos anteriormente.

a) Túnel de La Pirámide

La excavación del trono del túnel de La Pirámide ya se encuentra finalizada y en la actualidad se está



Figura 26. Portal norte del túnel de La Pirámide.



Figura 28. Frente en tobas grises y rojas.

ejecutando la zanja inferior que alojará la galería de evacuación. En las figuras 26 y 27 se muestran los portales norte y sur desde donde se han abordado los trabajos, el primero en las tobas de la formación Abanico y el segundo en las gravas desde el punto limpio de Vitacura, a través de una galería provisional de ataque.

La mayor parte desde el norte se ha excavado en materiales rocosos de calidad media y mala, destacando la caverna de bifurcación. En las figuras 28 y 29 se ilustran ambos aspectos.

Uno de los hitos del proyecto es el cruce del río, el cual se ha desarrollado con un nivel holgadamente manejable en lo que a las filtraciones hacia el interior de la excavación se refiere. En la zona, durante los metros finales del cruce en dirección norte, se ha interceptado en el frente de excavación el contacto entre la formación rocosa Unidad Abanico y los suelos aluviales de las gravas del Mapocho. Este contacto ha sido claramente identificable en el frente en una extensión notable. En la figura 30 se muestra el frente con esta singularidad, mientras que en la figura 31 se muestra la construcción por fases de la caverna Escrivá de Balaguer para el ramal de salida en Vitacura, construida en gravas.

b) Trincheras

En las figuras 32 y 33 se muestran dos aspectos de la obra con pantallas de pilotes.



Figura 27. Portal galería de ataque sur.



Figura 29. Caverna de bifurcación del ramal Mapocho.



Figura 30. Frente mixto en el túnel de La Pirámide.



Figura 31. Caverna de salida en gravas.



Figuras 32-33. Construcción del tramo en trinchera, falso túneles entre pantallas de pilotes.

c) Túnel híbrido

La excavación del nivel -1 se ha realizado en una o varias fases dependiendo de la anchura de la excavación en la bóveda. Para ilustrar esta idea, en la figura 9 se muestra la entrada del ramal Martín de Zamora en su intersección con el tronco, generando caverna excavada en cuatro fases, mientras que al fondo se aprecia el túnel de tres pistas con dos fases de excavación. En las figuras 34 y 35 se muestra la caverna de Los Militares excavada en tres fases.

Sin duda, un aspecto muy singular de la obra lo constituyen los numerosos encuentros, sobre todo en los enlaces de Kennedy y Apoquindo, entre los túneles artificiales excavados en trinchera entre pantallas y los túneles en mina. En las figuras 36, 37, 38 y 39 se muestran cuatro de estos encuentros.

Cabe comentar que en el portal norte del túnel se ha instalado una estación de tratamiento de agua del túnel con el objeto de reutilizar las aguas recogidas en el sistema de canalizaciones del túnel durante la construcción

El monitoreo de las obras subterráneas resulta de vital importancia para poder asegurar y controlar su correcta ejecución.

Las incertidumbres asumidas en la fase de diseño en cuanto a la asignación de comportamientos tensodeformacionales equivalentes y a la determinación de la estructura geológica del emplazamiento, hacen imprescindible un análisis de la información que se va obteniendo durante la propia construcción para verificar, o en su caso ajustar, lo determinado durante las fases anteriores de estudio

Estableciendo un sistema de medición de los desplazamientos que se producen durante y tras la ejecución de



Figuras 34-35. Cavernas de Martín de Zamora y de Los Militares.



Figuras 36-37. Portales de túneles en mina: ramal e inicio de túnel híbrido.



Figuras 38-39. Portal túnel en Mina. Ramal de acceso y Pozo 7+200.

una excavación, se puede comprobar la estabilización de la sección y, sobre todo, es posible comparar las medidas reales con las previsiones de los cálculos efectuados para, en el caso de que exista una divergencia significativa, adoptar las medidas correctivas oportunas.

Asimismo, resulta de especial interés llevar a cabo un control exhaustivo de los movimientos que la construcción de las obras subterráneas proyectadas pueda inducir.

Considerando todo lo anterior, se ha desarrollado un plan de monitoreo en el que se han definido las principales magnitudes a medir, los equipos necesarios para su control, la frecuencia de medición, los criterios de interpretación y, por último, un plan de contingencia.

El plan de monitoreo está basado en un control exhaustivo de la calidad geomecánica del frente y de los desplazamientos inducidos en el entorno de las excavaciones a efectuar y sobre las infraestructuras próximas al trazado. Comprende el control de los siguientes aspectos:

- El control geotécnico del frente se lleva a cabo caracterizándolo *in situ*, mediante la aplicación de una clasificación geomecánica. Se realizará, en cada fase, el estudio de la litología, estructura y calidad de los terrenos atravesados.
- Medidas de deformación en los túneles, caverna de bifurcación y pique que serán monitoreadas mediante secciones de convergencia y nivelaciones de clave. La figura 40 representa una sección tipo del túnel con las cuerdas de convergencia a monitorear.

- Medidas de deformación en la superficie inducida por la construcción del túnel que son monitoreadas mediante arquetas de nivelación topográfica.
- Medidas de deformación en el terreno inducidas por las excavaciones proyectadas, que son monitoreadas mediante extensómetros e inclinómetros.
- Control de vibraciones asociadas al empleo de voladuras en la excavación monitoreado mediante acelerómetros ubicados en las cercanías de infraestructuras existentes susceptibles de ser afectadas.
- Medidas de deformación en las infraestructuras existentes monitoreadas mediante clinómetros, regletas y MEMS (sistema automático de nivelación de carriles).

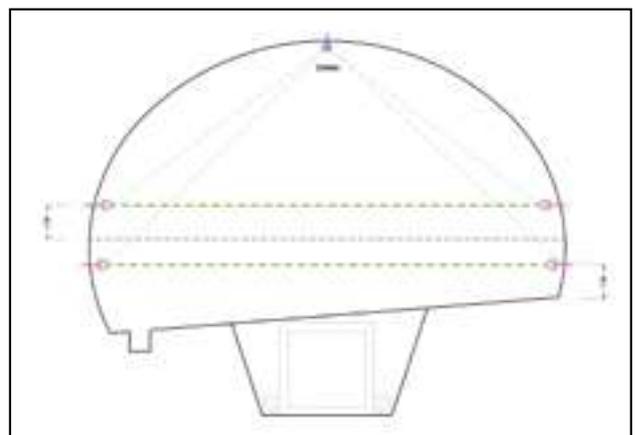


Figura 40. Sección tipo de medición de convergencias. Túnel de La Pirámide.

4. CONCLUSIONES

El proyecto Concesión Américo Vespucio Oriente, Tramo Av. El Salto-Príncipe de Gales, afronta el reto de implantar una autopista de tres carriles por sentido de circulación en un área urbana muy densamente poblada, cruzando un río y atravesando contextos geológicos diferentes, tanto en roca como, sobre todo, en suelos.

La cantidad y entidad de las interfaces existentes ha supuesto que el proceso de desarrollo del proyecto haya sido muy complejo, condicionado por la necesidad de implantar muy diferentes soluciones constructivas en las diversas áreas del proyecto, muchas de ellas en la vanguardia del estado del arte en el diseño de obras subterráneas.

Sin duda alguna, el cierre del anillo de circunvalación a Santiago constituirá un hito para la red de infraestructuras de la ciudad.

5. AGRADECIMIENTOS

Como no podía ser de otra manera, un proyecto de estas características requiere de la implicación y compromiso de un enorme equipo pluridisciplinar que merece nuestro reconocimiento, partiendo por la Sociedad Concesionaria AVO, que creyó desde un principio en este proyecto y ha sido un importante apoyo para la gestión de todas las dificultades presentadas; las constructoras SACYR y OHLA, que desde un principio estuvieron presentes para impulsarlo y que con su experiencia y dedicación han permitido abordar cada uno de los retos encontrados con las soluciones más adecuadas para cada situación; y el Ministerio de Obras Públicas de Chile, que con su supervisión y aporte, ha hecho de éste, un mejor proyecto.

6. REFERENCIAS

Batle, I., Uriel, A., Santos, D., De Cabo, M., y Rodríguez, J. (2016). El Túnel de La Pirámide, una pieza clave en el anillo de circunvalación a Santiago. *Ingeopress*, n° 250, pp. 24-33.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2017). Santiago Expressway. *Tunnels and Tunnelling International*, April 2017, pp. 27-32.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2018). La construcción del túnel de Lo Saldes en Santiago de Chile. *Cimbra*, n° 411, pp. 40-47.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2019). La construcción del túnel Kennedy en Santiago de Chile. *Ingeopress*, n° 279, pp. 14-18.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2019). The construction of the tunnel Lo Saldes in Santiago de Chile. A major challenge, a wide tunnel with an extremely low overburden. *ITA-AITES General Assembly and World Tunnel Congress WTC2019, 3-9 May 2019, Naples, Italy*.

Kuster, J., Núñez, R., Chávez, E., Galera, J.M., y Santos, D. (2019). The construction of the tunnel Kennedy in Santiago de Chile. A major challenge of an urban tunnel in soils. *ITA-AITES General Assembly and World Tunnel Congress WTC2019, 3-9 May, Naples, Italy*.

Kuster, J., Núñez, R., Santos, D., Chávez, E., Galera, J.M., e Ibarra, G. (2014). The construction of the Vivaceta Tunnel (Santiago de Chile). *World Tunnel Congress 2014-Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil*.

Normativa Técnica

AASHTO LRFD (2014). *Bridges Design Specifications*.

CETU (2000). *Technical Instruction Relating to Safety Measures in New Road Tunnels (Design Operation)*. Appendix N° 2 to Inter-ministry circular N° 2000-63 of 25 August 2000.

Dirección de Vialidad (Ministerio de Obras Públicas/Gobierno de Chile) (2018). *Manual de Carreteras*.

INN-Chile (1996). *NCh 433. Diseño sísmico de edificios*.

INN-Chile (2013). *NCh 2475. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*.

Persistencia de un nuevo comportamiento de las orcas ibéricas: las interacciones con embarcaciones

Persistence of a New Behaviour of Iberian Orcas: Interactions with Boats

A. López^{a,1,2,*}, R. Esteban^{a,3}, A. García de los Ríos^{b,4,5}, M. Ferreira^{c,6}, F. Martinho^{c,7}, P. Méndez-Fernández^{a,8}, E. Andréu^{c,9}, J.C. García^{d,10,11,12}, L. Olaya-Ponzon^{e,10,11,12}, R. Espada-Ruiz^{c,10,13}, F.J. Gil-Vera^{e,14}, M. González^{c,2}, C. Martín^{c,f,15}, J.A. Martínez-Cedeira^{c,2}, M. Sequeira¹⁶

Resumen

Hasta 16 individuos, pertenecientes a cuatro grupos, de una subpoblación de orcas en peligro de extinción en la península ibérica muestran un comportamiento disruptivo, consistente en interacciones físicas con barcos, desde 2020. La mayoría de los casos involucraron a veleros (91 %), pero también a pesqueros y lanchas a motor. Se informó y registró que los animales tocaban, empujaban y hacían girar las embarcaciones. En algunos casos esas interacciones provocaron daños en la popa del barco, principalmente en la parte móvil más frágil, que es el timón. De julio de 2020 a diciembre de 2023 se registraron 1031 encuentros, de los que 358 fueron avistamientos y 673 interacciones, entre las aguas del estrecho de Gibraltar, sobre todo atlánticas, y Portugal, Galicia y Francia.

Se implementaron algunas acciones preventivas, sobre todo en lo relativo a información básica para navegantes y prohibición temporal de la navegación de veleros, cuando las interacciones se intensificaron en Galicia y estrecho. Sin embargo, se necesitan mayores esfuerzos y colaboración para responder a esta situación sin precedentes.

Palabras clave: *Orcinus orca*, eco-biología, comportamiento disruptivo, interacción, impacto antropogénico.

Abstract

Since their onset in 2020, up to 16 individuals belonging to four groups of a subpopulation of endangered orcas in the Iberian Peninsula show a disruptive behaviour, consisting of physical interactions with boats. Most cases involved sailboats (91 %), but also fishing boats and motorboats. Animals were reported and recorded as touching, pushing, and turning vessels. In some cases, these interactions caused damage mainly to the stern of the vessel, and to the most fragile moving part, which is the rudder. From July 2020 to December 2023, 1,031 encounters were recorded, of which 358 were sightings, and 673 interactions. These data were recorded between the waters of the Strait of Gibraltar, mainly the Atlantic ones, and Portugal, Galicia, and France.

Some preventive actions were implemented, especially in terms of basic information for mariners and a temporary ban on sailing vessels, when interactions intensified in Galicia and the Strait of Gibraltar. However, greater efforts and collaboration are needed to respond to this unprecedented situation.

Keywords: *Orcinus orca*, eco-biology, disruptive behaviour, interaction, anthropogenic disturbance.

* Autor de contacto: gt.orcas.ibericas@gmail.com

^a Doctor/a en Biología.

^b Doctor en Veterinaria.

^c Licenciado/a en Biología.

^d Catedrático en Biología.

^e Fotógrafo, guía y capitán.

^f Máster en Oceanografía y Gestión del Medio Marino.

¹ Departamento Biología y CESAM, Campus Universitario de Santiago, 3810-193, Aveiro (Portugal).

² CEMMA, Apartado 15, 36380 Gondomar.

³ Madeira Whale Museum, 9200-031 Caniçal, Madeira (Portugal).

⁴ Departamento de Anatomía y Anatomía Patológica Comparadas, Facultad de Veterinaria, Universidad de Murcia, 30100 Murcia (España).

⁵ Centro de Estudio y Conservación de Animales Marinos (CECAM), Ceuta, 51001 (España).

⁶ Sociedade Portuguesa Vida Selvagem, Estação de Campo de Quiaios, Casa da Guarda Florestal Sul, Rua das Matas Nacionais, 3080-530 Quiaios (Portugal).

⁷ ECCO Ocean, Rua da Casquilha 10 5Fr, 1500-152 Lisboa (Portugal).

⁸ Observatoire Pelagis, UMS 3462- La Rochelle Université - CNRS, 5 allées de l'océan, 17000, La Rochelle (Francia).

⁹ Asociación Garum Tarifa.

¹⁰ Laboratorio de Biología Marina, Departamento de Zoología, Facultad de Biología, Universidad de Sevilla (España).

¹¹ Área de Investigación I+D+i del Acuario de Sevilla (España).

¹² Estación de Biología Marina del Estrecho, Ceuta (España).

¹³ Ecolocaliza. Pasaje Olmo N 2. La Línea de la Concepción 11300, Cádiz (España).

¹⁴ Turmares Tarifa, S.L. Avda. Alcalde Juan Núñez, N°3, local 12, 11380. Tarifa, Cádiz (España).

¹⁵ Estrecho Natura, dársena de El Saladillo, puerto deportivo Algeciras Club El Mero, Algeciras, Cádiz (España).

¹⁶ ICNF, Avenida da República, 16. 1050-191 Lisboa (Portugal).

1. INTRODUCCIÓN

A las orcas (*Orcinus orca*) de la península ibérica, se las considera una subpoblación diferenciada, cuyos parientes más cercanos serían las orcas de Canarias, manteniendo aislamiento genético con las que viven en las aguas de Noruega e Islandia (Foote *et al.*, 2011; Esteban *et al.*, 2016d). Son individuos de tamaño medio, de 4,5 a 6 m de longitud y con marcado dimorfismo sexual (figura 1), observadas desde primavera a verano en el golfo de Cádiz y el estrecho de Gibraltar. Posteriormente, en otoño, están de paso por la costa de Portugal y de Galicia en su migración hacia el norte, siguiendo a sus presas que son los atunes rojos (*Thynnus thynnus*) (García-Tiscar 2009; Samarra y Esteban, 2022). Desde 2020 mantienen un novedoso comportamiento de interacción con los barcos, incluyendo contacto físico, al que se ha denominado comportamiento disruptivo (López y Esteban, 2021; Esteban *et al.*, 2022). En el presente manuscrito presentaremos una actualización y ampliación de la información.



Figura 1. Dimorfismo sexual en las orcas y tamaño relativo de la orca ibérica.

2. OBJETIVO

Con este trabajo se pretende recopilar la información actualizada relativa a los encuentros de las orcas ibéricas con los seres humanos entre 2020 y 2023, describir las interacciones, discutir su origen y orientar las investigaciones que puedan llevarse a cabo.

3. METODOLOGÍA

El área de estudio se encuentra centrada en las aguas atlánticas de la península ibérica, que es el lugar donde normalmente se observan las orcas en primavera y verano (Esteban *et al.*, 2014; Samarra y Esteban, 2022) y donde se iniciaron las interacciones, aunque se extiende por el sur a la costa del norte de África y por el norte al golfo de Bizkaia hasta la costa de la Bretaña francesa.

Cuando comenzaron las interacciones, se formó un grupo de trabajo internacional en el que participaron expertos de España y Portugal, así como representantes de instituciones, y administraciones locales, denominado Grupo de Trabajo Orca Atlántica (GTOA). Se implementaron diferentes acciones como recopilación de datos, entrevistas e inspecciones de los barcos, para comprender mejor la naturaleza de las interacciones y proponer acciones a

desarrollar que se plasmaron en un primer informe (López y Esteban, 2021). Se realizaron mapas públicos con la recopilación de registros de orcas a lo largo de la península ibérica, de julio de 2020 a 2023, para tener una mejor idea de la presencia de los animales, su desplazamiento por la zona y advertir a la navegación. Se identificaron a los animales en base a más de 20 mil fotografías y videos oportunistas, realizando un catálogo de foto-identificación (Esteban, 2023).

Los registros de orcas fueron categorizados como **encuentros**: (i) **avistamientos** cuando los animales fueron observados sin ninguna atracción aparente hacia las embarcaciones; (ii) **interacciones** cuando los animales reaccionaron ante la embarcación, se acercaron o tocaron los barcos. Dichas interacciones son diversas y variadas teniendo en común algunas de ellas el contacto físico de los animales con los barcos.

Se contactó a los tripulantes de las embarcaciones que vivieron estas situaciones, recabando información básica: (i) tipo de embarcación: velero, catamarán, lancha neumática, lancha a motor y pesquero; (ii) tipo de timón (figura 2): (a) timón de pala; (b) timón semicompensado o semi-soportado; y (c), completamente soportado o, finalmente, motor fuera borda que dirige la embarcación girando la propia estructura del motor.

Se inspeccionaron al menos 25 de barcos, buscando pistas y marcas de interacción, filmando y tomando fotografías, mediante inmersiones en los puertos o cuando se sacaban del agua en los astilleros. Los daños en las embarcaciones se clasificaron como (i) ninguno; (ii) leve, de diferente consideración, o (iii) grave, cuando el barco no puede navegar por avería en el timón, bien sea rotura externa (figura 3) o bien rotura de los engranajes internos. En gran parte de estos casos el barco necesita asistencia o remolque para llegar a puerto. También se recopilaron testimonios de las tripulaciones, gran parte de los 536 casos en los que los tripulantes aportan información, durante los mismos se recopiló el material gráfico, fotografías y videos de la interacción, que recogieron los propios tripulantes. Se hizo un análisis exhaustivo de esos testimonios, fotos y videos para dilucidar el comportamiento adoptado por los animales al interactuar con las embarcaciones.

Finalmente se realizó una recopilación de casos anteriores similares de interacciones entre orcas y embarcaciones, consultando la literatura y a expertos en el estudio de cetáceos (Notarbartolo, 1977; Higdon y Ferguson, 2014).

De ese modo se han establecido diversas herramientas para que los navegantes puedan consultar información, a través de los mapas de interacciones y de riesgos, en la *web* (<https://www.orcaiberica.org/>): recopilando información, preguntas frecuentes, información sobre legislación, mapas, etc. También se creó una aplicación para telefonía móvil: GT Orcas (Google Play y Apple Store). Así se pueden conocer las zonas de riesgo, dada la presencia de orcas e interacciones, estar prevenidos si navegan en esas zonas, evitar navegar durante la noche y aproximarse a la costa, en la medida de lo posible.

Además, se elaboró un protocolo de actuación ante una interacción, en base a la recopilación de testimonios y a la legislación vigente, con el objetivo de reducir los estímulos para que las orcas pierdan interés. Las medidas fueron

debatidas por GTOA con expertos de la IWC (International Whaling Commission).

Durante este tiempo GTOA proporcionó información a los gobiernos español (directamente) y portugués (a través de la comisión del Grupo de Trabajo con técnicos ambientales, científicos y representantes de la Armada) para que pudiesen valorar medidas de seguridad a la navegación, investigación o legislativas, que deban adoptar en su momento.

4. RESULTADOS

Desde 1820 se registraron 23 casos de interacciones con orcas a nivel mundial, el 61 % con daños materiales y/o amenazas a humanos, y el 39 % sin daños, consecuencias o hasta con cooperación positiva. La mayor parte de ellos están poco documentados y todos ellos circunscritos a situaciones locales concretas.

Desde julio de 2020 a 30 de diciembre de 2023 se han registrado 1031 encuentros (avistamientos e interacciones) con las orcas desde la costa norte de África a la Bretaña francesa, a lo largo del área de migración estacional de las orcas (figura 2). El 7,9 % en 2020, el 29,1 % en 2021, el 30,8 % en 2022 y el 32,2 % en 2023 (tabla 1).

De la totalidad de encuentros, 358 (34,7 %) son avistamientos y 673 (65,3 %) son interacciones en las que las orcas reaccionan a la presencia de los barcos acercándose. En algunos casos son interacciones sin contacto (9,6 %, n=49), en otros casos son interacciones con contacto, pero sin daños (40,3 %) y en otros casos esos contactos físicos causan daños (59,7 %) que llegan a ser graves impidiendo la navegación de los barcos. Esto sucede en el 21,0 % de las interacciones (n=142 respecto de 673) o en el 13,7 % de todos los encuentros (n=142 respecto de 1.031) (tabla 2).

La frecuencia ha aumentado entre 2020 y 2021, dado que los eventos se iniciaron en julio de 2020, pero entre 2021 y 2022 no hubo un incremento significativo. Cambian a lo largo de las épocas y de las áreas. La frecuencia de interacciones parece mantenerse por encima de las 200 en 2023 (n=217), 49 de ellas con averías graves que tuvieron que ser remolcados, y 150 avistamientos (tablas 1 y 2).

La distribución de las interacciones indica que el 44,0 % de los casos fueron en el estrecho de Gibraltar, 28,5 % en la costa de Portugal, 20,4 % en Galicia, 3,9 % en Marruecos y 3,0 % en Francia (tabla 1).

Las interacciones son diversas y variadas, tienen en común el acercamiento y el contacto físico de los animales con el casco en la mayoría de los casos, pero los ejemplares no suelen presentar una actitud agresiva por lo que estos encuentros no deben ser calificados de otro modo.

La mayor parte de estas interacciones son con veleros, el 91 % (monocasco o catamaranes) de 12 a 17 m de eslora y con timones de pala 73 % (simple o doble). En algunos casos el contacto físico se traduce en averías y en un 21,3 % de las interacciones las averías, de diversa consideración, ocasionaron que el barco no pudiese navegar por rotura del timón o de su mecanismo interno siendo remolcado a puerto por las embarcaciones de Salvamento Marítimo.

Algunos de los barcos protagonistas de estas interacciones fueron inspeccionados (n=25). Los indicios encontrados se limitaron a áreas de apoyo corporal en el casco y timones, y unas pocas marcas de dientes en diferentes partes del casco, pero no en los timones rotos, por lo que se concluye que no utilizan la boca para romper o sujetar el timón. Esto ha sido comprobado por las grabaciones submarinas realizadas por los navegantes durante algunas interacciones.

Tabla 1. Registros de encuentros, avistamientos e interacciones, entre julio de 2020 y diciembre de 2023, en las diferentes áreas

Interacciones	2020		2021		2022		2023		Tot	%
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%		
Francia	0	0	2	1	11	5,3	7	3,2	20	3,0
Marruecos	0	0	13	6,6	4	1,9	9	4,2	26	3,9
Andalucía	11	20,8	106	53,8	54	26,1	125	57,9	296	44,0
Portugal	18	34	59	29,9	65	31,4	50	23,1	192	28,5
Euskadi	0	0	0	0	0	0	2	0,9	2	0,3
Galicia	24	45,3	17	8,6	73	35,3	23	10,6	137	20,4
SubTotal	53	100	197	100	207	100	216	100	673	100
Avistamientos	75		59		74		150		358	
Total	128		256		281		366		1031	

Tabla 2. Registros de aportación de datos durante las interacciones, daños y alcance de los mismos, entre julio de 2020 y diciembre de 2023

	2020	2021	2022	2023	Total	2020	2021	2022	2023	%
	Aportan datos	48	177	177	144	546	90,6	89,8	85,5	69,6
Sin datos	5	20	30	63	118	9,4	10,2	14,5	30,4	17,8
Sin daño	19	80	67	62	228	39,6	45,2	38,1	37,1	40,1
Daño	29	97	109	105	340	60,4	54,8	61,9	62,9	59,9
Leve	16	62	65	55	198	55,2	63,9	59,1	52,9	58,2
Grave	13	35	45	49	142	44,8	36,1	40,9	47,1	41,8

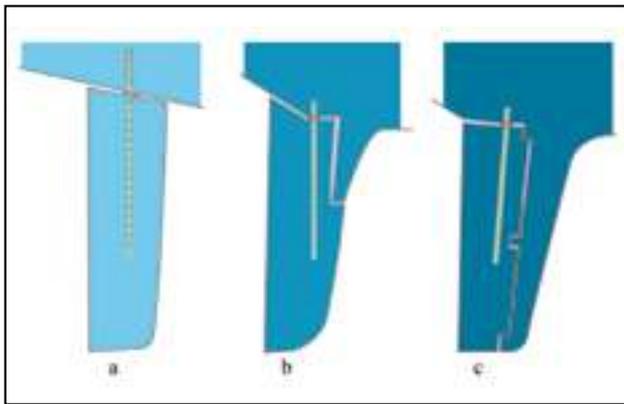


Figura 2. Diagrama de los tipos de timones. a) Pala: se articula por la parte superior con la mecha situada en la parte central. b) Semi-compensado: tiene la mecha unida en el punto más delantero de su envergadura, y puede ser semisoportado cuando la parte superior del timón está articulada con el casco. c) Bisagra: toda la parte anterior del timón está fijada al casco y gira abisagrado.

5. PERFIL DE LA INTERACCIÓN

Las interacciones por años fueron 2020-53, 2021-197, 2022-207 y 2023-216, mostrando un incremento significativo entre 2020 y 2021. En 2020 fue solo la segunda mitad del año (tabla 1). La mayor incidencia por áreas es en el estrecho (Andalucía), seguido de la costa de Portugal, Galicia y, en menor medida, Marruecos y Francia (figura 2), aunque anualmente van variando la frecuencia e intensidad en diferentes áreas. El 90 % de las interacciones ocurren entre abril y octubre. El 74 % entre las 8:00 h y las 18:00 h, aunque se mantiene un 22 % durante la noche.

Los barcos interaccionados son de todo tipo y de 5 a 32 m de eslora, pero el 91 % son veleros y catamaranes de 12-15 m de eslora navegando entre 5-6 nudos; el 72 % presentaban timones de pala y el 64 % pintura anti-incrustante oscura, entre las que destaca el anti-incrustante de color azul, que presentan una proporción de daños graves más acusada que el resto.

El 78 % de los casos de interacción duran menos de 40 minutos, con una media de 27,3, aunque algunas duraron más de 180 minutos y se observa una evolución a mayor duración de 2020 a 2023, aunque no variando la media significativamente.

En el 68 % de las ocasiones participaron en la interacción de 1 a 5 orcas, aunque en el 61 % de las ocasiones de 1 a 3. Cuanto mayor número de orcas esté implicada menor es la duración de la interacción, pero si en las proximidades del barco interaccionado se encuentran más orcas, la duración aumenta, lo que indica una importancia social de lo que hacen.

Durante este tiempo los navegantes han utilizado todo tipo de técnicas disuasorias durante las interacciones, mayoritariamente ilegales y más basadas en el boca a boca, o generalizando las experiencias únicas y personales, más que en efectividad comprobada. Se han usado gritos, ruidos, dispositivos acústicos (*pingers*), maniobras diversas, petardos, etc. Ninguna de ellas ha sido absolutamente efectiva registrando interacciones en todas las situaciones posibles. Posiblemente la respuesta humana a la interacción sea una nueva motivación para ellas y les llame más la atención.

6. VULNERABILIDAD DE LOS TIMONES

Los timones son estructuras llamativas, móviles, y accesibles para las orcas. A pesar de su importancia para la guía de la navegación, es una estructura delicada del barco, aunque su debilidad, o fortaleza, depende del tipo de timón de que se trate (figura 2). Durante la interacción las orcas persiguen, compiten, examinan o tocan el barco, golpean la estructura del timón, la mueven, observan la consecuencia de estas acciones y, a veces, sobrevienen las roturas. El timón de pala es más vulnerable a roturas en su tercio inferior o bien a la apertura de las láminas de fibra, pudiendo quedar solamente la mecha después de una interacción (figura 3). Si el timón es semisoportado o abisagrado, insertado parcial o totalmente en la roda de popa, es mucho más resistente a los impactos. En este caso la energía se transmite por la mecha y puede romper el engranaje interno.

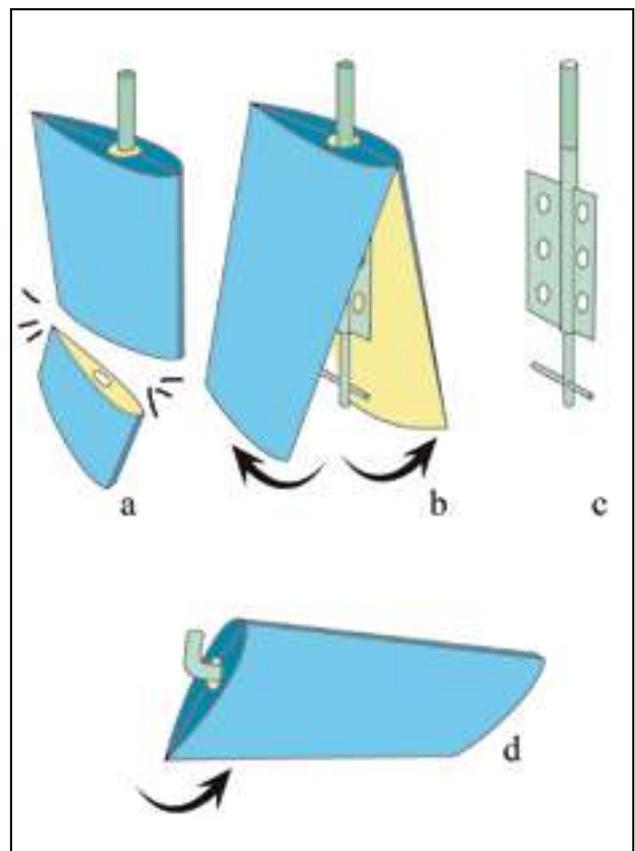


Figura 3. Diagrama representando los daños más comunes: a) rotura del tercio inferior de la pala, bajo el final de la mecha; b) apertura de las planchas de fibra; c) destrucción de planchas y relleno de poliuretano; y d), torsión de la mecha.

Tres veleros se hundieron a causa de una vía de agua, al no romperse el timón, pero pinzar sobre el punto de entrada de la mecha en el casco del barco, cojinete y limera, rompiendo la fibra en ese lugar y produciendo vía de agua. Las situaciones de riesgo durante las interacciones se dieron, además de por rotura del timón o mecanismo interno, por la brusquedad del giro del timón hasta forzar su ángulo de máxima apertura y por los giros de la embarcación, lo que causó angustia a las tripulaciones por el desconocimiento sobre las orcas, su intención y su incomprensible comportamiento.

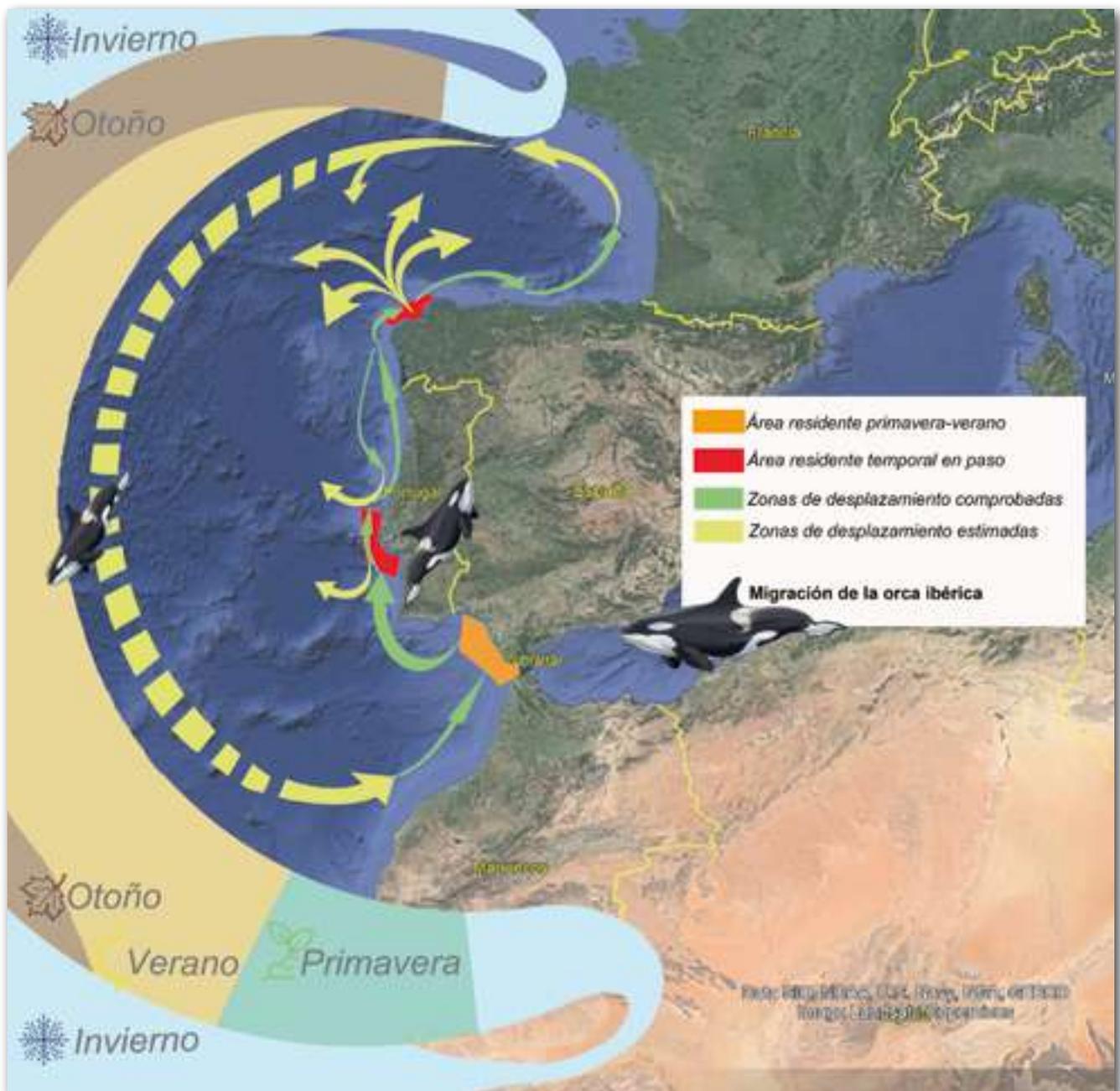


Figura 4. Distribución estacional, migración y movimientos a mesoescala de la orca ibérica.

7. LAS GLADIS

Desde las primeras interacciones se detectaron varios ejemplares de orcas que eran observados reiteradamente realizando interacciones con los barcos. Desde 9 ejemplares diferentes en 2020 hasta un total de 16 ejemplares repartidos al menos en cuatro grupos (figura 5), entre los que se encuentran cuatro ejemplares adultos,

dos que mantienen contacto físico con los barcos y dos observadores. A todos estos ejemplares se los denominó coloquialmente GLADIS, con su sobrenombre respectivo para diferenciarlas (Blanca, Negra, Gris, Clara, etc.), y forman parte del catálogo de foto-identificación realizado en 2023 en el que se contemplan, al menos, 35 ejemplares de esta subpoblación de orca ibérica (Esteban, 2023).

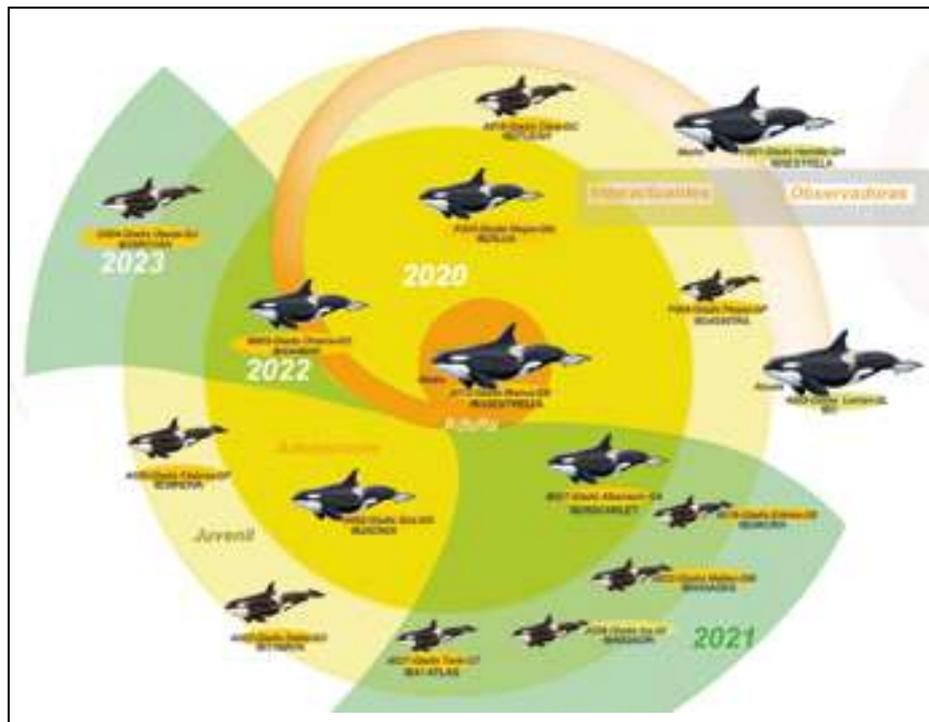


Figura 5. Representación de las 16 orcas implicadas en las interacciones con su incorporación a lo largo de los años.

8. EL ORIGEN DEL COMPORTAMIENTO

Este tipo de interacción con contacto, en el que se pueden identificar comportamientos anteriormente conocidos como la curiosidad o la capacidad lúdica de las orcas, no se corresponden con su comportamiento habitual, de ahí que haya sido calificado de disruptivo. No existe ningún caso documentado de amenaza o agresión deliberada a humanos por parte de orcas en libertad, en las aguas europeas, ni se conocen interacciones tan reiteradas en otros mares u océanos, por lo que esta actividad de las orcas ibéricas es considerada como inédita a nivel mundial.

En base a los informes de interacción y la documentación gráfica, se han elaborado dos hipótesis factibles sobre el origen del comportamiento disruptivo:

- Comportamiento autoinducido: lo que quiere decir que inventan algo nuevo y lo repiten. Este comportamiento coincide con el perfil de los ejemplares juveniles.
- Respuesta a una situación aversiva; es decir, uno o varios individuos habrían vivido o presenciado una mala experiencia y tratan de detener la velocidad del barco para no repetir esa situación. Este comportamiento coincide con el perfil de orcas adultas. Sería identificado como un comportamiento precautorio de protección colectiva.

No sabemos cuál puede ser la hipótesis correcta, incluso planteando la situación aversiva, no sabemos cuál pudo haber sido ese estímulo desencadenante. La A012-Gladis Blanca es la única adulta que mantuvo un comportamiento de contacto físico desde el principio, cabe la posibilidad de que iniciara este nuevo comportamiento. Los argumentos son:

- Es la única adulta que se identifica en 2020 en las interacciones con contacto físico en medio de 7 juveniles.

Las otras adultas registradas, A005-Gladis Lamari y F001-Gladis Herbillé, eran meras observadoras.

- En 2021 participó activamente en las interacciones incluso con su hija recién nacida, A027-Gladis Tarrik, por lo que la motivación que la mueve, como posible protección colectiva, es incluso mayor que la fuerza del instinto maternal.
- Los barcos utilizan habitualmente líneas de pesca por la popa para pescar durante la navegación. Algunos de los barcos interaccionados declararon llevar líneas de pesca, por lo que planteamos que este hecho sea una motivación más para las orcas que se acercan a examinarlas.
- En 2021 un barco que llevaba líneas de pesca, durante una interacción, al recogerlas atrapó a una de las orcas.
- Al inicio de 2023 fue observada la orca E003-Gael portando una línea colgada de su cuerpo.

Por eso, aun siendo una mera hipótesis, pensamos que hay argumentos que indican que un incidente causado por un atrapamiento, en el que se encuentre implicado un barco velero, es factible como causa de trauma psíquico que provoque una respuesta por parte de un animal salvaje con altas capacidades cognitivas, como es la orca (Marino, 2004). Son conocidas respuestas de trastorno de estrés postraumático complejo en ejemplares de fauna salvaje terrestre como elefantes y chimpancés (Bradshaw y Schore, 2007; Braswhaw *et al.*, 2008; Rizzolo y Bradshaw, 2016). Si esta hipótesis fuera cierta, el resto de las orcas juveniles repetirían el comportamiento por imitación (Rendell y Whitehead, 2001).

En cambio, se han propuesto muchas hipótesis que han sido rechazadas, entre las que podemos mencionar:

- Hipótesis aversiva implicando a un juvenil: hay una tercera orca juvenil implicada desde el inicio, la orca

X002-Gladis Gris. En 2018 fue observada presenciando un atrapamiento, y su rescate, de otra orca en un arte de pesca a lo largo de la costa portuguesa. Pero dada la dilatación temporal y al no estar implicado ningún barco, no tenemos argumentos para relacionarla con el inicio de este comportamiento.

- b) Hipótesis de colisión. Consideramos que el origen no fue una colisión dado que ninguno de los ejemplares interactuantes desde el inicio presentaba heridas compatibles. Conocemos las heridas presentes en la orca F003-Gladis Negra y la A012-Gladis Blanca porque en 2020 fue realizado un mapa corporal con todas sus heridas en base a un reportaje submarino realizado en el mes de julio. Sabemos que en ese momento la F003-Gladis Negra, presentaba heridas en la cara y también heridas en 2021, posiblemente de origen antropogénico. En ambos casos las heridas evolucionaron favorablemente y esta orca ha reducido la frecuencia e intensidad de las interacciones; puede que la causa tenga que ver más con un cambio de rol en el grupo y no tanto a causa de esas heridas.

Todo esto nos tiene que hacer reflexionar en que las actividades humanas, aún de un modo indirecto, pueden estar en el origen de este comportamiento, ya que pudo también haber sido un cúmulo de diferentes factores lo que ocasionó este comportamiento, o simplemente es un comportamiento que se ha puesto de moda entre algunos individuos y que pase con el tiempo. Como ya ocurrió con otras poblaciones de orcas, por ejemplo, se puso de moda llevar un salmón muerto en sus cabezas u otro caso en el que comenzaron a imitar las vocalizaciones de leones marinos (Foote *et al.*, 2006; Whitehead *et al.*, 2004).

9. ANÁLISIS DE PROTOCOLOS

Desde el inicio de las interacciones en 2020 se recopilamos los testimonios de los navegantes, recogiendo descripciones de como ocurrían los hechos y prestando atención a sus declaraciones sobre qué hacían, o no, antes de iniciar y al cesar la interacción. Con las declaraciones, y con la legislación vigente, se estableció un protocolo de actuación basado en:

- Disminuir la velocidad, arriar la vela, parar el motor y dejar el timón libre.
- Retirar las manos de la rueda del timón y apartarse de cualquier parte del barco que pueda caer o girar bruscamente.
- Contactar con el 112/ canal 16 radio o el oficial de la zona (Tarifa 10; Tánger 69; Fisterra 16).
- Apagar la sonda y mantener ENCENDIDOS VHF y elementos de posición.
- No gritar a los animales, ni tocarlos ni tirar nada, no mostrarse por la borda.
- Grabar con cámara o móvil a los animales para identificarlos.
- Comprobar que gira y funciona el timón cuando se hayan retirado los animales.
- Si se aprecia avería que impida navegación solicitar remolque.
- Permitir el traslado del contacto de los navegantes a especialistas en cetáceos para evaluar cada caso.

Estas recomendaciones serían de aplicación si la seguridad de la navegación lo permite y se basan en la normativa aplicable: en el Real Decreto 1727/2007, de 21 de diciembre, por el que se establecen medidas de protección de los cetáceos, en la Ley 14/2014, de 24 de julio, de Navegación Marítima.

De este modo, la resolución de la Capitanía Marítima de A Coruña de septiembre de 2020 y la Resolución de 4 de agosto de 2021, de la Capitanía Marítima de Cádiz, aceptan este protocolo y así lo difunden, estableciendo limitaciones a la navegación en Galicia y entre el cabo de Trafalgar y Barbate para evitar incidentes con las orcas, limitando la navegación de veleros de hasta 15 m de eslora.

Posteriormente GTOA incorpora la recomendación de la aplicación de la marcha atrás basada en la normativa portuguesa Decreto-Ley nº 9/2006, de 6 de enero, lo que genera una contradicción con la normativa española que no contempla esta posibilidad.

En junio de 2023 la Marina Mercante española publica las recomendaciones a los navegantes en caso de interacciones con orcas, en las que propone justo lo contrario que se había propuesto hasta el momento, es decir, no detener la embarcación:

1. Evitar que las personas a bordo se acerquen a las bandas.
2. Navegar a motor evitando parar la embarcación hacia aguas menos profundas lo más próximo que sea posible a la costa.
3. Tomar registro fotográfico de los ejemplares de orca involucrados en el suceso.
4. Informar de aquellos sucesos susceptibles de ser un peligro para la navegación.

Lo curioso en este caso es que la propia recomendación indica que se extremará el cumplimiento de lo dispuesto en el Real Decreto 1727/2007 y las recomendaciones que se incluyen contravienen esta normativa.

Por tanto, en 2023 los protocolos de actuación recomendados por las autoridades españolas y portuguesas son contradictorios.

El análisis de los datos indica que el protocolo GTOA, aceptado por todos hasta 2023 y mantenido como recomendación en Portugal, se basa en la reducción de las motivaciones. Las orcas, como todos los delfines, compiten en velocidad con el barco, por lo tanto, la velocidad es una motivación para ellas. La reducción de la velocidad reduce sus motivaciones y así lo indica el testimonio de muchos de los navegantes que declaran que las orcas pierden interés en ese momento. Ciertamente, no es efectivo en el 100 % de las ocasiones, pero los datos indican que en el 60 % de las interacciones que detuvieron el barco las orcas perdieron interés y se fueron. En los casos en los que no se detiene la embarcación o bien se acelera, se llega en menor tiempo a situaciones graves.

Hay que tener en cuenta que en la mayor parte de las ocasiones las orcas no se muestran previamente a la interacción, y cuando las tripulaciones son conscientes del inicio de una interacción están ya sintiendo golpes, fuertes giros de la rueda del timón o giros del propio barco. En esta situación es inviable la navegación sin grave riesgo de lesión del patrón de la embarcación. Hay que tener en cuenta que, debido al fenómeno físico denominado velocidad crítica de casco, una embarcación de 13 m no puede superar los 8,3 nudos de velocidad, en cambio las orcas alcanzan los 22-26 nudos

(Samarra y Esteban, 2022), por lo que nunca un velero podrá escapar a su persecución en velocidad.

Cabe destacar un aumento de los avistamientos en 2023 a causa del uso de la aplicación móvil GT orcas, en cambio destaca una fuerte reducción de la aportación de la información de las interacciones por parte de los navegantes a GTOA, pasando de un 90 % en 2020 a un 58 % en 2023, esta situación se debe a la desconfianza de los navegantes y a la dispersión de las fuentes de recopilación, también a la falta de información por parte de las autoridades de salvamento españolas.

10. ¿QUÉ HACER?

El seguimiento de los casos es fundamental para el mejor conocimiento de las interacciones y de las orcas implicadas, pero no es suficiente evitar el conflicto entre orcas y navegación, por lo que en este momento el GTOA mantiene conversaciones con especialistas y entidades para abordar este tema desde diferentes perspectivas siempre teniendo en cuenta los métodos no invasivos y la conservación de una especie protegida.

En este sentido se están estudiando líneas de trabajo con informáticos, ingenieros navales, ingenieros acústicos y otros especialistas, incidiendo en la divulgación y educación ambiental.

También es necesario incrementar la investigación para mejorar la cobertura de los datos disponibles, descubrir la intencionalidad de las orcas: desvelando qué ejemplares, cómo, cuándo, dónde y las razones que las llevan al contacto físico con los barcos.

El papel de las administraciones es crucial a la hora de transmitir información coherente y coordinada a la sociedad, poniendo en marcha las herramientas necesarias para paliar el impacto económico de las interacciones y manteniendo las labores de conservación de la especie.

11. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todos los navegantes que nos aportaron información a través de la aplicación móvil GT orcas o de la Cruising Association (<https://www.thecca.org.uk/>). La *web* y la *app* se desarrollaron en el marco del proyecto "FriendShip orcas", financiado por la Fundación Santander. La aportación de Alfredo López está financiada por fondos nacionales portugueses (OE), FCT N° 4, 5 y 6 del art. 23, Decreto-Ley 57/2016 y Ley 57/2017.

12. REFERENCIAS

Bradshaw, G. A., Capaldo, T., Lindner, L., y Grow, G. (2008). Building an inner sanctuary: complex PTSD in chimpanzees. *Journal of Trauma & Dissociation*, 9(1): pp. 9-34. <https://doi.org/10.1080/15299730802073619>

Bradshaw, G.A., y Schore, A.N. (2007). How elephants are opening doors: developmental neuroethology, attachment and social context. *Ethology*, 113(5): pp. 426-436. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0310.2007.01333.x>

Esteban, R. (2023). Catálogo de foto-identificación das orcas (*Orcinus orca*) ibéricas. Friendship-orca Project, Fundación Santander-CEMMA-GTOA. 70 pp. <https://www.orcaiberica.org/catalogo>

Esteban, R., López, A., García de los Ríos, A., Ferreira, M., Martinho, F., Méndez-Fernández, P., Andréu, E., García-Gómez, J.C., Olaya-Ponzzone, L., Espada-Ruiz, R., Gil-Vera, F.J., Martín, C.,

García-Bellido, E., Sequeira, M., y Martínez-Cedeira, J.A. (2022). Killer whales of the Strait of Gibraltar, an endangered subpopulation showing a disruptive behavior. *Marine Mammal Science*, 38(4): pp. 1699-1709. <https://doi.org/10.1111/mms.12947>

Esteban, R., Verborgh, P., Gauffier, P., Giménez, J., Afán, I., Cañadas, A., García, P., Murcia, J.L., Magalhães, S., Andréu, E., y De Stephanis, R. (2014). Identifying key habitat and seasonal patterns of a critically endangered population of killer whales. *Journal of the Marine Association of the United Kingdom*, 94(6): pp. 1317-1325. doi: 10.1017/S002531541300091X

Esteban, R., Verborgh, P., Gauffier, P., Giménez, J., Guinet, C., y De Stephanis, R. (2016b). Dynamics of killer whale, bluefin tuna and human fisheries in the Strait of Gibraltar. *Biological Conservation*, Vol. 194, pp. 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.11.031>

Foote, A.D., Griffin, R.M., Howitt, D., Larsson, L., Miller, P.J.O., y Rus Hoelzel, A. (2006). Killer whales are capable of vocal learning. *Biology Letters*, 2(4): pp. 509-512.

Foote, A.D., Vilstrup, J.T., De Stephanis, R., Verborgh, P., Abel Nielsen, S.C., Deaville, R., Kleivane, L., Martín, V., Miller P.J.O., Oien, N., Pérez-Gil, M., Rasmussen, M., Reid, R.J., Robertson, K.M., Rogan, E., Similä, T., Tejedor, M., Vester, H., Víkingsson, G.A., Willerslev, E., Gilbert, M.T.P., y Piortney, S.B. (2011). Genetic differentiation among North Atlantic killer whale populations. *Molecular Ecology*, 20(3): pp. 629-641. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.2010.04957.x>

García-Tíscar, S. (2010). *Interacciones entre delfines mulares (Tursiops truncatus), orcas (Orcinus orca) y pesquerías en el mar de Alborán y estrecho de Gibraltar* [tesis doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid.

Higdon, J.V., y Ferguson, S.H. (2014). Inuit Recollections of a 1950s Killer Whale (*Orcinus orca*) Ice Entrapment in Foxe Basin, Nunavut, Canada. *Aquatic Mammals*, 40(1): pp. 9-19. <http://dx.doi.org/10.1578/AM.40.1.2014.9>

López, A., y Esteban, R. (2021). Elaboración de un estudio científico sobre la interacción de la población de orca (*Orcinus orca*) del estrecho de Gibraltar con embarcaciones, para el diseño y propuesta de medidas de prevención, actuación y gestión. Informe técnico. Intemares, 88 pp. <https://www.dropbox.com/s/7cryarnpw2fr14s/INFORME-OOR-2021.pdf?dl=0>. Anexos: <https://www.dropbox.com/s/hyhl66qm8hm86t7/INFORME-OOR-2021-ANEXOS%20I-V-DEF.pdf?dl=0>

Marino, L. (2004). Cetacean brain evolution: Multiplication generates complexity. *International Journal of Comparative Psychology*, 17(1): pp. 1-16.

Notarbartolo-di-Sciara, G. (1977). A killer whale (*Orcinus orca* L.) attacks and sinks a sailing boat. *Natura*, 68, pp. 218-220.

Rendell, L., y Whitehead, H. (2001). Culture in whales and dolphins. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(2): pp. 309-324. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0100396X>

Rizzolo, J.B., y Bradshaw, G.A. (2016). Prevalence and Patterns of Complex PTSD in Asian Elephants (*Elephas maximus*). En A. Manatunga (ed.), *Asian Elephants in Culture and Nature*. Kelaniya, Sri Lanka: Centre for Asian Studies, University of Kelaniya.

Samarra, F.I.P., y Esteban, R. (2022). Killer Whale *Orcinus orca* (Linnaeus, 1758). En K. Hackländer, y F.E. Zachos (eds.), *Handbook of the Mammals of Europe*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-65038-8_100-1

Whitehead, H., Rendell, L., Osborne, R.W., y Würsig, B. (2004). Culture and conservation of non-humans with reference to whales and dolphins: review and new directions. *Biological Conservation*, 120(3): pp. 427-437. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.03.017>

CAMINOS DE INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

AUMENTA HASTA EL 21 % LA SUPERFICIE MARINA PROTEGIDA EN ESPAÑA*

Fernando Magdaleno¹, Ignacio Torres²

¹ Doctor ingeniero de montes. Subdirector general de Biodiversidad Terrestre y Marina. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

² Biólogo. Subdirector de Biodiversidad y Cambio Climático de la Fundación Biodiversidad. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

* E-mail: prensa@fundacion-biodiversidad.es

La diversidad biológica de los mares españoles es extraordinaria. Nuestras aguas jurisdiccionales presentan la mayor diversidad biológica marina de los países europeos, contando con al menos 9.856 especies de invertebrados, 999 de algas y 1051 de peces, de acuerdo con el Informe Anual 2022 sobre el estado del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad en España (MITECO).

Especies tan emblemáticas como los cetáceos, las tortugas, las aves marinas, los corales o las praderas marinas son constituyentes de ecosistemas marinos de enorme relevancia ambiental, social y económica, pues contribuyen al equilibrio de las condiciones ambientales, y la redistribución del calor, y aportan la mayor producción de oxígeno del planeta y la más eficaz captación de dióxido de carbono del mundo.

Por consiguiente, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico es plenamente consciente de la necesidad de garantizar el mantenimiento de los servicios de los ecosistemas marinos, ya que del mar depende el modo de vida de millones de personas en nuestro país.

En este contexto, las áreas marinas protegidas constituyen un instrumento que brinda numerosos beneficios económicos y ambientales, además de culturales, relacionados con la salud y el bienestar humano. Con una gestión eficaz contribuyen, entre otros, a la regulación climática y demuestran su resiliencia ante los impactos del cambio climático. Además, son una herramienta clave para la protección de la biodiversidad. Mantener su

buen estado de conservación es esencial para preservar la integridad, el equilibrio y el funcionamiento de los ecosistemas y garantizar la continuidad de sus servicios, también para el ser humano y la economía.

Por ello, el Gobierno de España mantiene su firme compromiso con el objetivo de lograr en 2030 la protección del 30 % de sus aguas.

Así, España cuenta desde diciembre de 2023 con siete nuevos espacios marinos en la Red Natura 2000, la red de espacios protegidos de la Unión Europea y la más grande del mundo. Con esta incorporación, nuestro país eleva hasta casi el 21 % su superficie marina protegida, lo que representa un salto cualitativo significativo, desde el 1 % de hace tan solo una década.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) aprobó, el 26 de diciembre de 2023 (Orden TED/1416/2023) la propuesta para la inclusión de seis espacios marinos protegidos en la lista de Lugares de Importancia Comunitaria (LIC) y declaró dos Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Ambas, ZEPA y LIC, son figuras pertenecientes a la Red Natura 2000.

Los espacios propuestos como LIC son: (i) Espacio marino Cañones de Alicante, (ii) Canal de Ibiza, (iii) Montes submarinos del suroeste de Canarias, (iv) Montes submarinos del noreste de Canarias, (v) Espacio marino Jaizkibel-Capbretón, y (vi) Estrecho occidental. Este último espacio se declara también como ZEPA. La segunda ZEPA declarada es el "Corredor migratorio galaico-cantábrico occidental", a partir de la ampliación y unificación de las ZEPA localizadas en la costa gallega y cantábrica occidental. Por último, también se amplía hasta la línea de costa la ZEPA Espacio marino del Baix Llobregat frente al municipio de Ca l'Arana, contribuyendo así a una mejor protección de este importante espacio marino.

Con estas incorporaciones, la Red Natura 2000 marina en aguas españolas progresa hacia el cumplimiento del compromiso internacional de alcanzar el 30 % de la superficie marina protegida en 2030, establecido en el Marco Global de Biodiversidad Kunming-Montreal del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD) y en la



Figura 1. Delfines moteados (*Stenella frontalis*).



Figura 2. Gorgonia roja (*Paramuricea clavata*).

Estrategia 2030 sobre Biodiversidad de la Unión Europea (UE), con los que están alineados el Plan estratégico estatal del patrimonio natural y de la biodiversidad a 2030 (R.D. 1057/2022) y la Declaración del Gobierno ante la Emergencia Climática y Ambiental (2020).

El papel de la Red Natura 2000, como herramienta de la política europea de conservación de la biodiversidad, es crucial para este propósito. Configurada a partir de las Directivas Hábitats y Aves, la red cumple un doble cometido: proteger y mantener en un estado de conservación favorable de los hábitats y especies de alto valor ecológico, y garantizar el desarrollo económico respetuoso y compatible con estos importantes valores naturales. Ambas prioridades se plasman a través de los planes de gestión de los espacios que integran la red.

Los valores que se protegen en estos siete nuevos espacios son muy variados, ya que pertenecen a cuatro de las cinco demarcaciones marinas en las que está ordenado el litoral español, y cumplen importantes funciones. Por ejemplo, el área occidental del estrecho de Gibraltar, además de separar el continente europeo y africano, supone el único punto de conexión entre las aguas del océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Atesora una elevada productividad biológica gracias a los sistemas de corrientes y los procesos de mezcla que tienen lugar en este cañón submarino. Por él, pasa casi la totalidad de la población mundial de pardela balear (*Puffinus mauretanicus*) y de la pardela cenicienta mediterránea (*Calonectris diomedea*).

Buena parte de los valores más significativos de estos espacios se refieren a la cría, alimentación y migración de aves y de numerosas especies de cetáceos y tortugas, y a la preservación de arrecifes que albergan complejas y amenazadas comunidades de organismos, como los corales, esponjas y las gorgonias del hábitat de interés comunitario 1170. También de otros hábitats propiciados por la presencia de montes submarinos, cuevas marinas sumergidas o semisumergidas, o los llamados campos de *pockmarks*, depresiones del terreno en zonas de sedimento arenoso de hasta 45 metros de profundidad y varios cientos de metros de anchura, que pueden estar formados por emisiones de gases. En los *pockmarks* se pueden encontrar estructuras formadas por bacterias capaces de vivir en ese entorno. Se necesitan miles de

años para que se forme una comunidad tan especial, por lo que su conservación es fundamental.

La identificación de gran parte de estos lugares se ha basado en la propuesta científica de adecuación de la Red Natura 2000 marina en España, elaborada en el marco del proyecto LIFE INTEMARES con la participación de 170 personas expertas de reconocido prestigio pertenecientes a 65 organizaciones del ámbito de la investigación y la conservación del medio marino, y en la priorización posterior realizada desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico teniendo en cuenta criterios ecológicos y socioeconómicos.

España dedica grandes esfuerzos a la investigación marina y a la protección del mar. En sus más de 10.000 km de costa y un millón de km² de aguas jurisdiccionales cuenta con una gran representación de hábitats marinos y especies de interés comunitario.

Aunque las lagunas de conocimiento de los ecosistemas marinos son todavía amplias, debe ponerse en valor el esfuerzo de los últimos años en el ámbito de la investigación de la biodiversidad marina, tanto a través de las inversiones propias del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico para el seguimiento de los hábitats marinos y de las especies marinas protegidas, como mediante las colaboraciones con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (con aportaciones económicas que en 2023 han alcanzado los 14.700.000 euros), así como a través del desarrollo de proyectos LIFE marinos coordinados por la Fundación Biodiversidad del MITECO: el LIFE+ INDEMARES, desarrollado entre 2009 y 2014, y el LIFE INTEMARES, aún vigente.

En las 175 campañas oceanográficas y en los seguimientos llevados a cabo hasta ahora, se han descubierto decenas de especies nuevas para la ciencia, además de incorporarse otras muchas al inventario español, se ha aumentado el conocimiento de la distribución geográfica de hábitats y especies presentes en áreas sin explorar y se ha realizado el seguimiento de la distribución y estado de conservación de muchos de estos valores naturales.

A la importante contribución científica se suma la necesaria participación de los sectores implicados para asegurar la gestión efectiva de los espacios marinos y el desarrollo de actividades compatibles con sus valores naturales. Entre otros ejemplos, el proyecto LIFE INTEMARES ha implicado hasta la fecha más de 13.000 personas de 925 entidades en diferentes eventos y procesos, con las que se han creado estrategias de gobernanza y capacitación, que permiten avanzar hacia modelos más integradores en la gestión de los espacios marinos



Figura 3. Pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*).



Figura 4. Praderas de posidonia (*Posidonia oceanica*).

protegidos. En relación con ello, se ha puesto en marcha un conjunto de actuaciones en el ámbito formativo, con el fin de transmitir a la sociedad los valores de la Red Natura 2000 marina y aumentar la conciencia ambiental entre los sectores económicos vinculados al mar.

La necesidad de asegurar la salud de los ecosistemas marinos exige, además, de la protección a través de los espacios marinos protegidos, una gestión efectiva de estos lugares en los que conjugar la protección y el mantenimiento de los hábitats y las especies con un desarrollo económico respetuoso con los valores y servicios ambientales proporcionados por el medio marino.

En consecuencia, desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se sigue trabajando en la elaboración participada de los planes de gestión de espacios y áreas protegidas marinas, con la participación efectiva de los usuarios y grupos de interés en relación a los espacios marinos protegidos; en la salvaguarda de estos espacios respecto a las posibles repercusiones que planes, programas o proyectos puedan generar sobre estas áreas de elevado valor natural con el fin de compatibilizar los usos y actividades humanas en estos espacios; así como en actuaciones de conservación y restauración de hábitats y especies para mejorar su conocimiento y mitigar los principales impactos que sufren. En esta labor, se apoya, entre otros, en iniciativas como el proyecto LIFE INTEMARES, que cuenta con la contribución del programa LIFE de la Unión Europea y que está coordinado por la Fundación Biodiversidad del

MITECO, con la participación de diferentes socios: el propio ministerio, a través de la Dirección General de Biodiversidad, Bosques y Desertificación y la Subdirección para la Protección del Mar; la Junta de Andalucía, a través de la Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul, así como de la Agencia de Medio Ambiente y Agua; el Instituto Español de Oceanografía; AZTI; la Universidad de Alicante; la Universidad Politécnica de Valencia; la Confederación Española de Pesca (CEPESCA), SEO/BirdLife y WWF España.

Existe un consenso internacional acerca de la relevancia de los ecosistemas marinos para nuestra supervivencia y de los impactos humanos sobre los mares y océanos, que según algunos autores alcanzaría a un 87-90 % de su superficie global. Pero falta profundizar en el conocimiento tanto de la propia complejidad marina como de dichos impactos para poder actuar de forma adecuada y revertir el daño. En este camino múltiple de investigación, gestión, participación y sensibilización, España está avanzando de manera decidida.

Referencias

Orden TED/1416/2023, de 26 de diciembre, del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Democrático. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-26741

Varios autores (Coordinación WWF España) (2021). Propuesta de adecuación de la Red Natura 2000 marina. En el marco del LIFE IP INTEMARES. https://intemares.es/wp-content/uploads/2022/06/propuesta_adecuacion_rn2000.pdf

Web LIFE INTEMARES: <https://intemares.es/>

Web LIFE INDEMARES: <https://www.indemares.es/>

Varios autores (2023). Protección y recuperación de los océanos y de la biodiversidad marina en España. Revista *Ambienta*, nº 137, monográfico. <https://www.revistaambienta.es/ambienta-137>

Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, y Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino

The Habitats Directive: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/habitats-directive_en

The Birds Directive: https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/birds-directive_en

LIFE Programme: https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en



Figura 5. Tortuga boba o común (*Caretta caretta*).

La BNE presenta la exposición 'Agustín de Betancourt 1758-1824. Fundador de la Escuela de Caminos y Canales. Ingeniero Cosmopolita', dedicada a hacer un recorrido por su figura, su obra y su tiempo

Marta Morueco O'Mullony^{1*}, Aída Suárez Díaz^{1*}

¹ Historiadora del arte. Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU), del CEDEX.

* E-mail: marta.morueco@cedex.es; aida.suarez@cedex.es

Esta exposición se celebra en la Sala Recoletos de la Biblioteca Nacional de España, en Madrid, entre el 6 de marzo y el 16 de junio de 2024, coincidiendo con el 200 aniversario del fallecimiento de Agustín de Betancourt. La muestra, resultado del trabajo conjunto de siete instituciones (la Biblioteca Nacional de España, el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, el Gobierno de Canarias, el Ayuntamiento de Puerto de la Cruz, la Fundación Juanelo Turriano y la Universidad Politécnica de Madrid), forma parte de las diferentes actividades del "Año Betancourt", proyecto impulsado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en conmemoración de esta efeméride. A través de 154 piezas, esta exposición, comisariada por Daniel Crespo Delgado, ofrece el mapa vital, la obra y el legado de este ingeniero cosmopolita.

La exposición queda organizada en tres secciones temáticas. La primera de estas, *Los viajes de Betancourt*, se centra en los numerosos viajes que realizó el ingeniero a lo largo de su vida y cómo estos fueron moldeando su instrucción académica. Esta formación comienza en su Tenerife natal, y prosigue en Madrid, donde estudia dibujo, matemáticas y maquinaria.

A partir de 1784 el ingeniero pasará largas estancias en Francia, donde entra en contacto con la *École des Ponts et Chaussées*. En Londres, Betancourt pudo conocer

importantes novedades tecnológicas, como la máquina de vapor de doble efecto de James Watt y Matthew Boulton, que más adelante ayudará a implementar en otros países. Además, se aborda su estancia en Rusia, donde trabaja como Inspector del Instituto del Cuerpo de Vías de Comunicación.

El ingenio de Betancourt, segundo bloque de la exposición, introduce, a través de maquetas, documentos y reconstrucciones audiovisuales la obra de este prolífico ingeniero. Destaca una detallada reproducción en madera de un telégrafo óptico que realizó en colaboración con el reputado relojero francés Abraham-Louis Breguet.

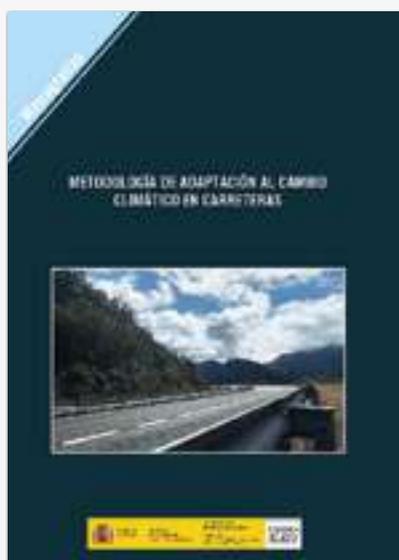
La última sección de la muestra, *El nacimiento de una profesión*, presenta las más relevantes aportaciones de Betancourt a la consolidación de la figura de los ingenieros civiles, como la fundación del Real Gabinete de Máquinas en el Palacio del Buen Retiro, la Inspección General de Caminos y Canales, y la Escuela de Caminos y Canales. Y concluye recogiendo el legado del célebre ingeniero y los consiguientes pasos del Cuerpo y la Escuela; desde la desaparición de ésta durante la guerra de Independencia (1808-1814) hasta su reapertura en 1834, y el posterior recorrido de los ingenieros de caminos como promotores de la modernidad y el progreso.

Catálogo

Acompañando la muestra se ha llevado a cabo la edición de un catálogo que reúne a un total de veinte investigadores nacionales e internacionales, dirigido por Daniel Crespo Delgado y Adrián Fernández Almoguer, y enmarcado en el Proyecto I+D+I "Agua y Luces. Tratados españoles de arquitectura hidráulica de la Ilustración", del Ministerio de Ciencia e Innovación. Estos artículos proponen un rico perfil de Agustín de Betancourt, acercando la imagen e innovaciones del ingeniero a nuestros días.



Maqueta del andamiaje proyectado por Betancourt para la elevación de las columnas de la catedral de San Isaac, en San Petersburgo. Colección de Maquetas de Historia de las Obras Públicas de CEHOPU (CEDEX).



Metodología de adaptación al Cambio Climático en carreteras. M-146
Methodology for Adaptation to Climate Change on Roads. M-146

Edición en papel

Autoría: AA. VV.

ISBN: 978-84-7790-658-2

Año: 2023

PVP: 20 €

Edición en línea

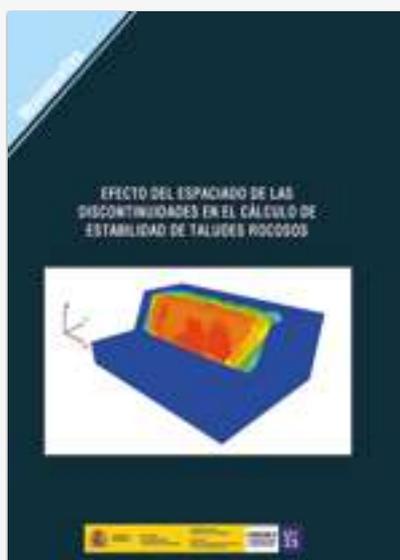
Autoría: AA. VV.

ISBN: 978-84-7790-655-9

PVP: 10 €

Los efectos de los eventos meteorológicos extremos sobre nuestras infraestructuras son cada vez más evidentes, muchos de ellos vienen intensificados por el cambio climático. La Asociación Técnica de la Carretera (ATC) decide crear en 2020, en el seno del Comité Técnico de Medio Ambiente, un grupo de trabajo transversal sobre cambio climático y resiliencia en carreteras. En este grupo se aborda un planteamiento metodológico para identificar los activos y servicios de transporte que podrían ser vulnerables a los impactos del cambio climático, evaluar el nivel de riesgo y orientar a las diferentes administraciones y agentes afectados en la toma de decisiones, sobre cuándo, cómo y para qué se debe realizar una respuesta adaptativa.

The effects of extreme weather events on our infrastructure are increasingly evident, many of them intensified by climate change. In 2020, the Technical Road Association (ATC) decided to set up, within the Technical Committee for the Environment, a transversal working group on climate change and resilience on roads. This group takes a methodological approach to identify transport assets and services that could be vulnerable to the impacts of climate change, evaluate the level of risk, and guide the different administrations and agents involved in making decisions about when, how, and why an adaptive response should be carried out.



Efecto del espaciado de las discontinuidades en el cálculo de estabilidad de taludes rocosos afectados por cuñas. M-147

Effect of the Spacing of Discontinuities on the Stability Calculation of Rock Slopes Affected by Wedges. M-147

Edición en papel

Autoría: Ignacio Pérez Ruiz, Mauro Muñiz Menéndez y Javier Moreno Robles

ISBN: 978-84-7790-662-9

Año: 2023

PVP: 20 €

Edición en línea

Autoría: AA. VV.

ISBN: 978-84-7790-663-6

PVP: 10 €

La evaluación de la estabilidad de cuñas en taludes rocosos suele realizarse mediante técnicas de proyección estereográfica y análisis de equilibrio límite. Sin embargo, esta metodología presenta varias limitaciones (por ejemplo: falta de información sobre las propiedades mecánicas de las discontinuidades o simplificación excesiva de la estructura), que podrían llevar a conclusiones poco precisas. En esta monografía, se recoge un nuevo enfoque mediante el que se evalúa el efecto del espaciado de las discontinuidades en la estimación del factor de seguridad de taludes rocosos afectados por posibles roturas tipo cuñas. Para este propósito, se seleccionó un código numérico de elementos distintos en 3 dimensiones (3DEC) para llevar a cabo numerosas simulaciones en las que se estudió el factor de seguridad de dos tipos de taludes afectados por diferentes conjuntos de discontinuidades, utilizando para ello el método de reducción de la resistencia al corte (SSR).

The evaluation of the stability of wedges on rock slopes is usually carried out using by stereographic projection techniques, and limit equilibrium analysis. However, this methodology presents several limitations (for example: lack of information on the mechanical properties of discontinuities or oversimplification of the structure), which could lead to imprecise conclusions. This monograph presents a new approach whereby the effect of the spacing of discontinuities on the estimation of the safety factor of rock slopes affected by possible wedge-type failures is evaluated. For this purpose, a numerical code of different elements in 3 dimensions (3DEC) was selected to carry out numerous simulations in which the safety factor of two types of slopes affected by different sets of discontinuities was studied, using the method of cutting resistance reduction (SSR).



Influencia del agua de mar en el curado del hormigón. Aplicación al caso de los cajones flotantes

Influence of Seawater Curing on Reinforced Concrete. Application to the Case of Floating Caissons

Edición en papel

Autoría: Víctor D. Lanza Fernández, Gonzalo Pazó Coyola, Pilar Alaejos Gutiérrez y Ana Lope Carvajal

ISBN: 978-84-7790-665-0

Año: 2023

PVP: 10 €

Edición en línea

Descarga gratuita en: <https://ceh.cedex.es/tienda/?product=influencia-del-agua-de-mar-en-el-curado-del-hormigon-aplicacion-al-caso-de-los-cajones-flotantes-digital>

La tecnología de cajones flotantes está ampliamente extendida en España para la construcción de diques y muelles. Este sistema presenta ventajas económicas y constructivas, pero conlleva que el hormigón del cajón, que quedará permanentemente sumergido en su vida de servicio, haya entrado en contacto prematuro con el agua de mar durante su ejecución, lo cual puede llevar a cuestionar la futura durabilidad del cajón debido a un mayor riesgo de corrosión del armado. En 2018, Puertos del Estado encarga al CEDEX realizar una investigación que profundice en el alcance de curar con agua de mar estructuras portuarias de hormigón armado que permanecerán sumergidas. Para tal fin, el Área de Ciencia de Materiales del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales realiza una amplia batería de ensayos en laboratorio de hasta 4 años y medio de duración, así como una evaluación sobre cajones flotantes ya colocados en los puertos. Esta publicación recoge los resultados más significativos y las conclusiones alcanzadas en el CEDEX tras los estudios llevados a cabo. El estudio realizado, riguroso y muy completo, ha permitido concluir que no existe un riesgo significativo mayor de corrosión del armado debido al proceso constructivo de los cajones en plataforma flotante. Los resultados alcanzados tienen un interés máximo ya que resuelven un problema real planteado y avalan la durabilidad de los cajones ejecutados con esta tecnología. Por ello, este documento se convierte en una herramienta técnica valiosa para los puertos españoles, ya que asegura la durabilidad de sus estructuras portuarias, y también para las empresas constructoras españolas, que son referente internacional en esta tecnología, y encontrarán en esta publicación un aval técnico para poder aplicarla en otros países.

The floating caisson system is a procedure widely used in Spain to construct breakwaters and docks. This system has constructive and economic advantages, but it means that the concrete, which will be permanently submerged during its service life, has been exposed to seawater prematurely during its construction, which may lead to question the future durability of the caisson due to an increased risk of corrosion of the reinforcement. In 2018, State Ports commissioned CEDEX to carry out a thorough study to assess the influence of seawater curing on reinforced concrete port structures permanently submerged under the sea. For that purpose, it is carried out a wide range of laboratory tests lasting up to 4.5 years, as well as an evaluation of floating caissons placed in the ports. This publication brings together the most significant results and conclusions reached at CEDEX after all the studies carried out. This rigorous and very complete study has led to the conclusion that there is no significant risk of corrosion of the reinforcement due to the construction process of the caissons on a floating platform. The results achieved are of maximum interest as they solve a real problem and guarantee the durability of caissons built with this technology. Therefore, this document becomes a valuable technical tool for Spanish Ports, since it ensures the durability of their structures, and for Spanish construction companies, which are an international reference in this technology, and will find in this publication a technical endorsement to apply in other countries.



Influence of Seawater Curing on Reinforced Concrete. Application to the Case of Floating Caissons

Influencia del agua de mar en el curado del hormigón. Aplicación al caso de los cajones flotantes

Edición en papel

Autoría: Víctor D. Lanza, Fernández, Gonzalo Pazó Coyola, Pilar Alaejos Gutiérrez y Ana Lope Carvajal

ISBN: 978-84-7790-666-7

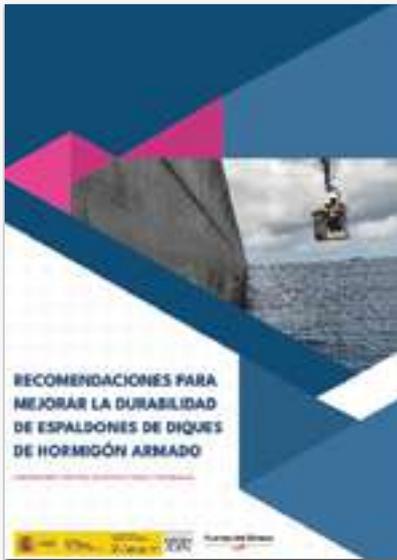
Año: 2023

PVP: 10 €

Edición en línea

<https://ceh.cedex.es/tienda/?product=influence-of-seawater-curing-on-reinforced-concrete-application-to-the-case-of-floating-caissons-digital>

The floating caisson system is a procedure widely used in Spain to construct breakwaters and docks. This system has constructive and economic advantages, but it means that the concrete, which will be permanently submerged during its service life, has been exposed to seawater prematurely during its construction, which may lead to question the future durability of the caisson due to an increased risk of corrosion of the reinforcement. In 2018, State Ports commissioned CEDEX to carry out a thorough study to assess the influence of seawater curing on reinforced concrete port structures permanently submerged under the sea. For that purpose, it is carried out a wide range of laboratory tests lasting up to 4.5 years, as well as an evaluation of floating caissons placed in the ports. This publication brings together the most significant results and conclusions reached at CEDEX after all the studies carried out. This rigorous and very complete study has led to the conclusion that there is no significant risk of corrosion of the reinforcement due to the construction process of the caissons on a floating platform. The results achieved are of maximum interest as they solve a real problem and guarantee the durability of caissons built with this technology. Therefore, this document becomes a valuable technical tool for Spanish ports, since it ensures the durability of their structures, and for Spanish construction companies, which are an international reference in this technology, and will find in this publication a technical endorsement to apply in other countries.



Recomendaciones para mejorar la durabilidad de espaldones de diques de hormigón armado

Recommendations to Improve the Durability of Reinforced Concrete Dam Shoulders

Edición en papel

Autoría: Víctor G. Lanza Fernández, Pilar Alaejos Gutiérrez y Ana Lope Carvajal

ISBN: 978-84-7790-664-3

Año: 2023

PVP: 15 €

Edición en línea

Descarga gratuita en: <https://ceh.cedex.es/tienda/?product=recomendaciones-para-mejorar-la-durabilidad-de-espaldones-de-diques-de-hormigon-armado-digital>

El origen de esta publicación se sitúa en el año 2017 cuando, a instancias de Puertos del Estado y de las autoridades portuarias afectadas, el Área de Ciencia de Materiales del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales comienza el estudio de diferentes espaldones de diques de hormigón armado que han mostrado problemas de corrosión antes de finalizar la vida útil de 50 años para la que fueron diseñadas estas estructuras. El estudio en profundidad de las causas que, en cada caso, han sido el origen de la corrosión prematura del armado, ha permitido presentar una serie de **recomendaciones para mejorar la durabilidad de los espaldones de diques de hormigón armado**. El alcance de esta publicación incluye aspectos fundamentales como identificar correctamente el ambiente de exposición de la estructura y su agresividad, diseñar la geometría del espaldón incluyendo criterios de durabilidad, la selección idónea de los materiales para fabricar el hormigón, el control de estos materiales durante la ejecución de la obra y la realización de una correcta puesta en obra. Todo ello para lograr una adecuada durabilidad de los espaldones de diques que permita completar su vida útil. El contenido de este documento tiene un gran interés ya que resuelve un problema real planteado en puertos españoles, y permitirá, en el futuro, realizar obras portuarias más durables. Desde el CEDEX agradecemos a Puertos del Estado su interés por querer ampliar el estado actual del conocimiento en todo lo concerniente a las patologías de corrosión del hormigón expuesto al ambiente marino, así como la confianza depositada en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales para llevar a cabo esta tarea. También agradecemos a las diferentes autoridades portuarias que han colaborado en el desarrollo de este trabajo su confianza en el CEDEX y su apoyo para poder realizar con éxito el estudio de sus espaldones.

The origin of this publication dates back to 2017 when, at the request of State Ports and the affected Port Authorities, the Materials Science Area of the Central Laboratory of Structures and Materials began the study of different shoulders of reinforced concrete docks that had shown corrosion problems before the end of the 50-year useful life for which these structures were designed. The in-depth study of the causes that, in each case, had been the origin of the premature corrosion of the reinforcement has allowed us to present a series of recommendations to improve the durability of the shoulders of reinforced concrete dams. The scope of this publication includes fundamental aspects such as correctly identifying the exposure environment of the structure and its aggressiveness, designing the geometry of the shoulder including durability criteria, the ideal selection of materials to manufacture the concrete, the control of these materials during the execution of the work and carrying out a correct implementation. All this to achieve adequate durability of the dike shoulders, allowing them to complete their useful life. The content of this document is of great interest since it solves a real problem posed in Spanish ports and will allow, in the future, to carry out more durable port works. From CEDEX, we thank State Ports for its interest in expanding the current state of knowledge in everything related to the corrosion pathologies of concrete exposed to the marine environment, as well as the trust placed in the Central Laboratory of Structures and Materials to accomplish this task. We also thank the different Port Authorities that have collaborated in the development of this work for their trust in CEDEX and their support to successfully carry out the study of their shoulders.



XL Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras (3 Volúmenes)

XL Course on Wastewater Treatment and Operation of Treatment Plants (3 Volumes)

Edición en papel

Autoría: CEDEX

ISBN: 978-84-7790-660-5

Año: 2023

PVP: 100 €

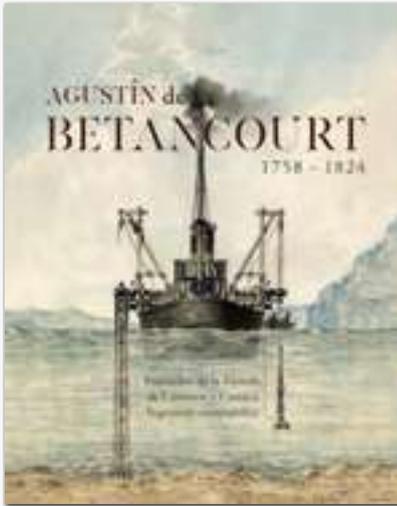
Edición digital en tarjeta USB

ISBN: 978-84-7790-661-2

PVP: 20 €

La recogida y tratamiento de las aguas residuales es una necesidad ineludible para la conservación y uso racional de los recursos hídricos. En España, a partir de la aprobación de la Directiva 91/271, se produjo el gran desarrollo de la depuración a través de sucesivos planes de saneamiento estatales y autonómicos. Sin embargo, a pesar de la gran evolución de estos años, y considerando el proceso de revisión actual de esta directiva, quedan todavía actuaciones por abordar, sobre todo en el rango de las menores poblaciones, y aspectos por mejorar, como la optimización energética de las instalaciones, la fiabilidad de los rendimientos, la gestión de pluviales o la estabilización de fangos. Por todo ello, sigue siendo necesaria la formación y actualización en los distintos sistemas de tratamiento, el funcionamiento y la explotación de las estaciones depuradoras, así como otros temas de gran interés relacionados como la reutilización de aguas, la generación y el control de olores, y el destino y valorización de los fangos procedentes de la depuración. Todos estos aspectos informan los contenidos de este curso en su XL edición.

The collection and treatment of wastewater is an unavoidable necessity for the conservation and rational use of water resources. In Spain, since the approval of Directive 91/271, there has been a great development of wastewater treatment through successive state and autonomous community sanitation plans. However, despite the great evolution of these years, and considering the current revision process of this directive, there are still actions to be addressed, especially in the range of smaller populations, and aspects to be improved, such as energy optimisation of facilities, reliability of performance, rainwater management or sludge stabilisation. For all these reasons, there is still a need for training and updating in the different treatment systems, the operation and operation of wastewater treatment plants, as well as other related subjects of great interest such as water reuse, the generation and control of odours, and the destination and recovery of sludge from wastewater treatment. All these issues shape the contents of this course in its XL edition.



Agustín de Betancourt (1758-1824). Fundador de la Escuela de Caminos y Canales. Ingeniero Cosmopolita

Agustín de Betancourt (1758-1824). Founder of the School of Roads and Canals. Cosmopolitan Engineer

Edición en papel

Autoría: AA. VV.

NIPO CEDEX: 197-24-003-0

Año: 2024

Edición en papel, disponible para la venta en:

<https://www.juaneloturriano.com/publicaciones>

El 26 de julio de 1824, el ingeniero español Agustín de Betancourt fallecía en San Petersburgo. Con motivo del segundo centenario de su muerte, esta exposición da a conocer el legado de uno de los principales ingenieros y técnicos de la Ilustración. Nacido en el Puerto de la Cruz (Tenerife), la trayectoria de Betancourt discurrió por una geografía singular. Desde La Laguna se trasladó a Madrid y viajó en varias ocasiones a París e Inglaterra, donde pasó largas temporadas. Incluso planeó un viaje fallido a Cuba. Sus últimos años de vida transcurrieron en Rusia.

Esta publicación reúne los contenidos presentados en la exposición homónima (del 6 de marzo al 16 de junio de 2024, en la Biblioteca Nacional de España, Madrid), en la que se muestra la extraordinaria labor que desarrolló Betancourt en el ámbito de la ingeniería civil, obteniendo el reconocimiento de destacadas autoridades políticas y científicas de la Europa de las Luces: su trabajo para reyes y ministros; sus relaciones con técnicos y emprendedores de distintos países; el estudio e invención de nuevas máquinas; su incansable implicación en la formación de nuevos cuadros técnicos y su decisivo papel en la creación de las primeras escuelas y museos de ingenieros de caminos y canales de España y Rusia.

On July 26, 1824, the Spanish engineer Agustín de Betancourt died in Saint Petersburg. On the occasion of the second centenary of his death, this exhibition reveals the legacy of one of the main engineers and technicians of the Enlightenment. Born in Puerto de la Cruz (Tenerife), Betancourt's career spanned a unique geography. From La Laguna he moved to Madrid, and traveled on several occasions to Paris and England, where he spent long periods of time. He even planned an unsuccessful trip to Cuba. He spent the last years of his life in Russia.

This publication brings together the contents presented in the homonymous exhibition (March 6-June 16, 2024, at the National Library of Spain, Madrid), which shows the extraordinary work that Betancourt developed in the field of civil engineering, obtaining the recognition of outstanding political and scientific authorities of the Europe of the Enlightenment: his work for kings and ministers; his relationships with technicians and entrepreneurs from different countries; the study and invention of new machines; his tireless involvement in the training of new technical staff, and his decisive role in the creation of the first schools and museums of road and canal engineers in Spain and Russia.

NORMAS DE REDACCIÓN

INTRODUCCIÓN

Ingeniería Civil (IC) se define como una publicación científico-técnica especializada en ingeniería civil y medioambiental. Es editada con periodicidad cuatrimestral por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), organismo público de referencia en los campos de la ingeniería civil, la edificación y el medioambiente, al que han estado ligados eminentes ingenieros españoles como Eduardo Torroja o José A. Jiménez Salas. IC cuenta con un sistema de revisión por pares que permite la evaluación externa de todos los artículos científico-técnicos recibidos, y acepta para su publicación artículos sobre trabajos relacionados con las siguientes áreas temáticas y tecnológicas de actividad: Aguas, Estructuras y Materiales, Puertos y Costas, Transporte y Movilidad, Carreteras, Sostenibilidad, Transición Ecológica, Geotecnia, Interoperabilidad Ferroviaria, Patrimonio Histórico de Obras Públicas, Economía Circular y Transferencia de Conocimiento. En este sentido, la revista realiza una labor fundamental como vehículo de difusión y transferencia tecnológica dentro de las áreas de conocimiento mencionadas.

PRESENTACIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS ARTÍCULOS

Los originales, que deberán ser inéditos, se harán llegar por correo electrónico a la dirección ingcivil@cedex.es, haciendo constar en el asunto del mensaje que se trata de un artículo presentado para su publicación en la revista IC. Ésta, por su parte, se compromete a adoptar una decisión sobre la publicación de originales en el plazo de seis meses, reservándose el derecho de publicación por un plazo de dos años de acuerdo con las necesidades de la misma.

Los originales seguirán la siguiente estructura: (1) página de título; (2) introducción que defina la finalidad del estudio; (3) objetivos perseguidos; (4) metodología utilizada; (5) resultados obtenidos y su significación; (6) conclusiones principales; (7) agradecimientos; y (8), referencias.

La página de título, a su vez, ha de incluir los siguientes componentes: (a) título en español e inglés; (b) nombre completo del autor/es así como su filiación académica y lugar de trabajo; (c) dirección de correo electrónico y postal del correspondiente autor/a de contacto o corresponding author; (d) resumen (español)/abstract (inglés), con una extensión entre 150-250 palabras; y (e), palabras clave (español) y keywords (inglés), con 5 términos como mínimo y 10 como máximo.

Los originales habrán de ir en español y su extensión, incluyendo las correspondientes imágenes, será entre 15 y 40 páginas, tamaño A4, en formato Word, a doble espacio y usando Times New Roman con un tamaño de fuente de 12 puntos. En casos excepcionales podrán publicarse artículos de mayor extensión, cuya aceptación quedará sujeta al criterio del Comité de Redacción de la revista.

Las figuras, cuyo objeto es simplificar y/o complementar el texto, se ordenarán según el orden de aparición en el texto, siendo identificadas con la expresión “figura 1”, “figura 2”, etc. Todas las figuras deberán llevar un pie de imagen o descriptor que ha de ser simple y claro. Más importante de todo, las figuras habrán de enviarse en los formatos propios de imagen (tiff., jpg., png., gif., etc.) para conformar los estándares de calidad plástica y gráfica establecidos por la revista. La resolución de las imágenes, para posterior impresión en papel, ha de ser 300 ppp (píxeles por pulgada), aunque 240 también se puede considerar un valor aceptable.

En el caso de las tablas, se seguirá el mismo criterio de numeración que en las figuras, utilizando la expresión “tabla 1”, “tabla 2”, etc. Todas las tablas llevarán un título en cursiva que ha de ser breve y explicativo.

Los títulos de los ejes de coordenadas y cualquier elemento de texto que se incorpore a las figuras y gráficos deben estar realizados en la misma fuente y tamaño (preferentemente en Minion Pro).

Por su parte, es conveniente que las fórmulas y ecuaciones incluidas en el artículo sean realizadas en Cambria Math con un tamaño de fuente de 9 puntos. En todo caso, y al igual que las figuras y tablas, dichas fórmulas/ecuaciones habrán de ir numeradas correlativamente, poniendo el número de orden entre corchetes [1], [2], etc.

Las citas de libros y artículos aparecerán preferentemente en el cuerpo del texto y no a pie de página. Las referencias que se inserten dentro del texto incluirán, entre paréntesis, el autor/res y el año que corresponda.

En lo que se refiere a la citación de fuentes bibliográficas o de cualquier otro tipo, se recomienda la utilización de un programa de gestión bibliográfica para insertar las referencias (EndNote, Mendeley, etc.), utilizando el estilo Harvard-APA (American Psychological Association: <https://www.apa.org/>). Sirvan a este respecto los ejemplos que siguen a continuación:

Libros

Dean, E.T.R. (2010). *Offshore Geotechnical Engineering*. London: Thomas Telford Publishing.

Fernández Casado, C. (2013). *Historia del puente en España. Puentes romanos*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Jiménez Salas, J.A., de Justo, J.L., y Serrano, A. (1981). *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del Suelo y de las Rocas*. Madrid: Editorial Rueda.

Capítulos de libros

Richardson, W.J. (1995). Documented Disturbance Reactions. En W.J. Richardson, C.R. Greene, C.I. Malme y D.H. Thomson (eds.), *Marine Mammals and Noise* (pp. 241-324). San Diego, CA (EE UU): Academic Press.

Artículos de revistas

Casagrande, A. (1965). Role of the Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering. Terzaghi Lecture. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 91(4): pp. 1-40.

Dapena, E., Alaejos, P., Lobet, A., y Pérez, D. (2011). Effect of Recycled Sand Content on Characteristics of Mortars and Concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(4): pp. 414-422.

Tamarit, J., e Iglesias, J.I. (2016). Los sistemas de señalización en España: el ERTMS y el ASFA Digital. *Ingeniería Civil*, nº 182, pp. 27-39.

Ponencias, congresos, conferencias y seminarios

Stive, M.J.F., De Schipper, M.A., Luijendijk, A.P., Ranasinghe, R.W.M.R.J.B., Van Thiel de Vries, J.S.M., Aarninkhof, S., Van Gelder-Maas, C., De Vries, S., Henríquez, M., y Marx, S. (2013). The Sand Engine: A Solution for Vulnerable Deltas in the 21st Century? En *Coastal Dynamics: 7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon, France, 24-28 June, 2013* (pp. 1537-1546). Bordeaux (France): Bordeaux University.

Tesis no publicadas

Toledo, M.A. (1997). *Presas de escollera sometidas a sobrevertido: estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa* [tesis doctoral inédita]. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Recursos electrónicos

A la referencia correspondiente según el tipo de documento (libro, artículo, etc.), se añadirá a continuación, si se estima oportuno, el número de identificación digital (DOI, por sus siglas en inglés), que es un identificador único y permanente para las publicaciones electrónicas, y si no lo tuviese se consignará la URL que corresponda poniendo a continuación “Disponible en: <http://xxxxx>”

García de Arquer, F.P. et al (2021). Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges. *Science*, 373, eaaz8541. DOI: 10.1126/science.aaz8541

United States Environmental Protection Agency (EPA) (2018). *Guide to Purchasing Green Power*. Washington, DC (EE UU): EPA. Disponible en: <https://www.epa.gov/greenpower/guide-purchasing-green-power>



PLAN ESTRATÉGICO CEDEX 2023 - 2025

- |AFRONTANDO LOS NUEVOS RETOS| -



Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

DIRECCIÓN

Directora: **Áurea Perucho Martínez**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 75 14/15

SECRETARÍA DEL CEDEX

Secretaria: **Sonia Fernández-Pacheco Rodríguez**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 75 01

GABINETE DE RELACIONES EXTERNAS Y
ACTIVIDADES COMERCIALES

Jefe: **Miguel González Portal**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 74 90

CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS

Director: **Federico Estrada Lorenzo**
Pº Bajo de la Virgen del Puerto, 3 - 28005 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 79 00

CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTAS

Director: **José María Grassa Garrido**
C/ Antonio López, 81 - 28026 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 77 00

CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE

Directora: **Laura Parra Ruiz**
Autovía de Colmenar Viejo, PK. 18,2 - 28760 El Goloso, Madrid
Tel.: (+34) 91 335 78 00

CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS

Director: **Francisco Javier Cachón de Mesa**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 72 00

LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES

Directora: **Pilar Alaejos Gutiérrez**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 335 74 11/13

LABORATORIO DE GEOTECNIA

Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo**
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 73 43/46

LABORATORIO DE INTEROPERABILIDAD FERROVIARIA

Director: **Jorge Ignacio Iglesias Díaz**
C/ Julián Camarillo, 30 - 28037 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 71 50

CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE OBRAS PÚBLICAS Y
URBANISMO (CEHOPU)

Miguel González Portal
C/ Alfonso XII, 3 y 5 - 28014 Madrid
Tel.: (+34) 91 335 74 90