



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UPC BARCELONATECH



# JORNADA DE RECERCA I INNOVACIÓ A L'ESCOLA DE CAMINS

Barcelona, 15 i 16 de novembre de 2011

## RESUM DE LES PONÈNCIES

Amb la col·laboració de:



**Camins.cat**

Col·legi d'Enginyers de Camins,  
Canals i Ports - Catalunya



## CONTINGUTS

**Reflexiones sobre el tránsito de la idea al producto en el entorno de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Barcelona.**

Eugenio Oñate y Pere-Andreu Ubach.

**Investigación e innovación en puentes y torres eólicas prefabricadas de hormigón pretensado.**

Antonio Marí, Jesús M. Bairán, Eva Oller y Noemí Duarte.

**Refuerzo de estructuras de hormigón armado con laminados de fibra de carbono (CFRP).**

Eva Oller, Antonio R. Marí y Jesús M. Bairán.

**Avances en modelos de análisis de estructuras de barras de hormigón frente a combinaciones de esfuerzos normales y tangentes**

Jesús M. Bairán, Antonio R. Marí, Steffen Mohr y Denise Ferreira.

**Optimal collapse simulator for three-dimensional frames**

J. Sarrate, A. Huerta, J. Bonet, J. Peraire, J. Saa-Seoane, and F. Vidal.

**Comportament resistent dels revestiments de túnel realitzats amb dovelles prefabricades de formigó.**

Oriol Arnau i Climent Molins.

**Backanalysis of measured movements in ageing tunnels.**

C. de Santos. , A. Ledesma, A. Gens.

**Hinchamiento en túneles por crecimiento de cristales y su modelación.**

Ramón, A., Alonso, E.

**Evaluación de la seguridad en problemas de mecánica de rocas mediante el método C- $\Phi$  reduction.**

Aliguer, I. Carol, E.E. Alonso.

**Lechago Dam. A case study.**

Eduardo. E. Alonso, Sebastià Olivella and Núria M. Pinyol.

**A bridge foundation analysis.**

Damians I.P., Olivella S., Josa A.

**Computational limit analysis for anchors and retaining walls.**

Jose J Muñoz, Andrei V Lyamin, Antonio Huerta.

**Avaluació de riscos ambientals mitjançant modelització geoquímica.**

Xavier Sánchez-Vila y Daniel Fernández-García.

**Modelització numèrica 2D en embassaments: temperatura i transport de sediments a l'embassament de Riba-Roja (riu Ebre).**

Marina Arbat, Ernest Bladé, Martí Sánchez-Juny, Josep Dolz.

**Aliviaderos escalonados sin cajeros laterales proyecto alivesca.**

Soledad Estrella, Martí Sánchez-Juny, Juan Pomares, Josep Dolz. Rafael Ibáñez de Aldecoa, María Domínguez, Jesús Rodríguez (Dragados), Luis Balairon, David López (CEDEX).

**Irrigation canal models for automatic control purposes.**

Klaudia Horváth, Eduard Galvis R., Manuel Gómez1, José Rodellar.

**Erosión local en pilas de puente: los procesos y su mitigación. Aplicación al pabellón puente de la expo 2008 de Zaragoza.**

Bateman, A.; Martín-Vide, Juan P.

**Análisis de datos composicionales: aguas, contaminantes, recursos, sociología...**

J.J. Egozcue, R. Tolosana-Delgado ,E. Jarauta-Bragulat , M.I. Ortego, J.L. Díaz-Barrero.

**Biogas production from algae biomass grown in high rate ponds for wastewater treatment.**

Fabiana Passos, Sabina Cordon, Maria Solé, Ivet Ferrer.

**Modelització dels processos físics, químics i biològics en aiguamolls construïts per al tractament d'aigües.**

Roger Samsó, Joan García.

**Investigació + enginyeria per a una zona costanera més sostenible.**

Agustín Sánchez-Arcilla, Manuel Espino, José Antonio Jiménez, Vicenç Gràcia, Marc Mestres, Joan Pau Sierra, César Möso, Francesc Xavier Gironella.

**Self-organized morphological patterns in coastal dynamics.**

Falqués, D. Calvete, N. Van den Berg, F. Ribas, A. Fernández, M., Caballeria.



**Avances en la simulación numérica de la propagación de oleaje en zonas costeras.**

David Modesto, Giorgio Giorgiani y Antonio Huerta.

**Análisis y previsión de fenómenos naturales peligrosos.**

R. Tolosana-Delgado, J.J. Egozcue, M.I. Ortego, A.Sánchez-Arcilla.

**The SMA: an effective damper in civil engineering that smooths oscillations.**

V. Torra., A. Isalgué, C. Auguet, G. Carreras.

**Simulació a escala atòmica de defectes en metalls i aliatges.**

Anna Serra.

**Metodologia d'avaluació energètica d'edificis.**

I. Rodríguez Cantalapiedra , M. Bosch.

**Modelització del comportament dels ferms semirrígids per optimitzar el seu disseny i manteniment.**

Miró, R. ; Rebollo, J.; Pérez Jiménez, F. ; Martínez, A.

**Valorización de cenizas de lodos de depuradora de aguas residuales como adición en morteros (conzen).**

Susanna Valls, M<sup>a</sup> Carmen Navarro.

**Utilización del hormigón con árido reciclado en la ciudad de Barcelona.**

Etxeberria Larrañaga, Miren.

**Utilización de áridos reciclados “Una oportunidad frente a la situación actual”.**

Marilda Barra, Diego Aponte, Sergio H. Piellarisi, Susanna Valls, Enric Vázquez.

**Estudio de hormigones con adición de polvo de neumático fuera de uso (NFU).**

Verónica Royano, Susanna Valls, Marilda Barra, Enric Vázquez.

**Impacto ambiental en el ámbito de los materiales de construcción.**

Marilda Barra, Diego Aponte, Susanna Valls, Enric Vázquez.

**Infraestructura y espacio urbano. proyectos de integración y transformación urbana.**

Magrinyà, F., Mayorga, M.

**Conèixer, valorar i divulgar les obres públiques com a patrimoni cultural.**

Teresa Navas, Francesc Magrinyà.

**La participació social en els plans de mobilitat de la UPC.**

Elisabet Roca i Míriam Villares.

**L'avaluació de l'impacte social en els processos de construcció d'infraestructures i reforma urbana.**

Míriam Villares i Elisabet Roca.

**Medida de la congestión del tráfico en ciudades.**

José Magín Campos Cacheda y Francesc Robusté Antón.

**Disseny eficient de xarxes de transport públic col·lectiu en zones urbanes**

M. Estrada., F. Robusté, H. Badia.

**Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals.**

Sergi Saurí and Enrique Martín.

**Mejorando el project appraisal. aportaciones a la evaluación de nuevas líneas de alta velocidad.**

Marta Sánchez Borràs, Francesc Robusté Antón, Mateu Turró Calvet.

**Asesoramiento sobre las medidas de gestión de la velocidad implantadas en la C-32.**

Josep Maria Torné Santos, Francesc Soriguera i Martí y Dulce María Rosas.

**Estimación del tiempo de viaje en autopistas.**

Francesc Soriguera., Francesc Robusté y Dulce María Rosas.

**Optimització d'operacions en aeroports**

César Trapote-Barreira, Francesc Robusté.

**Robustesa de serveis ferroviaris.**

Òscar Criado, Marta Sánchez Borràs, Francesc Robusté.

**Impacto de la tarificación dinámica sobre el bienestar social en carreteras metropolitanas.**

Sergi Saurí, Francesc Robusté y Albert Gragera.

**Slow pulse due to calcium current induces phase-2 reentry in heterogeneous tissue.**

Inma R Cantalapiedra, Angelina Peñaranda, Blas Echebarria.

## REFLEXIONES SOBRE EL TRÁNSITO DE LA IDEA AL PRODUCTO EN EL ENTORNO DE LA ESCUELA DE INGENIEROS DE CAMINOS DE BARCELONA

Eugenio Oñate y Pere-Andreu Ubach

Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
Universitat Politècnica de Catalunya  
e-mail: [onate@cimne.upc.edu](mailto:onate@cimne.upc.edu), [www.cimne.com](http://www.cimne.com)

**Paraules Clau:** Idea, Producto, Escuela de Ingenieros de Caminos, UPC

**Resum:** *Se presentan unas reflexiones sobre el ciclo que las ideas recorren desde que surgen en un entorno universitario hasta que se transforman en un producto industrial. Se concretan estas reflexiones en el contexto de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y de la Universitat Politècnica de Catalunya y se presentan algunos ejemplos de éxitos en la implantación del denominado Círculo de las Ideas.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación (I+D+I) [1] es frecuente confundir fines, medios y responsabilidades. En muchos casos parece que se exige que los grupos que investigan en Universidades y Centros de I+D, sean "rentables". Es decir, se pretende que su investigación se financie con créditos públicos, que los resultados de la misma se implementen en el mercado rápidamente y que los beneficios de su comercialización sirvan para devolver los créditos y para refinanciar esos grupos. También parece que se echa de menos que las empresas investiguen más, es decir, que inviertan recursos en descubrir nuevos conocimientos. El límite caricaturesco de esas aspiraciones sería pretender que las empresas produjeran premios Nobel y que un grupo universitario en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPC (ETSICCP/UPC) estuviera entre los 10 primeros puestos en el ranking de la actividad económica de un país. Ciertamente, esto no es imposible, pero es altamente improbable. Lo contrario desgraciadamente es más frecuente. Es decir, que los investigadores universitarios en su afán por la supervivencia económica de sus grupos, descuiden sus tareas investigadoras y que las empresas, confundiendo lo que es un Departamento Técnico o de Proyectos, con un Departamento de Innovación, se consideren autosuficientes y menosprecien u obvien el contacto con el mundo de la I+D real.

### 2. EL CICLO DE LAS IDEAS

Los conceptos anteriores creo que se pueden aclarar bastante si analizamos lo que podríamos denominar el Ciclo de las Ideas. La figura adjunta presenta un esquema del tránsito de una idea, desde que surge hasta que se transforma en un éxito industrial o comercial. Tal y como sucede en otros ciclos biológicos o medio-ambientales (el ciclo del agua, por ejemplo), las cadencias y tempos son muy importantes y trastocarlos conduce a resultados negativos. Veamos.

En general, lo usual es que las nuevas ideas (y aquí me refiero a avances de tipo científico) surjan en entornos universitarios, tales como la ETSICCP/UPC, en los que trabajan unos profesionales cuya misión fundamental es pensar, estudiar, investigar y eventualmente descubrir nuevos conocimientos. Esa idea (el nuevo conocimiento) sería equivalente a una semilla que siendo importante (esencial) está muy lejos de ser un fruto.

La idea madura en su recorrido por el primer cuadrante del ciclo (ETSICCP/UPC) hasta que produce resultados tangibles (tesis, publicaciones científicas, programas de ordenador, máquinas o instrumentos "de autor", etc.). Estos resultados si no se catalogan y protegen, se pierden con suma facilidad. Ello conduce a repeticiones o duplicaciones indeseables.

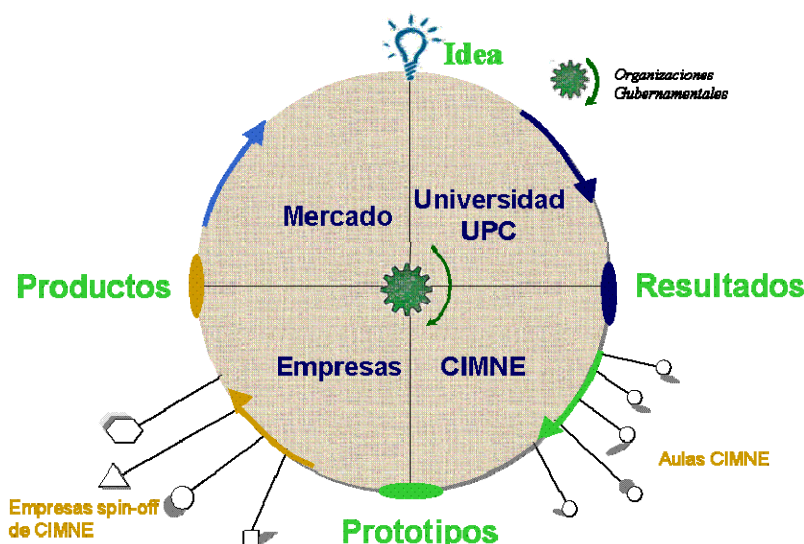


Figura 1 - El Ciclo de las Ideas en ETSICCP/UPC

¿Qué hacer pues con los resultados de una idea? Lo óptimo es que evolucionen hasta un nivel de "prototipo"; es decir hasta convertirse en algo (un sistema, un programa de ordenador, etc.) que funcione de manera contrastable en manos de una persona diferente del autor. Pasar del resultado al prototipo no es trivial y exige una organización, un personal competente y unos recursos de los que generalmente no dispone un grupo universitario. La solución es que el periplo de la idea continúe en organismos especializados adyacentes a la Universidad, y cuya misión sea transformar el conocimiento en cosas (prototipos) tangibles.

En los últimos años se han creado muchos organismos de este tipo en España y más concretamente en el entorno de la ETSICCP/UPC. Un ejemplo es el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE, [www.cimne.com](http://www.cimne.com)), pero hay otros muchos en diferentes ámbitos de la ciencia y la técnica. En el argot universitario se clasifican estos organismos en Centros de Investigación y Centros Tecnológicos. Estas son en mi opinión acepciones engañosas, pues parecen sugerir que unos centros tienen que investigar y no preocuparse de la tecnología y los otros al revés. Lo cierto es que la investigación y el desarrollo tecnológico son actividades imprescindibles en ambos. Lo esencial, en definitiva, es que tengan la capacidad de engranarse con el mundo universitario e industrial de manera efectiva y con una visión práctica.

En la página web de CIMNE ([www.cimne.com](http://www.cimne.com)) se pueden consultar las diferentes líneas de investigación de este centro en el ámbito de la ingeniería civil, así como en otras áreas de la ingeniería y las ciencias aplicadas incluyendo las ingenierías aeronáutica, naval, bio-medicina, tecnologías de la información y comunicación, energía y medio ambiente, natura, etc.

### 3. UNIVERSIDAD Y EMPRESA

¿Puede un prototipo lanzarse al mercado con garantía de éxito? No. La distancia entre un prototipo y un producto es generalmente muy larga. Conseguir un producto es una actividad

en sí misma y mezclarla con la I+D es contraproducente y conduce a frustraciones. Los productos se tienen que desarrollar en empresas en las que auténticos especialistas dediquen su tiempo y talento en exclusiva a la obtención, validación y documentación de un producto, y también a definir el plan para su posterior comercialización.

Una vez que un producto ha visto la luz en el mercado entraría en el cuarto cuadrante del ciclo. Allí el objetivo es el éxito comercial. Para ello la empresa establecerá las alianzas necesarias en todo el mundo. El ciclo se cierra con el retorno de parte de los beneficios obtenidos en la comercialización del producto al organismo de partida (la Universidad).

Naturalmente “la velocidad de giro” de la idea en su ciclo puede aumentar con la ayuda de Organismos Gubernamentales, tal y como se indica metafóricamente en la figura.

Lo anterior parece muy sencillo, pero realmente es muy difícil de poner en práctica. ¿Dónde están las dificultades?

#### **4. ¿DÓNDE ESTÁN LAS DIFICULTADES?**

Apuntaré sólo tres, que, por decirlo de alguna manera, son características de nuestro país. La primera es la falta de percepción de los límites de una organización. Los humanos somos limitados y las organizaciones también. En la práctica sólo se hacen bien las cosas dentro de los límites de cada persona u organismo. La Universidad, y por añadidura la ETSICCP/UPC no tienen las “competencias” de una empresa y viceversa. Salirse de esos límites es una tentación cotidiana, a la que sucumben muchos grupos en la academia y en la industria, con escasísimos ejemplos de éxito.

La segunda dificultad reside en la usual carencia de interfases adecuadas entre todos los agentes que intervienen en el proceso de transformación de una idea. Estas interfaces requieren, entre otras cosas, personas con capacidad para entender los problemas y requerimientos a ambos lados del “cuadrante”.

Finalmente, son muy importantes las alianzas en todas las direcciones. Los grupos universitarios y las empresas han de tejer a su alrededor una red de organismos de todo tipo a nivel nacional e internacional con los que compartir, desarrollar y explotar conocimientos. Ejemplos de esto, entre otros muchos, son la Red de Aulas que CIMNE ha tejido en España y Latinoamérica y las diferentes empresas de base tecnológica que desde él se han creado (ver [www.cimne.com](http://www.cimne.com)).

#### **5. POLÍTICAS DE I+D+I**

Si se asumen estos conceptos se puede intuir mejor la dificultad y/o conveniencia de implementar según que políticas o iniciativas para estimular el I+D+I en universidades, centros de investigación y empresas [2]. Así, es irreal que una universidad pueda obtener beneficios a corto o medio plazo de la explotación de los resultados de una idea. Por ello, financiar con créditos, en lugar de subvenciones, la investigación de las universidades y los centros de investigación, está abocado al fracaso. Sí que sería interesante, en cambio, que una parte de las subvenciones vayan ligadas al éxito en la investigación, validado en forma de resultados contrastables. Por otra parte, la política de incentivos a la innovación a las empresas debería contemplar la modalidad de préstamos no retornables, en el caso de éxito en la consecución de un producto novedoso.

Con todo ello se pondría el énfasis en incentivar la consecución del éxito de las actividades de I+D+I, y no la actividad en sí misma, como es lo usual. El fin sería siempre el mismo, conseguir que una buena idea se transforme en algo útil y rentable.

## 6. EJEMPLOS DE ÉXITOS EN LA TRANSFORMACIÓN DE IDEAS EN PRODUCTOS

Presentamos sucintamente varios ejemplos de productos desarrollados a partir de ideas que han surgido en el entorno de la ETSICCP/UPC. En todos los casos la “idea” ha seguido el “ciclo” descrito en los apartados anteriores.

**Pre-postprocessor GiD** ([www.gidhome.com](http://www.gidhome.com)). GiD es un entorno informático para preparación de datos para el cálculo y la visualización gráfica de los resultados del mismo. GiD es compatible con cualquier código de simulación, basado en el método de elementos finitos o en cualquier otra técnica de discretización. GiD se ha desarrollado de forma conjunta por investigadores del Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería (RMEI) de la ETSICCP/UPC y de CIMNE. GiD lo comercializa CIMNE.

**Programa STAMPACK** para simulación de procesos de conformado de chapa por estampación y embutición. Este código, basado en el método de elementos finitos, se ha desarrollado por investigadores del Dpto. de RMEI de la ETSICCP/UPC y de CIMNE. STAMPACK lo comercializa la empresa Quantech ATZ SA ([www.quantech.es](http://www.quantech.es)).

**Programa VULCAN** para simulación de procesos de fundición. El código, basado también en el método de elementos finitos, se ha desarrollado por investigadores del Dpto. de RMEI de la ETSICCP/UPC y de CIMNE. VULCAN lo comercializa la empresa Quantech ATZ SA ([www.quantech.es](http://www.quantech.es)).

**Programa TDYN** para análisis de problemas de fluidodinámica y multifísica por el método de elementos finitos. TDYN se ha desarrollado conjuntamente por investigadores del Dpto. de RMEI de la ETSICCP/UPC, de la Facultad de Náutica de la UPC y de CIMNE. TDYN lo comercializa la empresa Compass Ingeniería y Sistemas SA ([www.compassis.com](http://www.compassis.com)).

**Programa RAMSERIES** para cálculo de estructuras por el método de elementos finitos. El código se ha desarrollado por investigadores del Dpto. RMEI de la ETSICCP/UPC y de CIMNE. RAMSERIES lo comercializa la empresa Compass Ingeniería y Sistemas SA.

**INTERSPACE** es una plataforma para gestión del trabajo colaborativo de cualquier tipo de organización. INTERSPACE se ha desarrollado por investigadores del Dpto. RMEI de la ETSICCP/UPC. INTERSPACE se comercializa por CIMNE en el ámbito de la gestión de colegios, hospitales y organizaciones empresariales ([www.cimne.com](http://www.cimne.com)).

**Estructuras hinchables** para diferentes aplicaciones en ingeniería y arquitectura, tales como edificios y pabellones hinchables fácilmente transportables para eventos, viviendas, hospitales, exposiciones, etc.; hangares para aviones y helicópteros y puentes ligeros sustentados en vigas hinchables. La tecnología de estructuras hinchables ha sido desarrollada conjuntamente por investigadores del Dpto. RMEI de la ETSICCP/UPC y de CIMNE. Esta tecnología la comercializa la empresa BuildAir Ingeniería y Arquitectura SA ([www.buildair.com](http://www.buildair.com)).

## REFERENCIAS

- [1] E. Oñate (2009): Sobre íes grandes y pequeñas. Cinco Días, Viernes 24 de Julio
- [2] E. Oñate (2009): Estímulos anticrisis. Expansión, Viernes 9 de Octubre

# INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN PUENTES Y TORRES EÓLICAS PREFABRICADAS DE HORMIGÓN PRETENSADO.

Antonio Marí, Jesús M. Bairán, Eva Oller y Noemí Duarte.

Departamento de Ingeniería de la Construcción, ETSECCPB, UPC

[Antonio.mari@upc.edu](mailto:Antonio.mari@upc.edu), [jesus.miguel.bairan@upc.edu](mailto:jesus.miguel.bairan@upc.edu), [eva.oller@upc.edu](mailto:eva.oller@upc.edu), [noemi.duarte@upc.edu](mailto:noemi.duarte@upc.edu)

**Palabras Clave:** Hormigón pretensado, prefabricación, puentes, torres

**Resumen:** *Se presenta la investigación teórica y experimental realizada por los autores durante los últimos años en colaboración con empresas de prefabricación y de aerogeneradores, que ha dado lugar a nuevos tipos estructurales de puentes y torres eólicas de hormigón pretensado, con excelentes prestaciones estructurales, estéticas, resultando además económicamente competitivas. Se muestran algunas obras realizadas a partir de los conceptos desarrollados, destacando entre ellas puentes prefabricados continuos de medias y grandes luces así como la primera torre eólica prefabricada de hormigón totalmente postensada construida en el mundo, con una altura de 120 m y rotores de 60 m de longitud, para un aerogenerador de alta potencia (5 MW).*

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de hormigones de altas prestaciones, el uso del postensado como sistema de conexión entre piezas prefabricadas, la posibilidad de transportar y manipular grandes masas, la capacidad para realizar ensayos precisos a gran escala y el desarrollo de modelos rigurosos de cálculo, han permitido desarrollar nuevos tipos de estructuras prefabricadas de hormigón pretensado con grandes prestaciones estructurales y estéticas, competitivas económicamente.

## 2. PUENTES PREFABRICADOS CON CONTINUIDAD ESTRUCTURAL

En el ámbito de los puentes, los autores han colaborado con Structural Research SL, en el desarrollo de nuevos tipos de puentes prefabricados que aúnan las ventajas de la prefabricación con las de los puentes contruidos “in situ”. Por una parte, la prefabricación permite trabajar con hormigones de altas prestaciones, reducir espesores, homogeneizar la calidad, mejorar los acabados, reducir la afectación al tráfico durante la ejecución, aumentar la velocidad de construcción y reducir los riesgos laborales. Sin embargo sus puntos débiles son el transporte, la manipulación y, sobre todo la solución de uniones entre elementos y los apoyos, que ha dado lugar a estructuras casi exclusivamente isostáticas.

En los casos que se presentan, se ha resuelto adecuadamente la unión de elementos prefabricados mediante postensado, dando lugar a estructuras continuas en sentido longitudinal, con las consiguientes ventajas estructurales en cuanto a rigidez y redundancia. Así mismo se logran tableros de gran anchura uniendo transversalmente las almas de vigas adosadas o tableros de gran canto, adecuados para para cubrir grandes luces, conectando verticalmente las almas de piezas a través de juntas longitudinales. Se prefabrican así mismo elementos de canto variable, de planta recta o curva, con jabalcones longitudinales o transversales y puentes de tipos diversos, tales como tableros en viga continua, arcos, puentes pórtico o atirantados. Se trata, por tanto, de soluciones que estética y estructuralmente son



totalmente comparables a las construidas in situ, con todas las ventajas de la prefabricación, tal como se indica en la figura 1 que corresponde a puentes construidos con este sistema en cuyo análisis estructural han participado algunos autores de esta ponencia.



Figura 1. Puentes prefabricados continuos de hormigón postensado de medias y grandes luces

En el Departamento de Ingeniería de la Construcción se han desarrollado modelos de análisis estructural no lineal en el tiempo capaces de simular las fases constructivas y el comportamiento no lineal instantáneo y diferido de los materiales. Estos modelos, basados en el MEF utilizan elementos unidimensionales con la sección transversal idealizada mediante fibras, sometidas a un estado uniaxial de tensiones, incorporando ecuaciones constitutivas no lineales de los materiales. La estructuración en etapas constructivas, pasos de tiempo, escalones de carga e iteraciones de equilibrio permiten tener en cuenta el carácter marcadamente evolutivo de la construcción, así como evaluar la seguridad y la respuesta en servicio de estas estructuras a corto y a largo plazo.

El comportamiento de pilas de gran altura, en las que los efectos de segundo orden pueden ser importantes, se reproduce adecuadamente gracias a la consideración en el cálculo de la no linealidad geométrica mediante una formulación Lagrangiana actualizada. Uno de los aspectos más relevantes del modelo es que permite tener en cuenta la interacción entre el comportamiento no lineal de los materiales, los efectos de segundo orden, el comportamiento diferido y el proceso constructivo evolutivo, tal como ocurre en la realidad a lo largo de la vida útil de las estructuras. Fenómenos como la fisuración diferida o las redistribuciones de esfuerzos en el tiempo en estructuras construidas evolutivamente pueden ser simulados así como sus efectos en la rigidez y la resistencia.

Recientemente se han incorporado, así mismo, los efectos del deterioro por la acción ambiental sobre la respuesta estructural, por ejemplo los efectos estructurales de la reducción del área de acero de las armaduras por corrosión, la pérdida de recubrimiento o la rotura súbita de algún alambre de pretensado debido a la corrosión bajo tensión. Igualmente se han incorporado en el modelo, de forma natural y como un paso más en su carácter evolutivo, los efectos de cualquier intervención, tanto para adecuar la geometría, el esquema estructural o los apoyos a nuevas condiciones viales o de tráfico, como para repararlo o reforzarlo.

También se han llevado a cabo ensayos a gran escala en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras, para verificar experimentalmente los modelos teóricos e identificar algunos aspectos del comportamiento estructural no abordados por aquéllos.



### 3. TORRES EOLICAS PREFABRICADAS POSTENSADAS DE GRAN ALTURA.

En el ámbito de las torres eólicas, se ha colaborado con Gamesa y NORTEN Eólica en el desarrollo de un tipo de torre prefabricada híbrida de hormigón postensado y metálica, para aerogeneradores de medias y altas potencias, que requieren torres de gran altura y diámetro en la base, las cuales, no pudiendo ser transportadas enteras por carretera deben ser fabricadas en segmentos y ensambladas en obra. Los elementos prefabricados, resultantes de dividir un tronco de cono mediante cortes verticales y horizontales, están compuestos por una lámina delgada de hormigón armado, nervada en dos direcciones. Los nervios sirven para, además de rigidizar la lámina, albergar los tendones de postensado que permiten mediante compresión de las juntas, unir monolíticamente las piezas. El espesor medio resultante es de 19 cm, lo cual conduce a un reducido consumo de materiales y de peso, facilitando el transporte y montaje.

El número de nervios verticales puede cambiar en función de las dimensiones de la torre, especialmente del diámetro máximo en la base, y se plantea constante en toda la altura de la torre. En una primera opción se han planteado 12 nervios verticales, lo que permite fabricar “tejas” dividiendo el anillo nervado en 2, 3, 4 ó 6 partes, cubriendo ángulos de 180°, 120°, 90° o 60°, respectivamente. El montaje se realiza evitando dar continuidad a la junta vertical a lo largo de toda la torre, pero manteniendo la continuidad en los nervios verticales. El número de nervios horizontales depende de las necesidades de arriostramiento de la lámina y de pretensado horizontal de la junta vertical

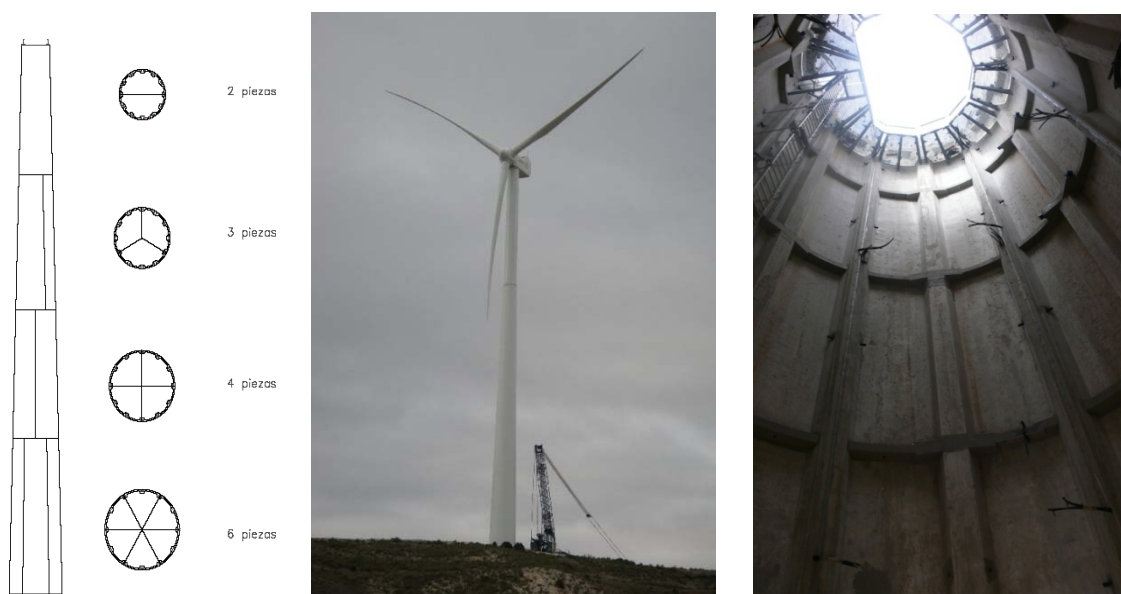


Figura 2. Torre eólica prefabricada de hormigón postensado, de 120 m de altura y 4,5 MW

Se han resuelto multitud de aspectos teóricos y prácticos, tales como el comportamiento a fatiga, la conexión a la cimentación, la conexión entre el fuste de hormigón y el metálico, el comportamiento de las juntas entre elementos, los efectos de la posible fisuración en el comportamiento dinámico, las deformaciones instantáneas y diferidas durante acopio, transporte y montaje y otros.

Se han diseñado, construido, instrumentado y validado experimentalmente tres prototipos de torre de 120 m de altura con diámetro de 8,50 m en la base, para un aerogenerador de 4,5 MW, que son las primeras torres prefabricadas totalmente postensadas construidas.

Así mismo se han realizado ensayos tanto para caracterizar los materiales y del rozamiento entre vaina y tendones como del comportamiento de las juntas verticales dentadas,

confinadas y rellenas de mortero de alta resistencia (figura 3). Se han realizado dos series de 6 ensayos, cada una con diferente resistencia del mortero, bajo tensiones transversales nominales de 0,25 MPa, 0,50 MPa and 0,75 MPa. Se midieron, la carga aplicada, la abertura de la junta, el deslizamiento vertical y la evolución de la fuerza transversal. Los resultados del ensayo permitieron obtener valores del coeficiente de rozamiento y de la cohesión, detectándose la influencia de la resistencia del mortero en el incremento de tracción de las barras de pretensado, y por tanto en la movilización del mecanismo cortante-fricción. Se midieron aperturas de junta despreciables en servicio y de 0,6 mm en rotura, y se verificó la capacidad resistente de la junta a los esfuerzos rasantes de cálculo.

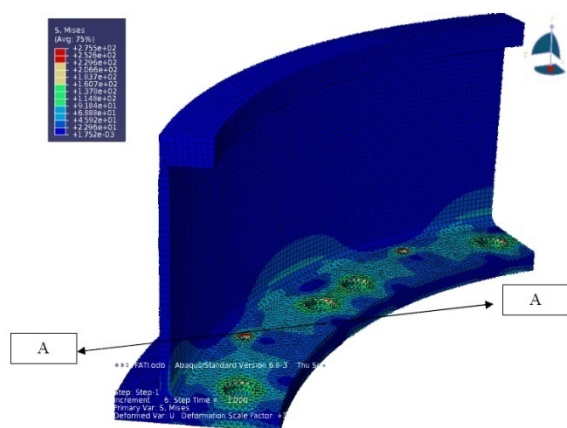


Figura 3. Estudio por EF de la brida conexión

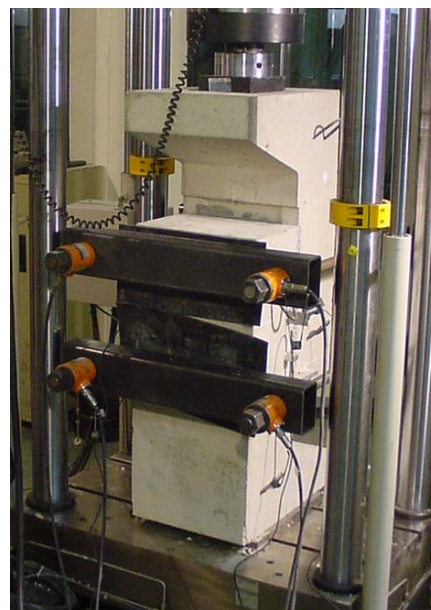


Figura 4. Ensayo a cortante de la junta

La torre y su cimentación se monitorizaron siguiendo un proyecto de instrumentación diseñado por los autores para determinar aceleraciones, desplazamientos, deformaciones en el hormigón y el acero, rotaciones de la cimentación y movimientos relativos en juntas, entre otros parámetros. En este momento se está realizando la validación de la torre por comparación de los resultados teóricos y los medidos con la instrumentación dispuesta.

## REFERENCIAS

- [1] Marí, A., "Numerical Simulation of the Segmental Construction of Three Dimensional Concrete Frames", Engineering Structures, No. 6 , Vol. 22, pp 585-596, June 2000.
- [2] Montaner, J., Marí, A., Bairán, J., "Remando al viento. Torre SCS para generadores eólicos". V Congreso Internacional de Estructuras, ACHE, Barcelona, Octubre 25-27, 2011.

# REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO (CFRP)

Eva Oller <sup>1</sup>, Antonio R. Mari <sup>2</sup> y Jesús M. Bairán <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: [eva.oller@upc.edu](mailto:eva.oller@upc.edu), <sup>2</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: [antonio.mari@upc.edu](mailto:antonio.mari@upc.edu), <sup>3</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: [jesus.miguel.bairan@upc.edu](mailto:jesus.miguel.bairan@upc.edu)

**Palabras Clave:** refuerzo, materiales compuestos, polímeros reforzados con fibras (FRP), laminados, hormigón armado.

**Resumen:** *El uso de los materiales compuestos en el campo del refuerzo estructural ha experimentado un notable crecimiento en los últimos años gracias a sus elevadas relaciones resistencia/peso y rigidez/peso, que permiten reducir costes de mano de obra respecto al empleo de otros materiales más convencionales. Los polímeros reforzados con fibras (FRP) se pueden aplicar como refuerzo de estructuras de hormigón armado o pretensado a flexión, cortante o confinamiento. Independientemente del tipo de refuerzo, uno de los principales inconvenientes o condicionantes en el dimensionamiento es el fallo por el desprendimiento prematuro del refuerzo, antes de alcanzar la resistencia última del mismo, por la concentración de tensiones en la interfase entre el laminado y el soporte.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde su aparición en los años noventa, la adhesión de laminados de polímeros reforzados con fibras (FRP) a estructuras de hormigón armado o pretensado se ha convertido en una de las técnicas más recurrentes en el refuerzo a flexión, cortante o confinamiento.

A continuación se presentan los trabajos que se están llevando a cabo en el Departamento de Ingeniería de la Construcción relativos al refuerzo a flexión y cortante con laminados FRP.

## 2. REFUERZO A FLEXIÓN

### 2.1 Dimensionamiento a flexión evitando el desprendimiento prematuro del refuerzo

Según el estado del arte relativo al refuerzo a flexión de estructuras de hormigón armado mediante la adhesión de laminados FRP, en la gran mayoría de ensayos experimentales, se produce el desprendimiento prematuro del refuerzo (ver Figura 1) antes de que se alcance la carga última asociada a una rotura clásica. Esta rotura prematura puede iniciarse a lo largo del vano, debido a la existencia de fisuras de flexión y/o cortante (intermediate crack (IC) debonding), o bien en el extremo del laminado debido a la concentración de tensiones generada por la discontinuidad de esa zona (plate end (PE) debonding).

En Oller [1] se desarrolla un método para el dimensionamiento del refuerzo a flexión con FRP que evita que se produzca el desprendimiento prematuro del laminado. Este método se basa en la aplicación de la teoría de la Mecánica de Fractura No Lineal para obtener la fuerza rasante máxima que se puede transferir entre laminado y hormigón, bien entre dos fisuras adyacentes o bien entre el extremo del laminado y la fisura más próxima. La fuerza rasante máxima transmitida entre dos fisuras adyacentes establece un límite en el cortante último actuando en la fisura más solicitada. El cortante último que produce el desprendimiento del

laminado se puede obtener para cualquier valor del momento flector actuando en la fisura más solicitada. Estos valores de cortante y momento flector definen un diagrama de interacción asociado al desprendimiento del refuerzo (ver Figura 1).

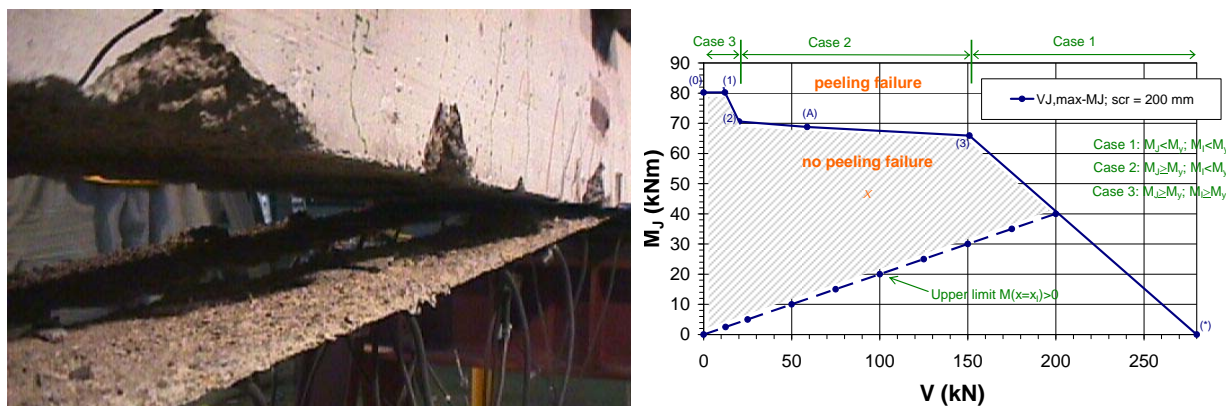


Figura 1. Desprendimiento prematuro del laminado en una viga reforzada a flexión con laminados CFRP [1]. Diagrama de interacción cortante-momento flector.

Al dimensionar, después de calcular el área de laminado necesaria para reforzar a flexión, se debe verificar que no se produce el desprendimiento del laminado en ningún punto. Por ello, se debe asegurar que el esfuerzo cortante y el momento flector en cualquier sección deben estar dentro del diagrama de interacción asociado al desprendimiento del refuerzo. Además, se debe verificar el extremo del laminado, comprobando que la fuerza rasante transmitida entre este punto y la fisura más cercana debe ser menor que el valor máximo teórico. Si esta condición no se verifica, se producirá un desprendimiento local en el extremo del laminado. Este desprendimiento local no implica el desprendimiento completo del refuerzo. Para saber si este efecto es localizado o no, se debe analizar el elemento entre las dos primeras fisuras en el extremo del laminado y si resulta necesario se debe reajustar el valor del cortante último que evita el fallo debido al efecto de las fisuras existentes al inicio del refuerzo.

La fiabilidad de este método se ha verificado con éxito prediciendo la carga última obtenida en los ensayos recopilados en la base de datos de Oller [1] de vigas reforzadas a flexión con laminados FRP que fallaron prematuramente.

## 2.2 Análisis del comportamiento de elementos de hormigón armado reforzados con laminados FRP mediante modelos no lineales y evolutivos

En el diseño del refuerzo estructural resulta fundamental evaluar de forma ajustada el comportamiento estructural del elemento antes y después de la intervención, para conseguir una solución que verifique los requisitos de resistencia, funcionalidad y durabilidad con el mínimo coste de intervención.

La respuesta estructural de los elementos de hormigón armado y pretensado se ve afectada por el comportamiento no lineal y diferido de los materiales que lo componen. Este comportamiento depende de la fisuración, fluencia, retracción, plastificación y deterioro de los materiales a lo largo de su vida útil. Por ello, los modelos elástico-lineales no resultan adecuados para analizar la capacidad residual de estructuras sometidas a un cierto nivel de daño ni para evaluar con rigor los efectos de una posible intervención. Además, el refuerzo estructural puede implicar modificaciones en la geometría, armadura, apoyos, esquema

estructural, cargas y deformaciones impuestas en la estructura que deben ser contempladas por el modelo, junto al comportamiento no lineal y diferido.

Para predecir el comportamiento estructural de elementos de hormigón reforzados a flexión con laminados FRP, se ha aplicado un modelo de análisis no lineal y evolutivo en el tiempo, previamente desarrollado por los autores, donde se ha implementado el criterio de dimensionamiento anteriormente descrito para evitar el desprendimiento prematuro del FRP. Este modelo se ha validado con ensayos experimentales realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras en el marco de la tesis doctoral de Oller [1] y con otras campañas experimentales (Marí et al. [2]). Se han obtenido muy buenos resultados a nivel de flechas, deformaciones, reacciones, esfuerzos, modos de rotura, y se ha evaluado correctamente la eficiencia de las soluciones de refuerzo propuestas.

Pese a no ser una técnica ampliamente contrastada, la experimentación existente ha demostrado que si se pretensan los laminados, se consigue mejorar su efectividad, al aprovechar en mayor medida su capacidad resistente y mejorar las condiciones de servicio (la aplicación del FRP pretensado aumenta la carga de fisuración, cierra fisuras existentes, reduce flechas). Por ello, el modelo de análisis no lineal se ha validado también para elementos de hormigón armado reforzados con laminados pretensados, analizando una campaña experimental de vigas reforzadas mediante esta técnica (Woo et al. [3]). Se ha obtenido una buena correlación entre los resultados numéricos y experimentales a nivel de carga, flechas y deformaciones en el laminado.

### **3. REFUERZO A CORTANTE**

Experimentalmente se ha probado y está bien establecido que el refuerzo con laminados FRP es un sistema eficiente para incrementar la resistencia última a esfuerzo cortante de elementos de hormigón armado. Sin embargo, así como los mecanismos resistentes a flexión están bien establecidos, no ocurre igual en el caso del cortante, y en particular para el refuerzo mediante laminados FRP. Por una parte, la viga a reforzar puede estar previamente fisurada. Por otra parte, esta viga se someterá a un cortante superior al valor resistido por la viga sin reforzar, con lo cual pueden producirse transferencias bruscas de tensiones del armado original al refuerzo, cambios de orientación de las bielas comprimidas y fisuras adicionales, entre otros fenómenos.

En la actualidad, no se dispone de un modelo consensuado que evalúe la contribución del laminado FRP a la resistencia a cortante. El análisis de una base de datos recopilada por los autores demuestra la dispersión existente en los resultados obtenidos analíticamente para el cortante último según las recomendaciones vigentes más utilizadas.

Para comprender y cuantificar los mecanismos resistentes a cortante de vigas reforzadas con FRP, se está desarrollando una campaña experimental en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción con el fin de contribuir a diseñar refuerzos con estos materiales que sean realmente eficaces y económicos.

#### **3.1 Campaña experimental de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante con laminados de fibra de carbono**

La campaña experimental, en desarrollo, consiste en un total de 20 ensayos sobre dos series de cinco vigas de sección transversal en T y de 5,80 m de longitud. La sección transversal de las vigas presenta un canto total de 550 mm y un ancho de ala de 600 mm. El espesor de alma es de 200 mm y el de ala 150 mm.

La diferencia entre las dos series de vigas radica en la cuantía de armadura longitudinal inferior dispuesta. Se distinguen entre dos series: A (cuantía alta) con dos filas de  $2\phi 16+2\phi 20$  y M (cuantía media) con dos filas de  $4\phi 16$ . Los cercos de cortante son  $\phi 6$  separados 140 mm en los 3,08 m centrales y 240 mm en el resto de las vigas. Las vigas se refuerzan a cortante mediante laminados de fibra de carbono en forma de U de ancho 50 mm y espesor medio 0,2 mm. Se distinguen entre dos cuantías en función de la separación entre ejes de los laminados: cuantía baja (240 mm) y cuantía alta (120 mm).

En relación a los materiales, el hormigón es HA-25/B/12/IIa y el acero de las armaduras es B500 SD. Los laminados están formados por fibras de carbono embebidas en una matriz de resina epoxi. Las fibras tienen un módulo de elasticidad nominal de 230 GPa y una deformación última nominal de 1,478%.

Sobre cada viga se realizan dos ensayos a cortante. En el primer ensayo, se aplica una carga puntual a una distancia de 1,48 m desde el apoyo izquierdo, que se corresponde aproximadamente a 3 veces el canto útil. El apoyo derecho se dispone de modo que queda un tramo biapoyado de 3,30 m de luz. En el segundo ensayo se modifica la posición de los apoyos y de la carga puntual de modo que la configuración resulta simétrica en relación a la del primer ensayo, aplicando la carga en la zona no dañada por el primer ensayo.

Se han realizado predicciones analíticas y numéricas para los ensayos experimentales. Las predicciones analíticas se han realizado siguiendo las recomendaciones existentes más utilizadas (Fib Bulletin 14, ACI-440 y TR-55). Las predicciones numéricas se han obtenido mediante un modelo numérico de análisis no-lineal, llamado IFENSSA (Inter Fiber Equilibrium based Nonlinear Sectional and Structural Analysis), desarrollado en el entorno del grupo de trabajo (Mohr et al. [4]). El modelo permite simular la interacción de esfuerzos normales, flexión y cortante considerando el equilibrio interno entre fibras y la compatibilidad de deformaciones en sentido bidimensional. El modelo es aplicable a problemas planos y se basa en una simplificación de un modelo general, aplicable a problemas 3D, previamente desarrollado en el grupo de trabajo. Se observa que las recomendaciones existentes proporcionan valores poco conservadores de la componente de resistencia a cortante del FRP. Tanto los resultados numéricos como los analíticos indican que se consigue la rotura por cortante, que es la deseable.

En el momento de redacción de la presente ponencia, la campaña experimental se encuentra en desarrollo. Sin embargo, en las fechas de la jornada se habrán finalizado los ensayos y se dispondrá de resultados analizados.

## REFERENCIAS

- [1] Oller, E. (2005): Peeling failure in beams externally strengthened by plate bonding. A design proposal, PhD. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament Enginyeria de la Construcció.
- [2] Marí, A. R., Oller, E., Bairán, J. M. (2011): Predicting the response of FRP-strengthened reinforced concrete flexural members by non-linear. *Journal of Composites for Construction*, in press.
- [3] Woo, S., Nam, J., Jay Kim J., Han, S., and Joo Byun, K. (2008): Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design. *Engineering Structures*, 30 (2008), pp. 3751-3763.
- [4] Mohr S., Bairán J. M., and Marí A. R.. (2010): A frame element model for the analysis of reinforced concrete structures under shear and bending, *Engineering Structures*, 32 (2010), pp. 3936-3954.



# AVANCES EN MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE BARRAS DE HORMIGÓN FRENTE A COMBINACIONES DE ESFUERZOS NORMALES Y TANGENTES

Jesús M. Bairán, Antonio R. Marí, Steffen Mohr y Denise Ferreira

Departamento de Ingeniería de la Construcción, ETSECCPB, UPC  
[jesus.miguel.bairan@upc.edu](mailto:jesus.miguel.bairan@upc.edu), [antonio.mari@upc.edu](mailto:antonio.mari@upc.edu), [steffen-mohr@upc.edu](mailto:steffen-mohr@upc.edu),  
[denise.carina.santos@estudiant.upc.edu](mailto:denise.carina.santos@estudiant.upc.edu)

**Palabras Clave:** cortante, hormigón, interacción esfuerzos, elementos barra, acción sísmica

**Resumen:** *A pesar del gran desarrollo de los modelos de barras para el análisis estructural, estos modelos presentan, en general, carencias importantes cuando las estructuras son sensibles a esfuerzos tangenciales (cortante, torsión) o cuando existen estados tridimensionales complejos. Estas solicitaciones, muy comunes en las estructuras de ingeniería civil, son mucho más complejas de analizar en el caso de materiales que presentan comportamiento anisótropo dependiente de la carga, como es el caso del hormigón armado. Se presentan los modelos desarrollados en los últimos años para tener en cuenta este comportamiento satisfactoriamente, facilitando así el análisis de estructuras bajo fuertes combinaciones de esfuerzos normales y tangentes, como pueden darse en estructuras bajo acciones sísmicas.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de barras para el análisis no-lineal de estructuras son muy extendidos tanto en la práctica como en la investigación gracias a la facilidad y rapidez en la construcción de los modelos, interpretación de resultados y su robustez. Sin embargo, en la formulación de estos es necesario aplicar hipótesis cinemáticas –p.e. Navier-Bernoulli o Timoshenko– para describir la distribución de deformaciones en las secciones a partir de los movimientos de las barras que no siempre reproducen satisfactoriamente el comportamiento ante solicitaciones en las que se involucran esfuerzos de cortante, torsión u otros estados multiaxiales.

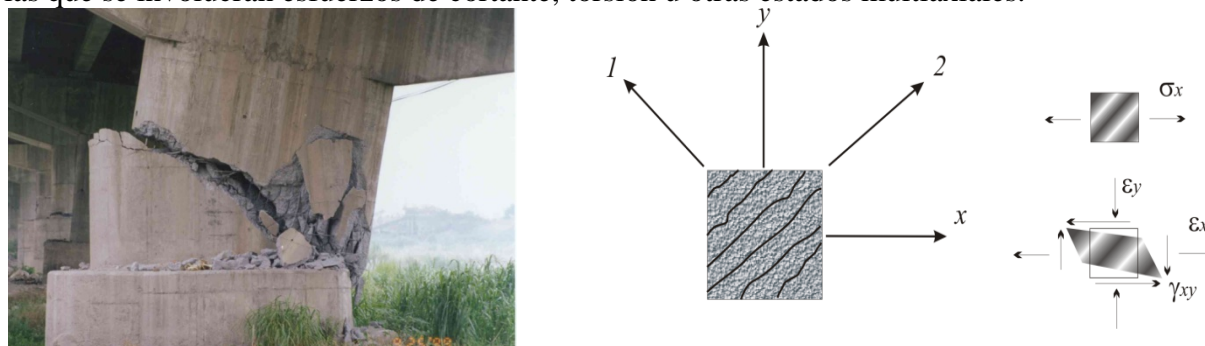


Figura 1. Rotura a cortante por solicitaciones sísmicas y mecanismo anisótropo del hormigón fisurado

Particularmente, el hormigón armado puede presentar ciertos comportamientos anisótropos después de fisurar que son dependientes del estado de fisuración y de las solicitaciones, lo que hace que tanto las distribuciones de tensiones y deformaciones en la sección transversal sean no-lineal y dependientes del estado. Más aún, el mecanismo por el que el hormigón armado resiste esfuerzos de cortante necesita movilizar la distorsión de la

sección transversal para poner en carga las armaduras transversales. Por ello, las hipótesis cinemáticas tradicionales con distribución de deformaciones fijas no son satisfactorias.

## 2. MODELO SECCIONAL DE INTERACCIÓN COMPLETA

En el grupo de investigación se desarrolló un modelo seccional que considera la distorsión y el alabeo de la sección transversal para reproducir estados tensionales tridimensionales mediante análisis seccional [1] llamado TINSAN (*Total Interaction Nonlinear Sectional Analysis*). Este incluye explícitamente el equilibrio interno entre las fibras de la sección (Fig. 2) y el comportamiento anisótropo del material por lo que es aplicable tanto al hormigón armado con fisuración inclinada como a otros tipos de materiales anisótropos (Figs. 3 y 4).

El modelo ha sido aplicado con éxito al análisis no-lineal, durante todo el rango de cargas hasta rotura, de secciones de geometría arbitraria sometidas a cualquier combinación de esfuerzos axial, flexión esviada, cortante esviado y torsión ( $N-M_{yz}-V_{yz}-T$ ), siendo, hasta la fecha, el único modelo seccional con estas características.

A modo de ejemplo, en la Fig. 4 se muestra la distribución de tensiones principales de compresión y el alabeo en una sección de hormigón armado antes y después de fisurar. Se observa como el modelo predice adecuadamente la formación de una sección tubular equivalente de forma natural y en función de la disposición de armaduras y la sollicitación. El la distorsión y alabeo de la sección transversal se muestra esencial para captar al respuesta después de la fisuración. El modelo ha sido igualmente aplicado a otras situaciones, como, confinamiento de secciones mediante armadura transversal y encamisados con CFRP y acero.

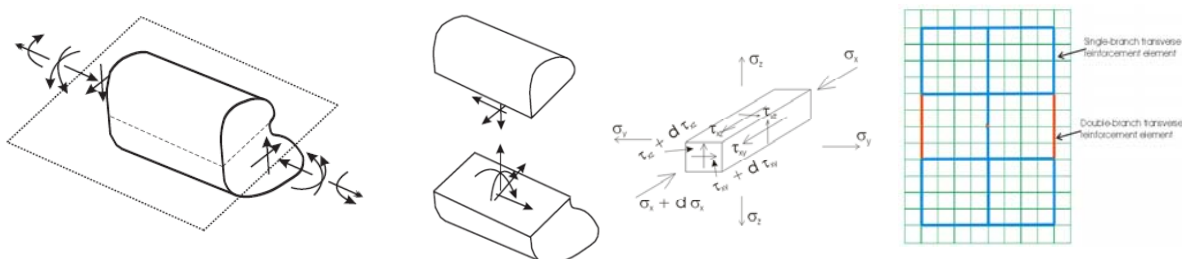


Figura 2. Equilibrio dual a nivel elemento y a nivel sección y representación de armaduras transversales

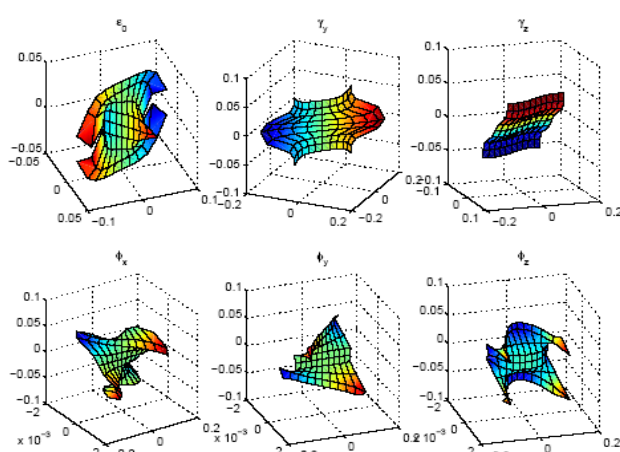


Figura 3. Modos de alabeo –distorsión de sección laminada de materiales compuestos anisótropos (CFRP)

Esta formulación acerca el comportamiento tridimensional completo a los modelos de barra, ampliando su campo de aplicación a otros problemas que tradicionalmente sólo podían ser contemplados mediante análisis sólidos más costosos.

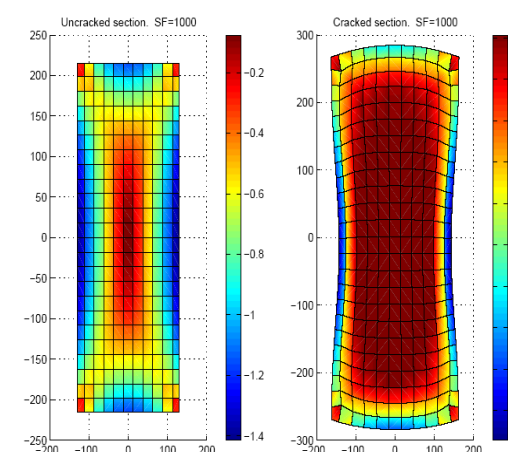


Figura 4. Tensiones principales y alabeo de una sección a torsión antes y después de fisurar



### 3. SIMPLIFICACIONES PARA PROBLEMAS PLANOS

El coste computacional del modelo totalmente tridimensional puede reducirse más a partir de simplificaciones que siguen permitiendo un gran número de aplicaciones. Así pues, se han planteado dos niveles de simplificación para los problemas planos, ambas con muy buenos resultados en cuanto a la interacción axil-momento-cortante (N-M-V) en el hormigón armado.

El primer modelo planteado [2] mantiene las mismas ecuaciones fundamentales del modelo anterior, aplicadas al caso bidimensional, y se aproxima la distribución de alabeo y distorsión mediante series polinómicas (Fig. 5). Se ha determinado que con unos pocos polinomios (entre 3 y 6) es posible captar todo el rango de cargas hasta la rotura de forma muy satisfactoria apreciándose mejoras muy significativas entre otros modelos con otras teorías de viga o inclusive modelos de sólidos (Fig. 7). Este modelo ha sido implementado en elementos barra basados en flexibilidad y aplicado al estudio no-lineal de estructuras hormigón ante sollicitaciones estáticas, dinámicas y sísmicas.

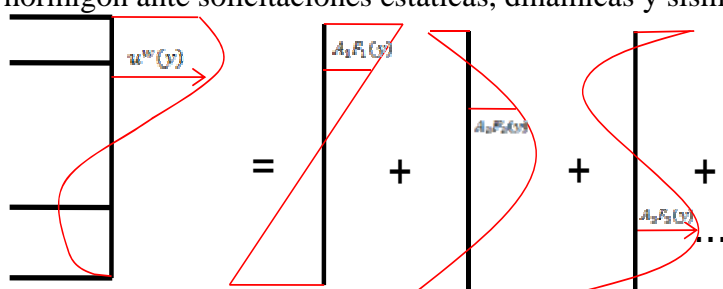


Figura 5. Simplificación 1: series polinómicas

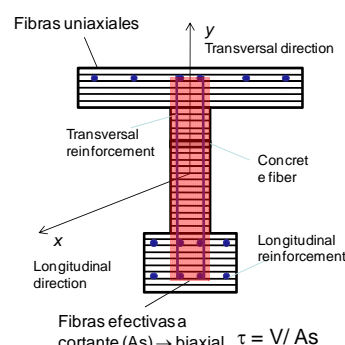


Figura 6. Simplificación 1: modelo seccional híbrido con patrón de tensiones cortante fijo

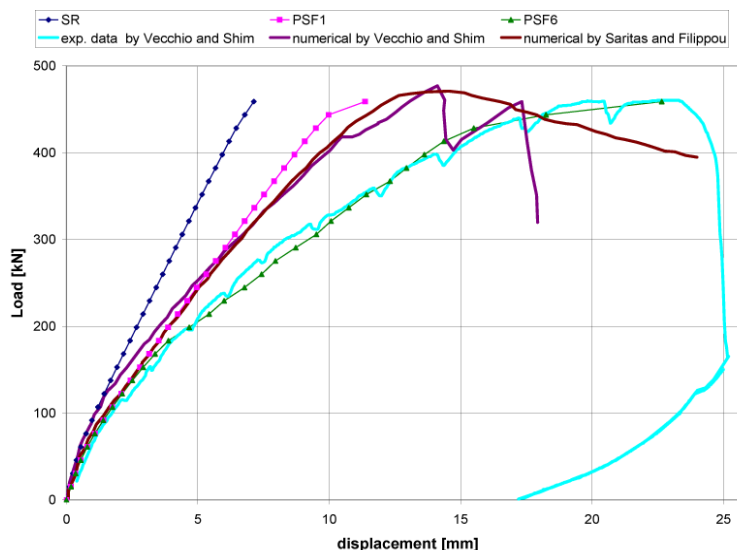


Figura 7. Comparación resultados modelo contra resultados experimentales y otros modelos numéricos

Se ha demostrado que las metodologías con patrones de distribución de deformaciones cortantes fijas no son adecuadas para el hormigón armado fisurado ya que no captan correctamente la respuesta global y los modos de rotura. Sin embargo, el uso de patrones de distribución híbridos, que combinen las distribución de deformaciones longitudinales ( $\epsilon_x$ ) con

patrones de tensiones de cortante predefinidas ( $\tau$ ) produce resultados adecuados. El segundo modelo planteado [3] consiste en el uso de hipótesis seccionales híbridas que combinen hipótesis cinemáticas y de tensiones (Fig. 6). El equilibrio interno se investiga solo en el sentido transversal lo cual pone en carga las armaduras transversales y activa la interacción (N-M-V).

Este modelo ha sido implementado en el programa CONS [4] de análisis no-lineal de estructuras de hormigón que tiene en cuenta efectos del tiempo y construcción evolutiva, para lo que ha sido necesario introducir un elemento finito con deformación de cortante. En la Fig. 8 se observan los resultados de la simulación de una campaña experimental de elementos con rotura a cortante, donde la interacción N-M-V se manifiesta claramente a partir de los incrementos de tensión en las armaduras longitudinales y las variaciones de tensiones en las armaduras transversales a lo largo del elemento.

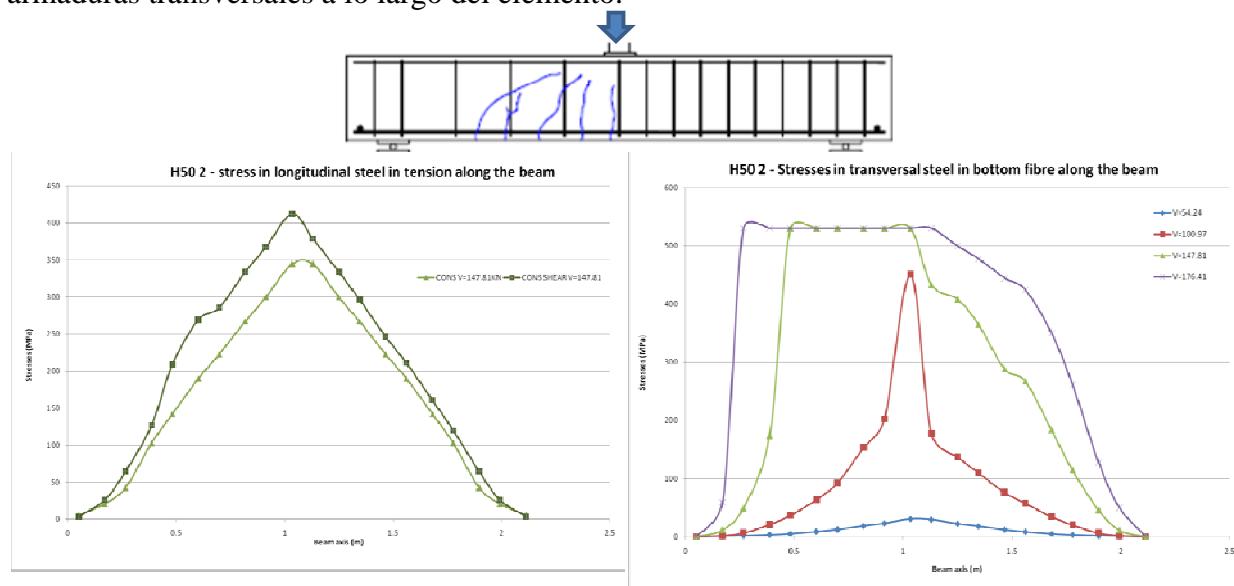


Figura 8. Predicción tensiones armaduras longitudinales y transversales

## 4. APLICACIONES

Los modelos presentados tienen un gran abanico de aplicaciones prácticas que van desde los estudios dirigidos a la comprensión de los mecanismos resistentes a cortante y torsión y desarrollo de formulaciones de cálculo y diseño al estudio de estructuras sensibles a esfuerzos cortantes en zonas sísmicas, redistribuciones de esfuerzos y comportamiento en rotura, entre otras. Algunas de estas aplicaciones se han llevado a cabo a lo largo de varios proyectos de investigación durante los últimos años. Actualmente, se están aplicando este tipo de modelos al estudio de estructuras de hormigón que sufren procesos de deterioro o que son reforzadas.

## REFERENCIAS

- [1] Bairán, JM, Marí AR (2007), "Shear-Bending-Torsion Interaction in Structural Concrete Members: A Nonlinear Coupled Sectional Approach", *Arch. Comput. Methods Eng.*, 14: 249-278.
- [2] Mohr S, Bairán JM, Marí AR (2010), "A frame element model for the analysis of reinforced concrete structures under shear and bending", *Eng. Structures*, 32: 3936-3954.
- [3] Ferreira D, Bairán JM, Marí AR (2011), "Análisis no lineal simplificado de vigas de hormigón armado sometidas a cortante: Modelo numérico y validación experimental", *V Congreso de ACHE*, Barcelona, 25-27 Oct.
- [4] Marí A. (2000), "Numerical Simulation of the Segmental Construction of Three Dimensional Concrete Frames", *Engineering Structures*, 22: 585-596.

# OPTIMAL COLLAPSE SIMULATOR FOR THREE-DIMENSIONAL FRAMES

J. Sarrate<sup>1</sup>, A. Huerta<sup>2</sup>, J. Bonet<sup>3</sup>, J. Peraire<sup>4</sup>, J. Saa-Seoane<sup>5</sup>, and F. Vidal<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Departament de Matemàtica Aplicada III e-mail: jose.sarrate@upc.edu,

<sup>2</sup>Departament de Matemàtica Aplicada III e-mail: antonio.huerta@upc.edu,

<sup>3</sup>University of Wales at Swansea e-mail: j.bonet@swansea.ac.uk

<sup>4</sup>Massachusetts Institute of Technology e-mail: peraire@mit.edu,

<sup>5</sup>Massachusetts Institute of Technology e-mail: jsaa(@)mit.edu

<sup>6</sup>Departament de Matemàtica Aplicada III e-mail: vc.ferran@gmail.com.

**Paraules Clau:** Ultimate structural load, collapse of structures, limit analysis.

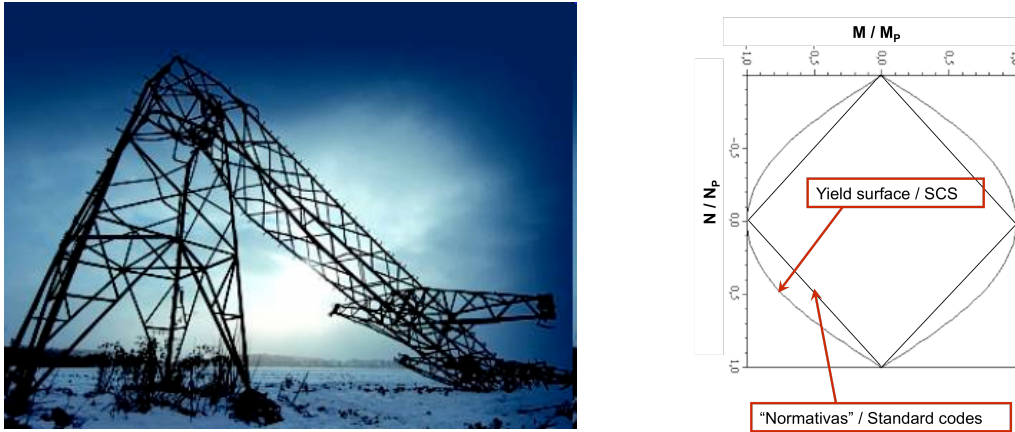
**Resum:** *In this work a limit analysis for 3D structures software package is presented. The goal is to obtain for a certain structure the load factor  $\lambda$  that applied to the external loads induces collapse to the structure. The static theorem of limit analysis is the theoretical basis for the Structural Collapse Simulator (SCS), that is finding a stress distribution in equilibrium that does not violate yield criteria anywhere. The limit analysis is developed and written as a Linear Programming Problem, which consists of the maximization of the collapse load factor subject to equilibrium and yield criteria. The Structural Collapse Simulator has been applied to several types of structures to assess its capabilities on world applications.*

## 1. INTRODUCCIÓ

Limit analysis has been an increasingly and widely used tool for structure designing and soil mechanics analysis since its initial developments. The problem aimed to be solved by means of limit analysis consists of finding the minimum multiple of the load distribution in a solid subject that drives to the complete collapse of the body, assuming a plastic behavior of the subject, i.e. elastic range is left. In this project we have applied the limit analysis to finding conditions of failure of statically loaded 3D and 2D-structures of ductile materials, particularly steel. Continuous beams and frames of steel can carry loads considerably greater than the ones that cause to reach the elastic limit of the material. In general, when loading increases plastic yield is attained in some elements of the structure, which implies the partial loss of its bearing capacities. If the process of loading does not cease it may incur the physical failure of the structure, when the load has reached a certain value called collapse load (see Figure 1.a). Above this factor, small loading increases may result in much larger permanent deformations than the ones experienced before. The so-called plastic methods attempt to estimate the collapse load factor, and hence provide both knowledge of its bearing capacity and a better use of materials in the design process.

Taking into account progresses in limit analysis and linear programming (LP) in this project we have developed a computational tool that compute a lower,  $\lambda_{lw}$ , and upper bound,  $\lambda_{up}$ , of the load factor,  $\lambda$ , that applied to the external loads induces collapse to the structure. It is important to point out that this analysis can be applied to 2D and 3D structures. First, global equilibrium equations are considered in matrix notation, bearing in mind geometric restrictions and kinematic constraints. One of the new approaches to the problem is the yield condition linearization. Yield surface of standard beam cross-sections is explicitly written,

and it is adaptively approximated in a manner that every element of the structure can have its yield surface differently approximated if desired (see Figure 1.b). Besides that, this approximation yields to lower and upper bounds of the exact collapse load whether the yield surface (always convex) is approximated inwards or outwards. The second major innovation is the possibility of considering Uniform Distributed Loads (UDL), and an adaptive procedure is sought as well. Combining both the yield conditions, uniform distributed load and adaptively the bound gap can be arbitrarily reduced, and therefore a more precise collapse load factor can be found.



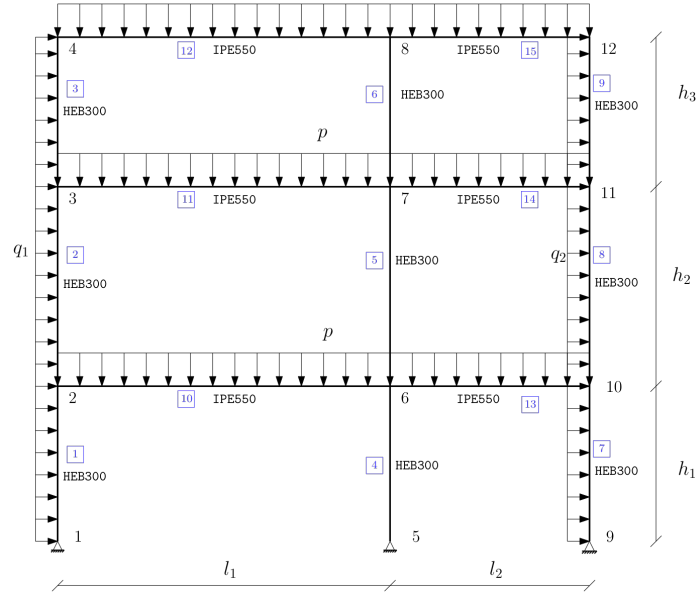
**Figure 1.** (a) Collapse of a frame structure. (b) Approximation to a yield surface performed by standard codes

## 2. EXAMPLES

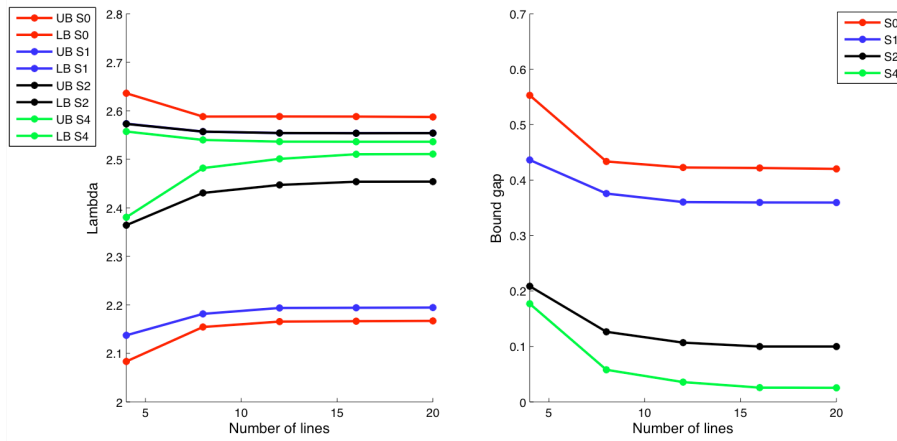
To illustrate and assess the capabilities of the SCS we present two examples. The goal of the first example is to show the robustness of the SCS. To this end, we consider a 2D analysis of a three-storey building where the influence of the approximation of the yield curve and the UDL are considered. A schematic representation of the frame is in Figure 1. Geometric data is  $l_1 = 7.5$  m,  $l_2 = 4.5$  m for horizontal spans and  $h_1 = 3.55$  m,  $h_2 = 4.5$  m,  $h_3 = 3.3$  m for vertical spans. The vertical loads correspond to use loads, with a value of  $p = 65$  kN/m, whereas the horizontal ones are wind loads, with values of  $q_1 = 5$  kN/m,  $q_2 = 3$  kN/m. All loads have already been increased by the appropriate load increase coefficients, which can be found in the normative of steel structures.

This frame has been studied by continuously subdividing the elements bearing UDL, and at each step analysis of the convergence will be carried out varying the number of lines used to approximate the yield curve. Figure 2 summarizes the results of the convergence analysis. We denote by  $S_i$ ,  $i = 0, 1, 2, 4$  the number of subdivisions applied to the elements of the structure. For each one of these cases, we have increased the number of lines used to approximate the yield curve,  $nl = 4, 8, 16, 20$ . Figure 2 shows the upper and lower bounds of the load factor, and the bound gap for all the subdivision. We realize that SCS performs precise computations that enable the user to know a lower and an upper bound to the exact collapse load factor. The convergence analysis shows that to achieve an accurate result both techniques have to be used simultaneously. Subdividing the beam elements bearing UDL is necessary in order to describe the frame more accurately, ensuring to detect the collapse mechanism and thus reducing the bound gap. Furthermore, approximating the yield curve using more lines guarantees convergence of the upper and lower bounds, but is useless without the element subdivision. The proof of this latter is the fact that the bounds remain stagnant despite using more lines,

therefore the need of subdividing the UDL elements arises. Consequently, the combination of these two techniques is necessary to obtain satisfying results, ensuring success of SCS.



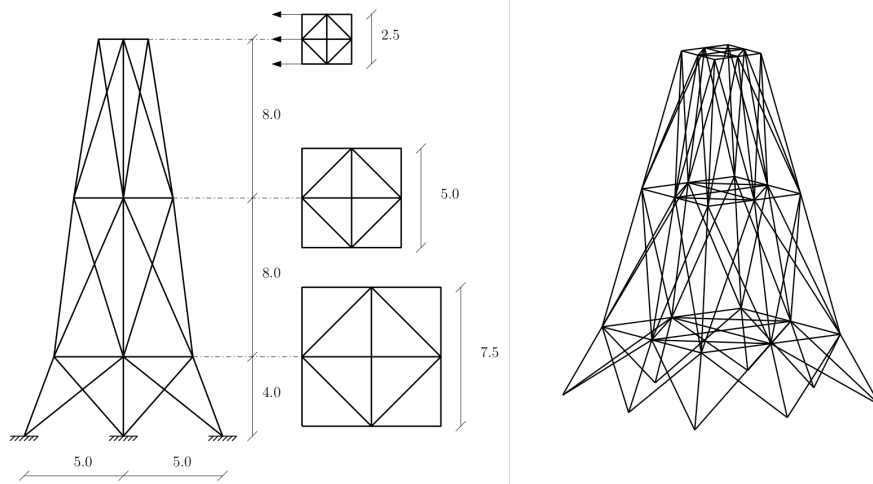
**Figure 2.** Schematic representation of the three-storey building.



**Figure 3.** (a) Convergence of the upper and lower bounds of the load factor  $l$  versus the number of lines used to approximate the yield curve. (b) Convergence of the bound gap versus the number of lines used to approximate the yield curve.

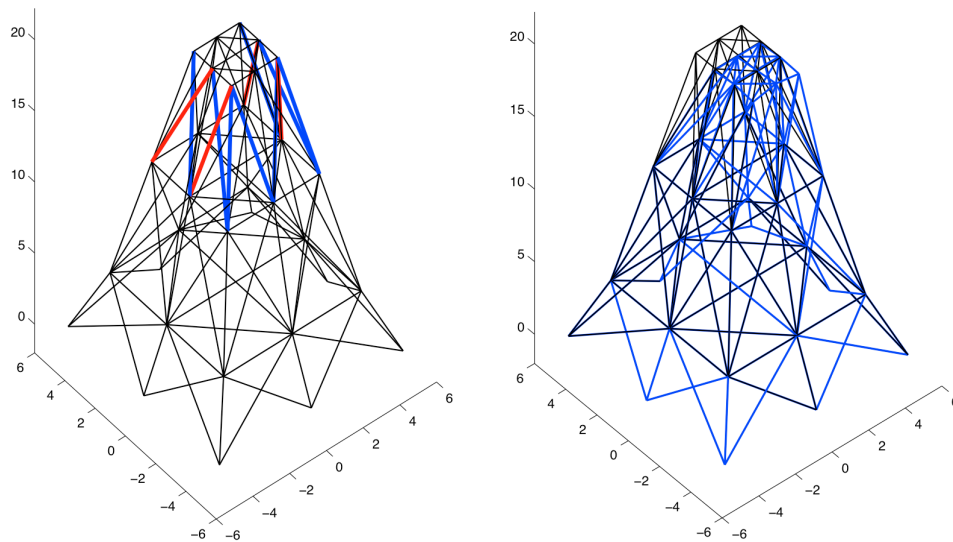
The goal of the second example is to illustrate the advantages of employing SCS in comparison to linear analysis methods. We consider a trussed 3D tower. The geometrical description of the tower is presented in see Figure 3. The used beams have square  $100 \times 100$  mm cross-sections. The plastic values are  $NT = -2 NC$ , where  $NC = 5 \cdot 10^5$  kN. In this analysis we apply horizontal loads to the trussed structure. Since the structure is trussed the failure of a section occurs whenever the axial stress reaches the plastic limit. Hence, the normative criterion equals the real behavior of the yield curve.

Linear analysis detects the first element to exceed the elastic limit (either traction or compression). In this case, due to problem symmetries various elements attain plastic flow at the same time. The collapse load found using SAAP2000 is  $F_{lin} = 216440$  kN. Nevertheless, the result obtained is not the true mechanism of collapse, as the structure can bear more loading without collapsing.



**Figure 3.** Schematic representation and 3D view of a steel tower.

However, computing this trussed tower with SCS leads to more realistic results. A distribution of elements that generate the collapse mechanism can be obtained. In Figure 2 the elements that fail are depicted, in red the elements that fail for traction and in blue for compression. Figure 4 shows that only the upper part of the structure fails, and therefore only this part collapses.



**Figure 4.** Right. Collapse mechanism: elements that fail due to traction (red) and compression (blue). Left. Amplified deformed structure (blue).

The collapse load obtained by SCS is  $F_{\text{real}} = 30,0075.7 \text{ kN}$ , which can be related to the one obtained with the linear analysis similarly to what done before. It is important to point out that  $F_{\text{real}}/F_{\text{lin}} = 1.4$ . Therefore, the proposed methods, SCS, detects that structure can bear 40% more loading, besides providing the actual collapse mechanism.

#### REFERENCES

- [1] L. Damkilde and S. Krenk (1997) A system for limit state analysis and optimal material layout. *Comput. Struct.*, 64(1–4):709–718.
- [2] K. Krabbenhoft and L. Damkilde, (2003) A general nolinear optimization algorithm for lower bound limit analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 56, pp. 84–165.
- [3] A. Lyamin and S. Sloan (2002) Lower bound limit analysis using non-linear programming,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 55, pp. 573–611.



# COMPORTAMENT RESISTENT DELS REVESTIMENTS DE TÚNEL REALITZATS AMB DOVELLES PREFABRICADES DE FORMIGÓ

Oriol Arnau<sup>1</sup> i Climent Molins<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament d'Enginyeria de la Construcció. [oriol.arnau@upc.edu](mailto:oriol.arnau@upc.edu) [climent.molins@upc.edu](mailto:climent.molins@upc.edu)

**Paraules Clau:** Túnel, assaig in situ, anàlisi estructural, simulació numèrica.

**Resum:** *La present ponència mostra l'activitat investigadora duta a terme en l'àmbit de la resposta resistent dels revestiments de túnels realitzats a base d'anells de dovelles prefabricades de formigó. L'activitat s'inicià amb la realització d'una prova de càrrega in situ sobre un tram experimental ubicat dins la línia 9 del metro de Barcelona. Les conclusions obtingudes sobre el seu comportament van permetre desenvolupar models de simulació numèrica tant 2D com 3D ben contrastats amb els resultats experimentals de l'assaig. Aquesta recerca també inclou l'estudi del comportament longitudinal del revestiment, on es determina fins a quin punt la compressió longitudinal inicialment introduïda per la tuneladora es va dissipant en el temps per efecte de la fluència del revestiment, fet que condiciona la capacitat d'interacció longitudinal entre anells successius.*

## 1. INTRODUCCIÓ

La utilització de màquines tuneladores per a la construcció de túnels s'ha incrementat de forma notable al llarg dels últims anys degut als nombrosos avantatges que presenta davant dels mètodes tradicionals de perforació. Aquest sistema permet la construcció de túnels sota grans pressions de terres i aigua, les quals han de ser resistides pel revestiment estructural després del pas de la tuneladora. Aquest nou escenari amb major sol·licitacions estructurals converteix al disseny del revestiment en un dels punts clau en tot projecte de túnel.

Per tal de procedir de la forma més segura possible en la contenció de les terres i l'aigua, el revestiment es va construir a l'interior de la tuneladora a mida que aquesta avança. El revestiment del túnel es descompon en diverses peces de formigó prefabricades que conformen un anell, el muntatge successiu dels quals acaba formant la totalitat del revestiment (Fig. 1).

Aquesta particular configuració genera una resposta estructural condicionada per múltiples fenòmens complexos com ara el comportament dels junts, dels materials de contacte disposats en ells o de la interacció terreny-estructura. La bibliografia presenta significatives llacunes de coneixement al respecte, dotant a aquest àmbit un fort interès per al desenvolupament de recerca ja que la millora del coneixement de la resposta estructural dels revestiments permetrà optimitzar els processos de disseny i oferir un producte més segur a un cost més reduït.

Un ambiciós pla de recerca va ser plantejat a fi d'incrementar el coneixement sobre la resposta estructural dels revestiments de túnels realitzats a base de dovelles prefabricades. Inicialment es va dissenyar un assaig innovador que permetés obtenir de forma realista la resposta estructural d'aquesta tipologia de revestiment. En base als coneixements obtinguts en l'assaig, es van desenvolupar tècniques de modelització numèrica destinades a reproduir de forma fidel els principals fenòmens que influeixen en la resposta estructural dels revestiments.

L'adequació dels models plantejats es va contrastar mitjançant la simulació numèrica de l'assaig, obtenint un excel·lent nivell d'adequació vers els resultats experimentals.

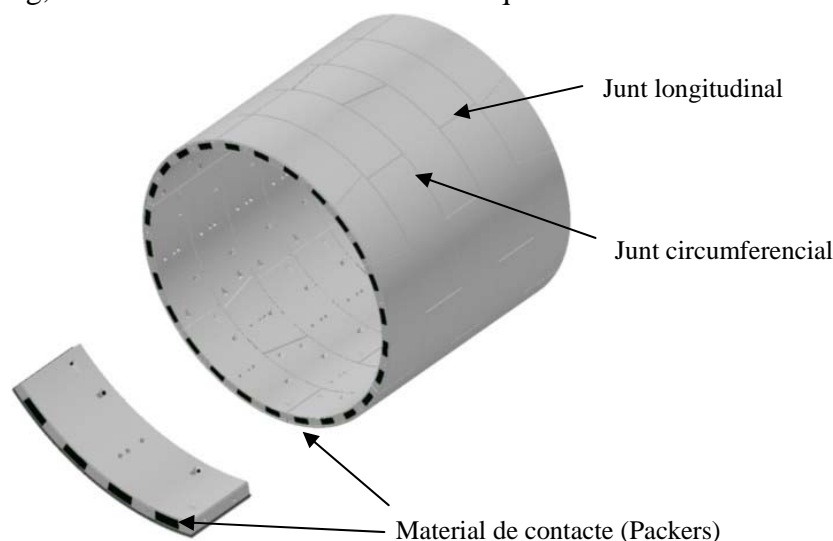


Figura 1. Revestiment de túnel a base de dovelles prefabricades de formigó.

Un segon bloc de recerca s'ha focalitzat en la determinació de la resposta tridimensional del revestiment. Degut a la particular configuració dels junts entre anells (junts circumferencials), el nivell de la força longitudinal que roman al túnel condiciona el nivell d'interacció entre anells adjacents i per tant, la capacitat de repartiment longitudinal o, el que és el mateix, el grau de tridimensionalitat de la resposta. L'estudi dels mecanismes longitudinals de transmissió de forces ha permès determinar els fenòmens que condicionen la seva evolució i, en base a aquests, proposar formulacions que permetin predir la reducció que experimenta la força longitudinal al llarg del temps.

## 2. ASSAIG *IN SITU* LINEA 9

A fi de poder obtenir evidències experimentals clares de la resposta estructural real presentada pels revestiments de túnels, es va dur a terme un assaig *in situ* sobre un tram experimental de la Línea 9 del metro de Barcelona [1]. La particularitat principal de l'assaig és que es va dur a terme sobre un anell ubicat en la seva posició definitiva dins del túnel, salvant d'aquesta forma la limitació principal de les experiències prèvies realitzades, que no podien considerar la interacció terreny-estructura real en realitzar-se dins de laboratori.

El tram experimental estava constituït per 15 anells de dovelles de formigó, les quals estaven exclusivament reforçades mitjançant l'ús de fibres metàl·liques (sense barres d'armadura convencionals). L'assaig presentava tres objectius principals: 1) desenvolupar i aplicar una nova tècnica per assajar revestiments de túnels tenint en compte tots els seus condicionants, 2) obtenir evidència experimental de la resposta estructural dels revestiments en les condicions de roca dura presentades, i 3) determinar la viabilitat de la utilització de les fibres d'acer com a únic reforç per al formigó de les dovelles.

La configuració de l'assaig es basava en l'aplicació de tres carregues puntuals en la zona de clau d'un anell, les quals es generaven mitjançant tres gats hidràulics plans col·locats a l'extradós de les dovelles durant el procés de prefabricació. La càrrega màxima finalment aplicada va ser de 3000kN, suficients per a generar una significativa fissuració del formigó en la zona carregada.



Es va disposar d'una gran quantitat d'instrumentació interna i externa tant en l'anell carregat com en els adjacents, permetent enregistrar amb un gran nivell de detall la resposta presentada per l'estructura.

L'anàlisi dels resultats va permetre obtenir conclusions significatives sobre la resposta estructural dels revestiments de túnels realitzats a base de dovelles prefabricades de formigó i dels principals fenòmens involucrats. A més, es van poder contrastar les diferents hipòtesis i valors correntment emprats en la fase de disseny per a la interacció terreny-estructura.

### **3. MODELS D'ANÀLISI RESISTENT**

L'optimització del procés de disseny estructural requereix disposar d'eines que permetin predir la resposta estructural que un determinat revestiment presenta davant de les seves particulars càrregues i condicions de contorn. Els múltiples paràmetres que l'afecten juntament amb la complexitat pròpia de cadascun d'ells genera que aquesta tasca sigui pràcticament inabordable mitjançant models analítics simplificats, requerint la utilització de models de simulació numèrica.

La realització de l'assaig *in situ* va permetre identificar els fenòmens que determinen la resposta estructural del revestiment i que, per tant, havien de ser inclosos de forma molt exacta. L'estratègia adoptada es va basar en l'estudi d'aquelles tècniques de modelització que permetessin reproduir de forma acurada cada un d'aquests fenòmens, de forma aïllada, per finalment integrar-los en un únic model del revestiment.

D'aquesta forma es van desenvolupar dos models de túnel per a reproduir l'assaig *in situ*, un 2D de tensió plana i un 3D de elements finits làmina que integressin les tècniques adequades per a reproduir: 1) el comportament post-fissuració del formigó reforçat amb fibres d'acer, 2) la resposta rotacional no lineal dels junts, 3) el comportament no lineal amb deformacions romanents presentat pel material de contacte dels junts entre dovelles i 4) la interacció terreny estructura [2].

La contrastació dels resultats numèrics amb les mesures experimentals va demostrar la capacitat d'ambdós models per reproduir la resposta real. La precisió en la predicció dels desplaçaments del túnel i en les obertures dels junts al llarg dels diferents estadis de càrrega va avalar la validesa de la filosofia, les hipòtesis i les tècniques de modelització adoptades. Les similituds entre els patrons de fissuració numèric i real corroboraren que el model material adoptat per incorporar la contribució de les fibres d'acer en el formigó era adequat.

### **4. COMPORTAMENT LONGITUDINAL DIFERIT DELS REVESTIMENTS**

El nivell de tridimensionalitat que la resposta estructural d'un revestiment a base de dovelles de formigó presenta depèn de la capacitat de transmissió de forces tangencials entre els seus anells.

La majoria dels revestiments de túnel construïts a la península ibèrica presenten una configuració plana en les seves juntes entre anells. Això suposa que la transferència de forces es produeix a través dels elements de contacte (packers) tot sol·licitant-los a tall i fricció. En conseqüència, la seva capacitat de transmissió de força tangencial dependrà de la força longitudinal existent en els junts entre anells.

El particular procés constructiu que fan servir les tuneladores produeix una força longitudinal permanent sobre el revestiment per tal d'impulsar-se i avançar, a la vegada que es conté la pressió de terres i aigua del front d'excavació. De forma general, en la bibliografia es considera que aquesta força roman permanentment en el revestiment. No obstant, si es tenen en compte les deformacions diferides que, ben segur, experimenta el formigó, aquesta

hipòtesi pot resultar poc realista. Per aquesta raó, s'ha desenvolupat un estudi detallat del procés constructiu dels revestiments així com dels diferents mecanismes que podien causar la transmissió de forces del revestiment cap al terreny [3] que demostra la dependència de la tensió de compressió romanent amb la fluència longitudinal experimentada per el revestiment. L'estructura comprimida per l'acció de la tuneladora experimenta un procés de relaxació que origina la progressiva pèrdua de la força longitudinal a mida que passa el temps. L'anàlisi d'aquest mecanisme ha permès determinar una formulació analítica per a la predicció de la tensió de compressió romanent en base al coeficient de fluència longitudinal del revestiment. Un model numèric d'anàlisi evolutiva ha permès realitzar la contrastació de la formulació proposada, obtenint un excel·lent nivell d'adequació entre ambdós resultats.

A més, també s'ha estudiat la influència que les deformacions diferides experimentades pel material de contacte dels junts (packers) podia presentar. S'ha dut a terme un assaig específic de laboratori per a determinar la fluència d'aquests materials i s'ha proposat una formulació per al coeficient global de fluència del revestiment a fi de unificar les deformacions diferides del formigó i del packer.

## 5. CONCLUSIONS

La investigació desenvolupada ha suposat una contribució directe en el coneixement de la resposta resistent dels revestiments de túnel realitzats a base de dovelles prefabricades de formigó. La realització d'un innovador assaig *in situ* ha permès desgranar els principals fenòmens que governen el comportament d'aquesta tipologia de revestiments.

Això ha permès desenvolupar tècniques de simulació numèrica basades en la reproducció acurada de tots fenòmens un a un i la seva posterior integració en un únic model de túnel. Els excel·lents resultats obtinguts en la simulació de l'assaig *in situ* han validat el model, el qual ha sigut satisfactòriament usat per analitzar situacions particulars en diferents túnels.

L'anàlisi dels mecanismes longitudinals de transmissió de forces ha permès determinar l'abast de la pèrdua de compressió longitudinal en el temps a causa de la fluència del revestiment. Aquest fet condiciona la capacitat d'interacció longitudinal, que disminueix amb l'edat de túnel.

## AGRAIMENTS

Els autors volen mostrar el seu agraïment a GISA i a l'empresa FCC Construcción S.A. per tot el suport donat a la investigació de la resposta estructural dels revestiments de túnel.

## REFERÈNCIES

- [1] Molins, C., Arnau, O. *Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution*. Tunnelling and Underground Space Technology. (2011), doi:10.1016/j.tust.2011.05.002.
- [2] Arnau, O., Molins, C. *Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation*. Tunnelling and Underground Space Technology. (2011), doi:10.1016/j.tust.2011.04.005.
- [3] Arnau, O., Molins, C., Blom, C.B.M., Walraven, J.C. *Longitudinal Time-Dependent response of segmental tunnel linings*. Enviat a Tunnelling and Underground Space Technology.

## BACKANALYSIS OF MEASURED MOVEMENTS IN AGEING TUNNELS

C. de Santos. <sup>\*1</sup>, A. Ledesma<sup>\*2</sup>, A. Gens.<sup>\*3</sup>

<sup>\*</sup>Department of Geotechnical Engineering and Geosciences <sup>1</sup>e-mail: cristian.desantos@upc.edu,  
<sup>2</sup>e-mail: alberto.ledesma@upc.edu, <sup>3</sup>e-mail: antonio.gens@upc.edu

**Keywords:** Inverse analysis, tunnels, ageing, Plaxis

**Abstract:** *The paper describes a procedure to perform backanalysis in a systematic manner in the context of ageing tunnels. Basically the input data include information on relative displacements or deformations of specific points in the lining of a tunnel exhibiting long term movements and the objective of the procedure is to identify a set of parameters that characterize the surrounding soil and the lining properties. Any damage in the infrastructure should give a change in those parameters identified. The analysis should be able to obtain useful information for the manager of the tunnel, in terms of maintenance, repair of some sections, warning in case of danger, etc. The paper presents the basic theory of parameter identification and an application to the backanalysis of a tunnel section from London Underground, where some measurements of rotation of lining segments are available.*

### 1. INTRODUCTION

The work presented in this paper has been developed in the context of the European Science Foundation Project “Micro-Measurement and Monitoring System for Ageing Underground Infrastructures”. The research project focus on the monitoring of the deterioration of underground structures by means of new technologies based on wireless sensor networks, including computer vision and miniature electromechanical sensors. Ageing of tunnels is observed as a deterioration of the lining in most cases. Opening of cracks, strains or relative displacements or rotations between two points constitute typically the main variables that can be measured on the lining surface. Other basic measurements like pore water pressures in the surrounding soil or absolute displacements could be considered as well in further developments.

All the data provided by these sensors must be gathered and stored in a comprehensive database. Due to the large amount of data involved, a postprocessor is required, in order to provide to the manager responsible for the maintenance a first insight into the overall behaviour of the infrastructure.

After identifying the most critical sections, it is necessary to perform a more sophisticated analysis in order to relate the damage with a cause. If the reason for that damage is not found out, it will be difficult to make appropriate decisions. This is often a difficult task due to the nature of the failure modes, involving complicated interactions between the underground structures and the adjacent ground. Therefore, it is necessary to analyze the mechanical response of the underground structure and the surrounding soil. There are several commercial codes based on the finite element method that can assist in that task. They usually solve the problem in a direct manner; that is, given a particular geometry and a set of parameters, they predict the stresses and strains of the structure. However, in this case field measurements constitute the input data, and the manager of the system would expect an assessment of the

integrity and properties of the materials involved. This is in fact an inverse problem, in which mechanical parameters are estimated from measurements as strains or relative displacements.

The estimation of soil and rock parameters based on field instrumentation data is a traditional and a common procedure in Geomechanics. However, the use of optimization techniques to perform backanalysis in a more systematic manner is a relatively recent development (Gioda & Sakurai, 1987). From a mathematical point of view, the identification of parameters results in a minimization problem. Nowadays, the use of system identification and optimization techniques allows the performance of this type of analyses in a more rational and objective manner. Examples of backanalysis in the context of tunnel excavation problems are described in Ledesma et al (1996, 1997) and Gens et al (1988, 1996) among others. In those works, a maximum likelihood approach is presented to estimate the required parameters. The main difficulty when estimating parameters is that several combinations of them may give similar results in terms of measurement variables and therefore the solution is not unique. Because of that, part of the research in this field has been devoted to the improvement of the optimization process itself.

This paper presents an example of backanalysis performed using field data from an old tunnel in the context of the research project mentioned above. First, a basic theory about parameter identification is presented. Then, a real case involving a tunnel section in London Underground is described. In this case, ageing is due to consolidation and drainage of the surrounding soil. The  $K_0$  parameter and the stiffness of the joints between lining segments have been identified. In fact, both parameters are very difficult to measure and this type of techniques could be very useful in practice.

## 2. BACKANALYSIS PROCEDURE

It is assumed that a fixed and deterministic model relates a set of variables  $\mathbf{x}$  and a set of parameters  $\mathbf{p}$ . Some of the variables  $\mathbf{x}$  are measured and form the vector of measurements  $\mathbf{x}^*$ . The best parameters are those that minimize the difference between measured and computed variables. A simple procedure to establish that, is defining the so called “objective function”,  $F$ :

$$F = \sum_{i=1}^m (x_i^* - x_i)^2 \quad (1)$$

where  $m$  is the number of measurements.  $F$  represents the error between the measurements and the same variables computed with the model, computed using a least squares criterion. Expression (1) can be generalized when measurements are not independent or have different errors (Ledesma et al, 1996). Note that  $F$  is a function of the parameters, as  $\mathbf{x} = \mathbf{M}(\mathbf{p})$ , where  $\mathbf{M}$  represents the model. Minimizing  $F$  will provide with the set of parameters that best simulate the measurements obtained.

It should be pointed out that  $F$  depends in a nonlinear manner on the parameters. The model  $\mathbf{M}$  is usually represented by a Finite Element analysis. Even when a linear law is used, the objective function,  $F$ , is nonlinear with respect to the parameters  $\mathbf{p}$ . That makes difficult to find the minimum of  $F$ . When only one or two parameters are identified, a simple inspection of the values of  $F$  may be enough to estimate the minimum. This has been the case in the example described in this paper. Moreover, the plot of the objective function is useful to understand the sensitivity of measurements to the parameters considered in the analysis. However, if more than two parameters are involved, then it is more convenient to use any suitable minimization algorithm.

In general it is necessary to choose between methods that only need evaluations of the function and methods that also require computations of the derivative of that function. Algorithms using the derivative of the objective function are expected to be more powerful

than those using only the values of the function itself, but they may be generally more time consuming. A combination of both approaches can be also a good strategy in complex problems.

### 3. APPLICATION TO AGEING TUNNELS IN LONDON

#### 3.1. Site description

The application of the backanalysis procedure outlined above refers to a particular section in the Northbound tunnel of the Jubilee Line, between Baker Street and Bond Street in London Underground, built in the seventies using a shield.

In the simulation, both tunnels have been taken into account, although only measurements from the Northbound tunnel have been considered in the backanalysis procedure. This is because ageing on those tunnels is apparently due to the consolidation and drainage of the surrounding soil and, therefore, both tunnels must be considered in the geometry for the analysis.

The Northbound tunnel has a diameter of about 4 m and was excavated mainly in London clay. The lining is made of 22 concrete segments in most of the tunnel.

#### 3.2. Measurements available

Measurements available refer to the rotation between segments due to the movements of the lining. Probably the initial shape of the lining when constructed was not circular (Lyons, 1979) but it is difficult to distinguish between original imperfections and movements produced along time, as only one set of displacements has been measured and compared with the theoretical circular shape.

The measurements available give the rotation between two contiguous segments. That rotation originates a displacement of the contact point between segments, which is known as “eccentricity”. Values of “eccentricity” for all the joints have been used as main data in the identification process.

#### 3.3. Identification of parameters

The direct problem has been analyzed by using the Finite Element Code “Plaxis” (version 8 in 2D). Figure 1 shows the finite element mesh used in the simulations. As this analysis is focused on the inverse problem, a simple constitutive law was selected for the direct problem. In this case, an elastic – perfect plastic law based on Mohr-Coulomb and available in Plaxis was used. First, the initial stresses are generated assuming a  $K_0$  parameter in advance. Then the tunnel is excavated, installing the lining and computing for equilibrium after release of the initial stresses. We have used an additional contraction loss of the lining corresponding to a volume loss of 1.4%, in order to take into account the effect of the shield (gaps, open excavation, installation of segments, etc), just during construction. That value is just an estimation based on experience. After that state, drainage is allowed, and a fully drained analysis is performed, keeping constant the water table and the hydraulic conditions in the geometry. Future improvements of the model will include the consideration of the actual groundwater history in the zone.

For the inverse problem we have considered the  $K_0$  parameter of London clay and the stiffness of the joints as the main parameters to be identified. On the one hand, the stiffness of the segment joints with respect to rotation is a difficult parameter to know in advance and therefore a backanalysis constitutes the only manner to obtain a consistent value. On the other hand, the  $K_0$  parameter, although well known for London clay, has an important influence on the deformed shape of the linings.

The objective function adopted for this case,  $F$ , had the following expression:

$$F(K_0, C_r) = \sum_{\text{joint } A-B}^{M-N} \left( \frac{x^*}{d} - \frac{x_{\text{Plaxis}}}{d} \right)^2 \quad (2)$$

Where  $x_{\text{plaxis}}$  refers to the eccentricity values obtained from the direct analysis using Plaxis and  $x^*$  corresponds to the measured eccentricities. Also, “ $d$ ” is the segment thickness (used to make the error dimensionless) and  $C_r$  the joint stiffness for rotation.

The analysis was performed considering both,  $C_r$  and  $K_0$ , as parameters to be identified. The combinations of  $C_r$  and  $K_0$  were used to solve the direct problem, and then the objective function (2) was computed. In this manner it was possible to plot that function and to obtain the minimum by direct inspection also. That is, a minimization algorithm was not required in this problem. Figure 1 presents that function for this case. The minimum is found for a value of  $C_r$  close to 10000 kNm/rad/m and a value of  $K_0 = 1.5$ . This value for the earth pressure coefficient at rest is quite common in many Finite Element analyses involving London clay.

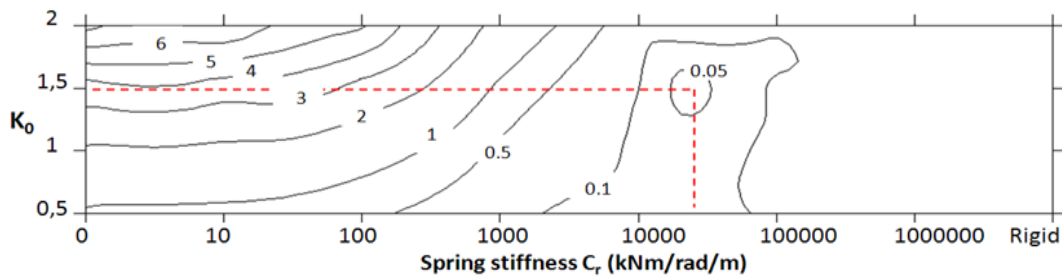


Figure 1. Objective function  $F(C_r, K_0)$

#### 4. CONCLUSIONS

The paper presents an example of estimation of parameters from measurements from the lining of ageing tunnels. This process is expected to be performed in an automatic manner in order to assess the evolution of the lining of tunnels undergoing deterioration. Inverse problem techniques can be used in this process as they have proven to be efficient in Geomechanical problems. The identification of  $K_0$  and the joint stiffness of a segmental lining has been identified from measurements of rotations between segments in a real case involving a tunnel in London Underground. Joint stiffness is particularly difficult to measure in practice and may be related to lining deterioration. In this respect, a systematic application of the identification of parameters techniques, constitute a useful tool for the safety assessment of old tunnels.

#### REFERENCES

- [1] Gens, A., Ledesma, A., Alonso, E.E. (1988). Back analysis using prior information – Application to the staged excavation of a cavern in rock. Numerical Methods in Geomechanics, Swoboda ed., Innsbruck, Balkema, p. 2009-2016.
- [2] Gens, A., Ledesma, A., Alonso, E.E. (1996). Estimation of parameters in Geotechnical Backanalysis – II. Application to a tunnel excavation problem. Computers and Geotechnics, 18:29-46
- [3] Gioda, G., Sakurai, S. (1987). Back analysis procedures for the interpretation of field measurements in Geomechanics. Int. J. for Numerical Analyt. Methods Geomech., 11:555-583.
- [4] Ledesma, A., Gens, A., Alonso, E.E. (1996). Estimation of parameters in Geotechnical Backanalysis – I. Maximum Likelihood Approach. Computers and Geotechnics, 18:1-27.
- [5] Ledesma, A., Romero, E. (1997). Systematic backanalysis in tunnel excavation problems as a monitoring technique. Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Hamburg, Balkema, 3, p.1425-1428.

# HINCHAMIENTO EN TÚNELES POR CRECIMIENTO DE CRISTALES Y SU MODELACIÓN

Ramon, A.<sup>1</sup>, Alonso, E.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica  
e-mail<sup>1</sup>: anna.ramon@upc.edu, e-mail<sup>2</sup>: eduardo.alonso@upc.edu

**Palabras Clave:** Túnel, hinchamiento, yeso, anhidrita, arcilla, cristalización, evaporación

**Resumen:** *La intensidad del comportamiento expansivo observado en excavaciones de túneles en arcillas sulfatadas es mayor que en otras rocas y suelos expansivos libres de sulfatos. En la mayoría de casos la funcionalidad y la estabilidad de los túneles se ven afectadas. Investigaciones de campo y de laboratorio muestran que, en general, el desarrollo de deformaciones y altas presiones en rocas sulfatadas está asociado al crecimiento de cristales de yeso en discontinuidades. El crecimiento de cristales de yeso es una consecuencia de la sobresaturación del agua del macizo en sulfatos. Los datos de campo que avalan esta interpretación tienen un ejemplo sobresaliente en el túnel de Lilla (Tarragona), que ha sufrido graves problemas de hinchamiento tras su construcción. Se ha desarrollado un modelo de cálculo hidro-mecánico acoplado que permite predecir hinchamientos en excavaciones en arcillas sulfatadas durante la etapa de diseño.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En la literatura se han descrito fenómenos expansivos de gran intensidad en túneles excavados en arcillitas anhidríticas de origen secundario en el centro de Europa. El túnel de Lilla atraviesa sedimentos arcillosos anhidríticos más modernos, terciarios, de la cuenca del Ebro. En estos materiales no se habían descrito fenómenos expansivos de la intensidad encontrada en Lilla. Tanto los movimientos verticales de solera (que alcanzaron valores próximos a 1 m) como las tensiones máximas medidas sobre revestimientos rígidos (6 MPa) son solo valores extremos raramente mencionados en la literatura. Por ello Lilla es un caso de referencia para la construcción de túneles en España, especialmente en el Centro y Este peninsular donde son frecuentes las formaciones anhidríticas y yesíferas.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS FENÓMENOS OBSERVADOS

### 2.1 Geología y aspectos técnicos del túnel de Lilla

El túnel de Lilla es un túnel ferroviario perteneciente a la línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona-Frontera francesa. Está situado cerca de Montblanc en Tarragona. El túnel atraviesa principalmente rocas arcillosas del Eoceno Inferior que contienen anhidrita, un sistema complejo de venas milimétricas y centimétricas de yeso fibroso y nódulos de yeso. Los estratos componen series monótonas de capas razonablemente horizontales. Un aspecto importante es la existencia de un sistema persistente de superficies cizalladas, de bajo buzamiento debido a la tectónica del Horst regional (Priorato-Gayá).

Existen dos componentes esenciales en la caracterización mineralógica del material atravesado por el túnel: (i) la matriz arcillosa y (ii) la fracción cristalina sulfatada. El primero está formado mayormente por filosilicatos (illita y paligorskita). Las arcillas expansivas sólo se detectan en puntos aislados de la matriz. El segundo componente está constituido

principalmente por anhidrita y yeso. El agua subterránea que contiene el túnel está muy mineralizada y muestra concentraciones elevadas de sulfatos y de calcio.

El túnel tiene una longitud de 2 km y fue excavado inicialmente con una sección transversal en herradura con radio de bóveda de 6.76 m. El recubrimiento oscila entre los 10m y los 110 m. La excavación se realizó mediante perforación y voladura desde ambos emboquilles, dividiendo la sección en avance y destroza. La solera del túnel sufrió la acción de agentes medioambientales durante la mayor parte del proceso constructivo.

## 2.2 Fenómenos de hinchamiento en el túnel de Lilla

Las primeras expansiones en el túnel de Lilla se detectaron en forma de levantamientos en la losa de solera inmediatamente después de su construcción. Los fenómenos expansivos aumentaron en gravedad con el tiempo y ocurrieron de manera generalizada a nivel de la solera. Los movimientos sólo se percibían levemente en la bóveda sin revestir. Al desplazamiento siguieron los daños al sistema de drenaje longitudinal y, finalmente, el deterioro y rotura de las losas de solera.

Se iniciaron campañas de investigación “in situ” y en laboratorio para tratar de entender el fenómeno. Las medidas de desplazamiento vertical registradas por micrómetros deslizantes indicaron que los levantamientos ocurrían en profundidad bajo la solera. Los hinchamientos se concentraban en un espesor de material de 4 a 5 metros (zona activa). En todos los perfiles de roca estudiados, la zona activa se caracterizaba por la aparición de agujas de yeso neoformado en las superficies cizalladas abiertas al excavar el túnel y la existencia de agregados yesíferos neoformados en discontinuidades, relativamente confinadas.

La Figura 4 indica la magnitud del desplazamiento de la solera y la extensión estimada de la degradación de la roca en tres fases diferentes durante el periodo de hinchamiento. La “zona activa” que se dibuja se define con las cotas en las que se midieron deformaciones de hinchamiento mediante los extensómetros continuos. La profundidad de la roca dañada fue estimada a partir de una serie de sondeos excavados a lo largo del túnel. La magnitud del fenómeno expansivo en el túnel de Lilla no fue homogénea a lo largo de su longitud. Los hinchamientos más extremos se concentraron en un tramo de unos 800 metros a partir del emboquille Norte. En una longitud de 500 metros aproximadamente, próximos al extremo Sur, no se observaron hinchamientos.

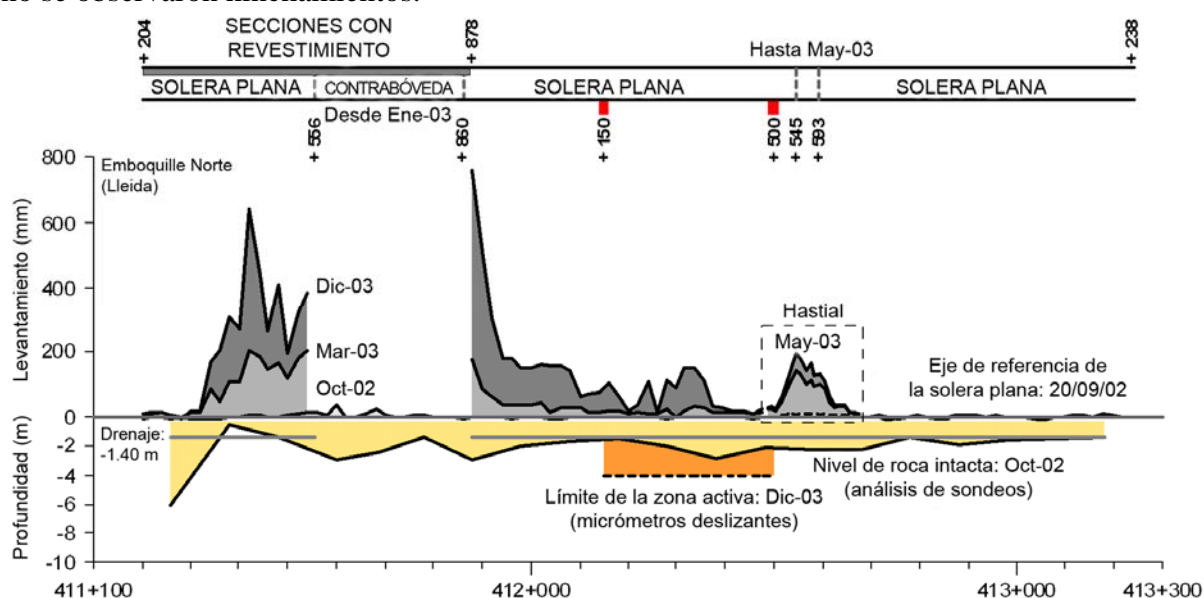


Figura 4: Hinchamiento de la losa longitudinal entre octubre de 2002 y diciembre de 2003 y su relación con las condiciones de la roca en octubre de 2002 y la cota de la zona activa.



Los fenómenos expansivos en la roca bajo solera evolucionaron rápidamente. En diciembre de 2003 las secciones críticas con solera plana instrumentadas mostraron desplazamientos de más de 700 mm, con una velocidad de movimiento vertical que variaba de 1.2 a 2 mm/día. A pesar de que se obtuvieron valores relativamente altos de los desplazamientos verticales en las secciones con contrabóveda instrumentadas, en algunos puntos se observó que las presiones radiales totales eran muy altas (4-5 MPa).

### **3. MECANISMOS DE HINCHAMIENTO DE LAS ROCAS ARCILLOSAS SULFATADAS**

Parece comprobado que la expansión observada en las rocas arcillosas sulfatadas se debe al crecimiento de cristales de yeso en fisuras o huecos disponibles en el macizo rocoso. Una característica común en el túnel de Lilla y en los distintos casos de hinchamientos en rocas sulfatadas descritos en la literatura, es la presencia de cristales de yeso de neoformación en discontinuidades abiertas localizadas en la zona activa donde se concentran las expansiones.

Los cristales se originan al precipitar los sulfatos en exceso de la concentración de saturación de las aguas en circulación. Existen, al menos, dos mecanismos que conducen a la sobresaturación en sulfatos del agua en el macizo rocoso y que por tanto pueden conducir a hinchamiento. El primero es la evaporación de agua sulfatada. La propia presencia del túnel, debido a las condiciones de humedad relativa impuestas por su atmósfera, con su ambiente ventilado, favorece la evaporación en las superficies expuestas de la roca. Debido a que la solubilidad de la anhidrita excede la concentración de sulfatos en equilibrio con yeso, el segundo mecanismo que conduce a la sobresaturación está inducido por la disolución previa de anhidrita en agua [2]. En la práctica la sobresaturación (sin evaporación) se alcanza principalmente cuando el agua que fluye en discontinuidades disuelve anhidrita.

Debido a que la precipitación de cristales de yeso tendrá lugar en un medio fracturado (la roca arcillosa), la cristalización de yeso en discontinuidades resultará en la apertura de fracturas existentes y en la aparición de nuevas, generando nuevas superficies donde el yeso puede cristalizar. La suma de los procesos aislados de apertura de las fisuras se traduce en el fenómeno expansivo general observado. Los distintos agregados de yeso cristalizado actuarían como pequeños gatos hidráulicos que dilatan la masa de roca circundante, originando hinchamientos y presiones elevadas sobre revestimientos. Aparentemente este proceso se mantendría mientras se produzca la cristalización del yeso, en lo que influye el aporte de agua rica en sulfatos, su concentración y las condiciones ambientales de las juntas.

En Lilla, la reducción de tensiones por excavación fue probablemente la causa de que se abriesen tanto superficies de cizalla como fisuras en la roca. El flujo de agua, rica en sulfatos, permitió la precipitación de cristales en las fisuras. Por tanto, los fenómenos de hinchamiento están asociados con el crecimiento de cristales y evolucionan sistemáticamente en el tiempo mientras las discontinuidades permanecen abiertas.

### **4. MODELACIÓN DE CRECIMIENTO DE CRISTALES DE YESO**

Se ha desarrollado un modelo de cálculo Hidro-Mecánico acoplado que permite predecir hinchamientos en excavaciones en arcillas sulfatadas durante la etapa de diseño del túnel. El modelo es consistente con observaciones de campo y de laboratorio. Permite simular el flujo de agua a través de un material con un contenido de yeso y anhidrita inicial. Reproduce la disolución de anhidrita y la cristalización de yeso tanto en medio acuoso por sobresaturación en sulfatos debido a la disolución de anhidrita como debido a la sobresaturación por evaporación de agua saturada en sulfatos. En el modelo se transforma la cristalización en

deformaciones. En el caso de desplazamientos impedidos, las deformaciones se traducen en tensiones de hinchamiento.

Se ha modelado el crecimiento de cristales dentro de un marco general para análisis Termo-Hidro-Mecánico en materiales porosos saturados y no saturados. En el material poroso se distingue una fase sólida compuesta de minerales arcillosos y de cristales de anhidrita y de yeso que son susceptibles de disolverse. Para tener en cuenta las características de este material en la formulación, el balance de masa de fase sólida incluye dos “tipos” de sólido: el sólido insoluble (que corresponde a matriz arcillosa) y el sólido soluble (que representa los cristales de anhidrita y de yeso). El balance de masa sólida tiene en cuenta los mecanismos básicos de disolución de anhidrita y precipitación de yeso para representar el crecimiento de cristales de yeso. Las ecuaciones de balance implementadas permiten definir la variación en porosidad, que depende del incremento de deformaciones volumétricas inducidas por los desplazamientos de los sólidos y el incremento de deformaciones volumétricas inducidas por la masa de cristales precipitada o disuelta. Finalmente la cantidad de masa precipitada se relaciona con las deformaciones inducidas por precipitación de cristales. Estas deformaciones se introducen en el proceso iterativo global y el modelo las tiene en cuenta para el cálculo de desplazamientos, deformaciones y tensiones. Cuando las deformaciones están impedidas, la cantidad de masa precipitada se traduce en incremento de las tensiones.

La formulación se ha implementado en el programa de Elementos Finitos para análisis Termo-Hidro-Mecánicos CODE\_BRIGHT (DIT-UPC, 2002) [1].

## CONCLUSIONES

Se han resumido los principales aspectos fenomenológicos del hinchamiento observado en el túnel de Lilla.

Se han presentado los conceptos que explican las características esenciales del comportamiento expansivo de las rocas que contienen sulfatos. Observaciones de campo del túnel de Lilla y de excavaciones en rocas sulfatadas con expansiones descritas en la literatura indican que las deformaciones de hinchamiento y las presiones de hinchamiento son debidas al crecimiento de cristales de yeso en discontinuidades abiertas. Los cristales de yeso se desarrollan debido a las condiciones de sobresaturación del agua en sulfatos. Estas condiciones tienen lugar cuando el agua que circula por las discontinuidades disuelve la anhidrita. La evaporación de agua en la roca expuesta a la atmósfera del túnel también puede contribuir a sobresaturar el agua natural del macizo.

Se ha desarrollado un modelo teórico consistente con observaciones de campo y de laboratorio. Se ha incluido en un código de Elementos Finitos general para el análisis Termo-Hidro-Mecánico y Químico de materiales porosos (Code\_Bright).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Administradora de Infraestructuras Ferroviarias de España (ADIF) por su colaboración y asistencia técnica en la preparación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] DIT-UPC (2000): CODE\_BRIGHT. A 3-D program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media. User's guide. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).
- [2] Kontrec, J., Kralj, D. y Brecevic, L. (2002): Transformation of anhydrous calcium sulphate into calcium sulphate dihydrate in aqueous solutions. *Journal of Crystal Growth*, 240, n 1-2: 203-211.

# EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN PROBLEMAS DE MECÁNICA DE ROCAS MEDIANTE EL MÉTODO $c-\phi$ REDUCTION.

I. Aliguer\*, I. Carol\*, E.E. Alonso\*

\*Departamento de Ingeniería del Terreno Cartográfica y Geofísica (DITCG)  
e-mail: [ignasi.aliguer@upc.edu](mailto:ignasi.aliguer@upc.edu) [ignacio.carol@upc.edu](mailto:ignacio.carol@upc.edu) [eduardo.alonso@upc.edu](mailto:eduardo.alonso@upc.edu)

**Palabras Clave:** Elementos Finitos, Mecánica de Rocas, Estabilidad de Taludes

**Resumen:** *En este documento se detalla de forma sintética el trabajo realizado hasta la fecha en la realización por parte del primer autor de la tesis doctoral que lleva por título: “Métodos Numéricos Avanzados para Evaluar la Estabilidad en Problemas de Mecánica de Rocas”, dirigida y tutelada por I. Carol y co-dirigida por E.E. Alonso. El trabajo se enmarca dentro del amplio campo de la mecánica de rocas tratando aspectos de modelos constitutivos e ingeniería computacional.*

*Se presenta a continuación la formulación de un método para la evaluación de la seguridad en macizos rocosos fracturados mediante la reducción de los parámetros resistentes de la ley de comportamiento de las juntas de roca. Este método se codificó y se implementó en el código por el Método de los Elementos Finitos DRAC, desarrollado por el grupo de investigación MECMAT. Finalmente se presentan algunos ejemplos.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Tanto en aplicaciones de ingeniería civil como de minería: construcción de vías de transporte rodadas y ferroviarias, tanto en superficie como subterráneas, construcción de presas, excavaciones de minas a cielo abierto o en galería, en fase de diseño el aspecto más importante a comprobar es la estabilidad de la porción de material afectado, debido principalmente a variaciones del estado inicial de tensión o aplicación de cargas exteriores.

En cuanto al material, las propiedades resistentes y el tipo de comportamiento son los aspectos más determinantes a la hora de evaluar la estabilidad. En el caso de roca en general, y de macizos rocosos fracturados en particular, la inestabilidad es inducida por el deslizamiento de bloques de roca a través de los planos de discontinuidad o juntas.

En cuanto a los métodos de análisis usados en problemas de estabilidad, éstos se dividen en dos grandes grupos: los Métodos de Equilibrio Límite y los Métodos Numéricos. Los primeros se basan en definir a priori un mecanismo de rotura y establecer el equilibrio de fuerzas para obtener las fuerzas movilizadas (actúan en contra de la estabilidad). Del modelo constitutivo del material se obtiene la fuerza que resiste el material en el plano de rotura. Finalmente, el Factor de Seguridad (FS) se obtiene comparando las fuerzas resistentes y las movilizadas. Los Métodos Numéricos consisten en discretizar el dominio de roca y calcular los valores de las variables del problema en puntos de este dominio de manera que se satisfagan las condiciones de equilibrio, compatibilidad, ley constitutiva y condiciones de contorno. A lo largo de los años se han desarrollado y aplicado una gran variedad de métodos numéricos en mecánica de rocas, sin embargo, uno de los más extendidos es el MEF. El  $c-\phi$  reduction es un método integrado al MEF que permite obtener el factor de seguridad del mecanismo de rotura más desfavorable sin necesidad de haberlo definido a priori.

El trabajo se articula alrededor del estudio de un caso real, el Análisis de Estabilidad del Estribo Izquierdo de la Presa de Canellas, en colaboración con la empresa hidroeléctrica ENDESA, donde se ha aplicado el método desarrollado, pero previamente también se ha

considerado el análisis por Métodos de Equilibrio Límite para evaluar la estabilidad del macizo de cimentación de la presa.

## 2. ELEMENTOS FINITOS CON ELEMENTOS JUNTA

Los elementos junta son un tipo de elemento finito que se caracterizan por tener un espesor nulo y por depender de los desplazamientos relativos en vez de las deformaciones. Pueden ser bidimensionales (se representan por una línea) o tridimensionales (triangulares o cuadrangulares) y pueden ser de diferente orden (lineal, cuadrático, cúbico...). Las coordenadas de sus nodos coinciden dos a dos pero tienen diferente conectividad. De este modo, en el lado común de los dos elementos de continuo separados por un elemento junta, los nodos tendrán las mismas coordenadas pero serán formulados como nodos diferentes.

## 3. MODELO CONSTITUTIVO DE JUNTA

El modelo constitutivo a utilizar en la formulación del método *c- $\phi$  reduction* fue formulado por Gens et al., 1989 [1]. Se trata de una ley de elasto-plástica general formulada en términos de una tensión normal a la junta y dos tangenciales y, un desplazamiento en la dirección normal y dos desplazamientos tangenciales de corte.

No obstante, existe la derivación de una versión simplificada que permite una integración analítica [2]. Los aspectos simplificativos son los siguientes: plasticidad perfecta, relación elástica lineal entre la tensión normal y el desplazamiento relativo normal y sin dilatación. En consecuencia, es posible reducir enormemente el coste computacional, en términos de tiempo de cálculo, en problemas con un elevado número de grados de libertad.

## 4. CÓDIGO DRAC

En este trabajo, todos los cálculos que requieren el MEF han sido realizados con el código DRAC [3], desarrollado por el grupo de investigación MECMAT y usado en un gran número de aplicaciones, inicialmente en problemas mecánica rocas con elementos junta de espesor nulo hasta problemas de Mecánica de Fractura más recientemente. La estructura interna del programa principal consiste en cuatro bucles anidados:

- *Stage loop*. Cada stage corresponde a una geometría diferente del problema a analizar (excavación/construcción).
- *Step loop*. Diferentes configuraciones de carga pueden ser aplicados a una misma geometría.
- *Increment loop*. El sistema de carga puede ser impuesto a partir de una serie de incrementos parciales.
- *Iteration loop*. En análisis no lineales, este bucle realiza las iteraciones necesarias hasta que se llega a converger.

Otros aspectos de utilidad en este trabajo han sido por un lado la posibilidad de usar solvers tanto directos como iterativos y por otro lado la interacción del código DRAC con las herramientas de pre-proceso (tratamiento de geometrías CAD, mallador, definición de planos de junta) y de post-proceso (visualización de resultados) con el programa GiD.

## 5. MÉTODO $C-\Phi$ REDUCTION

### 5.1. Generalidades

La primera referencia que menciona la idea de reducir los parámetros resistentes de un material para evaluar el Factor de Seguridad es atribuida a Zienkiewicz et al., 1975 [4], para un problema de estabilidad de taludes en suelo. Posteriormente, diversos autores han utilizado este método para otros problemas en el campo de Mecánica de Suelos. El Factor de Seguridad se puede definir como el factor reductor de los parámetros resistentes para llegar a la rotura.

En el análisis numérico por el MEF de problemas de ingeniería geotécnica, existen diversas maneras para definir la rotura. La más utilizada (también en este estudio) es la no convergencia del cálculo iterativo.

### 5.2. Formulación e implementación

El método  $c-\Phi$  reduction ha sido formulado como una modificación del modelo constitutivo presentado en el apartado 2, considerando en este caso la evolución de los parámetros  $c$  y  $\Phi$ , los cuales son reducidos progresivamente (softening) en relación a una variable de evolución  $\alpha$ .

Análogamente al caso sin reducción de los parámetros resistentes, en este caso también es posible una integración explícita de la ley constitutiva.

El modelo constitutivo que incorpora la reducción de  $c-\Phi$  ha sido implementado en el código DRAC en el módulo de leyes constitutivas para elementos junta. Además se ha aprovechado la estructura del código en relación al tiempo para implementar la reducción de los parámetros resistentes.

## 6. APLICACIÓN AL ESTRIBO IZQUIERDO DE LA PRESA DE CANELLAS

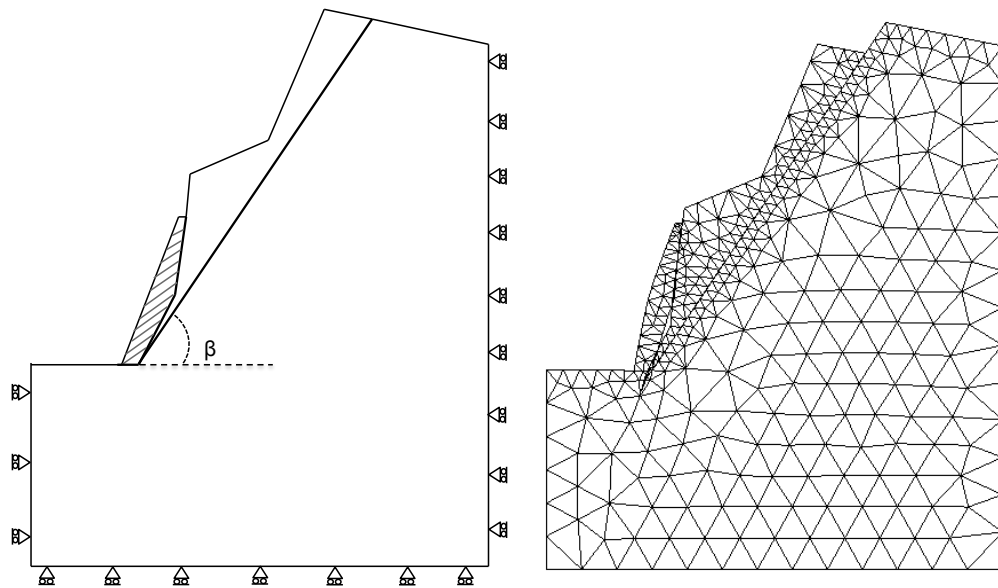
La presa de Canellas es una presa de doble bóveda de 151 m de altura ubicada en el Pirineo de Lleida y fue terminada en el año 1958. Desde entonces se han realizado diferentes análisis para obtener evaluaciones ingenieriles de la seguridad. El más importante, en el que se tuvieron en cuenta mecanismos de rotura que incluían la presa y los dos estribos, tuvo lugar durante la década de los 90 [5].

La presa está cimentada en roca caliza fracturada por dos sistemas de juntas. El sistema principal está formado por juntas verticales paralelas al valle. La otra familia la componen juntas orientadas N-S buzando  $55^\circ$  hacia el oeste (prácticamente hacia aguas abajo). Además, los planos de estratificación buzan  $45^\circ$  hacia aguas arriba.

Debido a la distribución espacial de las tres familias de discontinuidades en los últimos años algunos bloques de roca se han desprendido del macizo rocoso en el estribo izquierdo hacia el valle, lo cual motivó el diseño de un muro de contención. En consecuencia se inició un estudio recientemente, esta vez centrado en el incremento de seguridad que debido a la construcción del muro.

El primer paso en la aplicación del método  $c-\Phi$  reduction para la evaluación de la seguridad del estribo izquierdo de la Presa de Canellas, ha sido considerar una sección 2D tal y como se aprecia en la Fig. 1. Dicha sección está orientada a lo largo de la dirección de máximo buzamiento de los planos de la familia N-S.

El objetivo de este análisis preliminar es doble: (1) verificar el comportamiento del método en un caso real y (2) estimar el incremento de seguridad aportado por el nuevo muro.



**Figura 1.** Definición geométrica y malla de EF deformada en rotura.

Para este ejemplo, se consideraron los siguientes parámetros resistentes:  $c=475$  kPa y  $\tan\phi_{\text{res}}=0.7$  para la junta roca-roca, y  $c=10$  kPa y  $\tan\phi_{\text{res}}=1.0$  para las juntas de contacto roca-hormigón en la base y trasdós del muro. Durante el proceso de reducción de los parámetros resistentes, únicamente se han reducido los parámetros de la junta roca-roca, mientras que los de la junta de contacto hormigón-roca se han mantenido constantes. La rotura ocurrió cuando el ángulo de fricción llegó a un valor de  $25.85^\circ$ . En consecuencia el Factor de Seguridad que se obtiene es de 1.44.

## 7. NUEVOS DESARROLLOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la aplicación del método *c- $\phi$  reduction* para la sección 2D analizada demuestran que se trata de un método que da resultados razonables en problemas de estabilidad en macizos rocosos fracturados.

Recientemente se está trabajando en la aplicación del método a geometrías tridimensionales y a la mejora en cuanto a eficiencia y robustez de la implementación del método *c- $\phi$  reduction*.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por los proyectos BIA2009-10491 del MICINN, 2009SGR-180 del AGAUR y por la empresa ENDESA. El primer autor agradece su actual beca doctoral FPU del MICINN.

## REFERENCIAS

- [1] A. Gens, I. Carol, and E.E. Alonso. An interface element formulation for the analysis of soil-reinforcement interaction. *Computers and Geotechnics*, 7:133-151, 1989.
- [2] A. Gens, I. Carol, and E.E. Alonso. Rock joints: Finite element method, implementation and applications. In A.P.S. Selvadurai and M.J. Boulon, editors, *Mech. of Geomaterial Interfaces*, p. 395-420. Elsevier, 1995.
- [3] P.C. Prat, A. Gens, I. Carol, A. Ledesma, and J.A. Gili. Drac: A computer software for the analysis of rock mechanics problems. In *App. of Comp. Methos in Rock Mechanics*, pages 1361-1369, Xian, China, 1993.
- [4] O.C. Zienkiewicz, C. Humpheson, and R.W. Lewis. Associated and non-associated visco plasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 25:671-689, 1975.
- [5] E.E. Alonso, I. Carol, C. Delahaye, A. Gens, and P. Prat. Evaluation of safety factors in discontinuous rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech.*, 33:513-537, 1996.

## LECHAGO DAM. A CASE STUDY

Eduardo. E. Alonso<sup>1</sup>, Sebastià Olivella<sup>1</sup> and Núria M. Pinyol<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. e-mail: [eduardo.alonso@upc.edu](mailto:eduardo.alonso@upc.edu), [sebastia@olivella.upc.edu](mailto:sebastia@olivella.upc.edu), [nuria.pinyol@upc.edu](mailto:nuria.pinyol@upc.edu)

<sup>2</sup>Centre Internacional de Mètodes Numèrics. e-mail: [nuria.pinyol@upc.edu](mailto:nuria.pinyol@upc.edu)

**Paraules clau:** dam, case history, finite element modelling, hydro-mechanical coupling

**Resum:** *Lechago dam (Teruel, Spain) is a 40 m high zoned earth and rockfill dam sitting on soft continental deltaic deposits. A relatively narrow central clay core is stabilized by wide rockfill shoulders. The dam was well instrumented and continuous records of stress, pore water pressures and displacements are available for the construction period. A coupled FE model has been developed to analyse the dam behaviour during construction. Model predictions, essentially based on laboratory tests, are compared with measurements during construction. The paper provides an integrated description of the dam design, construction and early behaviour.*

### 1. GENERAL DESCRIPTION OF THE LECHAGO DAM

Lechago dam is an earth and rockfill dam located in the northeast of Spain, in Teruel province. It was built in the period between April 2005 and January 2009. The dam was built on the valley of the Pancrudo river. Foundation soils are composed by a soft alluvial soil, in the lower central part of the valley, and ancient shales and quartzitic rocks, which form the steep lateral slopes of the valley. A cross-section of the valley is shown in Figure 1.

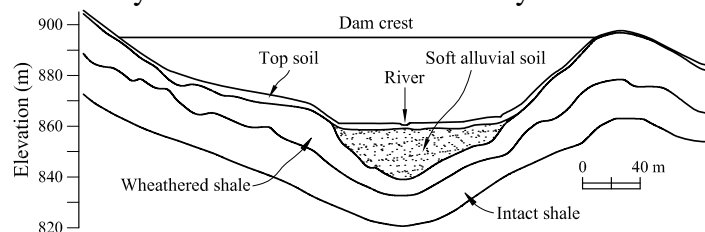


Figure 1: Central cross-section of Lechago dam.



Figure 2: Aerial photograph of Lechago dam at the end of its construction.

The non-symmetrical valley, the presence of soft continental deltaic sediments and the sharp transition between highly deformable and rigid strata were the main challenges to face during the design stage. As a result, Lechago dam has two definite cross-sections (Fig. 2). On the valley bottom the section is modified and two wide rockfill berms were added to improve the stability. With the aim of improving the undrained strength of the soft alluvial deposits, a preloading underneath the downstream shoulder and a dewatering were carried out. The dam was instrumented during construction.



### 3. MECHANICAL BEHAVIOUR OF COMPACTED SOILS AND FOUNDATION

The behaviour of the compacted materials of Lechago dam and foundation soils are described below. Some available laboratory tests have been simulated in the Code\_Bright finite element program (Olivella, 1996) using the models mentioned above in order to calibrate the constitutive parameters of the materials and to use them in the model simulation of the dam construction.

#### 3.1 Rockfill material

The rockfill material of Lechago shells was quarried around the dam site. Lechago rockfill has been extensively tested in the past decade in the Soil Mechanics Laboratory of UPC. The oedometric test by Oldecop and Alonso (2001) and the triaxial tests reported by (Chávez, 2004) (Figs. 3 and 4) have been chosen for the interpretation of the rockfill behaviour by means of the model published in Oldecop and Alonso (2001).

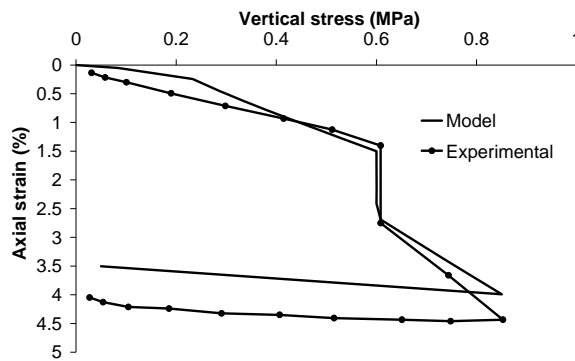


Figure 3: Oedometric test on Lechago Rockfill (experimental results by Oldecop and Alonso, 2001)

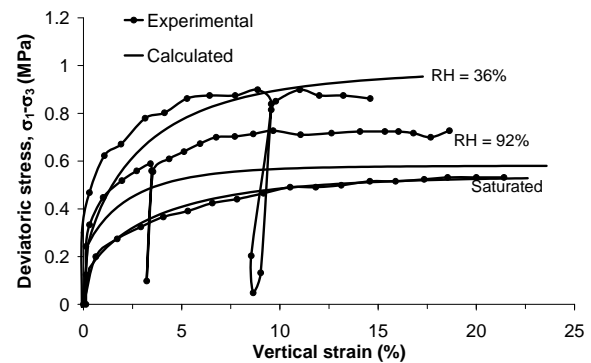


Figure 4: Triaxial tests at different relative humidity values and at 0.1 MPa confining stress (experimental results by Chávez, 2004)

#### 3.1 Clay core

The clay core of the dam ( $w_L = 38\%$ ,  $PI = 18.5\%$ ) was also tested on samples compacted at Standard Proctor optimum. Oedometer tests results are plotted in Figures 5 and 6. The behaviour of the clay has been model using BBM (Alonso *et al.*, 1990) in order to calibrate the constitutive parameters.

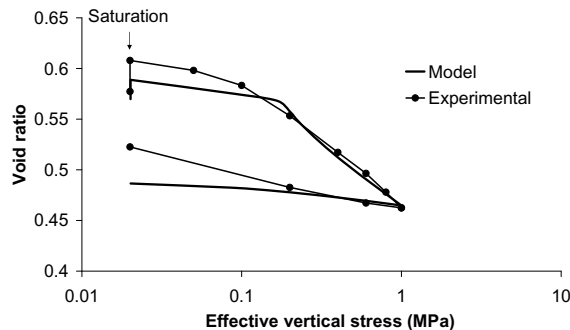


Figure 5: Saturated oedometric test on a compacted clay sample initially saturated at constant vertical stress (0.02 MPa).

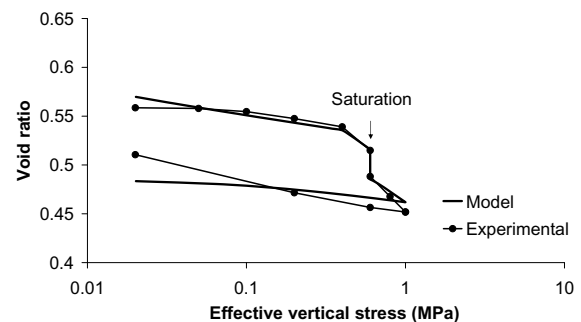


Figure 6: Oedometric test on a compacted clay sample a 1 MPa of suction. Saturation at constant vertical stress (0.6 MPa).

### 3.3 Foundation soils

The alluvium of the Pancrudo River was identified as a sequence of three horizontally layered strata: an upper layer of pervious sandy silt and gravels, 5 m thick, an intermediate soft clayey and silty stratum (deltaic deposits), 12 m thick, and a lower level of clayey sands and gravels 4 m thick directly over the shale substratum. In all levels thin sequences of impervious/pervious soils explain the fast consolidation of the entire alluvial stratum.

## 4. MODELLING DAM CONSTRUCTION

Once the models have been calibrated by back-analysis of laboratory tests, the hydro-mechanical response of the dam has been simulated. A finite element model of the dam using quadrilateral elements was built in a plane strain approximation of the central instrumented cross-section (Fig. 7).

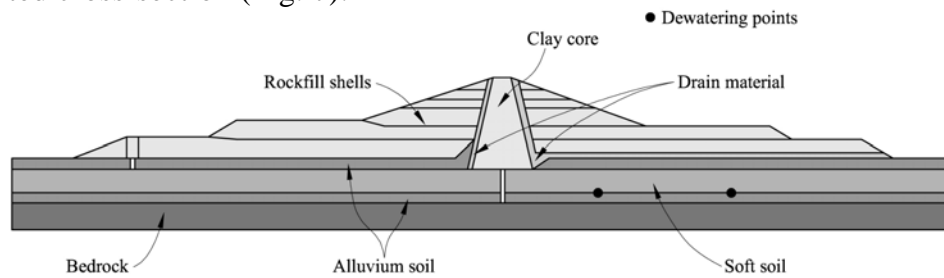


Figure 7: Model of central cross-section of Lechago dam for modelling.

The construction of the dam was simulated by successive soil layers incorporated at the appropriate time. Initial conditions introduced in the model are indicated in Table 3 and 4. The following stages are considered in the calculation:

*Stage 1:* Construction until elevation 874 in the period July to December of 2006.

*Stage 2:* Stop construction from January 1<sup>st</sup> to June 30<sup>th</sup> of 2007.

*Stage 3:* Construction until elevation 886 during July and August of 2007.

*Stage 4:* Preloading-ramp during September of 2007 and phreatic level lowering.

*Stage 5:* Preloading during October and November of 2007 and phreatic level lowering.

*Stage 6:* Unloading during December of 2007 and phreatic level lowering.

*Stage 7:* Construction until final elevation (895 m) during January and February of 2007.

### 4.1 Results of dam construction simulation

Calculated vertical displacements are compared with measurements in Figure 7. The magnitude of the measured values is in general well captured. Settlement records also react to the step-wise history of loading but in a more progressive manner than the total stresses due to consolidation effects in the foundation and the compacted structure.

Pore water pressures are calculated and compared with measurements in Figure 8. Consider first the piezometers located in the saturated foundation soil (Figs. 8a).

5

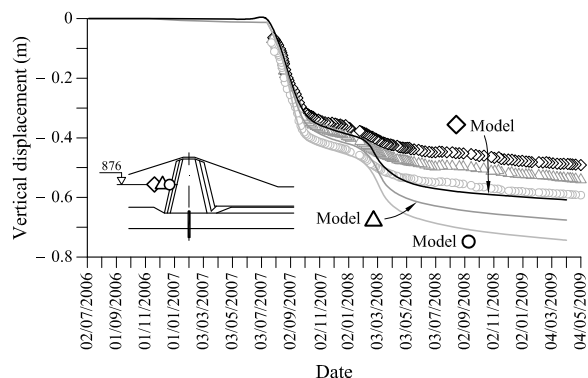


Figure 7: Comparison of measured and calculated differences of vertical displacements between the measurement gauge and the reference location.

The pumping tests, especially the third one (final months of 2007) is reflected in all measurements. The model also reacts in a similar way.

The response of the clay core is plotted in Figure 8b. Piezometers located in upper levels cannot record the prevailing suction. The model calculates suction values not shown in the figure because of the pressure scale of the graph reflects the water level elevation upstream (6 m) which took place in March 2009.

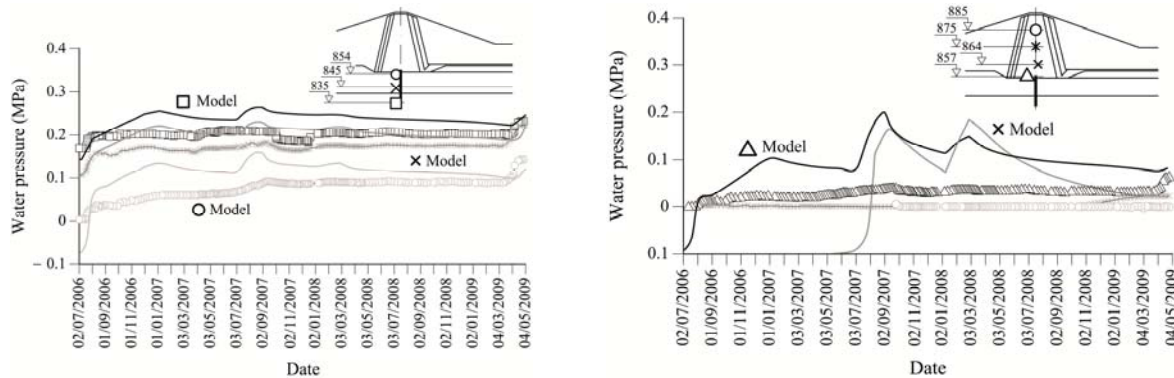


Figure 8: Comparison of measured and calculated pore water pressure. (a) Foundation soils, under the core; (b) clay core.

## 4. CONCLUSIONS

The construction of Lechago dam has been modelled. Several kinds of materials are involved in the dam: a soft saturated clay foundation limited by pervious granular layers, compacted quartzitic shale in the shells and a medium plasticity clay core.

Lechago dam presents an interesting feature for its analysis because an extensive previous experimental investigation of the rockfill shells is available. According to the results obtained in the laboratory test simulations, the constitutive models used, the Rockfill model by (Oldecop and Alonso, 2001) and the BBM by (Alonso *et al.* 1990) are able to reproduce satisfactorily the behaviour exhibited by the materials at different values of Relative Humidity and during saturation of the samples.

All the stages of the dam construction have been reproduced. A comparison of the measured and calculated vertical settlements and pore water pressure at different elevations of the dam has been given in the paper. Settlements include the deformation response of the foundation and the compacted materials. The recorded settlements are satisfactorily simulated. Lechago dam experienced large total vertical displacements up to 1 m in the central cross-section.

The predicted response of the dam under an assumed programme of impounding is given in Alonso *et al.* (2011). In the future, once impounding occurs, it will be possible to compare predictions with actual dam performance.

## REFERENCES

- Alonso, E.E., Olivella, S., Soriano, A. and Pinyol, N.M. (2011) Modelling the response of Lechago earth and rockfill dam. *Géotechnique*. Accepted.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J. and Alonso, E.E. (1996) Numerical formulation for simulator (CODE\_BRIGHT) for coupled analysis of saline media. *Engineering Computations* 13 (7), 87-112.
- Oldecop, L. and Alonso, E.E. (2001) A model for rockfill compressibility. *Géotechnique* 51 (2): 127-139 (2001).
- Chávez, C. (2004) Estudio del comportamiento triaxial de materiales granulares de tamaño medio con énfasis en la influencia de la succión. *Doctoral Thesis*. UPC, Barcelona (2004).
- Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soil. *Géotechnique* 40 (3), 405-430.

# A BRIDGE FOUNDATION ANALYSIS

Damians I.P.<sup>\*</sup>, Olivella S.<sup>\*</sup>, Josa A.<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, <sup>\*\*</sup> Institute of Sustainability  
Technical University of Catalonia (UPC), Campus Norte, 08034 Barcelona, Spain  
e-mail: ivan.puig@upc.edu

**Key words:** Bridge foundation, Anthropic soil, Plastic analysis.

**Abstract.** *This document presents the analysis with CODE\_BRIGHT finite element program of a geotechnical case. The problem analyzed is related to a mechanical analysis of soil-structure interaction considering different alternatives for the foundation of a bridge in El Prat de Llobregat (Highway A-2)<sup>i</sup>. The comparison of displacements shows that an alternative solution using shallow foundations can be considered in addition to the originally proposed, composed by sheet walls.*

## 1 INTRODUCTION

In order to validate an alternative design for the foundation of a bridge at the Highway A-2 (see general map in Figure 1.a) different solutions have been analyzed geotechnically developing appropriate numerical models with the finite element program CODE\_BRIGHT<sup>ii</sup>.

With the geotechnical analysis performed under different assumptions of calculation it is shown that the shallow foundation (concrete box and strip footing; see Figure 2.b), probably less complex and costly than the deeper one (sheet wall; see Figure 2.a), also satisfies the requirements of stability and strength needed while keeping displacements small.

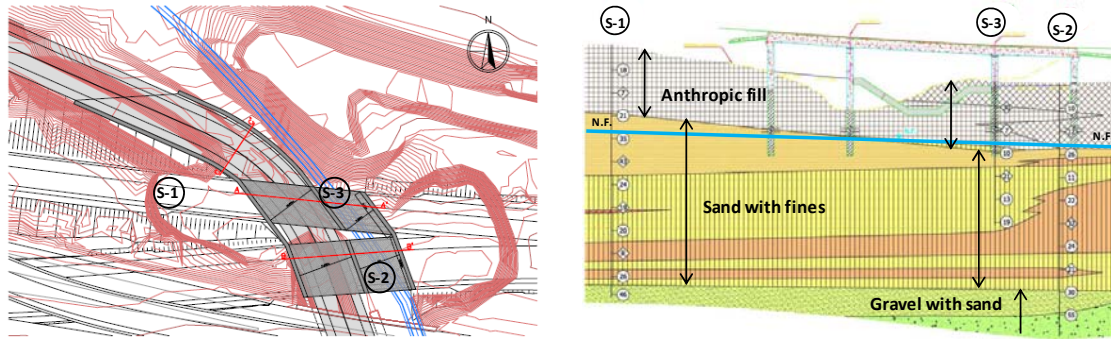
Furthermore, is not unusual to find potholes near the bridge access, generated by the stiffness of the support structure against the settlements of the embankment on the access areas. The contact between the soil and the structure may develop shear stresses which limit the consolidation of the soil near the structure. This may produce an abrupt change on the pavement surface. The found behavior for shallow solution shows that the displacements can be in these zones smoother than in the case of deep foundation, thus reducing the bump effect of the potholes.

The cases have been calculated including plastic behavior (with Cam-Clay model in some materials) and elastic behavior for others. In addition, the presence of groundwater has also been considered in the analysis.

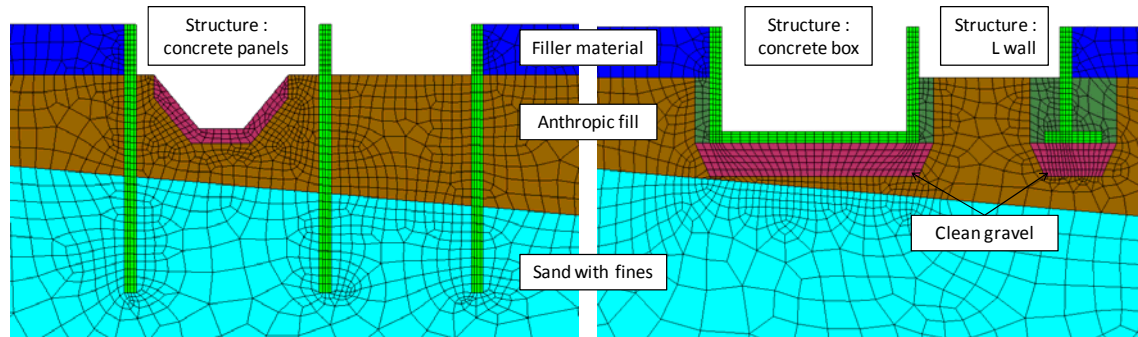
### 2.1 Model features: materials, properties and tension solicitations

Different laboratory tests carried out on samples taken from soil and characteristic properties have been selected for each material<sup>iii</sup>. The soil types that appear in the test area, according to information drawn from surveys (see geological section on Figure 1.b) can be classified into three types: anthropic fills (a way to describe recent filling materials of different origins), sand with a variable content of fines, and gravel with sand. Anthropogenic filling has a high dispersion of parameters; this dispersion on the values forces us to assume conservative values. The replacement of the bad quality filling material below the foundation by clean gravel (see Figure 2.b and Table 1 for the parameters) that contributes to a better behavior generating less and uniform settlement has also been considered. Furthermore,

another material for the leveling of the surface has been considered, adequately compacted and suitable for the layer required under the pavement. The properties and parameters that have been assumed for the materials that compose the different types of model materials are shown in Table 1.



**Figure 1:** a) General location, b) Geologic section of the soil.



**Figure 2:** Geometry and finite element mesh of cases to analyze: a) Deep foundations with sheet wall, b) Shallow foundations with box and strip footing.

**Table 1:** Constitutive parameters of the materials

Parameters	Materials					
	Anthropic fill	Sand with fines	Gravel with sand	Concrete	Clean gravel	Filler material
$E$	(5.5 MPa)	-	150 MPa	25000 MPa	15 MPa	50 MPa
$\phi'$	26°	28°	-	-	-	-
$M$	1.03	1.13	-	-	-	-
$C_c$	0.15	0.12	-	-	-	-
$C_s$		0.0135 (oc)	-	-	-	-

In Table 1,  $E$  is the Young Modulus: it has been obtained from a geotechnical report or suitable for the objective and conservative evaluation;  $\phi'$  is the effective friction angle: the adopted values are the most conservative values from the different tests and has been considered that cohesion is negligible in all cases;  $C_c$  is the compression index;  $C_s$  is the swelling index: shows that the material for the sand with variable presence of fines has a bit of overconsolidation,  $M$  is the slope of the critical state line in the plane of invariants (this is, the relationship between isotropic and shear stresses). Poisson ratio value is considered 0.3 for the soil materials and 0.15 for the concrete.

Anthropic fill and sand with variable content of fines soils have been considered with plastic behavior. This means that shear strength ( $M$ ) and plastic compressibility are required ( $C_c$  or  $\lambda$ ).

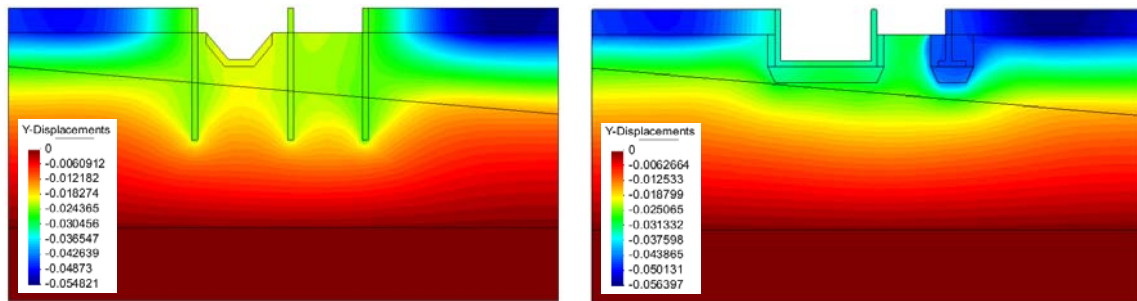
Self-weight of the structure, a distributed load due to normal traffic and point loads due to the presence of a heavy vehicle have been considered in the analyses. The values to be applied on the vertical structures (Figure 2) derived from these three types of loads are shown also in Table 2. The final stage of calculation and the results obtained below correspond to the combination of all these three loading types, i.e. maximum loading conditions.

**Table 2:** Value of the applied loads

Load Type	Central Support	Central Support	Right Support	Units
Self-weight of bridge: 15 kPa	98	173	75	kN/m
Traffic loads (distributed): 8 kPa	52	92	40	kN/m
Heavy vehicle (point): 600 kN	86	86	86	kN/m

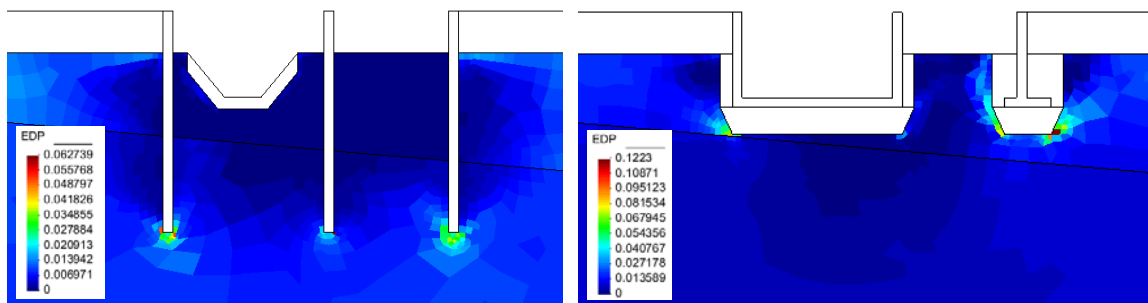
## 2.2 Results

Figure 3 shows a comparison of displacements obtained from the analyses, considering the self-weight, permanent loads over all surface and the point loads over the three supports. Displacements are somewhat larger for the case of shallow foundation that is in more solidarity with the ground settlements.



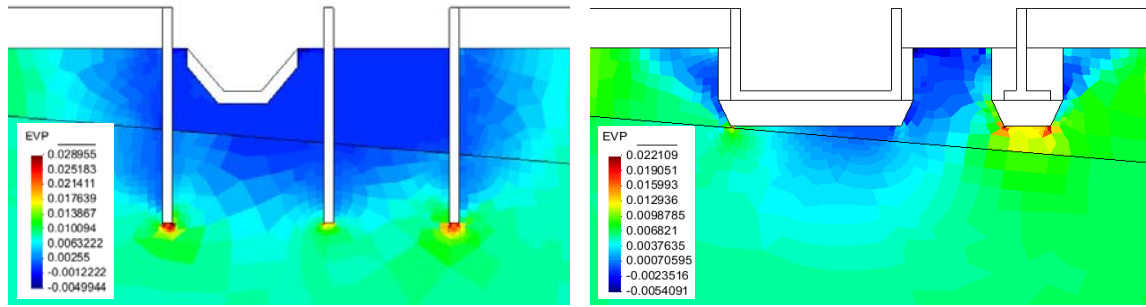
**Figure 3:** Vertical displacement for the plastic analysis.

In order to illustrate the critical zones in this type of problems, Figure 4 and Figure 5 show the distribution of volumetric and shear plastic deformations generated by the overloading. In the case of sheet walls plastic deformations concentrate around the end of the sheet indicating the zone of support (local failure with a plasticized bulb). In the case of shallow foundation, the gravel fill transmits a stress that produces plasticization of the soil. This plasticization is local and does not show a global failure mechanism.



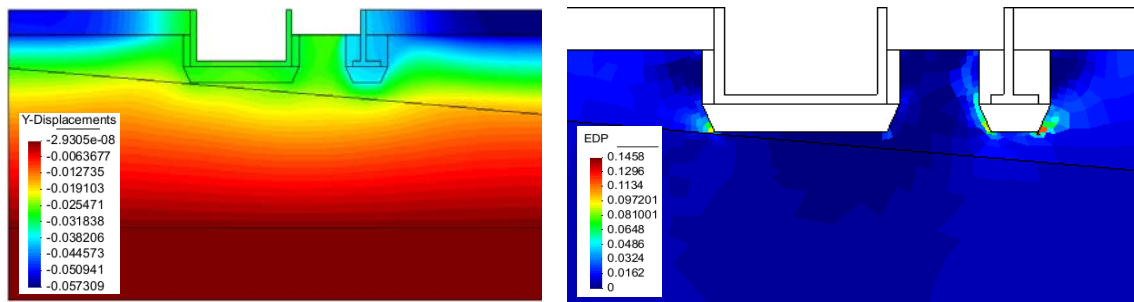
**Figure 4:** Shear plastic deformation due to the overloading.





**Figure 5:** Volumetric Plastic deformation due to the overloading.

The results of the vertical displacements calculated with a model that considers the presence of water in the ground according to the geological section shown in Figure 1, are presented in Figure 6. Displacements are similar than in the case of dry soil, but shear deformations show a somewhat different distribution.



**Figure 6:** Vertical displacement and plastic strains for the case in which groundwater is considered.

## 2 CONCLUSIONS

CODE\_BRIGHT has proved to be an appropriate tool for calculating the mechanical and comparative analysis of the proposed cases. From the results it seems that the solution by shallow foundations is as valid as the one composed by sheet walls to support the structure and to keep movements in normal range. The final results of the settlements show that the solution by shallow foundation produces movements of the ground surface more uniform than in the case of the sheet walls. This is expected to reduce the effect of potholes that eventually may appear near the entrances of bridges.

## 3 REFERENCES

- [i] Damians I.P., Olivella S., 2010. Informe Técnico: *Cimentación de un paso elevado en la autovía del nordeste (Tramo: El Prat del Llobregat). Análisis de la Interacción Terreno-Estructura*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona.
- [ii] CODE\_BRIGHT, Manual, User's Guide, accessible at: [https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\\_bright/v3/Cb\\_v3manual\\_v3.zip/view](https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/v3/Cb_v3manual_v3.zip/view)
- [iii] GEOPAYMA, 2009. Proyecto Modificado: *Mejora del Enlace Autovía A-2, P.K. 0+611.0, tramo: El Prat del Llobregat*. Geotecnia. GEOPAYMA S.A.U. Barcelona.



# Computational Limit Analysis for anchors and retaining walls

Jose J Muñoz<sup>1</sup>, Andrei V Lyamin<sup>2</sup>, Antonio Huerta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament MA3 e-mail: [j.munoz@upc.edu](mailto:j.munoz@upc.edu), [antonio.huerta@upc.edu](mailto:antonio.huerta@upc.edu)

<sup>2</sup>Centre for Geotechnical and Materials Modelling

**Keywords:** Limit analysis, stability, retaining walls, bounds

**Abstract:** *The computation of the bearing capacity of engineering structures commonly relays on results obtained for simple academic examples. Recent developments in computational limit analysis have allowed engineers to compute bounds of the bearing capacity of arbitrary geometries. We here extend these formulations to problems with practical interest such as retaining walls, anchors, or excavations with particular interface conditions. These situations require the special treatment of the contact conditions between different materials, or the modelling of joints and anchors. We demonstrate the potential of the resulting tool with some practical examples.*

## 1. INTRODUCTION

According to the lower bound theorem of limit analysis, the bearing capacity of a structure is equal to the maximum load factor  $\lambda^*$  under equilibrium conditions and with admissible stresses  $\sigma$ . Formally, it can be computed as the optimal solution of the following maximisation problem [1]:

$$\lambda^* = \max \lambda$$

$$s.t. \begin{cases} a(v, \sigma) + b(v, \sigma) = \ell(v), & \forall v \\ \sigma \in \mathcal{B} \end{cases} \quad (1)$$

The linear form  $\ell(v)$ , and the bilinear forms  $b(v, \sigma)$  and  $a(v, \sigma)$  represent respectively the dissipation energy at the region where the velocity  $v$  is discontinuous (denoted  $\Gamma$ ) and where it is continuous (denoted by  $\Omega \setminus \Gamma$ ). These forms are explicitly given by,

$$a(v, \sigma) := \int_{\Omega \setminus \Gamma} \varepsilon(v) : \sigma d\Omega$$

$$b(v, \sigma) := \int_{\Gamma} [[v]] \cdot \sigma n d\Gamma = \int_{\Gamma} [[v]] \otimes n : \sigma d\Gamma$$

$$\ell(v) := \int_{\Omega} v \cdot f d\Omega + \int_{\partial\Omega} v \cdot g d\Gamma,$$

with  $\varepsilon(v)$  the strain rate tensor. The vectors  $f$  and  $g$  represent the body and boundary loads on the domain  $\Omega$ . The symbol  $[[v]]$  denotes the jump of the velocity vector  $v$ . The optimisation problem in (1) has associated a dual optimisation problem, which is given by,

$$\lambda^* = \min_v D(v) \quad s.t. \begin{cases} \ell(v) = 1 \\ -\varepsilon(v) \in B^* \\ -[[v]] \otimes n \in B^* \end{cases} \quad (2)$$

where  $B^*$  is the dual set to  $B$  which is defined by  $B^* = \{s \mid s: \sigma, \forall \sigma \in B\}$ .

## 2. LOWER AND UPPER BOUND FORMULATIONS

The particular saddle point structure of limit analysis allows us to use specific interpolation spaces  $(\sigma^{UB}, v^{UB})$  and  $(\sigma^{LB}, v^{LB})$  of the stresses and the velocities that yield upper and lower bounds of the optimal factor  $\lambda^*$ , denoted respectively by  $\lambda^{UB}$  and  $\lambda^{LB}$ . The details of the choices for the lower and upper bound problem may be found in [2]. We just mention that in the lower bound problem, the stresses  $\sigma^{LB}$  are piecewise linear, while the velocities  $v^{LB}$  are linear at the edges and piecewise constant in the element interiors. In the upper bound problem, the stresses  $\sigma^{UB}$  are instead linear at the edges and piecewise constant at the element interiors, while the velocities  $v^{UB}$  are piecewise linear. After applying such interpolations, the primal and dual problem in (1) and (2) turn into the following form,

$$\lambda^* = \max \lambda \quad s.t. \begin{cases} A\sigma^{LB} + \lambda f = 0 \\ \sigma_i^{LB,e} \in B, \quad e = 1, \dots, N_e, i = 1, \dots, n_{sd} + 1 \end{cases} \quad \lambda^* = \min_v D(v^{UB}) \quad s.t. \begin{cases} \ell(v^{UB}) = 1 \\ -\varepsilon(v_i^{UB,e}) \in B^*, \quad e = 1, \dots, N_e, i = 1, 2 \\ -[[v^{UB}]]_i^\xi \otimes n^\xi \in B^*, \quad \xi = 1, \dots, N_\xi, i = 1, 2 \end{cases}$$

These problems can be solved efficiently using available optimisation programs. Moreover, usual plasticity criteria such as von Mises or Mohr-Coulomb in two dimensions allow us to rewrite the membership conditions as second order cones (SOC), which can be handled by the mentioned optimisation software. The optimum values of the lower and upper bound problem can be used to compute a set of elemental and edge contributions to the total gap, which are defined by:

$$\Delta\lambda^e = \int_{\Omega^e} \sigma^{UB,e} : \varepsilon(v^{UB}) d\Omega + \int_{\Omega^e} \nabla \cdot \sigma^{LB} \cdot v^{UB} d\Omega - \int_{\partial\Omega^e} \sigma^{LB} n \cdot v^{UB} d\Gamma$$

$$\Delta\lambda^\xi = \int_{\Gamma^\xi} s^{UB,\xi} \cdot [[v^{UB}]] d\Gamma - \int_{\Gamma^\xi} \sigma^{LB} n \cdot [[v^{UB}]] d\Gamma$$

These bound gaps satisfy the properties,  $\lambda^{UB} - \lambda^{LB} = \Delta\lambda^e + \Delta\lambda^\xi$ ,  $\Delta\lambda^e \geq 0$ ,  $\Delta\lambda^\xi \geq 0$ , which make them good candidates to estimate the errors of the lower and upper bound solution. We have used them to design an adaptive remeshing strategy.

## 3. EXTENSION TO INTERFACES, DUPLICATED EDGES AND JOINTS

We will develop next specific conditions for common interface conditions encountered in geomechanics. The conditions are:

1. **Interface material:** when two different materials are encountered, the practitioner must specify the admissibility criterion for the interface between these two materials. Computationally, these conditions are set by adding the following constraints:

- a. *Lower Bound:* New nodal stresses are defined at the interface, with the corresponding interface admissibility conditions, together with the equilibrium conditions between interface and edge stresses:

$$\begin{aligned} \sigma_i^I &\in \mathcal{B}_I, \quad i = 1, 2 \\ (\sigma_i^A - \sigma_i^B)n &= 0, \quad i = 1, 2 \\ (\sigma_i^A - \sigma_i^I)n &= 0, \quad i = 1, 2 \end{aligned} \quad (3)$$

- b. *Upper Bound:* It is sufficient to assign to the edge stresses the membership condition given in (3).

2. **Duplicated edges:** in two-dimensional applications, it may convenient to overlap materials or structural elements such as ties or anchors. In these situations, it is required to have edges that joint one element on one side (element A) and two elements, B and B', on the other side. The equilibrium condition (lower bound) and exact kinematic conditions are then given by:

- a. *Lower Bound:* The exact equilibrium condition is now imposed witht he following equation:

$$(\sigma_i^A - \sigma_i^B - \sigma_i^{B'})n = 0, i = 1, 2$$

- b. *Upper Bound:* The dissipation power and the admissibility condition for the edge stresses  $s^{UB}$  now read,

$$\begin{aligned} b_\xi(s, v) &= \int_{\Gamma^\xi} s^{A-B} \cdot (v^B - v^A) d\Gamma + \int_{\Gamma^\xi} s^{A-B'} \cdot (v^{B'} - v^A) d\Gamma \\ &\left\{ \begin{array}{l} s_i^{A-B} \in \mathcal{B} \\ s_i^{A-B'} \in \mathcal{B} \end{array} \right., i = 1, 2, \end{aligned}$$

3. **Modelling of joints:** The presence of punctual loads or the presence of articulated jonts require the modelling of joints. They can be represented in the optimisation problem by adding the following conditions:

- a. *Lower Bound:* The equilibrium conditions are not nodal but averaged throughout the edge:

$$\int (\sigma^A - \sigma^B)n d\Gamma = 0$$

- b. *Upper Bound:* The linear relationship throughout the edge is equivalent to the follow condition,

$$[[v]]_1 + [[v]]_2 = 0$$

## 4. RESULTS

The extensions described so far have been employed to numerically test pull out capacity of multi-belled anchors. Figure 1(a) shows the contour plot of the dissipation energy for the upper bound solution. The linearity of the limit tension with respect to the number of bells has been verified. Five different anchor/soil conditions have been employed: rough (same properties as the soil), smooth (no resistance to shear), no tension condition, rough condition with no tension, and smooth condition with no-tension. Although the mechanisms do not

significantly depend on these conditions, the pull out capacity does, and has been shown to be much larger for rough conditions.

The material properties have been shown to strongly influence the failure mechanism. While for clay materials (zero internal friction angle, but non-zero cohesion) the failure mechanism is localised around the anchor (see Figure 1(a)), in other sand materials the slide-lines propagate up to the soil surface. Further results have been reported in [3].

The model has been also applied to determine the maximum height of simply supported and anchored retaining walls. The limiting height has been compared with experimental results and other numerical models that use incremental plasticity. The agreement between our results and the results has been very satisfactory [3]

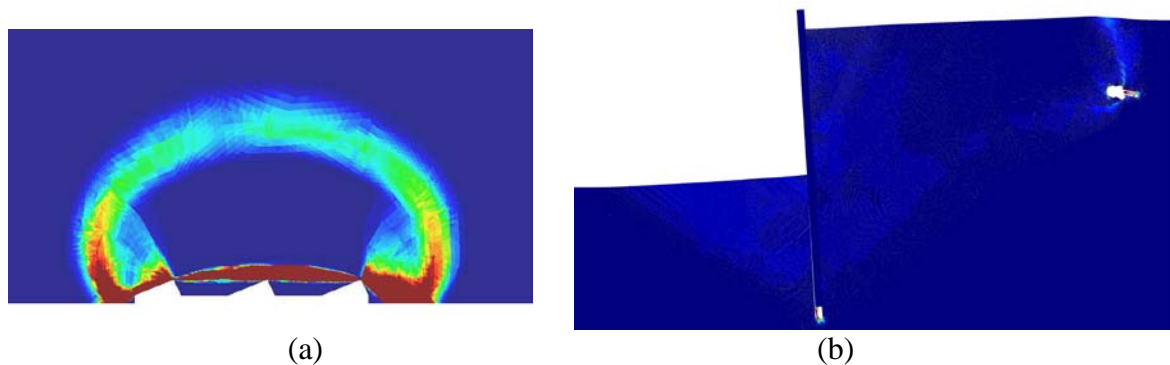


Figure 1. Detail of anchor with three beels pulled from the left in clay material

## 5. CONCLUSIONS

This work has extended the applicability of computational limit analysis to practical problems. The agreement between our numerical results and the experimental values reported in the literature demonstrates the validity of the approach.

Further extensions to other geometries of anchors, soil stability or cavern securing in two and three dimensions can be analysed using the same ideas described here. The inclusion of pre-stressed anchors can be equally handled by modifying the equilibrium conditions or the dissipation energy. These further developments are currently under study.

The computation of bounds of the load factor for non-associative plasticity is also currently being investigated. Recent advances along this research line will be also presented.

## REFERENCES

- [1] W F Chen. Limit analysis and soil plasticity. Dev. in Geoth. Engin. 7. Elsevier, 1975.
- [2] H Ciria, J Peraire, and J Bonet. Mesh adaptive computation of upper and lower bounds in limit analysis. Int. J.Num. Meth. Engng., 75:899–944, 2008.
- [3] J J Muñoz, A V Lyamin, A Huerta. Stability of anchored sheet wall in cohesive-frictional soils by FE limit analysis. Submitted.

# AVALUACIÓ DE RISCOS AMBIENTALS MITJANÇANT MODELACIÓ GEOQUÍMICA

**Xavier Sanchez-Vila, Daniel Fernández-Garcia**

Department of Geotechnical Engineering and Geosciences    e-mail: xavier.sanchez-vila@upc.edu

**Paraules Clau:** avaluació de risc ambiental, recàrrega artificial, modelació hidrogeoquímica

**Resum:** *L'interés sobre la recàrrega artificial d'aqüífers s'ha incrementat en els últims anys. La recerca del Grup d'Hidrologia Subterrània (GHS) de l'ETSECCPB vol donar una visió integrada i multidisciplinària sobre el risc (enginyeril i sanitari) associat a les pràctiques de recàrrega en basses d'infiltració. Per això és necessari avançar en paral·lel tant en l'estudi de la reducció en l'infiltració amb el temps, com en diferents aspectes relacionats amb les variacions hidrogeoquímiques durant el procés d'infiltració de l'aigua pel sòl i un cop a l'aqüífer. La incertesa lligada al desconeixement del medi natural implica haver de tractar amb el concepte risc des d'un punt de vista probabilístic. Els estudis realitzats o en marxa integren aspectes teòrics i numèrics amb assajos de laboratori i treball de camp en una zona pilot ja parcialment instrumentada.*

## 1. INTRODUCTION

A zones semiàrides es comprova que la pressió sobre els recursos hídrics creix i els conflictes entre els usuaris de l'aigua empitjoren [1]. La societat s'enfronta a canvis que qüestionen la sostenibilitat dels recursos hídrics. La gestió dels recursos en condicions d'escassetat suposa un equilibri entre oferta i demanda. Una gestió correcta sobre la demanda implica el compromís dels agents que hi intervenen. A més, trobem una important pressió sobre l'oferta, per exemple lligada al canvi climàtic, que farà que algunes regions del món pateixin un descens en les precipitacions i un augment en la durada de les èpoques de sequera.

Aquesta conjunció d'oferta minvant amb demanda sostinguda o creixent donarà lloc a una escassetat de recursos en els aqüífers, a més de provocar un impacte indesitjat sobre els cursos fluvials, els aiguamolls i els ecosistemes associats. Així, l'aigua corre el risc de convertir-se en moltes regions en un factor limitant del desenvolupament futur i en objecte de disputes. Al descens de recursos cal afegir el possible deteriorament de la qualitat dels mateixos, lligat a les activitats agrícoles, ramaderes o antròpiques. És evident que la situació ha de ser revertida. Això requereix, entre d'altres, la recuperació dels nivells als aqüífers i la reducció de la contaminació. Una possibilitat és la Recàrrega Artificial Controlada (MAR per les sigles en anglès). La MAR consisteix a introduir aigua en un aqüífer per augmentar la disponibilitat dels recursos hídrics i millorar la seva qualitat, contribuint a una gestió més racional d'aquests recursos. Els mètodes de recàrrega són diversos, però ens centrarem en els de superfície.

Existeix un conjunt de reptes científics associats a la recàrrega artificial d'aqüífers: Quanta aigua es pot recarregar de manera sostenible? Què pot fer-se per reduir la contaminació d'un aqüífer? Quins contaminants són mòbils i poden arribar als punts de captació, i en quina concentració? Quin és el risc associat a aquestes pràctiques? La resposta a aquestes i d'altres preguntes és el motor de la recerca del GHS. Un dels punts singulars és la combinació entre treball teòric, aplicacions numèriques, feina de laboratori i tasques de camp.

## 2. RECÀRREGA, FLUX, TRANSPORT DE SOLUTS I RISC AMBIENTAL

Els estudis en recàrrega artificial són essencialment interdisciplinaris i integrats. L'objectiu final és l'avaluació probabilista del risc en les pràctiques de MAR. El risc està associat amb el temps d'arribada d'un solut a una superfície de control, però també amb la signatura geoquímica d'una aigua en un punt concret. Aquesta signatura depèn de l'aigua inicial, però fonamentalment dels processos modificadors que hi tenen lloc. Científicament l'interès es troba en les interfícies entre geologia, hidrologia i geoquímica: la variabilitat geològica regeix el flux subterrani i el transport de soluts, que és el factor limitant en la majoria de reaccions.

### 2.1. Caracterització del transport de soluts reactius

Tradicionalment es modela el transport de soluts mitjançant l'equació d'advecció-dispersió (ADE). Malgrat això, el transport presenta un comportament que s'anomena anòmal o no-Fickià. A més, els paràmetres que controlen el comportament dels soluts a distàncies curtes presenten efectes d'escala. La dispersió suposa la separació dinàmica de les molècules i en zones amb presència d'aigües amb diferent composició química, provoca la mescla física d'aquestes i les consegüents reaccions (Figura 1).

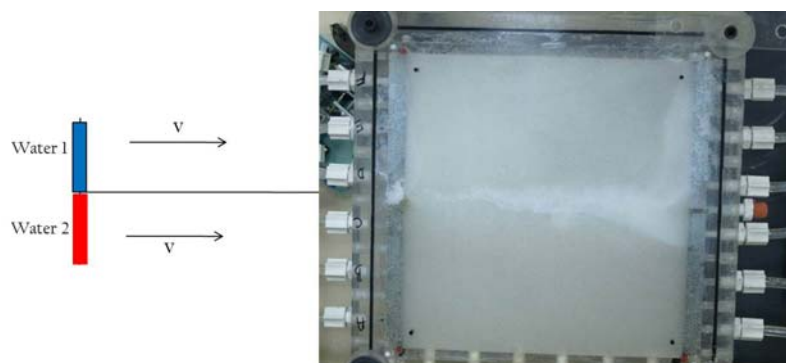


Figura 1. Experiment sobre precipitació de minerals provocat per la mescla de dues aigües deguda a la dispersió transversal

Un dels problemes coneguts en estudiar el transport reactiu és la complexitat matemàtica. Per aquest motiu la majoria de problemes s'aborden numèricament. Si bé és important avançar en el desenvolupament d'eines numèriques que incorporin processos cada vegada més complexos, una de les àrees de treball del GHS els darrers anys ha estat derivar expressions analítiques per a l'avaluació de la velocitat de reacció de precipitació/dissolució produïda per la barreja de dues aigües en equilibri químic amb el medi (Figura 2). La metodologia desenvolupada consisteix en desacoblar el problema de transport del problema reactiu (especiació).

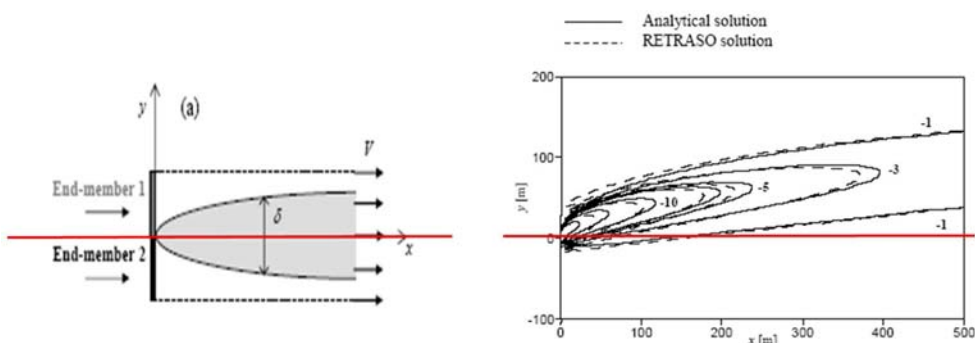


Figura 2. Comparació de solució analítica i numèrica en un problema de precipitació no-lineal

## 2.2. Formulació de les equacions de transport reactiu

En el seu transport a través d'un mitjà porós, les espècies dissoltes reaccionen entre elles i amb la fase sòlida, tot provocant canvis en la composició química del sistema. Existeixen força formulacions (incorporant més o menys processos) per a la caracterització del transport reactiu utilitzant com a base la ADE. Al GHS hem desenvolupat una formulació efectiva de transport basada en el model MRMT (Multi Rate Mass Transfer) que permet reproduir la taxa de reacció en problemes de transport. El model s'esquematitza en la Figura 3 i es basa en substituir la impossibilitat dels reactants de trobar-se a petita escala degut a la presència de zones de mobilitat reduïda (mescla incompleta) tot afegint un terme cinètic de reacció a la equació de govern. Aquest terme involucra uns paràmetres que són funció del temps.

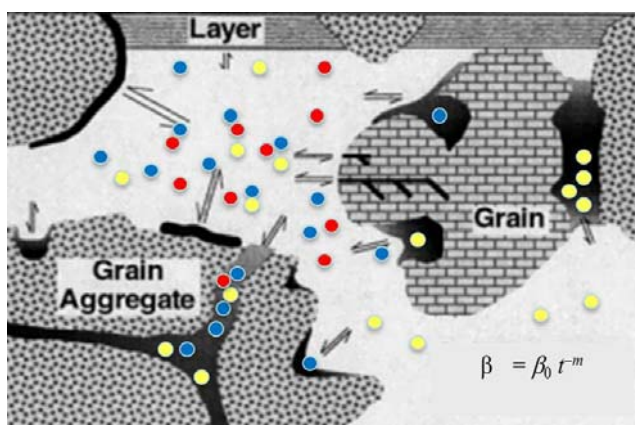


Figura 3: Model MRMT per incorporar transport reactiu multicomponent al transport de soluts considerant l'efecte de l'heterogeneïtat del medi porós

## 2.3. Connectivitat hidràulica.

Com s'ha comentat, un problema per analitzar el transport de soluts és la impossibilitat de caracteritzar completament el medi porós. El tractament del problema és llavors inherentment estocàstic. Un punt força complicat és el tractament de la connectivitat entre les zones d'alta permeabilitat, que ha demostrat tenir un impacte molt significatiu en el transport de soluts. Hi ha tota una sèrie d'indicadors de connectivitat, dependents del procés estudiat i del mètode d'interpretació emprat. Els dos més utilitzats són (1) el temps de resposta d'un punt en un assaig de bombament i que constitueix un indicador de la resposta hidràulica, i (2) la porositat estimada en un assaig de traçadors, que constitueix un indicador de la resposta associada al transport. Recentment s'ha comprovat que hi ha una relació quantificable entre ambdós [2].

L'estudi de la connectivitat hidràulica és crucial per a l'avaluació del risc associat a qualsevol instal·lació potencialment contaminant, incloent les basses d'infiltració. El GHS ha treballat recentment en un mètode estocàstic per delinear els patrons de connectivitat que pugui honorar tot tipus de dades procedents de diferents assaigs de caracterització: dades puntuals de transmissivitat, temps d'arribada de traçadors i el coeficient d'emmagatzematge estimat d'assaigs de bombament.

## 2.4. Dinàmica de la degradació de contaminants emergents

Es té molt poca informació sobre els processos de degradació de contaminants orgànics i la seva cinètica en el subsòl. Aquesta situació és especialment certa en el cas dels contaminants emergents (alguns recentment identificats i la major part d'ells encara no regulats), com són els productes farmacèutics o de cura personal. S'han estudiat les cinètiques de degradació d'alguns contaminants recalcitrants en assaigs batch que incloen aigua, sòl i un còctel de



fàrmacs. Com a resultat s'ha pogut observar un efecte de degradació reversible d'alguns contaminants emergents (diclofenac i sulfametoxazol) governats pel procés de reducció del nitrat a nitrit i posteriorment a nitrogen.

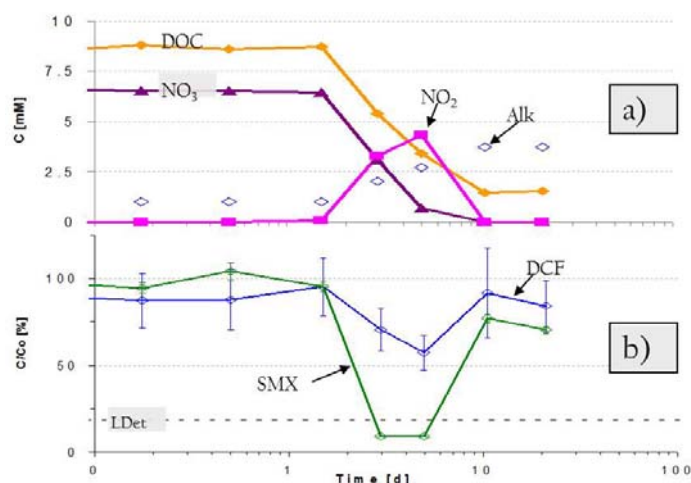


Figura 4: Degradació reversible de dos contaminants emergents lligats a un procés de denitrificació

## 2.5. Anàlisi probabilista del risc

Davant d'una activitat que comporti un risc potencial (sigui el risc ambiental, sanitari o, simplement, econòmic), un gestor ha sempre triar entre un conjunt d'alternatives mitjançant uns criteris de cost-benefici. L'avaluació del risc sota condicions d'incertesa es denomina avaluació probabilística de risc (ERP).

Recentment [3] hem treballat en desenvolupar una metodologia per a una avaluació del risc associat a un esquema de recàrrega artificial mitjançant basses d'infiltració (veure Figura 5). En concret s'avalua la probabilitat que algun contaminant (o qualsevol dels seus metabòlits) que pogués estar present en l'aigua de recàrrega, pogués acabar contaminant els pous de captació. Aquesta probabilitat es calcula mitjançant la combinació de probabilitats (condicionals) de fallada dels diferents processos que intervenen. Per a això s'ha de definir prèviament el "arbre de fallada" (conjunt de combinacions de successos que poden donar lloc a una fallada final), i després avaluar les probabilitats combinada a partir de les probabilitats dels subprocessos. Aquestes últimes poden obtenir analíticament o numèricament.

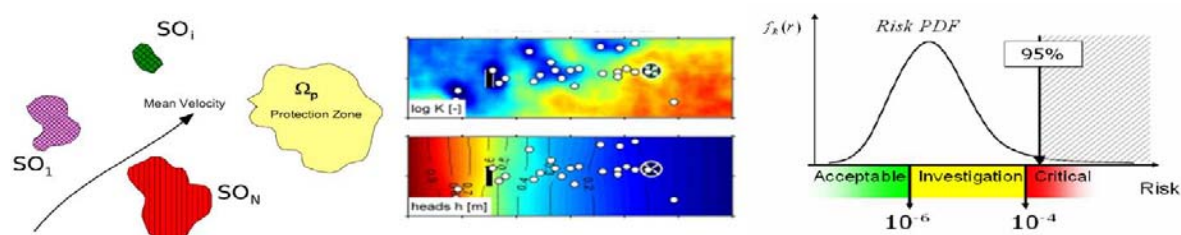


Figura 5: Esquema simple d'avaluació del risc associat a un procés de contaminació de l'aquífer

## REFERÈNCIES

- [1] Delli Priscoli, J., A.T. Wolf (2009) Cambridge University Press, 2009
- [2] Trinchero, P., X. Sanchez-Vila, D. Fernández-Garcia (2008) Advances in Water Resources, 31
- [3] Bolster D., et al. (2009) Water Resources Research, 45, W06413, doi:10.1029/2008WR007551

# MODELITZACIÓ NUMÉRICA 2D EN EMBASSAMENTS: TEMPERATURA I TRANSPORT DE SEDIMENTS A L'EMBASSAMENT DE RIBA-ROJA (RIU EBRE)

Marina Arbat <sup>1</sup>, Ernest Bladé <sup>2</sup>, Martí Sánchez-Juny <sup>3</sup>, Josep Dolz <sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Institut mixt Flumen UPC-CIMNE, Dept. d' Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.  
e-mail: <sup>1</sup>[marina.arbat@upc.edu](mailto:marina.arbat@upc.edu), <sup>2</sup>[marti.sanchez@upc.edu](mailto:marti.sanchez@upc.edu), <sup>3</sup>[ernest.blade@upc.edu](mailto:ernest.blade@upc.edu),  
<sup>4</sup>[josep.dolz@upc.edu](mailto:josep.dolz@upc.edu).

**Paraules Clau:** hidrodinàmica, embassament, modelització

**Resum:** *En aquesta comunicació es presenta un breu resum dels treballs realitzats a l'embassament de Riba-roja d'Ebre, per tal de conèixer i estudiar el comportament hidrodinàmic, l'evolució tèrmica i la dinàmica sedimentària del mateix. Es resumeixen breument els treballs de camp realitzats i la instrumentació utilitzada per tal d'obtenir les dades necessàries per dur a terme l'estudi. També es presenten simulacions realitzades mitjançant dos models numèrics bidimensionals molt diferents: el model CE-QUAL-W2 (hidrodinàmica i temperatura 2D en la longitud i la profunditat) i el model Iber (hidrodinàmica i transport de sediments en suspensió, 2D en el pla). Finalment es comparen i discuteixen els resultats obtinguts, tot comparant-los amb les dades reals obtingudes in situ.*

## 1. INTRODUCCIÓ

En les últimes dècades s'han anat desenvolupant un seguit de models numèrics per a la simulació de la hidrodinàmica i l'evolució tèrmica per rius, embassaments o llacs. L'objectiu dels models numèrics és determinar l'evolució física, tèrmica, transport de sediments (i en alguns casos, la qualitat de l'aigua) en funció dels processos meteorològics, entrades/sortides de cabal o altres processos que tenen lloc en els mateixos. Aquests models són molt útils per l'estudi dels processos que tenen lloc als embassaments i sobretot per a poder fer una correcta gestió d'aquests.

## 2. L'EMBASSAMENT DE RIBA-ROJA D'EBRE

L'embassament de Riba-roja d'Ebre es troba a la província de Tarragona, al curs baix del riu Ebre, aigües amunt hi ha l'embassament de Mequinensa i immediatament aigües avall, el de Flix. Com a tret característic, cal destacar que a la cua de l'embassament de Riba-roja hi ha la desembocadura del riu Segre (un dels afluents més importants de l'Ebre) que aporta pràcticament la meitat del cabal d'entrada a l'embassament.

## 3. INSTRUMENTACIÓ I CAMPANYA DE CAMP

L'Institut d'investigació Flumen UPC-CIMNE porta treballant a l'entorn del mig-baix Ebre des de la dècada dels 90, al llarg d'aquest període de temps s'han realitzat nombroses campanyes de camp (per prendre mostres i mesures in situ) i s'han instal·lat diferents tipus de sensors (fixos durant períodes de temps) per controlar l'evolució de diferents variables

meteorològiques (vent, temperatura, radiació, humitat, precipitació,...) i de qualitat de l'aigua (temperatura, velocitat i direcció de l'aigua, pH, oxigen dissolt, conductivitat,...).

#### 4. MODELITZACIÓ DE LA TEMPERATURA DE L'EMBASSAMENT MITJANÇANT CE-QUAL-W2

CE-QUAL-W2 és un model de qualitat de l'aigua en dues dimensions (longitudinal i vertical) que simula l'evolució hidrodinàmica i tèrmica d'embassaments. Com que el model suposa homogeneïtat lateral, és adequat per a masses d'aigua llargues i estretes com és el cas de l'embassament Riba-roja d'Ebre. A més permet simular més de 60 paràmetres bioquímics de qualitat de l'aigua (si es disposa de les dades d'entrada corresponents) com oxigen dissolt, salinitat, concentracions d'elements traça, blooms d'algues, macròfits, ...

Amb CE-QUAL-W2 s'ha simulat el comportament tèrmic de l'embassament pel període d'estratificació de l'any 2004 (figura 1), a partir de sèries de dades temporals de diferents variables: meteorològiques, hidrològiques, hidràuliques, tèrmiques,... També s'han obtingut resultats de variacions de densitat, de velocitat vertical i longitudinal al llarg de l'embassament.

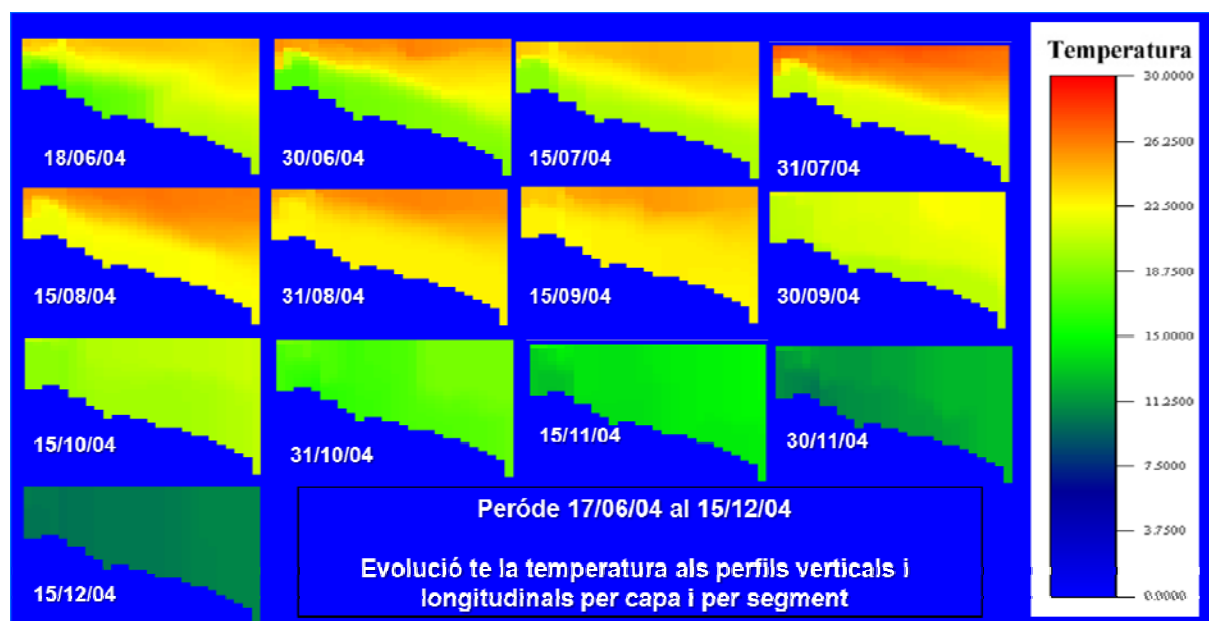


Figura 1. Resultats de l'evolució tèrmica de l'embassament de Riba-roja d'Ebre obtinguts amb el model CE-QUAL-W2 (període d'estratificació de l'any 2004).

#### 5. MODELITZACIÓ DEL TRANSPORT DE SEDIMENTS EN SUSPENSÍO MITJANÇANT IBER

Es presenta el mòdul de transport de sediments en suspensió implementat al model bidimensional IBER (desenvolupat conjuntament pel CEDEX, el CIMNE, el GEAMA de la UdC i l'Institut Flumen UPC), com es va calibrar pel terç superior de l'embassament de Ribarroja i com es va aplicar al tram final del riu Segre, immediatament aigües amunt de la confluència amb l'Ebre, a l'entorn de la població de Mequinensa.

El model permet realitzar l'estudi hidrodinàmic del transport de sediments en suspensió al llarg del temps. A partir de les condicions hidrodinàmiques (calats i camp velocitats en dues dimensions) s'obtenen les zones d'erosió/sedimentació, així com la concentració de sediments en suspensió.

S'han posat a punt dos models digitals del terreny pel fons de l'embassament a partir de transsectes batimètrics realitzats el 2007 i el 2008. En el període comprès entre les dues batimetries (novembre 2007 - desembre 2008) es va produir una sola avinguda significativa

que es va utilitzar per calibrar el model i definir les equacions escollides. El model defineix acceptablement les zones d'erosió i deposició en comparació amb les obtingudes a partir de la diferència dels models digitals del terreny.

Després de realitzar la calibració s'ha dut a terme la simulació de la dinàmica erosiva/deposicional pel tram final del riu Segre comprès entre la confluència amb el riu Ebre i un quilòmetre aigües amunt de la població de Mequinensa, on es pretén construir un espigó per protegir la zona del camp de regates de la sedimentació. A l'estudi s'analitzen diferents geometries i longituds de espigó per a diversos cabals d'avinguda; posteriorment s'han comparat amb la situació actual.

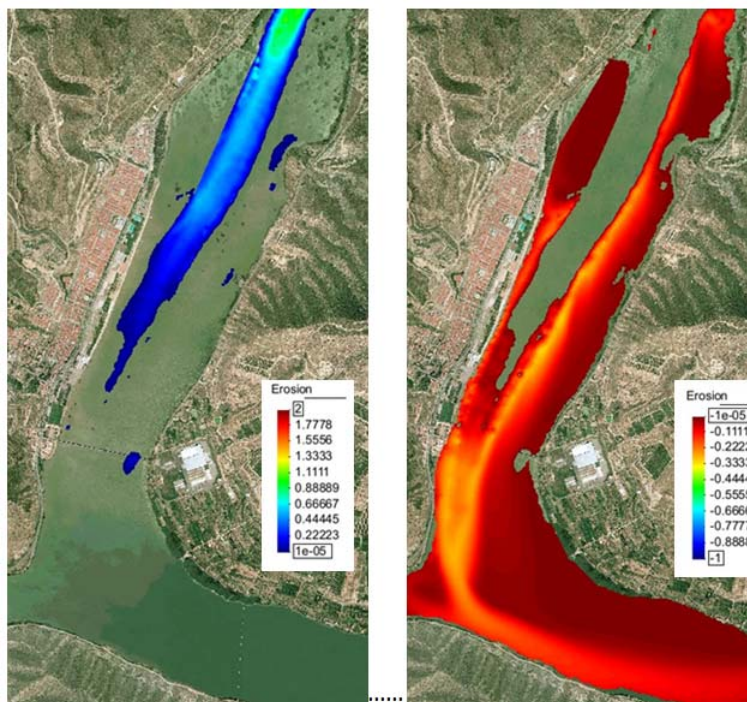


Figura 2. Erosió (esquerra) i sedimentació (dreta) pel cas d'espigó de 700 m de longitud amb un cabal de 500 m<sup>3</sup>/s (24 h) i l'embassament a la cota 69.5 m. Valors en metres.

## REFERÈNCIES

- [1] Arbat, M., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2009): *Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2*. Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid. ISBN 978-90-78046-10-3.
- [2] Arbat, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2010): *Módulo de transporte de sedimentos en suspensión en el modelo IBER: Calibración y aplicación para el tercio superior del embalse de Ribarroja de Ebro y la confluencia con el río Segre en el entorno de Mequinensa*. Actividad experimental de I+D+i en Ingeniería Hidráulica en España. Seminario 2010. ISBN: 978-84-693-9617-9.
- [3] Arbat, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2010). *Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro*. II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation. ISBN 978-0-415-61648-5.



## ALIVIADEROS ESCALONADOS SIN CAJEROS LATERALES PROYECTO ALIVESCA

**Soledad Estrella, Martí Sánchez-Juny, Juan Pomares, Josep Dolz.**

Instituto de Investigación FLUMEN, DEHMA  
soledad.estrella@upc.edu, marti.sanchez@upc.edu

**Rafael Ibáñez de Aldecoa, María Domínguez, Jesús Rodríguez.**

DRAGADOS S.A. ribanezl@dragados.com

**Luis Balairon, David López.**

Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX, luis.balairon@cedex.es

**Palabras clave:** Aliviaderos escalonados, flujo bifásico, expansión lateral

**Resumen:** *En el presente trabajo se muestran los primeros resultados del proyecto de investigación aplicada colaborativa entre el Instituto de Investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y DRAGADOS, con el objetivo de establecer los criterios hidráulicos para el diseño de rápidas escalonadas sin los tradicionales cajeros laterales que confinan el flujo (proyecto ALIVESCA).*

### 1. INTRODUCCIÓN

Hasta ahora la investigación hidráulica de aliviaderos escalonados se ha centrado en caracterizar aspectos como: los diferentes tipos de flujo que se producen sobre una rápida escalona, los procesos de entrada de aire, los posibles efectos de presiones negativas y problemas de cavitación, la disipación de energía producida por el escalonado, la capacidad de descarga de una rápida escalonada e incluso los efectos de turbulencia en el flujo escalonado.

Estas investigaciones, sin embargo, se han centrado en aliviaderos con cajeros laterales que imponen un ancho de vertido constante a lo largo de la rápida.

El objetivo del proyecto ALIVESCA es establecer los criterios hidráulicos para el diseño de aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado con rodillo sin los tradicionales cajeros laterales que confinan el flujo.

### 2. MODELO REDUCIDO Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El modelo reducido del aliviadero escalonado se ha construido en metacrilato transparente, y correspondería, a escala 1:15 con un aliviadero prototipo de altura de presa (H) de 75 m, altura de escalón (h) de 1,20 m, pendiente (i) 0.8 y un ancho de total de presa (B) de 45 m. El modelo se opera bajo la semejanza de Froude.

El estudio se realizado para tres anchos de vertido ( $b_0$ ), respecto al ancho total de la presa:  $B/2$ ,  $B/3$  y  $B/6$ , es decir, anchos de vertido en prototipo: 22.5m, 15m y 7.5m.

Hay que considerar que hacia aguas abajo todo el ancho de la presa es útil para el paso de agua, provocando una reducción del caudal específico y modificando las características del flujo en la rápida.

El vertido se realiza considerando que el cajero lateral derecho es el eje de simetría del vertido, es decir, en realidad se analiza la mitad de una estructura. Esto se hace basándose en la bidimensionalidad del modelo la misma que ha sido corroborada en el proyecto.



Son objetivos específicos de este trabajo por un lado cuantificar la expansión lateral del flujo hacia aguas abajo del vertido mediante un análisis de la distribución del caudal, tanto a pie de presa como a lo largo de la rápida. Por otro lado, también se analiza el comportamiento del flujo de agua en el aliviadero basándose en medidas de presión, velocidad y concentración de aire para poder caracterizar la expansión de la lámina.

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES DE LA EXPANSIÓN LATERAL DEL FLUJO: DISTRIBUCIÓN DE CAUDALES A PIE DE PRESA.

Una vez realizado el diseño y la construcción del modelo en laboratorio, se inició una campaña de ensayos preliminares con el fin de verificar el correcto funcionamiento del modelo y encontrar diferentes condicionantes a su comportamiento mediante observación.

A partir del análisis visual (mediante toma de fotografías) se creyó conveniente, como primer paso, analizar cuantitativamente la distribución de caudales a pie de presa para los tres anchos de vertido y diferentes caudales específicos en prototipo de hasta  $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

La distribución de caudales se diseñó mediante aforo definiendo tres zonas uniformemente repartidas a lo ancho del aliviadero, esto es una longitud de  $B/3$ , que corresponde a un ancho en prototipo de 15m para cada canal. Así, se obtendrá una distribución de caudales en 3 zonas: canal derecho, central e izquierdo.

En la siguiente figura se puede observar la distribución de caudales a pie de presa obtenidas para caudales específicos en prototipo ( $q_{e \text{ prot}}$ ) de  $12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para los 3 anchos de vertido ( $b_0$ ) de 15, 30 y 45m.

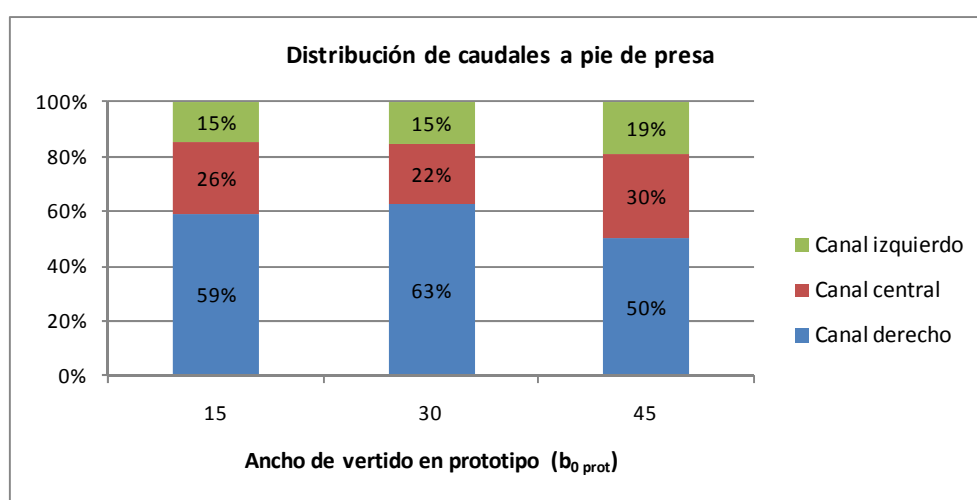


Figura 1.  $q_{e \text{ prot}} = 12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Una vez se obtuvieron los datos de la distribución de caudales a pie de presa, se procedió a realizar otros ensayos con la misma metodología para cuantificar la distribución a diferentes alturas de la estructura y conocer la distribución del caudal a lo largo y ancho de la estructura. Estos resultados preliminares son el primer paso para definir un rango de variables (caudal, ancho, altura) con las que un aliviadero escalonado puede funcionar sin los tradicionales cajeros laterales.

### REFERENCIAS

- [1] Sánchez Juny, Martí (2001): *Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado. Análisis del campo de presiones.*
- [2] Táboas Amador, António (2005): *Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado.*
- [3] Chanson, Hubert (2002): *The hydraulics of stepped chutes and spillways.*



## IRRIGATION CANAL MODELS FOR AUTOMATIC CONTROL PURPOSES

Klaudia Horváth<sup>1</sup>, Eduard Galvis R.<sup>2</sup>, Manuel Gómez<sup>1</sup>, José Rodellar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Flumen – UPC e-mail: klaudia.horvath@upc.edu,

<sup>2</sup>Departamento de Matemática Aplicada III e-mail: edugare.plc@gmail.com

**Key Words:** irrigation canal, automatic control, Muskingum, Hayami, Integrator Delay

**Abstract:** *Automatic control is one way to improve irrigation canal management and to save water volumes during normal canal operation. In order to develop control algorithms for irrigation canals there is a need for simple linear models to be used in the algorithms. The following simple linear models are approximating the canal in order to give a base to develop control algorithms. The PAC-UPC laboratory canal (Prueba de Algoritmos de Control - Universitat Politècnica de Catalunya) is modelled (input and output discharge) using the following three models: Muskingum, Hayami and Integrator Delay Zero (IDZ) and the results are compared to measurements. All three models are able to describe the irrigation canal in an acceptable way. However, only the IDZ model can capture all the important characteristics. These tested models can be applied to represent real canals for control purposes where it is especially important to obtain good models without extensive measurements. Test campaigns are developed now in cooperation with the CHE (Confederación Hidrográfica del Ebro) in order to test control algorithms to be used in irrigation canals under their management.*

### 1. INTRODUCTION

Irrigation is the main user of fresh water all over the world. In some countries, 60 to 80% of total water resources are dedicated to irrigation. Automatic control of irrigation canals can be one way to improve water management in such a way that savings up to one third of water volumes can be achieved. In the heart of this process we find control algorithms who are in charge to decide how to move canal gates to meet irrigation needs in time and space.

In order to develop automatic control for irrigation canals (e.g. PID, predictive) there is a need for a simple linear model of the canal. These models can be developed in two different ways: experimentally (model identification) or analytically. In the first case, there is a need for measured data from the canal that is not always available. In the second case the analytical models are based on the geometrical parameters of the canals or in some cases they need few measured values but basically they need no previous tuning. Their advantage is hence that they can be applied to canals where there is no measured data available. There are three simple linear models presented.

The models are tested on the UPC-PAC experimental canal. The models were developed for the UPC-PAC laboratory irrigation canal. The canal was specially designed to develop basic and applied research in the irrigation canals control area, it has a serpentine shape. The geometrical data of the canal is the following: it has a length of 220 m, width of 0.44 m and depth of 1 m. The canal has three gates, hence three pools and three offtake possibilities. Upstream of the canal there is a reservoir, and at downstream end there is a weir. The canal has zero slope. The canal disposes 11 level measuring sensors and 3 motorized gates whose

information arrives to the SCADA system that can be used to implement different control algorithms. This canal can be used to test and develop control algorithms. We are having joint activities with the Confederación Hidrográfica del Ebro, and some controllers are tested in the UPC-PAC canal that can be applied in the future in practice.

## 2. THE MODELS

### a. The Muskingum model

The Muskingum model is a frequently used linear model for flood routing. It contains two equations, a continuity equation and a storage equation. The parameters of these equations are  $K$  and  $\chi$  containing all the information about the river reach. The advantage of the model is the simplicity and linearity, however, the same characteristics are responsible for the disadvantages. It is a rough approximation of the non-linear behaviour of the canal.  $K$  is the storage time constant (with the dimension of time) for a river reach that can be well approximated by the travel time: this is the time it takes for one wave to travel through the reach.  $\chi$  is a dimensionless coefficient weighing the relative effects of inflow and outflow on the reach storage.  $\chi$  usually varies between 0-0.5 for reservoirs and 0-0.3 for stream channels.

### a. The Hayami model

The Hayami model is derived from the diffusive wave equation, a simplified form of the Saint-Venant equations. It can be identified with first or second order Linear Time Invariant systems with the help of the momentum matching method. According to the properties of the canal different numbers of momenta are calculated and the resulting model can be first order, first order with delay or second order and in case of very long canals second order with delay.

### a. The integrator delay model

This model assumes that the canal pool has two parts: a normal depth section and a backwater section. The backwater portion acts as reservoir with no time delay and no variation in water surface elevation. The other part is described by the delay time. The model is developed by combining these two parts.

## 3. METHODOLOGY DEVELOPPED

Due to zero slope, in cases the normal depth was needed a reference depth was used, that was measured in the canal in the upstream end in steady state with the reference discharge (70 l/s).

### a. Muskingum model development

The following is the transfer function in the continuous Laplace domain:

$$G_m = \frac{1 - cs}{ds + 1}$$

Using the mentioned reference water depth and the chosen reference discharge, the Muskingum parameters can be calculated. The parameters  $\chi$  and  $K$  were calculated in a way suggested by Cunge<sup>3</sup>. In this case the calculated parameters:  $c=42.38$   $d=44.93$ .

### b. The Hayami model development

Using the formula suggested by Litrico<sup>1</sup> a first order model can be adjusted to the laboratory canal hence only the first momentum is matched. The value of the parameter is

calculated using the formula given by Litrico<sup>1</sup> using the reference water depth, the reference discharge and the geometrical data of the canal.

The following is the transfer function in the continuous Laplace domain:

$$G_h = \frac{1}{bs + 1}$$

In this case the calculated parameters:  $b=547.8$ .

### c The integrator delay model

The parameters are calculated for the uniform flow and the backwater part. In case of the uniform part low and high frequency approximations are taken into account.<sup>2</sup> The canal partition is experimentally set to the middle since the zero slope the formula in the mentioned paper could not be used. The normal depth was approximated with the reference depth. The downstream depth was calculated using the weir equation. This model gives a complete transfer matrix between the water levels and the discharges. Since in this case discharge input- discharge output models are tested the model is combined with the linearized equation of the downstream weir. The transfer function is the following:

$$G_{id}(s) = \frac{(k + ls)e^{ms}}{ns + k}$$

In this case the calculated parameters:  $k = 0.01111$ ,  $l = 1.220$ ,  $m = -79.23$ ,  $n = 3.465$ .

## 4. RESULTS

A discharge step was simulated by Simulink. The first step is from a smaller discharge to a reference discharge while the next step is from the reference discharge to a higher discharge. The responses of the different models are plot and compared with the measured output.

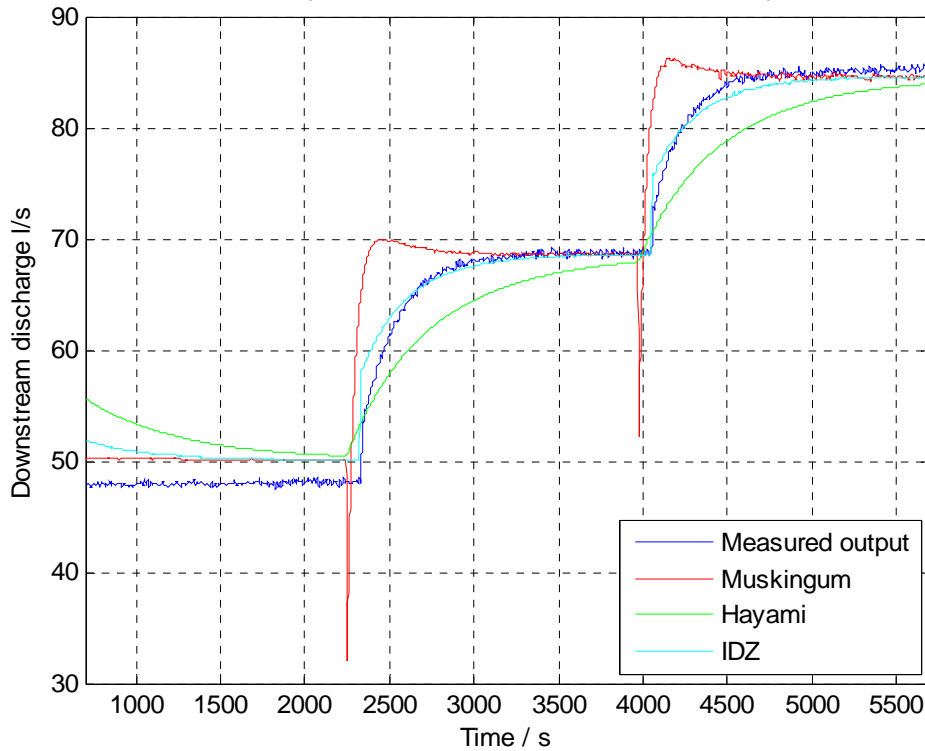


Figure 1 The measured and simulated response for an upstream step discharge

All models were tested without any tuning. The results are plot on Figure 1. All the three models followed the behaviour of the measured output. The Hayami model is slower than the measured output but arrives to the final state. The Muskingum model is slightly faster and also disposes a considerable undershoot before the step. The IDZ model approximated very well the canal behaviour. The delay time and the behaviour of the curve as well as the final state is very well approximated. This fact can be explained by the complexity of the IDZ model, while the poorer behaviour of the other two models can be explained by the few identified parameters. As a summary, all the three models showed the basic ability to give a simple model for an irrigation canal without measurements.

## **5. SUMMARY**

The canal PAC-UPC is an experimental platform that can be used for testing existing control algorithms before applying them for real canals as well as to develop new algorithms. The canal includes all the most important characteristics of the real canals (like time delay) whereas it is available for tests all the time with the desired flow conditions. Supported by the numerical simulator, a wide range of tests can be carried out by testing before the algorithms numerically. Thanks to the different configurations (from one pool to 3 pools) SISO and MIMO algorithms can also be applied.

It is not only used for academic research. Control algorithms for the Confederación Hidrográfica del Ebro that are going to be applied in real canals are tested. The canal PAC-UPC is an open facility that can be used for those involved in irrigation canal management.

## **6. REFERENCES**

- [1] LITRICO, X. and GEORGES, D., (1999) Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system. (I) Modelling. *Applied Mathematical Modelling*, 23(11), pp. 809-827.
- [2] LITRICO, X. and FROMION, V., (2004) Analytical approximation of open-channel flow for controller design. *Applied Mathematical Modelling*, 28(7), pp. 677-695.
- [3] CUNGE, J., (1969) On the subject of a flood propagation computation Method (Muskingum Method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), pp. 205-230.

# EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTE: LOS PROCESOS Y SU MITIGACIÓN. APLICACIÓN AL PABELLÓN PUENTE DE LA EXPO 2008 DE ZARAGOZA

Bateman, A.<sup>1</sup>, Martín-Vide, Juan P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental  
e-mail: juan.pedro.martin@upc.edu, allen.bateman@upc.edu

**Paraules Clau:** Puente, Erosión local, Socavación, Pila, Estribo, Modelo físico, Expo 2008.

**Resum:** Se exponen los avances en el estudio de la erosión local en pilas de puente gracias a la experimentación en modelos a escala reducida en laboratorio. Se describe la evolución temporal, las características de la erosión local en pilas de base cuadrada y circular, la influencia de las presiones no hidrostáticas, así como también la protección que ha de utilizarse para mitigar la erosión. Desde el punto de vista de la ingeniería el uso de modelos reducidos es imprescindible debido a la complejidad de los fenómenos que intervienen. Se presenta la aplicación a la evaluación del riesgo de erosión fluvial en una pila compleja de gran anchura, construida en el cauce del río Ebro en Zaragoza. Se describe el problema de erosión local, las características del modelo físico ensayado y los mantos de escollera que consiguen detener la erosión, así como la ejecución y auscultación de esta protección.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos erosivos en pilas de puente y estribos son fenómenos de gran complejidad y requiere del estudio continuo para poder profundizar en su entendimiento. El proceso de erosión se basa en varios conceptos, el primero de ellos es el arrastre de las partículas de sedimento por el flujo de agua, la creación de vórtices activos debido al choque del agua contra la superficie de la pila, el derrumbe del material en la zona de formación del foso como un fenómeno independiente del arrastre pero que puede verse comprometida por él, la distribución de presiones no hidrostáticas en el lecho alrededor de la estructura [1], la geometría de las pilas, el tipo y granulometría del lecho, y otros aspectos relacionados con la morfología del cauce.

Es muy difícil acceder a un conjunto de ensayos experimentales completos y caracterizados por los mismos efectos hidrodinámicos. Cada trabajo experimental se basa en la infraestructura que cada laboratorio utiliza, el material disponible, la metodología de trabajo sobre todo en lo que se refiere al tiempo de ensayo, y otros factores que hacen que los ensayos sean de difícil comparación entre sí. Sin embargo, sería interesante a nivel global el rescate y el almacenamiento a forma de biblioteca de todos los ensayos realizados por los diferentes investigadores a todo lo largo y ancho del mundo científico. Tratar de mantener la coherencia de unos ensayos con otros manteniendo la metodología de trabajo permite sistematizar mejor el conocimiento de estos fenómenos. El desarrollo de nuevos ensayos permitirá conocer mejor este tipo de fenómenos aunque los ensayos sean repetitivos, los nuevos ensayos suman nuevos datos que ayudan a su comprensión. No es fácil dar con un buen modelo pues siempre se encuentran fenómenos adicionales que influyen en la evolución y desarrollo de la erosión

local. Por ello cabe destacar que la ejecución de nuevos ensayos en los que se ponga en marcha toda la técnica de medición, es fundamental en el desarrollo de nuevos modelos conceptuales.

Las nuevas técnicas utilizadas, como es el uso de cámaras digitales que permiten de forma más sencilla acceder a fotogramas con una gran calidad y cantidad de información, iluminación láser, sensores de ultrasonido, medición de velocidades, y otras técnicas dan como resultado una base de datos de gran importancia para que en un futuro no muy lejano para que los modelos numéricos puedan ser validados y calibrados.

La distribución no hidrostática de presiones es uno de los factores que afectan directamente al inicio del movimiento de la protección de escollera que se coloca alrededor de las pilas de puente. Este artículo se dedica a la comparación del inicio de movimiento que ocurre en pilas de base circular y cuadrada. Para este objetivo se realizaron un total de 30 ensayos con diferentes dimensiones de pilas y diámetro de escollera. Estos ensayos se realizaron en el canal de alta pendiente del Laboratorio de Morfodinámica Fluvial del Grupo de Investigación en Transporte de sedimentos (GITS-UPC) del Departamento de Ingeniería Hidráulica. Se realiza la comparación con otros autores para extraer conclusiones y confirmar hipótesis de trabajo. La distribución no hidrostática de presiones en la superficie del lecho es de vital importancia para distinguir el comportamiento de los procesos de transporte de material. La principal idea se centra en encontrar el inicio de movimiento de la escollera de protección.

## 2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y MÉTODO DE TRABAJO

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Morfodinámica Fluvial-GITS de la UPC. El canal utilizado, ver esquema es de 2.5 m de anchura y comporta una zanja de 0.5 m de profundidad y 2.5 m de longitud, ésta zanja se ha llenado con arena silíceá de diámetro  $D_{50}=1.65\text{mm}$ . La longitud total es de 9 metros, dividida en tres tramos de longitud aproximadamente igual. La pendiente media del canal es del orden 0.6%. La geometría de las pilas utilizadas fue de 4, 5, 6, y 9 cm de diámetro y 60 cm de altura. También se han realizado ensayos en el SAFL (Saint Anthony Falls Laboratory) que completan una serie de datos de gran valor en el desarrollo de ésta investigación.

Figura 1. Esquema del canal utilizado

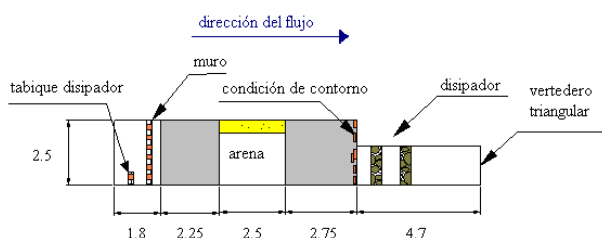


Figura 2. Fotografía del canal utilizado.

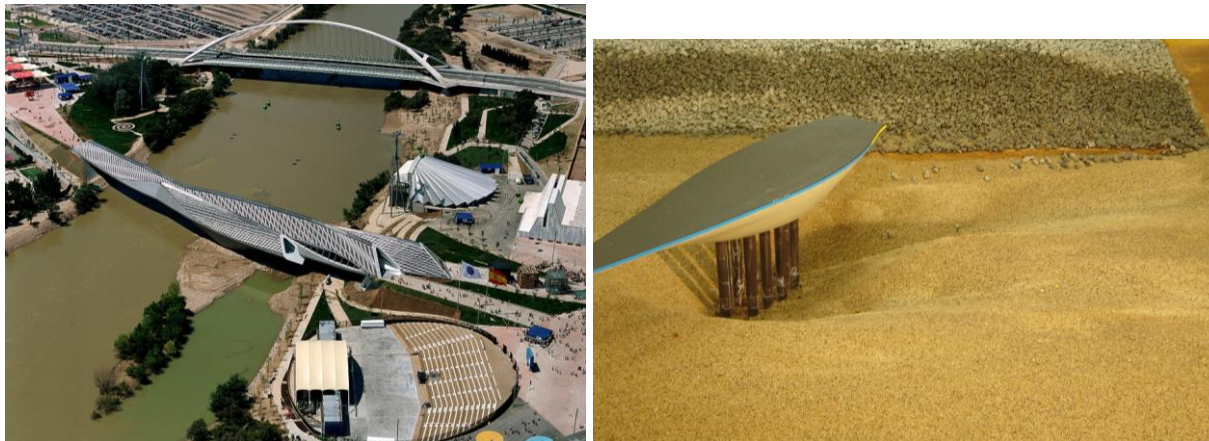
Se ha utilizado también la instalación del canal de alta pendiente del Laboratorio de Morfodinámica Fluvial operado por GITS-UPC: 40 cm de anchura por 60 cm de altura y 9 m de longitud. El caudal se controla desde un ordenador y se puede variar desde sólo  $250\text{ cm}^3/\text{s}$  hasta  $50\text{ l/s}$ , con dos válvulas automáticas de dos diámetros diferentes colocadas en paralelo.

### 3. LA TEORÍA

En el desarrollo de la investigación se han utilizado las teorías de Batchelor (1953) de la dinámica de los vórtices, la asociación de ideas de la hidrología básica para el comportamiento del derrumbe de material, el concepto de inicio de movimiento, la relación geométrica simple de la erosión y otros conceptos que dotan a esta investigación de varios años de un soporte científico sólido. La dinámica de los fluidos es esencial para dar soporte a los modelos conceptuales que se utilizan en la identificación de los diferentes fenómenos que se desarrollan durante el proceso de erosión.

### 4. APLICACIÓN AL PABELLÓN PUENTE DE ZARAGOZA 2008

El Pabellón Puente de la Exposición Internacional Zaragoza 2008, uno de los más visitados por el público de la muestra, diseñado por la arquitecta iraquí Zaha Hadid, ha supuesto un reto técnico para las especialidades implicadas en su ejecución, desde su cimentación, con pilotes de 2 m de diámetro y profundidades de más de 70 m, hasta la hidráulica fluvial, pasando por la estructura. El puente se apoya en una pila central cimentada sobre una pequeña isla natural cercana a la margen izquierda del río (fig.3). El proyecto arquitectónico incluyó un “cáliz” que envuelve el encepado abrazando los 10 pilotes de 2 m y soldándose al tablero por debajo. El cáliz, así como una parte inferior del tablero, resultan mojados por la avenida de proyecto del río Ebro. La obstrucción del flujo es de 28 m de anchura al nivel del fondo y de 80 m de longitud a nivel de la superficie libre. Se consideró para la cimentación de la pila un espesor de terreno no colaborante en el cálculo de los pilotes de sólo 6 m. Esta cifra es mucho menor que la erosión potencial calculada, de 25-27 m. Una protección mediante manto de escollera<sup>[1]</sup> debería ser un anillo de 30 m de anchura rodeando la pila, de 3 m de espesor y escollos de unas 5 toneladas. La magnitud de la erosión potencial y las dimensiones teóricas de la obra de protección (extensión y peso) aconsejaron el estudio en modelo, encargado en marzo de 2008 siendo la fecha de inauguración de la Exposición el 15 de junio de 2008 [2].



*Fig. 3. Vista aérea del Pabellon Puente. Fig.4 modelo físico sin escollera.*

Un puente fluvial debería abordar el estudio de los aspectos hidráulicos, en particular la erosión, desde sus primeras fases, puesto que un 50% aproximadamente de los fallos de grandes puentes tiene su causa en la socavación. Trazado, estructura, cimentación e hidráulica fluvial se deberían estudiar conjuntamente. La ingeniería fluvial no debe ser la última



disciplina en intervenir, so pena de no ofrecer más que soluciones insatisfactorias. Un manto de escollera no es más que un medio *fungible* para combatir la erosión local (no la general ni la de estrechamiento), que no forma parte inseparable de la estructura, sino que es granular y móvil. Por ello, podría perderse o ser afectado algún día por otras obras en el río.

#### 4. MODELO Y RESULTADOS

Un modelo físico no puede ser una réplica exacta de la realidad, pero sí una técnica de análisis superior a un modelo matemático sobre todo en el caso de flujo tridimensional, con presencia de un lecho aluvial y cuando existe una interacción entre el agua, el fondo y una estructura de geometría compleja. Se ensayó el modelo con la técnica de “agua clara”, es decir con agua sin material sólido. La arena del lecho se encuentra cerca de su inicio de movimiento para el caudal de ensayo. El modelo no es plenamente de lecho móvil sino localmente erosionable: sólo son reales las formas directamente asociadas al foso de socavación. La larga duración de los ensayos de agua clara es un artificio para garantizar que el ensayo quede del lado de la seguridad. El material aluvial del río Ebro en Zaragoza parece ser una grava media-gruesa de tamaño  $D_{50} = 16.6$  mm. Para el modelo se eligió una arena uniforme con  $D_{50} = 1.28$  mm. La escala del tamaño de grano ( $16.6/1.28$ ) es alrededor de la cuarta parte de la escala geométrica del modelo. Esta exageración no altera la semejanza en la erosión local, excepto en el caso de pilas muy grandes en relación al grano<sup>[6]</sup>, como puede ocurrir en el prototipo. La uniformidad de la arena asegura que en el modelo no se produce freno a la erosión local por acorazamiento del lecho: la erosión en el modelo puede ser mayor que la real, es decir el modelo estaría del lado de la seguridad. El modelo reprodujo la parte del río que influía sensiblemente en los fenómenos que se estudian. La atención a la pila hacía irrelevante el meandro y el puente de aguas arriba y las planicies inundables. El caudal utilizado fue  $5222 \text{ m}^3/\text{s}$  (500 años); la velocidad  $3,8 \text{ m/s}$ . Se sumó al calado la erosión general transitoria. El modelo por sí mismo no puede simular de ninguna manera esta erosión, que existiría en el río durante la circulación de una avenida. Respecto a la erosión por estrechamiento se obtiene del modelo. La escala geométrica fue finalmente 62.5. La máxima erosión bajo el cáliz medida al final del ensayo fue de  $17.5 \text{ m}$ , con respecto al fondo inicial (la longitud de pilotes descubierta fue  $20.3 \text{ m}$ , fig.4). La preocupación despertada por el cálculo se vio pues confirmada por el modelo reducido. El volumen de material erosionado es  $43.500 \text{ m}^3$ , que equivaldría a un cubo de más de  $35 \text{ m}$  de lado. La superficie total de fondo erosionado es algo más de  $1 \text{ Ha}$ . La escollera de  $600 \text{ kg}$  resultó suficiente y su extensión bastante menor de la calculada.

#### REFERENCIAS

- [1] Bateman, A.; Fernández, M.; Parker, G. 2005. Morphodynamic model to predict temporal evolution of local scour in bridge piers. RCEM, Illinois - USA.
- [2] Martín-Vide, J.P., Fael C.M.S., Núñez F., Ferrer C., Gutiérrez F., Goyeneche F-J. “La audacia del Pabellón Puente en el río Ebro (Expo 2008): consecuencia en erosión fluvial y exigencias de protección y auscultación”. Rev.de Obras Públicas, n.3497, III-2009, pp.53-68.

## ANÁLISIS DE DATOS COMPOSICIONALES: AGUAS, CONTAMINANTES, RECURSOS, SOCIOLOGÍA...

J.J. Egozcue<sup>1</sup>, R. Tolosana-Delgado<sup>2</sup>, E. Jarauta-Bragulat<sup>1</sup>, M.I. Ortego<sup>1</sup>,

J.L. Díaz-Barrero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dep. Matemática Aplicada III e-mail: juan.jose.egozcue@upc.edu,

<sup>2</sup>Dep. Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental (LIM), e-mail: raimon.tolosana@upc.edu

**Plabras clave:** simplex, concentraciones, proporciones, transformación logística

**Resumen:** *Los datos composicionales describen las partes de un todo. Se presentan en forma de vectores proporciones, porcentajes, concentraciones químicas etc. y aparecen en multitud de campos de la ciencia y la ingeniería. A pesar su uso frecuente en modelización, su análisis es problemático y se pueden obtener conclusiones sin sentido si no se utilizan métodos adecuados. Los métodos de análisis composicional se basan en los principios de invariancia por escala y coherencia subcomposicional. Se utilizan logaritmos de cocientes entre proporciones como coordenadas (transformaciones logísticas), que luego se analizan como variables reales ordinarias. Este tipo de análisis requiere técnicas específicas de fácil implementación. Se describen algunas herramientas descriptivas y de modelización a través de ejemplos.*

### 1. DATOS COMPOSICIONALES

Los metales pesados que contaminan un suelo se expresan en partes por millón (ppm de masa). Los análisis de aguas minerales se presentan en mg/litro. Las partículas en suspensión en el aire se describen por su diámetro y el grado de contaminación se expresa por la proporción de cada unos de esos diámetros. En gestión de transportes y movilidad interesa la proporción de viajeros que van a diversas estaciones o bien el modo o el motivo de su desplazamiento. La estructura de una cartera de valores se describe por los porcentajes invertidos en diferentes valores. En las elecciones interesa el porcentaje de votos a cada candidatura. Las probabilidades de cada suceso excluyente suman la unidad. Todas estas descripciones numéricas se caracterizan porque reparten un todo (total metales pesados, total de soluto, partículas en suspensión, total de viajeros, total invertido, total de votos, la probabilidad unitaria) entre sus partes y su interés no reside en ese total sino en la distribución sobre las partes. Pero las unidades indicadas no dan una información relevante. Nadie se preocupa si una probabilidad o proporción, en lugar de expresarse en tanto por uno, se da en porcentaje. O si una concentración química en lugar de expresarse en ppm se expresa en fracción molar. Se entiende que dos analistas trabajando en diferentes unidades deberían llegar a idénticas conclusiones. Por tanto, si una composición se multiplica con una constante positiva, el nuevo vector debe contener idéntica información, la que expresan los cocientes entre las distintas partes. Esta conclusión constituye el principio de *invariancia bajo cambio de escala*.

Los cocientes entre proporciones o partes se convierten en el centro del análisis composicional. Sin embargo, los cocientes de partes, que son cantidades positivas, tienen escala relativa. Si en una votación un candidato obtiene el 2% de los votos y en la siguiente votación obtiene el 4%, podemos decir que se ha doblado sus votos y ha obtenido un éxito

electoral. En cambio, un candidato que obtuvo el 30% de votos y consigue ahora el 32%, habiendo mejorado su posición, podemos decir que mantiene su apoyo. Por razón de la escala relativa se suelen tomar *logaritmos de los cocientes de proporciones* de forma que su escala se transforma en absoluta (diferencia de logaritmos).

Cuando se tratan composiciones químicas nunca se analizan todos los elementos sino una parte reducida de ellos. Parece lógico exigir que los resultados del análisis concernientes a un grupo de elementos (una subcomposición) no dependa de cuáles fueron el resto de las concentraciones medidas. Esto da lugar al principio de *coherencia subcomposicional* que exige que la información no cambie cuando se extrae una subcomposición. Cualquier descriptor de datos composicionales como concentraciones medias, variabilidad de una muestra, distancias entre composiciones deben cumplir los principios mencionados si no se quiere incurrir en contradicciones, que en ocasiones pueden ser inquietantes.

Las composiciones se pueden representar en el *símplex*: vectores de componentes positivas que suman una constante. Se puede dotar al *símplex* de una estructura de espacio Euclídeo [2]. La operación de adición es la perturbación que consiste en multiplicar las composiciones componente a componente y después normalizar a suma constante. La perturbación puede asimilarse a un filtrado (lineal) en química o al incremento/decremento multiplicativo del valor de una cartera. También se establece una métrica que conforma la llamada geometría de Aitchison en el *símplex*.

## 2. CORRELACIÓN ESPÚREA

El cálculo de la correlación entre variables es la base de casi todos los métodos estadísticos. Un ejemplo muestra cómo la correlación entre concentraciones de solutos en un acuífero puede cambiar dependiendo de qué subcomposición se analice. Se analizan aguas profundas en 23 pozos para estudiar su salinidad (Moeller et al. 2008) y se obtienen las concentraciones en mg/l de los iones Na, K, Mg, Ca, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>. Pueden obtenerse las correlaciones de cada par de elementos. Tomemos como ejemplo los tres pares que pueden obtenerse de Cl, Na, Mg. A continuación supongamos que no se ha medido HCO<sub>3</sub> y reducimos cada composición a tanto por cien en peso. La tabla 1 muestra las correlaciones entre las concentraciones de los pares de elementos en los dos casos mencionados. Un observador, ante la correlación entre Cl y Na (cuando se expresan en mg/l), concluye satisfecho que los incrementos de Cl corresponden a incrementos proporcionales de Na (sal marina, salmuera, ...). En cambio quién observara el % en masa de la subcomposición (sin HCO<sub>3</sub>) llegaría a la conclusión de que los incrementos de Cl corresponden a decrementos en Na. Cada uno de los pares encierra sorpresas de este tipo. Estamos ante una flagrante violación del principio de coherencia subcomposicional.

Tabla 1. Correlaciones espúreas en un análisis de aguas

	Cl Na	Cl Ca	Na Ca
mg/l	0.99	0.73	0.65
% masa	-0.37	-0.85	0.00

## 3. TRANSFORMACIONES LOGÍSTICAS Y ANÁLISIS EXPLORATORIO

Aitchison [1] propone una solución al análisis de datos composicionales de acuerdo con los principios que se han descrito. Consiste en estudiar el comportamiento de log-cocientes

que sean invariantes por escala, llamados log-contrastes. Los más simples son los log-cocientes de dos partes. Esto da lugar a transformaciones de los vectores de proporciones en vectores de log-contrastes que contienen toda la información de las muestras. El análisis estadístico se realiza sobre los vectores transformados. Por sus características estas transformaciones son generalizaciones de la transformación logística o logit utilizadas en diversos campos. Una de las más importantes es la llamada transformación clr (*centered log-ratio*) que consiste en dividir cada parte entre la media geométrica de todas las partes y tomar logaritmo. Esta transformación permite utilizar la métrica euclídea ordinaria sobre los datos clr-transformados de forma que las operaciones de perturbación equivalen a sumas y las distancias corresponden a la geometría de Aitchison en el simplex. Con ello la operativa de análisis se reduce a la ordinaria.

Como se ha mencionado, la geometría de Aitchison en el simplex es una geometría euclídea. Esto permite utilizar todas las propiedades y herramientas de estos espacios que nos son familiares. Es decir, disponemos de productos escalares para hacer proyecciones ortogonales y de ejes ortogonales que permiten trabajar en coordenadas ([3] cap. 3). Simplificando, los pasos de un análisis composicional son: expresar los datos composicionales mediante sus coordenadas; realizar el análisis estadístico de las coordenadas; e interpretar los resultados, deshaciendo la transformación a coordenadas si es necesario.

Una alternativa composicional al análisis de correlación consiste en examinar el comportamiento de log-cocientes entre dos partes. Si la varianza del log-cociente es pequeña indica que ambas partes están muy asociadas y viceversa. El conjunto de todas estas varianzas puede sustituir a las matrices de covarianza-correlación ordinarias. Por otra parte los valores medios de estos log-cocientes, corresponden al concepto de media en el simplex: se define *centro* de una muestra composicional como la media geométrica de cada parte a lo largo de la muestra, normalizada a la suma constante. Estos conceptos permiten hacer los resúmenes estadísticos necesarios en cualquier estudio ([3] cap. 2).

La estadística composicional es siempre multivariante, frecuentemente con una dimensión considerable. La representación intuitiva de una muestra es, en estas circunstancias, un desafío. Una de las herramientas más útiles es el llamado *biplot* que permite la representación simultánea de datos y variables que se basa en el análisis de componentes principales. En el caso composicional se procede a tomar clr de los datos y a continuación realizar el biplot ([3] cap. 5, 8). La figura 1 representa el *biplot*-composicional (86% varianza explicada) de los resultados de las elecciones al *Parlament de Catalunya* en 2010 ([3] cap. 2). Se puede interpretar que la primera componente principal corresponde a el no apoyo al nacionalismo catalán; la segunda parece representar el conservadurismo del *status quo*. Las uniones de los rayos representan la varianza de los log-cocientes simples y el ángulo entre ellas su correlación. Por ejemplo se sugiere que el log-cociente (CiU, C's) está poco correlacionado con el de (PP, ICV); también que la relación (PSC, PP) está muy correlacionada con la de (ERC, CiU, C's), etc.

#### 4. MODELOS DE EVOLUCIÓN

Como se ha mencionado los métodos estadísticos tradicionales pueden aplicarse a los vectores de coordenadas. Por ejemplo, una coordenada composicional puede tomarse como variable respuesta y tratar de predecirla a partir de una variable explicativa externa a la composición con métodos de regresión.

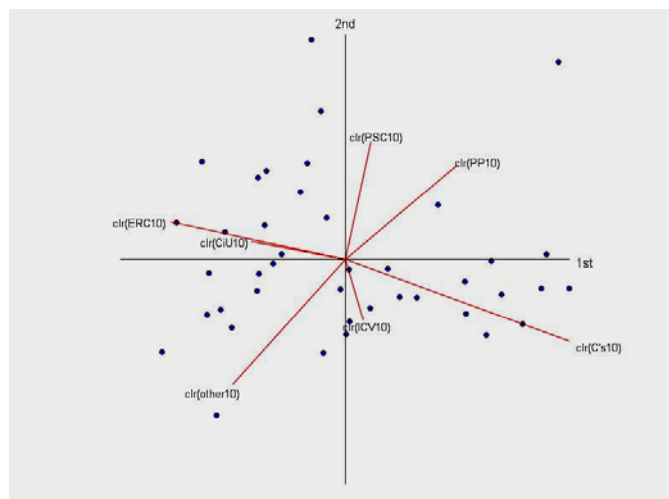


Figura 1. Biplot composicional de los votos a candidaturas en las elecciones al Parlament de Catalunya 2010. Los rayos son proporcionales a la variabilidad de las componentes clr de las candidaturas. Los puntos representan *vegueries*.

El símplex, como espacio euclídeo, admite la definición de derivada e integral y por tanto ecuaciones diferenciales que pueden modelar la evolución en el tiempo ([3] cap. 12). Por ejemplo, la ecuación que iguala la derivada con una constante será una recta en el símplex. La figura 2 muestra un ajuste (por regresión) del petróleo ya consumido, las reservas conocidas y tres hipótesis de reservas desconocidas. El ajuste es a una recta en el símplex, después de descartar ecuaciones diferenciales de orden superior.

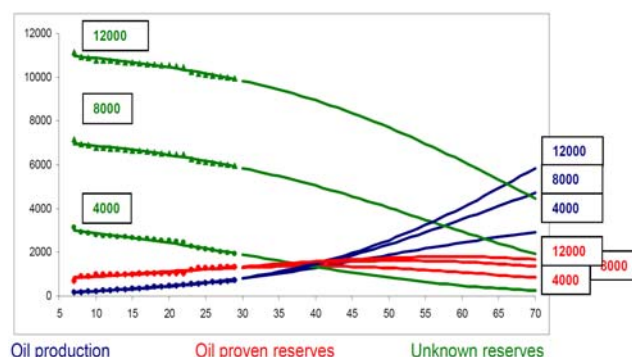


Figura 2. Regresión de la composición (petróleo consumido, reservas conocidas, reservas desconocidas) en Mbarriles. Predicción a 50 años siguiendo una recta del símplex.

## REFERENCIAS

- [1] Aitchison, J., 1986, *The statistical analysis of compositional data. Monographs on statistics and applied Probability*, Chapman & Hall, London (Reprinted in 2003 with additional material by Press Blackburn).
- [2] Pawlowsky-Glahn, V. and J.J. Egozcue: Geometric Approach to Statistical Analysis on the Simplex, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 15, 5, 384-398, 2001.
- [3] Pawlowsky-Glahn, V. and A. Buccianti (Ed.) (2011): *Compositional data analysis. Theory and applications*, Wiley, West Sussex, UK.

## BIOGAS PRODUCTION FROM ALGAE BIOMASS GROWN IN HIGH RATE PONDS FOR WASTEWATER TREATMENT

Fabiana Passos<sup>1</sup>, Sabina Cordón, Maria Solé, Ivet Ferrer<sup>2</sup>

GEMMA-Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental

<sup>1</sup>e-mail: fabiana.lopes.del.rei@estudiant.upc.edu, <sup>2</sup>e-mail: ivet.ferrer@upc.edu

**Key Words:** wastewater treatment, microalgae, anaerobic digestion, methane, renewable energy

**Abstract:** *High rate ponds are wastewater treatment systems that combine heterotrophic bacteria and microalgae communities in a symbiosis relation, which triggers a series of reactions that eliminates pollutants from the water. Moreover, during the last decade, there has been a growing interest in investigating the energy potential of biofuels obtained from microalgae cultures. The high lipid content of microalgae makes them an alternative to terrestrial energy crops for biodiesel production. A major drawback of microalgae anaerobic digestion is the hydrolysis of cell walls. The aim of this project is to study the potential of high rate ponds for wastewater treatment, biomass and biogas production and finally evaluate the technology as a new energy source.*

High rate ponds are extensive natural wastewater treatment systems where heterotrophic bacteria and microalgae communities grow in a symbiotic relation. Algae photosynthetic activity produces the oxygen necessary for organic matter degradation by aerobic bacteria, which generates carbon dioxide used by the microalgae communities for photosynthesis. In this way, algae biomass growth also contributes to the reduction of greenhouse gases emissions, since the inorganic carbon used for photosynthesis is mostly atmospheric. Therefore, the system is a carbon dioxide gas sink.

Regarding the wastewater treatment, high rate ponds are secondary treatment systems, since aerobic bacteria oxidize the organic matter. Moreover, the system is efficient in elimination of nutrient by microalgae biomass assimilation. For this reason, an important issue is the effective separation between algae biomass and treated effluent.

During the last decade, there has been a growing interest in investigating the energy potential of biofuels obtained from microalgae cultures. The high lipid content of microalgae makes them an alternative to terrestrial energy crops for biodiesel production. However, this technology is still at an initial research phase. According to the literature, the cultivation of microalgae in photobioreactors to produce biofuels has a number of requirements that may limit its implementation at industrial scale.

Anaerobic digestion of microalgae was first studied in the 1950s by Oswald and Golueke in California, USA. These authors used algae biomass from high rate ponds, pointing out biomass separation from the liquor as a major limitation of the process. Up to date, the

literature on microalgae digestion is very limited compared to other substrates like sewage sludge. However, it is known that a major drawback of microalgae anaerobic digestion is the hydrolysis of cell walls.

The pre-treatment of substrates to increase the anaerobic biodegradability has been the subject of intense research in recent years. Chemical, thermal and mechanical processes (i.e. ultrasounds and microwave) have proven successful at improving the disintegration and anaerobic biodegradability of sludge [2]. Moreover, positive energy balances of these processes have been reported.

The electromagnetic radiation of microwaves has been investigated as sludge pretreatment process [3]. This pretreatment condition can result in changes in the secondary and tertiary structure of proteins and accelerate cell hydrolysis. Microwave thermal effect was studied previously, concluding that the microwave pretreatment increased cell disruption and biogas production compared to conventional thermal pretreatments [1]. Cell hydrolysis is caused by the polarization of macromolecules sidechains, which align in direction with the electric field, influenced by microwave frequency, radiation time, concentration and penetration depth [3].

## REFERENCES

- [1] Park, W., Ahn, J., Hwang, S., Lee, C. (2010): Effect of output power, target temperature, and solid concentration on the solubilization of waste activated sludge using microwave irradiation. *Bioresource Technology* 101, S13-S16.
- [2] Ferrer, I., Ponsá, S., Vázquez, F., Font, X. (2008): Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. *Biochemical Engineering Journal*, 42 (2), 186-192.
- [3] Eskicioglu, C., Terzian, N., Kennedy, K. J., Droste, R. L., Hamoda, M. (2007): Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. *Water Research* 41, 2457-2466.



## MODELITZACIÓ DELS PROCESSOS FÍSICS, QUÍMICS I BIOLÒGICS EN AIGUAMOLLS CONSTRUÏTS PER AL TRACTAMENT D'AIGÜES

**Roger Samsó, Joan García**

GEMMA-Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental. E-mail: roger.samsó-campa@upc.edu, joan.garcia@upc.edu

**Paraules Clau:** aiguamolls construïts, aigües residuals, modelització numèrica, tractament.

**Resum:** *Els aiguamolls construïts s'utilitzen per al tractament d'aigües residuals de poblacions de fins a 2000 p.e des de la dècada dels 70. Aquests sistemes compten amb una sèrie d'avantatges respecte a les plantes de tractament convencionals, com són la baixa inversió inicial, el reduït consum energètic i la baixa producció de fangs, entre d'altres. La millora de la qualitat de l'aigua als aiguamolls es du a terme per mitjà de diversos processos tan físics com químics i biològics, que es desenvolupen simultàniament. Els models numèrics comencen a ser considerats una eina ESSENCIAL per tal de millorar el coneixement existent sobre aquest tipus de sistemes i optimitzar-ne el disseny. En aquest article es presenta un model d'aiguamoll desenvolupat sobre la plataforma Comsol Multiphysics i que incorpora les equacions del model biocinètic CWM1 per descriure els processos implicats en la millora de la qualitat de l'aigua.*

Els aiguamolls construïts són una tecnologia de tractament d'aigües residuals que s'utilitza amb èxit des de la dècada dels 70 en poblacions de fins a 2000 p.e. Aquests sistemes, consisteixen en una excavació de menys d'un metre de profunditat i recoberta d'una membrana impermeable, que es rebleix de material granular i es planta amb plantes típiques de zones humides. L'aigua residual es fa circular a través del material granular i, és durant el transcurs a través d'aquest que es desenvolupen una sèrie de processos, físics, químics i biològics que milloren la qualitat de l'aigua.

Els aiguamolls construïts compten amb una sèrie d'avantatges respecte a les plantes de tractament convencionals, com són la baixa inversió inicial, el reduït consum energètic, la baixa producció de fangs i el fet que requereixen poc manteniment i que aquest el pot dur a terme personal poc qualificat. Aquests sistemes s'utilitzen com a tractament secundari i terciari de l'aigua residual i el seu efluent compleix, generalment, amb els paràmetres de qualitat exigits per la llei.

No obstant, els aiguamolls construïts són sistemes complexos, i el tractament de l'aigua al seu interior es du a terme per mitjà de diversos processos que es desenvolupen simultàniament. Aquest fet complica la seva comprensió i fa necessari considerar vies alternatives a les estrictament experimentals per tal d'entendre el seu funcionament i optimitzar-ne el disseny. És per això que a principis de la última dècada van començar a aparèixer els primers models numèrics d'aiguamolls construïts. Aquests primers models consideraven els aiguamolls com a caixes negres i tenien com a objectiu reproduir les concentracions efluentes dels diferents contaminants a partir de les concentracions a l'afluent. Recentment, han aparegut models més complexos, que, no només permeten predir les concentracions efluentes sinó que també descriuen part dels processos que es donen al seu interior. Aquests processos són representats mitjançant equacions típiques

de models de fangs activats i descriuen els processos de degradació i transformació de la matèria orgànica i altres components típics de l'aigua residual.

El present article presenta un model d'aiguamoll construït utilitzant com a base el paquet de software Comsol Multiphysics (CM) al qual se li han introduït les equacions del model biocinètic Constructed Wetlands Model number 1 (CWM1)[1] (basat en les sèries de models ASM per fangs activats) per descriure els processos de degradació i transformació de la MO, nitrogen i sofre de l'aigua residual.

El CM és un entorn de simulació amb elements finits que incorpora les equacions diferencials més comunes per resoldre diversos fenòmens físics. El model presentat, desenvolupat en la plataforma CM, se subdivideix en dos models. El model base descriu el flux d'aigua a l'aiguamoll mitjançant la llei de Darcy, mentre que el transport i reacció dels diferents contaminants és descrit amb l'equació de transport en medi porós saturat per cadascun dels components considerats en el CWM1. Les equacions del CWM1 s'han acoblat al terme de reacció de les respectives equacions de transport. El model CWM1 té en consideració 16 components (8 solubles i 8 particulats) i 17 processos, com són la hidròlisi per part dels bacteris fermentadors i els heteròtrofs, la lisi dels diferents microorganismes i els creixements aeròbics o anaeròbics d'aquests.

Actualment s'està treballant en el procés de calibrat i validació del model 2D amb dades experimentals obtingudes en un aiguamoll real a Les Franqueses del Vallès per [2]. Les principals característiques d'aquest aiguamoll es mostren a la Taula 1.

Taula 1. Principals característiques de l'aiguamoll simulat.

Geometria del llit	Longitud (m)	10,3
	Amplada (m)	5,3
Medi granular	Porositat	0,41
	Cu	1,6
	D <sub>60</sub> (mm)	10
	Conductivitat hidràulica (m/d)	14,76
Propietats hidràuliques	HLR (mm/d)	36
	HRT (h)	132
	Profunditat d'aigua (m)	0,5-0,525

## REFERÈNCIES

- [1] Langergraber, G., Rousseau, D. P. L., García, J., & Mena, J. (2009). CWM1: a general model to describe biokinetic processes in subsurface flow constructed wetlands.
- [2] García, J., Chiva, J., Aguirre, P., Alvarez, E., Sierra, J., & Mujeriego, R. (2004). Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size.

## INVESTIGACIÓ + ENGINYERIA PER A UNA ZONA COSTANERA MES SOSTENIBLE

**Agustín Sánchez-Arcilla<sup>1</sup>, Manuel Espino<sup>1</sup>, José Antonio Jiménez<sup>1</sup>, Vicenç Gràcia<sup>1</sup>, Marc Mestres<sup>1</sup>, Joan Pau Sierra<sup>1</sup>, César Möso<sup>1</sup>, Francesc Xavier Gironella<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM/UPC), Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental (DEHMA), Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona (ETSECCP), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC); Jordi Girona 1-3, D1 Campus Nord, 08034 Barcelona, Spain; e-mail: agustin.arcilla@upc.edu

**Paraules Clau:** mar, costa, enginyeria, solucions, clima, canvi, modelat.

**Resum:** *Aquest article presenta tres projectes que han contribuït a desenvolupar noves eines per a millorar el projecte d'estructures i actuacions d'enginyeria civil a la zona costanera. L'objectiu és plantejar com es poden fer servir aquests nous models i coneixements per a un millor aprenentatge i, eventualment, una millor enginyeria civil a la frontera mar-terra.*

### 1. INTRODUCCIÓ

La costa és un territori limitat amb una varietat d'usos i conflictes que requereixen infraestructures típiques d'enginyeria civil com ara ports, espigons, emissaris, ... El projecte d'aquestes infraestructures i el seu manteniment precisen considerar els aspectes resistents, funcionals i l'impacte ambiental associat. Per aquest motiu es fan servir eines avançades que fins fa pocs anys, no estaven disponibles. Aquestes eines s'han beneficiat del desenvolupament recent dels equips de mesura (òptics i acústics), de les tècniques numèriques de simulació i, en general, de l'avanç en el coneixement tant del clima marítim com dels processos físics que tenen lloc a la frontera terra-mar.

### 2. PLANTEJAMENT

Aquesta comunicació presentarà els resultats de tres projectes de recerca recents desenvolupats dins del *Laboratori d'Enginyeria Marítima LIM/UPC (Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona-ETSCCP)*. Aquests projectes han permès desenvolupar nous enfocaments i models i la seva incorporació a la docència dins de la nostra Escola. El primer d'aquest projectes, amb col·laboració amb l'Ens públic *Puertos del Estado*, mostra com es pot controlar i predir la qualitat d'aigües costaneres particularment al voltant de ports importants com ara Barcelona o Tarragona, amb platges d'una gran importància turística al seu voltant[1].

El segon projecte, promogut per la Generalitat de Catalunya, presenta com es pot realitzar un diagnòstic actualitzat de l'estat erosiu de la costa Catalana fent servir imatges aèries, campanyes batimètriques i les mes recents tècniques d'anàlisi i càlcul de volums i transport de sediments.

El tercer projecte, dins del 7è programa marc de la Unió Europea, té com a objectiu millorar la capacitat actual per predir vent, onatge i corrents a la zona costanera amb una alta resolució i grau de fiabilitat, com correspon per prendre decisions en aquesta zona amb

important conseqüències econòmiques (tancament d'un port, condicions per a ús d'una platja, etc...).

Dins d'aquesta línia de predicció operacional amb alta resolució, com correspon als dominis costaners on es fan les actuacions d'Enginyeria Civil, podem considerar la importància de temporals energètics a la Costa Catalana, donat que son els responsables dels grans canvis que experimenta la bora costanera. La predicció del fenomen i la resposta morfodinàmica associada és fonamental per a qualsevol actuació d'emergència o preventiva i gairebé la totalitat dels països desenvolupats, Catalunya no és una excepció, han de disposar de models capaços de predir les condicions morfodinàmiques associades a la informació meteorològica i d'onatge ja disponible per a un horitzó de dies.

L'objectiu d'aquesta recerca, és avaluar la funcionalitat d'un sistema de previsió morfodinàmica, operacional amb les escales de temps i espai condicionades per la corresponent previsió meteorològica i oceanogràfica, i fer servir els resultats morfodinàmics com una eina per a la gestió dels riscos costaners. L'anàlisi que plantejarem es centra en l'estudi de la resposta morfodinàmica de la *Barra del Trabucador* (*Figura 1*), una platja de 5km de longitud situada al hemidelta Sur del riu Ebre i que en els darrers 20 anys ha hagut de ser reconstruïda artificialment diverses vegades per l'efecte dels temporals.

La recerca desenvolupada ha consistit en combinar un model meteorològic amb un d'oceanogràfic i un de morfodinàmica. Aquest sistema, encara no operatiu, s'ha anomenat *PREMOS* (*Pre-Morphodynamic-Operational-System*). *PREMOS* està estructurat en un mòdul meteorològic, basat en la predicció del Servei Meteorològic de Catalunya, un mòdul hidrodinàmic, basat en el model *SWAN*[2] i un mòdul morfodinàmica basat en el model *XBEACH*[3]. Tots aquests models són de codi obert i molt estesos i reconeguts dins la comunitat científica internacional.

Per a validar la efectivitat del sistema *PREMOS* s'ha reproduït el temporal d'Octubre de 2003. Aquest episodi ben energètic per a la costa Catalana, va resultar en afectacions amb danys econòmics importants tant en infraestructures com en la resposta del sistema de platges. En particular va suposar el trencament de la *Barra del Trabucador*, amb la alarma social i les repercussions que això té. A la *Figura 1* mostrem la batimetria i topografia obtinguda mitjançant fotos aèries. Com es pot comprovar, a la part dreta de la figura, *PREMOS* és capaç de reproduir el trencament de la barra així com el senyal morfodinàmic produït pel temporal. Mes específicament això suposa reproduir qualitativament be els canals que tallen la barra i la acumulació de sorra a la part posterior de la mateixa.

La qualitat dels resultats obtinguts recolza la utilitat d'aquestes eines de previsió operacional, tant pel que fa a la meteorologia (d'un ús més habitual avui en dia) com pel que fa a la oceanografia física (onades i corrents) o morfodinàmica (evolució de la planta i perfil d'una platja). Amb aquestes eines es pot gestionar amb informació avançada sistemes costaners vulnerables com poden ser les zones costaneres baixes dels deltes o aiguamolls de la costa Catalana, però també trams de costa "estressats" com pot ser *El Maresme*.

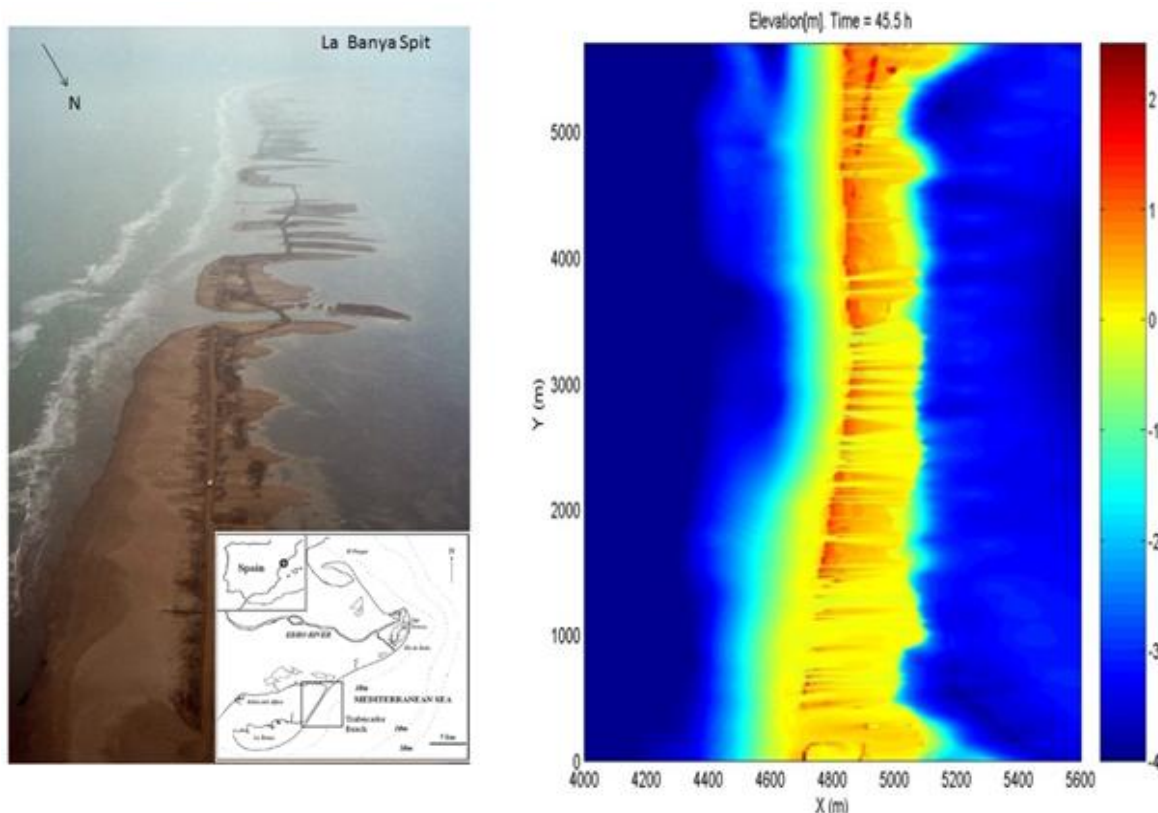


Figura 1. Trencament de la *Barra del Trabucador* (esquerra) i simulació (dreta) amb el sistema informàtic *PREMOS*, desenvolupat dins el LIM/UPB (Escola de Camins).

## REFERÈNCIES

- [1] Sánchez-Arcilla, A., Espino, M., Grifoll, M., Möso, C., Sierra, J.P., Mestres, M., Spyroupoulou, S., Hernáez, M., Ojanguren, A., G.-Sotillo, M. and Alvarez-Fanjul, E. (2010): *Quay design and operational oceanography. The case of Bilbao Harbour*. Proceedings of the 32st International Conference on Coastal Engineering, Shangai, China (June 30th – July 5th). ASCE. Paper nº229.
- [2] Booij, N., Holthuijsen, L.H. and R.C. Ris (1996): *The SWAN wave model for shallow water*, Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng., Orlando, USA, Vol. 1, pp. 668-676.
- [3] Roelvink D., Reniers A., van Dongeren A., van Thiel de Vries J., McCall R. and Lescinski J. (2009): *Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. Coastal Engineering, Vol.56, (11-12), Nov.-Dec. 2009.



# SELF-ORGANIZED MORPHOLOGICAL PATTERNS IN COASTAL DYNAMICS

A. Falqués<sup>1</sup>, D. Calvete<sup>1</sup>, N. Van den Berg<sup>1</sup>, F. Ribas<sup>1</sup>, A. Fernández<sup>1</sup>, M. Caballeria<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Departament de Física Aplicada: falques@fa.upc.edu, <sup>2</sup>Escola Politècnica Superior, U. Vic

**Keywords:** Coastal engineering, geomorphology, mathematical modelling, sandy beaches.

**Summary:** the meaning and significance of self-organization processes in coastal morphodynamics is presented. Two types of coastal self-organized patterns are discussed: crescentic bars in the surf zone and free shoreline sand waves emerging along coastlines where the wave incidence is very oblique to the shore. The coupling between wave breaking and bathymetry in the surf zone is presented as the mechanism which is responsible for crescentic bar formation. Numerical modelling illustrating this process is presented. Shoreline sand waves are described and numerical model results showing their growth and propagation are shown.

## 1. INTRODUCTION

The coast is one of the most dynamic environments of the Earth and at the same time has an enormous importance from a societal, economical and environment point of view. Indeed, a large fraction of the world population lives at the coast or near it and many economical activities as tourism, industries, fisheries, etc. take place at the coast. Also, many coastal areas as river deltas (e.g., Ebro Delta) are vital for the biodiversity. Therefore, knowing and understanding the physical processes that govern the dynamics of coastal morphology is a major research theme.

The coastal dynamical system has two basic components: i) an external forcing which is accomplished by waves, tides, coastal currents, wind, human intervention, etc. and ii) an internal dynamics which is governed by water motions in combination with the changing morphology, where the key point is the transport of sediment by the water (and air) motion. Although coastal morphodynamics is highly complex, from a conceptual point of view one can distinguish between forced processes and self-organized processes. In the forced processes the response of the system is simple dictated by external forcing and directly show the time and length scales of this forcing. For instance, if we built a groin perpendicular to a beach interrupting the dominant littoral drift, a sand accumulation will occur at the updrift side. The position and the shape of the sand deposit directly depend on the position and dimensions of the groin and the wave climate. This is an example of forced response. On the contrary, if a shore parallel bar develops rip channels and a crescentic shape, the shape, the exact location and the alongshore spacing of the rips has nothing to do (directly) with the wave forcing. They depend on the internal dynamics of the system: coupling hydrodynamics and morphology via the sediment transport. This is an example of self-organized response. From a practical or engineering point of view of predicting beach evolution, self-organized processes make the job much more difficult since the response of the system is then much



more complex featuring patterns in time and space which are not directly predictable from the external forcing.

Examples of self-organized patterns in coastal morphology are ripple-marks, megaripples, beach cusps, rhythmic sand bars, shoreline sand waves and the sand waves and sand banks in the continental shelf. Our research group has been doing research on such patterns for the last 20 years. Here we will give a brief description of our research regarding two of such patterns: rhythmic sand bars and shoreline sand waves.

## 2. CRESCENTIC BARS AND RIP CHANNELS

Breaker bars are elongated sand deposits which run roughly parallel to the coast in the surf zone. They are important because they are a reservoir of mobile sand and they protect the beach from storms as most of the wave energy dissipates at the bar. Bars can be straight or they can feature undulations that are typically rhythmic (roughly periodic, with wavelengths typically in the range of a few hundred m up to 1-2 km at most) along the coast. In this case they are known as crescentic bars (see Fig. 1). The typical time scale at which they can form, evolve and disappear is of a few days. The most offshore segments of the undulations are deeper than the most onshore ones and are known as rip channels because seaward directed strong and dangerous currents (rip currents) concentrate in these channels. Rip currents severely affect beach safety for swimming and the rip channels are important for beach erosion, since they bring offshore an important amount of sand.



Figure 1: crescentic bar (indicated by the white foam of the breaking waves) with rip channels from Long Island, New York, USA. Taken from from Google Earth.

For a long time it was believed that the crescentic patterns were forced by edge waves, i.e., nearshore trapped low frequency waves propagating along the coast. A much more plausible assumption that has now become widely accepted is that crescentic bars are self-organized patterns emerging from an instability of the straight bar. Our research group has been pioneering in this paradigm shift (Falqués et al., 2000). Essentially, waves break more on the shallow areas than on the deeper. If an irregularity in bed level arises along an initially straight bar, the more intense breaking will cause an shoreward current at the shallow and a return seaward current at the deep. These currents will transport sediment and will deposit

sand at the shallow and remove sand from the deep. In this way, a positive feedback arises and the perturbation of the alongshore uniform bathymetry will grow together with the rip current circulation. This is essentially the physical mechanism which is responsible of the deformation of a straight bar into a crescentic bar. In Figure 2 we show a numerical simulation of this process with our morphodynamic model morfo55 (Garnier et al, 2008). This model describes the wave transformation from deep water over the changing bathymetry of the surf zone, the currents generated by the breaking waves, the sediment transport by the currents and, by keeping track of the gradients in sediment flux determines the bed level evolution.

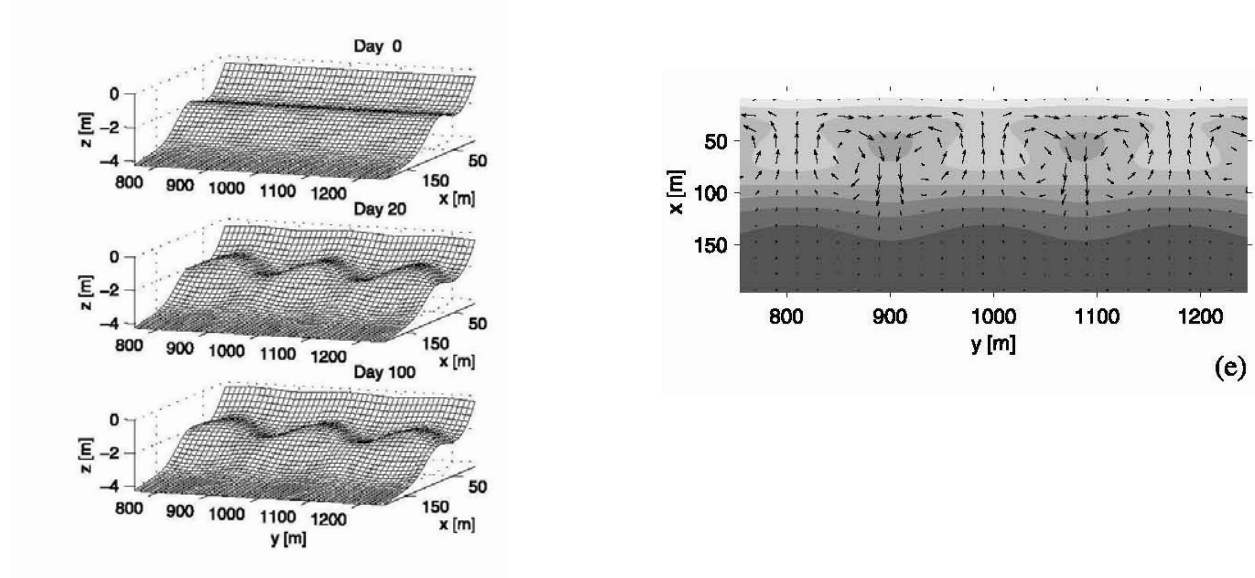


Figure 2: numerical simulation of the formation and evolution of a crescentic bar with the morfo55 model (from Garnier et al., 2008). Left: 3D view of the bathymetry; right: plan view of the bathymetric contours and the rip current circulation.

### 3. SHORELINE SAND WAVES

Shoreline sand waves are shoreline undulations that can occur at different length and time scales and can be generated by different causes. Here we will focus on self-organized sand waves that emerge from a morphodynamic instability in case of very oblique wave incidence. Their wavelengths are larger than those of crescentic bars, typically in the range of a few km's. The characteristic time scales are also much larger, of the order of a few years. If there is a dominant wave incidence direction they propagate downdrift at celerities of hundreds of m per year (Falqués and Calvete, 2005). Figure 3 shows an example from the SW coast of Africa (Namibia).

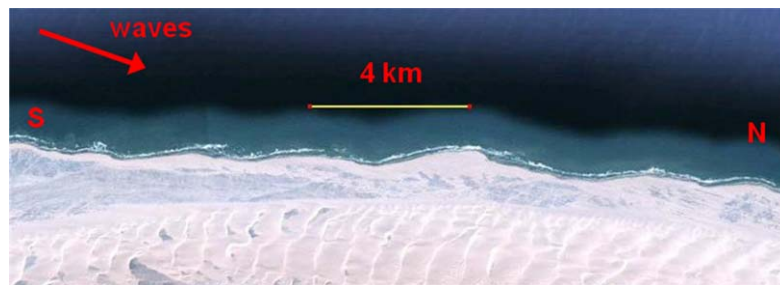


Figure 3: shoreline sand waves along the coast of Namibia. Taken from Google Earth.

We here show a numerical simulation of their formation with our Q2D-morfo model. This model is similar to morfo55 but does not resolve the hydrodynamics, it computes sediment transport directly from the waves by a parameterization. In this way it is appropriate for long term simulations at large length scales, which would be prohibitive with a model like morfo55 (2DH model). It belongs to the N-line model-type used in coastal engineering.

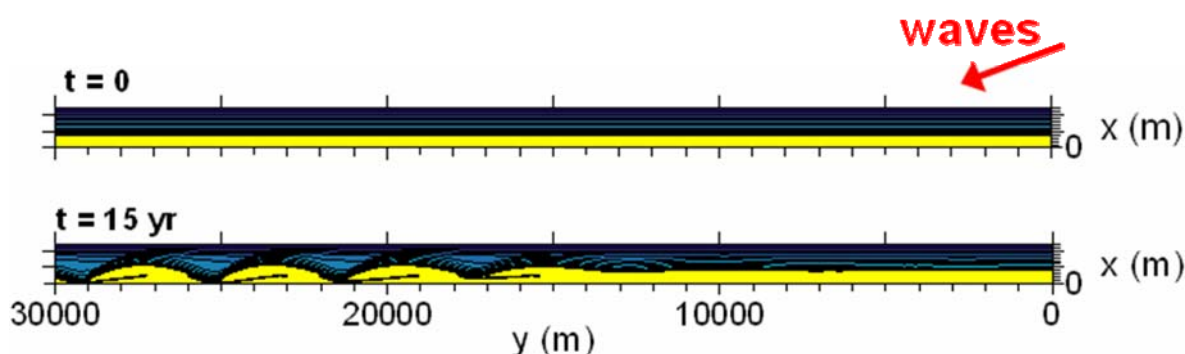


Figure 4: numerical simulation of the formation and propagation of shoreline sand waves with the Q2D-morfo model.

#### 4. CONCLUSIONS

This type of studies is not meant to make predictions for particular situations with engineering interest but to gain knowledge on the fundamental physical processes. Thus, our goal is to understand why these patterns form, which are the wave conditions and the underlying morphology that determine their occurrence, which is the main features of their shape, which is their characteristic length and time scale and where it comes from, which is their propagation celerity, etc. This type of knowledge can then be used by coastal engineers to better design beach nourishments to mitigate beach erosion, since nourishment can interact with bars or can trigger the formation of sand waves or to foresee which impact a coastal structure can have on the adjacent beaches. Large scale sand waves can be associated to the so-called erosional hot-spots that can develop at the bays of the sand wave. One of the main difficulties we encounter is the lack of systematic experimental data on bar and sand wave dynamics to test our self-organization theory. Detailed bathymetric surveys, sometimes very frequently or during long periods of time are required. Also, laboratory experiments on these morphological features have not been done yet. However, the modern improvements of the experimental techniques to monitor beach morphology like video-monitoring of beaches, satellite images, lidar surveys, differential GPS, etc. make us feel optimistic regarding the development of this research theme in the near future.

#### REFERENCES

- [1] A.Falqués, G.Coco and D.Huntley (2000): A mechanism for the generation of wave driven rhythmic patterns in the surf zone. *J. Geophys. Res.*, 105(C10), 24071-24087.
- [2] A. Falqués (2006): Wave driven alongshore sediment transport and stability of the Dutch coastline. *Coastal Engineering*, 53, 243-254.
- [3] R. Garnier, D. Calvete, A. Falqués, N. Dodd (2008): Modelling the formation and the long term behaviour of rip channel systems from the deformation of a longshore bar. *J.Geophys.Res.*, 113, C07053, doi:10.1029/2007JC004632

# AVANCES EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA PROPAGACIÓN DE OLEAJE EN ZONAS COSTERAS

David Modesto<sup>1</sup>, Giorgio Giorgiani<sup>1</sup> y Antonio Huerta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratori de Càlcul Numèric (LaCàN), Departament de Matemàtica aplicada III  
e-mail: {david.modesto, giorgio.giorgiani, antonio.huerta}@upc.edu

**Palabras Clave:** Modelos reducidos, alto orden, métodos discontinuos, NEFEM, PML

**Resumen:** *Se presentan los últimos avances en la simulación numérica de la propagación de oleaje en zonas costeras. Las nuevas herramientas numéricas permiten obtener de manera precisa y eficiente las características de la ola en las zonas de interés. A partir de un modelo reducido es posible simular en tiempo real la propagación para cualquier oleaje predominante.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La generación y propagación del oleaje desde las áreas *offshore* hasta las zonas costeras es hoy en día fuente tanto de investigación como de muchos y variados estudios ingenieriles. En multitud de aplicaciones, tales como el diseño de estructuras portuarias y sistemas de control, o análisis de operatividad y resonancia, es de vital importancia conocer las características del oleaje, usualmente la amplificación o la altura de ola, dentro de una zona de interés. Para caracterizar este oleaje, se plantea un modelo que toma los datos de periodo y dirección de ola predominantes y los propaga hacia la zona de interés.

Varias aplicaciones prácticas están asociadas a la caracterización de la agitación de la ola en el interior de los puertos. La propagación en estos casos se realiza en condiciones muy reflejantes que dominan el comportamiento del oleaje en las zonas de interés, típicamente aquellas donde la altura de ola tiene que ajustarse a la normativa vigente. El objetivo de estas aplicaciones pasa por los siguientes tres puntos:

- 1) Propagar el rango más amplio posible de oleajes predominantes.
- 2) Realizar estimaciones precisas de la altura de la ola para cada uno de los oleajes predominantes seleccionados.
- 3) Estimar la altura de ola en la zona de interés para aquellos oleajes predominantes que no se hayan considerado en la propagación.

Para este tipo de aplicaciones se registran muchísimos datos de oleajes predominantes, donde la simulación numérica de la propagación para cada uno de ellos es una tarea que puede demandar importantes cantidades de tiempo y recursos computacionales. En la práctica, por tanto, tan sólo se realizan las simulaciones para un pequeño número de oleajes predominantes, y se interpolan las condiciones de la ola en la zona de interés para aquellos oleajes no considerados en la propagación. Además del error inherente de interpolación, este tipo de simulaciones suelen presentar otros errores. Debido a las mallas de Elementos Finitos usadas, no consiguen reducir el error de dispersión de las olas en condiciones de reflexión dominante. El uso de contornos artificiales poco óptimos genera, además, reflexiones numéricas que contaminan la solución.

En esta ponencia se pretende enseñar el desarrollo de la tecnología numérica necesaria para dar una respuesta eficiente a estos problemas. Por un lado, el uso de modelos reducidos permite caracterizar la altura de ola en la zona de interés, para cualquier oleaje predominante, en tiempo real utilizando una cantidad ínfima de recursos computacionales. Por otro, las simulaciones de la propagación se realizan de manera mucho más precisa, haciendo uso de elementos grandes y de alto orden que capturan la geometría exacta, contornos artificiales óptimos y Elementos Finitos discontinuos que permiten adaptar el orden de la malla, refinándolo sólo donde sea necesario. El uso de algoritmos dedicados permite además realizar simulaciones en puertos muy grandes de manera muy eficiente, como el puerto de Barcelona, donde los detalles geométricos, la extensión del dominio y la reflexión dominante hacen necesarias mallas con varios millones de grados de libertad.

## **2. SIMULACIONES COMPETITIVAS: ALTO ORDEN, NEFEM & PML**

El modelo de propagación de oleaje empleado es el modelo Mild-Slope, ampliamente utilizado en condiciones de reflexión dominante para la simulación de las características de la ola en el interior de puertos y otras estructuras reflejantes. Es un modelo lineal que consigue reproducir los efectos de reflexión, refracción y difracción del oleaje tanto en aguas profundas como en aguas someras. Matemáticamente, el modelo Mild-Slope está gobernado por una ecuación elíptica en dominio frecuencial. Para oleajes de alta frecuencia, la pérdida del carácter elíptico da lugar a dificultades en la resolución numérica debido a la naturaleza oscilatoria de la solución, lo cual lleva asociado un error de dispersión que produce que la longitud real de la ola no sea igual que la obtenida numéricamente.

### **2.1. Elementos Finitos de alto orden**

En el entorno de estructuras altamente reflejantes, la dispersión numérica puede resultar en simulaciones muy poco precisas si no se utiliza una malla de cálculo que reproduzca la ola con suficiente exactitud. Los Elementos Finitos de alto orden presentan aquí claras ventajas respecto a los elementos de bajo orden: reducen el error de dispersión a igualdad de grados de libertad, aproximan mejor la solución y permiten utilizar algoritmos dedicados que resultan en sistemas con menos grados de libertad y, por tanto, más baratos computacionalmente de resolver.

### **2.2. Nurbs-Enhanced Finite Element Method (NEFEM)**

Utilizando elementos de alto orden, un cálculo de Elementos Finitos eficiente resulta al emplear elementos de gran tamaño. Obviamente, la caracterización de la ola en la región interior de un puerto está altamente relacionada con la geometría establecida en el diseño, por lo que normalmente se utilizan elementos con un tamaño tan pequeño como la geometría necesite. Con NEFEM, un nuevo método numérico desarrollado en [1], es posible aumentar el tamaño del elemento capturando exactamente la geometría del diseño. De esta manera, por ejemplo, se podría reducir el número de elementos necesarios en la simulación del oleaje en el puerto de Mataró cerca de un 45%.

### **2.3. Perfectly Matched Layer (PML)**

La propagación de oleaje se realiza en dominios abiertos, donde se requiere un truncamiento con un contorno artificial que acote el dominio de resolución. Una fuente de

error asociada a la propagación es debida a la reflexión numérica del oleaje en este contorno artificial. El uso de una capa numérica absorbente (PML) que amortigua esta reflexión numérica se presenta como una herramienta óptima en simulaciones de oleaje.

### 3. MÉTODOS DISCONTINUOS DE ADAPTIVIDAD-P

En el marco de cálculos con Elementos Finitos de alto orden, otra línea de investigación que se está siguiendo es el desarrollo y la aplicación de métodos discontinuos. Concretamente, Compact Discontinuous Galerkin (CDG) e Hybridizable Discontinuous Galerkin (HDG). Estos métodos se basan en una aproximación discontinua de la solución elemento a elemento, donde la información pasa de un elemento a otro por medio de flujos numéricos. El uso de estos flujos numéricos genera una estabilización inherente de la solución, que reduce drásticamente el error de dispersión.

La aproximación discontinua abre el camino a una tecnología de adaptividad-p, véase por ejemplo [2]. Esta técnica permite modificar el orden de la aproximación en cada elemento según una estima del error *a posteriori*, aumentando el orden en aquellas áreas del dominio donde sea más necesario (típicamente las zonas de mayor reflexión) y disminuyéndolo fuera de ellas. Las mallas adaptadas que se obtienen con este método permiten realizar simulaciones de alta precisión en la altura de la ola, con cálculos rápidos y eficientes.

### 4. SIMULACIONES EN TIEMPO REAL A PARTIR DE MODELOS REDUCIDOS

Con las herramientas numéricas presentadas anteriormente se consigue, de manera eficiente y precisa, estimar la altura de la ola en las zonas de interés dado un oleaje predominante. Sin embargo, el objetivo último de toda aplicación pasa por caracterizar la altura de ola para el máximo número de oleajes predominantes posible (par frecuencia-dirección) que hayan sido registrados en las áreas de *offshore*. A la práctica resulta totalmente ineficiente simular todos los oleajes registrados, por lo que se suele recurrir a técnicas de interpolación directa de los resultados, cometiendo así un error difícilmente controlable.

La solución ideal a este problema es poder simular directamente, y en tiempo real, la propagación de cualquier par frecuencia-dirección con un modelo cuatridimensional (dos dimensiones espaciales, una frecuencial y otra direccional). La resolución numérica por Elementos Finitos de este modelo es computacionalmente imposible debido al altísimo número de grados de libertad en una malla de cuatro dimensiones.

La opción es construir un modelo reducido *a priori* a partir de una nueva técnica numérica conocida como Proper Generalized Decomposition (PGD), véase [3]. La idea es descomponer el modelo en una base reducida con un número de grados de libertad muy inferiores a los del modelo inicial. Una vez calculada la base se obtiene la propagación de cualquier oleaje que se desee de forma precisa, en tiempo real, y bajo una plataforma de cálculo limitada (PDAs, móviles,...).

### REFERENCIAS

- [1] R. Sevilla, S. Fernández-Méndez and A. Huerta (2008): NURBS-enhanced finite element method (NEFEM).
- [2] J-F. Remacle, J. E. Flahert and M. S. Shepard (2003): An adaptive discontinuous Galerkin technique with an orthogonal basis applied to compressible flow problems.
- [3] A. Ammar, B. Mokdad, F. Chinesta and R. Keunings (2006): A new family of solvers for some classes of multidimensional partial differential equations encountered in kinetic theory modelling of complex fluids.





# ANÁLISIS Y PREVISIÓN DE FENÓMENOS NATURALES PELIGROSOS

R. Tolosana-Delgado <sup>2</sup>, J.J. Egozcue <sup>1</sup>, M.I. Ortego <sup>1</sup>, A. Sánchez-Arcilla <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dep. Matemática Aplicada III e-mail: [juan.jose.egozcue@upc.edu](mailto:juan.jose.egozcue@upc.edu),

<sup>2</sup>Dep. Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental (LIM), e-mail: [raimon.tolosana@upc.edu](mailto:raimon.tolosana@upc.edu)

**Paraules Clau:** vulnerabilidad, riesgo, Bayes, tendencia climática, incertidumbre

**Resum:** *La toma de decisiones referentes al diseño o en sistemas de alerta requieren el estudio de las acciones externas (frecuentemente meteorológicas), la descripción probabilista del sistema (vulnerabilidad, susceptibilidad) y los costes asociados a los efectos que se producen. Se hace especial referencia a los estudios de peligrosidad de fenómenos como vientos, oleaje, precipitación, etc. A partir de datos observados se estiman las probabilidades de ocurrencia de sucesos extremos y otros parámetros de la peligrosidad (periodos de retorno). Los métodos estadísticos utilizados son preferentemente bayesiano, los cuales permiten el control de la incertidumbre de las estimas. Se incluye el estudio de tendencias climáticas o la adquisición de datos de diferente procedencia.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las obras civiles están sometidas a multitud de cargas externas entre las cuales se encuentran las relacionadas con fenómenos meteorológicos. Relacionadas con estas acciones, se destacan dos tipos de toma de decisiones: las de diseño de seguridad y las de declaración de alertas. En ambos casos es necesario determinar el riesgo de cada una de las decisiones posibles. El riesgo es el valor esperado del coste ligado a la decisión y su cálculo requiere la determinación de los costes para cada eventualidad y, sobre todo, establecer las probabilidades de que éstas ocurran. Es decir, se trata de modelizar la incertidumbre acerca de los sucesos que causan el coste, evitando las simplificaciones que tienden a concebir acciones externas y reacciones del sistema como deterministas. Un ejemplo, relativamente simple es la determinación del nivel de seguridad para el diseño de un rompeolas sometido a temporales de oleaje. El primer estudio necesario es determinar los costes (generalizados) derivados del diseño y de las acciones externas. A cada desenlace que puede registrarse en el rompeolas (servicio, daños de diversa consideración, colapso) se le asocia un coste; A cada decisión de diseño se le asigna el coste de construcción. Conociendo las probabilidades de cada desenlace puede calcularse el riesgo y tomar la decisión de diseño óptimo.

La estimación de las probabilidades de los desenlaces provocados por las acciones debe tener en cuenta las principales fuentes de incertidumbre. La primera, la incertidumbre en la ocurrencia de las acciones (temporales de oleaje, viento, precipitación, ...) que se incluye en el modelo adoptado (proceso de Poisson evaluado, distribución de las magnitudes de los sucesos). En segundo lugar, los parámetros del modelo de acciones se suelen estimar con pocos datos dando lugar a una considerable incertidumbre estadística (Egozcue and Ramis, 2001). Una tercera fuente de incertidumbre es la vulnerabilidad del sistema que se modela mediante la probabilidad de un desenlace dada la acción externa. La estadística bayesiana es especialmente adecuada para abordar la estimación de los parámetros de los modelos utilizados en un contexto de incertidumbre como el presentado.

## 2. ESTIMACIÓN BAYESIANA DE LA PELIGROSIDAD

Los datos que se utilizan en la estimación de un modelo de ocurrencias suelen ser la magnitud de los sucesos (p.e. precipitación en un tiempo fijado, altura de ola significativa, velocidad del viento) por encima de un umbral predefinido y el tiempo en que sucedieron. Las figuras 1 y 2 muestran ejemplos de estos registros.

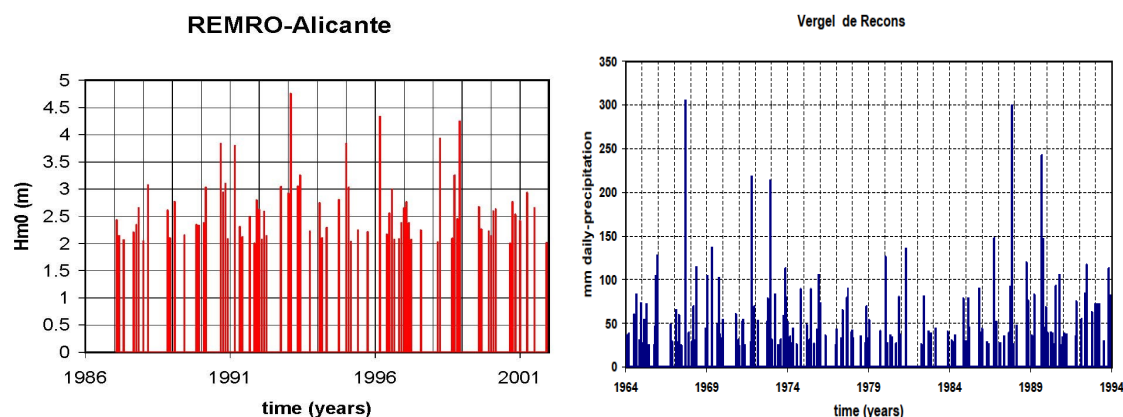


Figura 1. Izquierda: 14 años de datos extremales de oleaje (Hm0) en Alicante. Derecha: 30 años de datos extremales de precipitación en Vergel de Racons (Valencia)

Un primer paso para modelar este tipo de datos es determinar su escala. En los dos casos de la figura 1, la escala puede considerarse relativa, por lo que conviene considerar los logaritmos de las magnitudes (Sánchez-Arcilla et al., 2008). Para modelar estos datos se supone que su aparición sigue un proceso de Poisson en el tiempo, y la distribución de su exceso sobre un umbral (altura de ola 2m Hm0, precipitación 25mm/24h en la Figura 1) corresponde a una distribución generalizada de Pareto (GPD). A continuación puede estimarse los parámetros del modelo mediante técnicas bayesianas. El resultado es la distribución conjunta de los parámetros a posteriori. Es decir, no se determina un valor de los parámetros sino su distribución de probabilidad. Esto permite calcular la densidad de probabilidad de cualquier medida derivada de peligrosidad, incluyendo su incertidumbre.

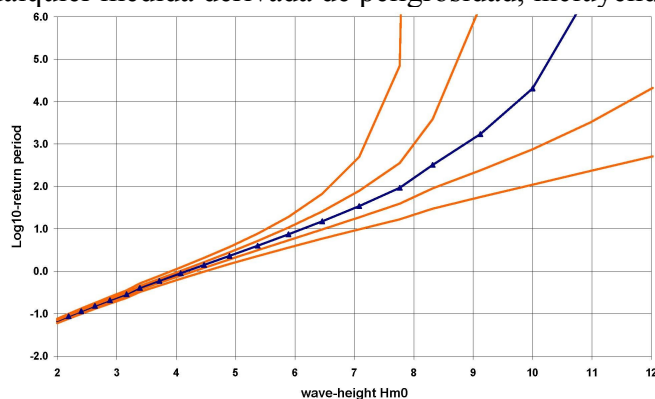


Figura 2. Periodos de retorno de log-altura de ola (línea azul) con intervalos de credibilidad de 5, 25, 75, 95% (líneas naranja). Boya Palamós. Se observa gran incertidumbre para periodos de retorno del orden de 50 ó 100 años.

La estimación bayesiana tiene la ventaja añadida de incorporar informaciones que no provienen de los datos sino del conocimiento que se pueda tener del fenómeno aparte de la que proporcionan los datos in situ.

### 3. TENDENCIAS CLIMÁTICAS

Los modelos anteriores se caracterizan porque suponen que los procesos que producen los fenómenos peligrosos son estacionarios a largo plazo. Sin embargo, existe un creciente interés por estudiar la posible incidencia de cambios climáticos, que requieren modelos capaces de describir esos cambios. Por otra parte, la escasez de datos extremos obliga a utilizar datos de diferentes épocas con distinta calibración y resulta necesario estudiar cambios bruscos en estas series (p.e. Ortego et al. 2010). La figura 3 muestra un estudio de cambio de número de sucesos de oleaje en un registro construido con observaciones directas recientes, con datos obtenidos por hindcasting. El modelo ajustado por métodos bayesianos permite la estimación simultánea de una posible tendencia lineal del número medio de sucesos y un salto en dicha media en el punto de unión de ambos registros. En el ejemplo de la figura 3 el salto en media resulta significativo pero no la tendencia lineal.

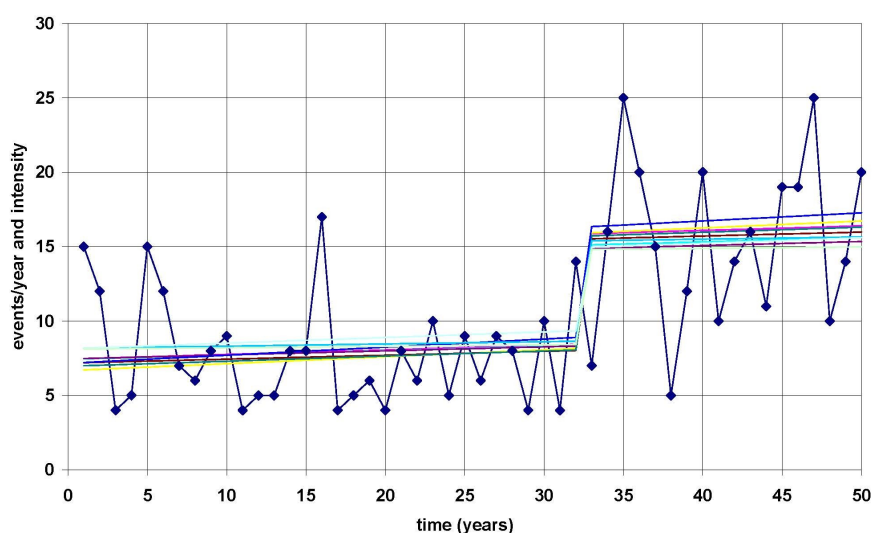


Figura 3. Número anual de temporales en Tortosa: 32 años hindcasting, 18 años observados. Líneas superpuestas: realizaciones a posteriori de la media con tendencia lineal y salto en el año 32 (i.e., posibles escenarios compatibles con los datos), que reflejan la incertidumbre del modelo.

### 4. VULNERABILIDAD

La precipitación en si misma no suele producir daños. Es el caudal recibido en un cauce, posiblemente alterado con infraestructuras, el que produce una inundación. Resulta necesario evaluar la probabilidad de que se produzca un caudal dada la precipitación que recibe la cuenca. Esta probabilidad condicionada caracteriza la vulnerabilidad del cauce. Si se trata de un rompeolas, la probabilidad de un desenlace (servicio, daños o averías) dado un tipo de oleaje caracteriza la vulnerabilidad del rompeolas. Para modelar la vulnerabilidad se recurre a modelos simulados de la cuenca y el cauce o, en el caso del rompeolas, se simula la reacción aleatoria del mismo. Esto permite establecer modelos de vulnerabilidad utilizando técnicas de regresión logística o composicional. El aspecto de estos modelos su muestra en la figura 4 en

un caso sencillo de rompeolas. Con una altura de ola incidente creciente se registra una disminución de la probabilidad de que se mantenga el servicio mientras que aumenta la probabilidad de averías; finalmente domina la probabilidad de colapso.

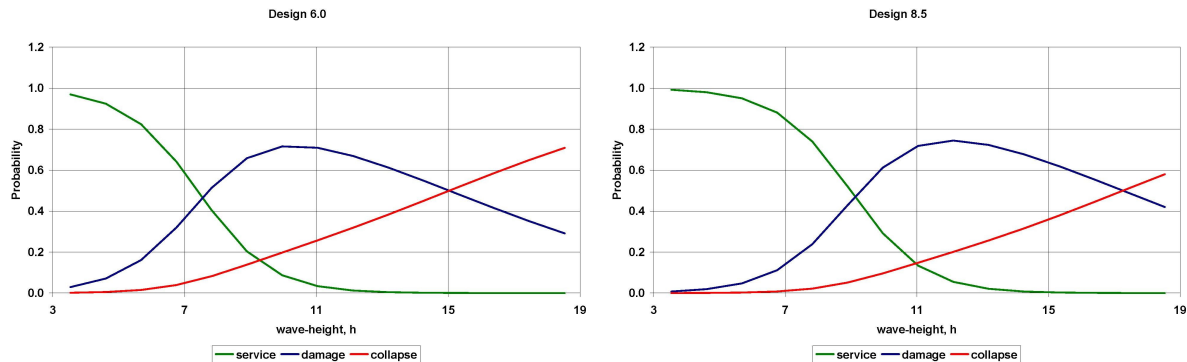


Figura 4. Vulnerabilidad de un rompeolas (simplificado) con alturas de ola de diseño de 6.0m y de 8.5m. Interpolación utilizando regresión simplicial.

La cuantificación adecuada de la incertidumbre de estos modelos aconseja utilizar técnicas bayesianas.

## RREFERENCIAS

- [1] J.J. Egozcue, and C. Ramis (2001): Bayesian Hazard Analysis of Heavy Precipitation in Eastern Spain, *International Journal of Climatology*, 21, 1263-1279.
- [2] A. Sánchez-Arcilla, J. Gómez-Aguar, J. J. Egozcue, M. I. Ortego, P. Galiatsatou and P. Prinos (2008): Extremes from scarce data. The role of Bayesian and scaling techniques in reducing uncertainty. *Journal of Hydraulics Research*, 46, extra 2, 224-234.
- [3] M. I. Ortego, J. Gibergans-Báguena, R. Tolosana-Delgado, J. J. Egozcue, and M. C. Llasat (2010): Bayesian trend analysis for daily rainfall series of Barcelona, *Advances in Geosciences*, 26, 71-76.

# THE SMA: AN EFFECTIVE DAMPER IN CIVIL ENGINEERING THAT SMOOTHES OSCILLATIONS.

V. Torra.<sup>1</sup>, A. Isalgué<sup>2</sup>, C. Auguet<sup>1</sup>, G. Carreras.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dep. Applied Physics. ETSECCPB, vtorra@fa.upc.edu, <sup>2</sup>Dep. Applied Physics. Fac. Nautica  
aisalgué@fnb.upc.edu

**Keywords:** damping, smart materials, SMA, NiTi, martensitic transformation, stayed cables

**Abstract:** *The properties of SMA (Shape Memory Alloys, that are smart materials) are associated to a first order phase transition named martensitic transformation that occurs between metastable phases: austenite and martensite. At upper temperature or at lower stress the austenite is the metastable phase. The martensite appears at lower temperature or higher stresses. The hysteresis of the transformation permits different levels of applications, i.e., in their use as a damper. Two types of applications can be considered in damping of structures in Civil Engineering. The first one is related to diminishing the damage induced by earthquakes. The second one is a reduction of oscillation amplitude associate to an increase of the lifetime for the stayed cables in bridges.*

## 1. INTRODUCTION

The characteristic patterns in an earthquake and replicas relate sets of some minutes of intense oscillations after a number of years or decades without any action. The earthquake engineering would require an excellent performance during one or two minutes, i.e., nearly 200 – 1000 working oscillations, after a lot of years at rest. Large numbers of oscillations per day (at least  $10^5$  for a frequency of one Hz) with pauses for good weather of several hours or days could be the typical dynamic of stayed cables in bridges.

This work is focused into the realistic analysis of the behavior of a SMA alloy damper used in a “facility”: one steel portico (2.5 x 3.5 m) for a family house working as a shaking table in one dimension. The results establish the excellent damping effect of the SMA (in CuAlBe and in NiTi). Furthermore, the requirements corresponding to stayed cables for bridges were analyzed: the number of expected oscillations per each event that easily overcomes one million of oscillations. In particular, the fatigue - life behavior for the NiTi alloy and the suitable thermo-mechanical training treatment was studied avoiding the parasitic effects of SMA creep on cycling. At the end, three examples show the application of SMA damper to reduce the oscillation amplitudes in the portico and in two facilities using two “similar” and realistic cables built with steel wires. One with a length of 45 m (four sets of steel wire of 15 mm of diameter) and stressed by 250 kN. The second one, with a length of 50 m, uses one multilayer steel wire of 57 mm diameter stressed by 1000 kN.

## 2. CYCLING EFFECTS: THE FATIGUE/FRACTURE LIFE SMA

The first parameter required in damping to reduce the oscillation amplitude is that the fracture life overcomes the number of required working cycles. The use of SMA for stayed cables

requires a long lifetime of the alloy i.e., more than one million of cycles in comparison with 1000 working cycles for mitigation of earthquakes. The maximal stress ( $\sigma_{MAX}$ ) is a function of the maximal working cycles ( $N_f$ ) by the Basquin law:

$$\sigma_{MAX} \text{ (MPa)} = 170 + 7920.9 * (N_f)^{-0.398}. \quad (1)$$

The approximate fit is in Fig. 1 left. For instance, the fatigue-fracture process was controlled by the martensitic phase transition not by the dislocation glides as in classical materials.

### 3. THE SMA CREEP, TRAINING AND TEMPERATURE EFFECTS

In the “as furnished” wire the initial transformation stress (for instance via sinusoidal cycles at 0.01 Hz) usually was close to 3 kN or 630 MPa. Series of 20 or 100 sinusoidal cycles at 0.01 Hz and 8 % of deformation reduces the initial maximal stress and, also increases the permanent initial deformation. Moreover, the retransformation was submitted to minor changes. Use of SMA in dampers requires an “invariant” length of the SMA wires when works. In general, the length increases progressively in the initial sets of cycles. Supplementary increase appears with an increase of cycling frequency, oscillation amplitude or the external temperature. An appropriate training is always necessary for satisfactory work. The hysteresis energy is a function of the cycling frequency as indicates the figure 1 right.

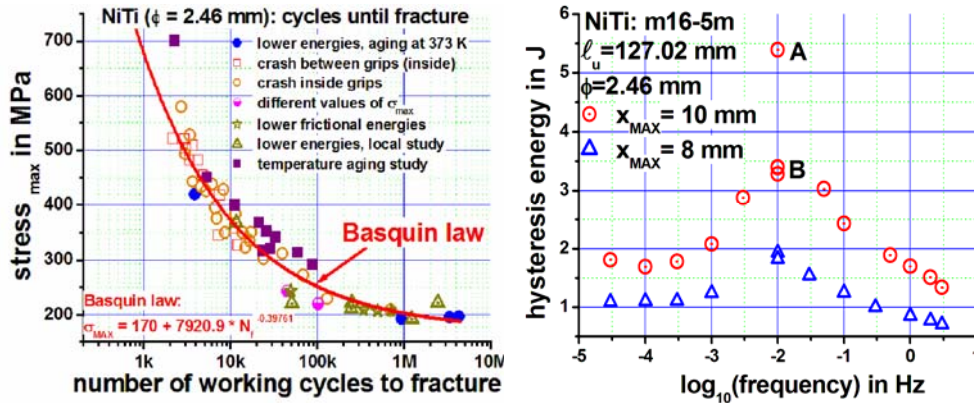


Figure 1. Left: The stress against the fracture life for NiTi. For fracture overcoming 500k cycles the used deformation remains under 1.5 %. Right: Evolution of hysteresis energy against the cycling frequency

The experimental values show relevant changes in the hysteresis cycle induced by the air currents (i.e., in laboratory measurements by the fan effects). To reduce the uncertainty in the numeric results of simulation was convenient the use of hysteretic cycles determined at frequencies near the particular frequencies of the application. In fact, in dampers situated in a bridge in free contact with the external weather, the numeric results are semi-quantitative.

### 4. EXPERIMENTAL RESULTS IN “FACILITIES”

The test of the SMA behavior was carried out in a “shaking table” in 1-dimension (see Fig. 2 left). The portico in steel [1] is mounted over a chariot with 10 wheels moving inside two U-

shape guidelines and was protected by supplementary reinforced walls for “out-of-plane” oscillations [2]. The SMA dampers (near 700 mm length) were installed in the portico diagonals and joined to the frame with steel cables. In the outlined example, Fig. 2 left, the four boxes (global load near 2120 kg) are situated on the top of the portico beam and the actuator realizes 40 sinusoidal oscillations at one Hz and  $\pm 15$  mm. When SMA damper (CuAlBe) was introduced with a pre-stress force of 1.38 kN, the oscillation amplitude reduces to near the 40 %, and the frequency spectrum is extremely reduced (Fig. 3 left).

The study of SMA in damping for stayed cables several measurements were carried out in the cable no 1 of the ELSA - JRC - EU laboratory facility. The cable no.1 (Fig. 2 center) with length of 45 m and four sets of steel wires is filled with wax that produces an intrinsic and relevant “self damping”. Only one trained wire (by 100 cycles) of NiTi SMA was used (2.46 mm of diameter and 4.14 m of length). The analysis was devoted to determine the oscillations induced by external periodical forces (roughly 49, 98 and 196 N) at the resonance frequencies of 1.8 Hz (free) and 2.05 Hz (SMA). When the SMA is included, several values of pre-stress are studied. The maximal cable oscillations, for instance  $\pm 80$  mm, are equivalent to deformations below 3.9 % in the SMA wire system. When the oscillations produce a deformation below 0.5 % in the SMA system the working point remains in the elastic part without energy dissipation in the SMA. In this case, only the intrinsic effect of wax reduces the oscillation amplitude. The analysis is performed without and with the SMA as shows the Fig. 3 center. The action of SMA reduces the maximal amplitude to 1/3.

The experimental equipment in IFSTTAR, Nantes, France (Fig. 2 right) permits a vertical displacement (up) of the cable by a measured force. The excitation is realized by the sudden release of the stress. The action (a Heaviside return) induces oscillations on the steel cable. Some results obtained in the 50 m length ( $\ell$ ) steel cable with 57 mm of diameter are shown in the Fig. 3 right. The experimental observations were realized inducing oscillations in the middle of the cable without (free cable) or with the SMA damper by two NiTi wires of 1260 mm long. Other tests were realized situating the actuator or the damper in cable lengths as  $\ell/4$ ,  $\ell/6$ ,  $\ell/8$  and  $\ell/16$ .

The vertical position of the cable (the oscillation amplitude) is detected by a laser, and the results are stored at a sampling of 300 Hz. The Fig. 3 right shows the time evolution of the oscillation amplitude without the SMA after a return of Heaviside signal of 4 kN. The spontaneous damping in the free cable was extremely low (25 % in one minute). The same figure includes the effect of a damper with two wires of NiTi SMA. The effect of the SMA induces one reduction of the oscillation amplitude to near “zero” in less than “ten” seconds. Simulations have been made with ANSYS with good agreement between experiment and simulation [3].

## 5. CONCLUSIONS

Guaranteed behavior of the SMA in damping requires a deep study of the alloy behavior according to the requirements of the application. Their application to portico or cable oscillations in realistic systems shows an excellent damping effect. Available technical solutions for immediate applications are available.



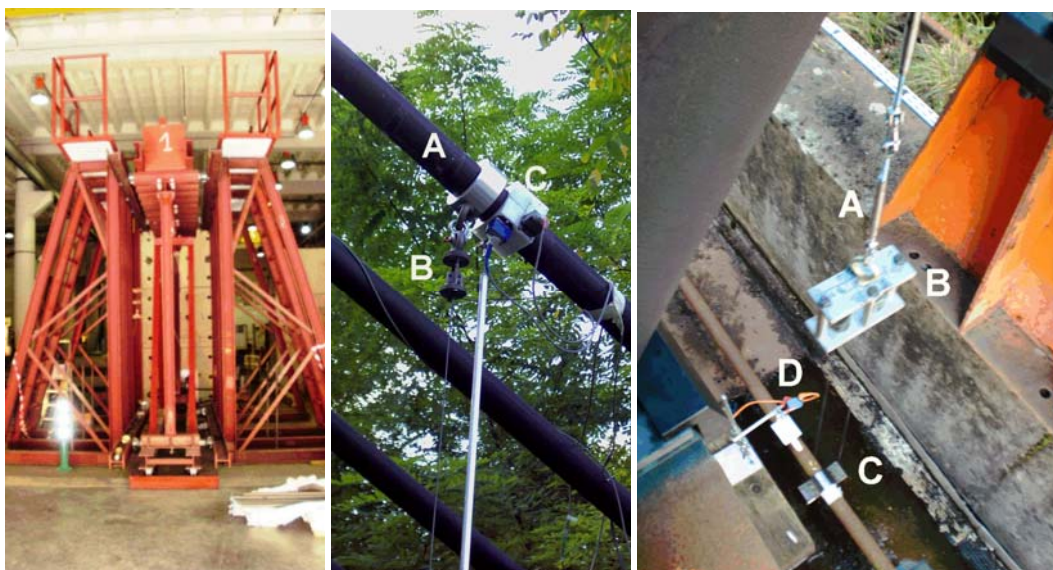


Figure 2. Left: Overview of the portico and their “out of plane” protections situated in the C1-ETSECCPB. Center: ELSA cables 1, 2 and 3. A: cable No. 1; B: SMA damper (1 wire of trained NiTi); C: accelerometers. Right: IFSTTAR cable: position near the center of the cable of the SMA damper with two SMA wires. A: shortened. B: fixation device up to 3 wires. C: fixation of wires in the cable. D: laser sensor.

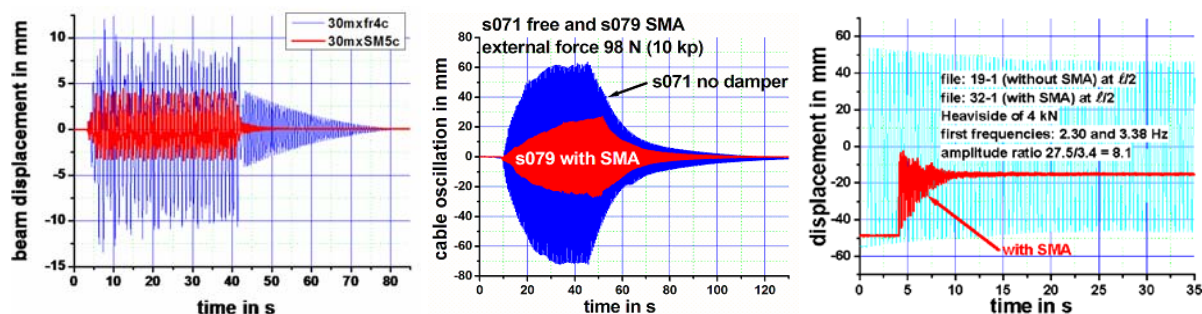


Figure 3. Left: Portico results (actuator frequency of 1 Hz and full available load): free oscillations (amplitude 20 mm) and damper (CuAlBe) amplitude (7 mm). Center: The displacements of ELSA cable no. 1 without and with one wire of NiTi. Right: oscillations in the cable of IFSTTAR without and with two wires of NiTi.

## ACKNOWLEDGEMENTS

To G. Magonette, D. Tirelli, and B. Zapico (cable No. 1 in ELSA), to L. Dieng, D. Bruhat and R. Michel (IFSTTAR cable) and to J. Lafuente (“Lab. Construcció” ETSECCPB, UPC), in portico. Projects: Fomento 2003/22 and 22/06, SMARTeR (ESF 2007-09), BIA2006-27041-E.

## REFERENCES

- [1] M. L.Perea Ibáñez (Juliol-2010), “Estudi d’una casa familiar sismo-resistent”, Tesina ETSECCPB
- [2] V. Torra, A. Isalgue, F. Martorell, F. C. Lovey and P. Terriault (2010): Can. Metall. Quart., 49(2), pp. 179-190
- [3] V. Torra, F.C. Lovey & P. Terriault (2010), “Experimental study of damping in civil engineering structures using smart materials (Cu-Al-Be – NiTi SMA). Applications to steel portico and to stayed cables for bridges (The SMARTeR project)”, School and Symposium on Smart Structural Systems Technologies, 6-9 April, 2010, a FEUP, Porto, Portugal (S3T-ESF Meeting). Published in S(3)T 2010, R. Barros, A. Preumont Eds., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ISBN: 978-989-96697-0-3, pp. 369-399

# SIMULACIÓ A ESCALA ATÒMICA DE DEFECTES EN METALLS I ALIATGES

Anna Serra

<sup>1</sup>Departament Matemàtica Aplicada III e-mail: a.serra@upc.edu

**Paraules Clau:** dislocacions, fronteres de gra, macles, dany per radiació, dinàmica molecular.

**Resum:** *Les propietats físiques dels materials amb estructura atòmica ordenada estan directament relacionades amb la estructura cristal·lina dels àtoms que els formen i, per tant, es veuen fortament modificades pels defectes d'ordenació. Aquí es presenta un resum de l'estudi de defectes creats en metalls de les estructures cristal·lines més comunes: Fe, Cu, Zr i Ti, i.e., cúbica centrada en el cos (bcc), cúbica centrada en les cares (fcc) i hexagonal compactes (hcp). En particular, es descriuen els defectes que dominen la deformació plàstica (per lliscament i maclat), els produïts per indentació i els creats en materials irradiats.*

## 1. INTRODUCCIÓ

Les propietats físiques dels materials amb estructura atòmica ordenada (estructura cristal·lina), com plasticitat (dúctil, fràgil) o conductivitat (difusió del calor, resistència elèctrica), depenen de la estructura cristal·lina dels àtoms que els formen. Donat que tots els materials cristal·lins amb temperatura més gran que zero tenen defectes intrínsecs d'ordenació i que petites modificacions locals de la ordenació poden modificar en ordres de magnitud una propietat, l'estudi dels defectes és una necessitat i un repte. A l'any 1934 es va publicar el primer article on es definia el concepte de dislocació com a un model per explicar les discrepàncies (ordres de magnitud!) entre els càlculs teòrics de l'esforç de deformació d'un cristall perfecte i els resultats experimentals. De fet les equacions constitutives emprades en el medi continu utilitzen paràmetres empírics que recullen, en promig, l'acció dels defectes. Avui, gracies a la potència de càlcul dels ordinadors, podem estudiar el comportament col·lectiu de milions d'àtoms i establir una connexió cada cop més quantitativa entre el comportament a escala atòmica i les propietats macroscòpiques. El coneixement de la configuració atòmica dels defectes, les interaccions mútues i la manera de generar-los o eliminar-los permet la fabricació de nous materials i està en la base tant de la recerca en electrònica i nano-enginyeria, com en la millora de les propietats dels aliatges emprats en la construcció de grans estructures metàl·liques, avions, reactors nuclears, etc.

La recerca del nostre grup està centrada en l'estudi dels defectes associats a la deformació plàstica (dislocacions, macles i fronteres de gra), als defectes generats en metalls irradiats (defectes puntuals i els seus aglomerats) i a les interaccions entre ells.

## 2. MÈTODE

El mètode utilitzat és la simulació atòmica per dinàmica molecular. És un mètode estàndard en l'àmbit de la simulació, tot i que cada grup tendeix a produir els seus propis codis per poder adaptar-los al tipus particular de problema a estudiar.

El sistema a simular conté les coordenades de  $N$  àtoms que evolucionen en el temps sota la interacció de les forces interatòmiques proporcionades per una llei (potencial interatòmic). El conjunt està envoltat d'altres àtoms que proporcionen les condicions de contorn necessàries

per que el sistema estudiat representi una part d'un volum macroscòpic, evitant així l'influència no desitjada de les superfícies. El nombre d'àtoms,  $N$ , depèn del defecte i pot variar des de  $10^3$  fins a  $10^7$  en els estudis més recents de nano-indentació.

El potencial interatòmic és una llei empírica o semi-empírica, de paràmetres ajustats amb valors experimentals o deduïts de càlculs *ab initio*, que representa la interacció entre dos àtoms en el sí del material.

### 3. RESULTATS

#### a) Dislocacions

Les dislocacions són defectes essencials per entendre la deformació plàstica. Des de fa més de vint-i-cinc anys estem fent recerca de tots els tipus de dislocacions en ferro (bcc), coure (fcc), zirconi i titani (hcp). En la mesura que els potencials interatòmics milloren i els ordinadors tenen més capacitat de memòria i de càlcul s'han pogut tractar interaccions més complexes. S'ha estudiat la estructura atòmica de les dislocacions, la seva mobilitat, l'esforç crític per moure-les i la interacció de les dislocacions amb els aglomerats. En la figura 1 tenim un esquema de la interacció dislocació – aglomerat en el zirconi pel cas d'aglomerats amb moviment paral·lel al pla de lliscament de la dislocació. Veiem que hi pot haver absorció de l'aglomerat, recombinació parcial i repulsió. En cada cas s'ha indicat l'esforç màxim necessari per produir la reacció.

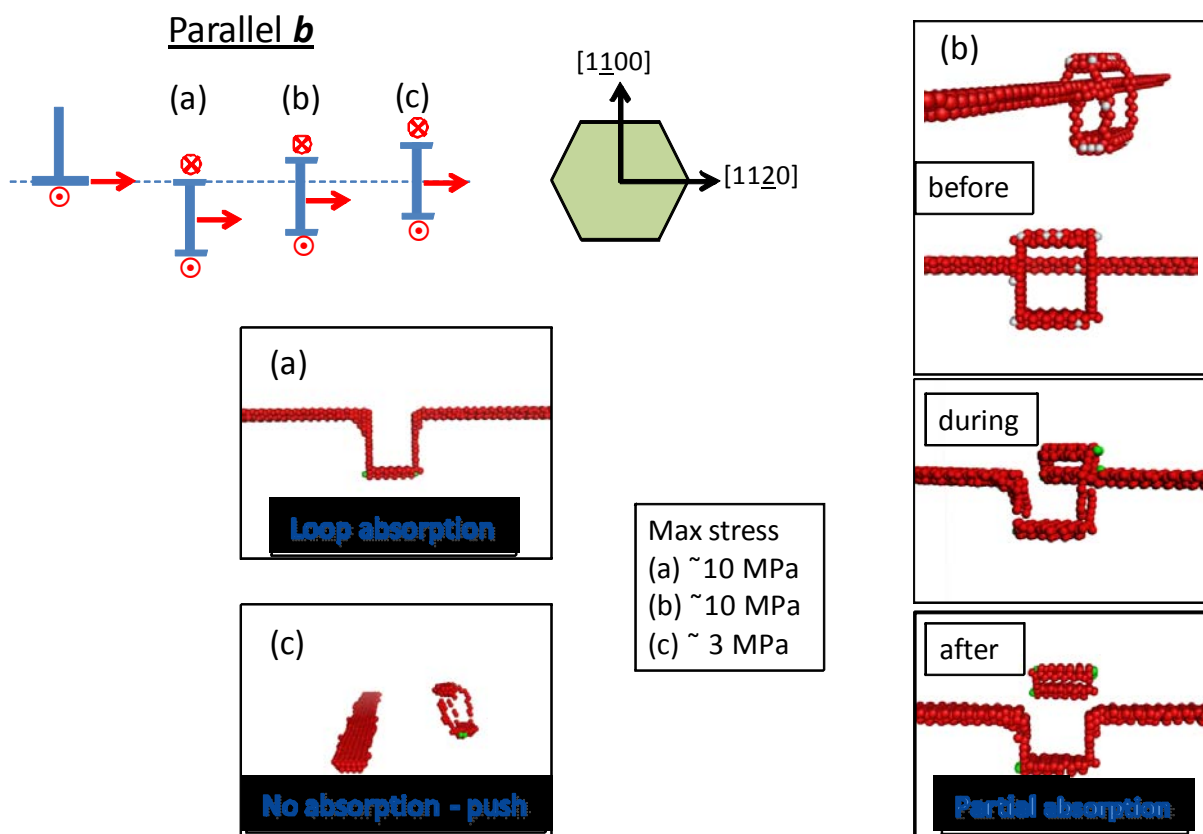


Figura 1. Interacció en el zirconi d'una dislocació de falca (defecte en línia) amb un aglomerat d'intersticials (tan sols els àtoms de la perifèria de l'aglomerat estan dibuixats).

#### b) Fronteres de gra

La recerca es basa en la teoria de Defectes en Interfases que hem aplicat des de la seva creació (veure referències 68 i 70 en [1]). Els resultats de la simulació van ser 'experiments' per contrastar la teoria. Hem explicat la transformació, observada experimentalment, de fronteres incoherents en 'plateaux' coherents limitats per dislocacions com a mecanisme d'alliberació de tensions. El treball més recent descriu el mecanisme d'acoblament de la migració d'una frontera d'angle petit amb la cisalla. Es ben conegut que les fronteres d'angle petit estan formades per una alineació de dislocacions massives. Fins ara es donava per entès que la frontera migrava per desplaçament d'aquestes dislocacions. Això implicava la necessitat d'esforços de cisalla molt grans. En la nostra recerca hem vist que hi ha un altre mecanisme molt més efectiu per moure la frontera basat en la creació de dislocacions de frontera que satisfà de manera exacta la migració i necessita esforços un ordre de magnitud més petits.

### c) Maclat en metalls d'estructura hexagonal compacta: Zirconi i Titani

El maclat és un mode de deformació plàstica predominant en els sistemes cristal·logràfics amb baixa simetria degut a la falta de sistemes de lliscament que permetin acoblar els modes de deformació. La macla és una regió on ha canviat l'orientació dels plans cristal·logràfics afavorint així la orientació dels plans de lliscament. Les macles estan delimitades per unes fronteres majoritàriament formades per un pla cristal·logràfic de baix índex. El moviment d'aquestes fronteres regeix la creació i desaparició de la macla i la interacció de les fronteres amb els altres defectes incideix directament en la plasticitat del material. Aquest moviment de la frontera de macla i aquestes interaccions són l'objecte de la recerca aquí descrita.

S'ha estudiat l'estructura atòmica de les fronteres i els defectes de línia creats en la pròpia frontera (dislocacions de macla) responsables de la translació de la frontera. El moviment d'aquestes dislocacions, que formen un graó a la frontera, són els responsables del seu creixement. El moviment és conservatiu, i no necessita processos de difusió atòmica. S'han caracteritzat les dislocacions de les principals macles, donant l'estructura atòmica, la mobilitat i esforç crític necessari pel seu desplaçament. S'ha descobert un mecanisme de creació de dislocacions de macla associat a la interacció de les dislocacions massives amb la frontera de macla. Aquesta font de dislocacions assegura la continuïtat del moviment de la frontera.

S'ha estudiat la interacció de les fronteres de macla amb els defectes produïts durant la irradiació de zirconi. Tot seguit es descriuen uns resultats com exemple de la recerca descrita.

S'ha simulat la frontera de macla (10-12) per unió de dos monocristalls girats en sentits contraris fins a fer coincidir els plans de la família {10-12}. El moviment de la frontera de macla s'ha induït per lliscament de la dislocació de macla corresponent sobre el pla de la frontera. A continuació s'han introduït aglomerats de vacants i de intersticials en un dels cristalls. Els aglomerats són mòbils i poden lliscar en el pla basal en direccions formant  $60^0$  amb el pla de macla o bé en direcció paral·lela al pla. Per tant la interacció es pot produir per apropament dels aglomerats a la macla o vice versa. S'han observat les següents reaccions:

i) restricció de la mobilitat de la frontera (inhibició del maclat), ii) canvi de la orientació i forma de l'aglomerat, iii) arrossegament a distància (drag) de l'aglomerat per la frontera, finalment, iv) total o parcial absorció de l'aglomerat per la frontera amb ulterior lliscament de l'aglomerat al ésser arrossegat per la frontera.

De lo anterior es conclou que l'esforç necessari per moure la frontera s'incrementa amb la presència dels defectes de radiació. Aquest efecte podria inhibir la creació o creixement de les macles en front d'un altre sistema de lliscament amb esforç menor; de fet hi ha evidència experimental en zirconi irradiat a dosis elevades. D'altra banda, les fronteres de macla poden actuar com a embornals o centres de recombinació dels defectes produïts per radiació.

#### d) Dany per radiació

Estudiem els defectes creats en els reactors nuclears en el marc del projecte europeu PERFORM60 [2].

En els materials bombardejats per partícules energètiques es creen parelles de defectes ‘vacant – intersticial’ que, en difondre’s pel material formen aglomerats. Aquests interactuen amb els altres defectes modificant notablement les propietats macroscòpiques com, per exemple, la temperatura de transició dúctil–fràgil.

Les característiques dels aglomerats que estudiem son la mobilitat, la capacitat de ser obstacles per les dislocacions i altres defectes així com els mecanismes que inhibeixen el seu moviment. Així, en l’estudi de la difusió dels aglomerats en ferro, mentre que en els més petits s’han detectat configuracions immòbils que disminueixen la capacitat de difusió, els més grans, visibles per TEM, son mòbils amb energia de migració molt petita i independent de la mida. D’altra banda, els elements en solució, com el carbó (C), poden disminuir la mobilitat d’aquest aglomerats, essent més eficaços quan formen complexos  $nC-mVacants$ .

#### a) Nano-indentació

S’està simulant un sistema de 8 milions d’àtoms de coure format per 2 cristalls units per una frontera (pla blau en fig.2). Les dues direccions del pa de frontera es repeteixen periòdicament simulant un bicristall de dimensions infinites. Un indentador penetra un cristall a velocitat constant creant llaços de dislocació (veure figura 2) que en arribar a la frontera queden aturats. Per que els defectes traspassin la frontera es necessita un esforç acumulat considerable. La frontera actua com una barrera per la difusió dels defectes en el cristall inferior. S’ha fet un estudi en funció de la velocitat del indentador i del seu diàmetre.

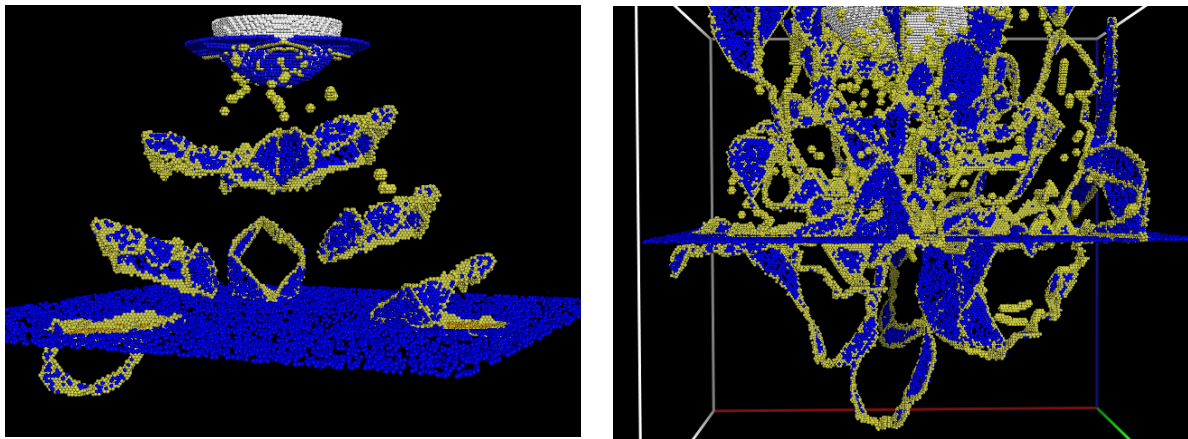


Figura 2. Nano-indentador (blanc). Tan sols els defectes estan representats (àtoms que no estan en una posició cristal·logràfica perfecta). En blau la frontera que separa els 2 cristalls.

#### REFERÈNCIES

- [1] R.C. Pond (1989), ‘Line defects in interfaces’ en *Dislocations in Solids*, vol 8, p. 1 - 66
- [2] Project del FP7 Unió Europea: “Prediction of the Effects of Radiation For reactor pressure vessel and in-core Materials using multi-scale modelling – 60 years foreseen plant lifetime”

# METODOLOGIA D'AVUACIÓ ENERÉTICA D'EDIFICIS

I. Rodríguez Cantalapiedra<sup>1</sup>, M. Bosch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departament Física Aplicada e-mail: inma@fa.upc.edu, <sup>2</sup>Departament Construccions Arquitectòniques II e-mail: montserrat.bosch@upc.edu

**Paraules Clau:** estalvi energètic, qualificació energètica

**Resum:** *El Pla d'Eficiència en el Consum de Recursos (PECR) de la UPC contempla, en una de les primeres fases, la realització d'avaluacions energètiques en les edificacions de la UPC per valorar l'estat actual dels edificis i poder establir uns indicadors del seu comportament energètic a partir dels quals establir els objectius d'estalvi i d'eficiència. Per fer aquestes avaluacions, es va crear una metodologia amb l'objectiu d'establir polítiques i definir línies d'actuació per a l'estalvi i l'eficiència en el consum dels recursos energètics i d'aigua en els edificis de la UPC que poden ser aplicades a gran part dels edificis públics.*

## 1. INTRODUCCIÓ

El marc normatiu actual sobre l'edificació està experimentant un canvi, derivat, entre altres motius, de l'aprovació, a final de l'any 2002, de la Directiva 2002/91/CE, del Parlament Europeu relativa a l'eficiència energètica dels edificis, i que s'ha transposat a la legislació espanyola.

Aquesta directiva europea obliga els estats membres a posar en vigor les disposicions legals, reglamentàries i administratives necessàries per donar compliment als requisits següents:

1. Aplicació de requisits mínims d'eficiència energètica per a edificis nous i grans edificis existents que siguin objecte de reformes importants.
2. Certificació energètica d'edificis.
3. Inspecció periòdica de calderes i sistemes d'aire condicionat.

En aquest context, s'estan incorporant, en el sector de l'edificació, noves exigències quant a la limitació de la demanda energètica dels edificis i també quant a l'eficiència energètica. Aquests objectius es concreten en el Código Técnico de la Edificación CTE, la certificació energètica dels edificis, la implantació i la utilització de l'energia solar, i amb la publicació de diferents ordenances municipals, que pretenen potenciar i fer complir actituds d'estalvi energètic i d'eficiència.

El CTE ja ha incorporat, en la seva redacció, les exigències de requisits mínims d'eficiència energètica que es tradueixen en el Documento Básico HE-Ahorro de Energía i en les eines d'avaluació associades per a la seva implementació (programes LIDER i CALENER).

Quant a la certificació energètica, cal explicar que consisteix en un procés administratiu que verificarà la qualificació energètica obtinguda per l'edifici, com a obra realment executada, respecte al seu projecte. Aquesta qualificació energètica s'obté mitjançant uns indicadors i una metodologia de càlcul, i comparant el consum energètic real de l'edifici –o el que s'hagi considerat com a necessari per satisfer les necessitats associades al seu ús– amb els paràmetres d'un edifici de referència.



És dins aquest marc que s'estava desenvolupant el projecte "Calificación Energética de Viviendas" (CEV) i que ara s'ha actualitzat amb el desenvolupament de l'eina CALENER, que amplia l'àmbit de treball a la resta de tipologies d'usos i que coincideix amb les tasques d'actualització del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).

A Catalunya s'ha aprovat també el Decret d'ecoeficiència, promogut des del Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya, que regula l'adopció dels criteris d'ecoeficiència i ambientals en els edificis de nova construcció, els procedents de reconversió d'una antiga edificació i els que resulten d'obres de gran rehabilitació. Els paràmetres d'ecoeficiència que hauran de complir els edificis fan referència als àmbits següents:

- Aigua
- Energia
- Materials i sistemes constructius
- Residus

També cal mencionar les diferents ordenances solars municipals, entre elles la de Barcelona, que ha estat un referent no tan sols a Catalunya sinó també en l'àmbit estatal i europeu i a partir de la qual s'han desenvolupat bona part de les ordenances solars que hi ha disponibles en els municipis de Catalunya.

Presentem en aquest treball la metodologia emprada per avaluar els edificis de la UPC i que un cop testejada pot servir per la valuació general d'edificis públics.

## 2. METODOLOGIA

El procés per a establir criteris d'estalvi energètic en edificis precisa de medis i col·laboracions a diferents nivells. Per tant, cal que des d'un principi es pugui comptar amb la participació i la implicació de tots els agents que intervenen en el procés.

Presentem a continuació el que podria ser un esquema bàsic de treball[1-2], organitzat en quatre grans fases diferenciades, més la prèvia Fase 0 de Pre-diagnòstic que és la que serveix per definir l'escenari d'inici dels treballs.

- Fase 0: Pre-diagnòstic
- Fase 1: Aixecament de dades
- Fase 2: Valuació
- Fase 3: Diagnosi i línies d'actuació
- Fase 4: Propostes d'intervenció

### **Fase 0: El Pre-diagnòstic**

És la primera fase de tot el procés, i està orientat a descobrir les disfuncions energètiques presents en un edifici.

Com hem dit, qualsevol iniciativa que pretengui definir criteris de millora, estalvi o eficiència energètica necessita emmarcar, prèviament, l'escenari de partida sobre el qual valorar el potencial de millora i la viabilitat dels objectius.

Aquest escenari requereix d'una informació suficient per poder identificar la tendència del consum de recursos, els factors que s'intueix poden estar condicionant aquestes tendències i, segons el nivell de detall de la informació que es disposi, identificar línies d'actuació específiques que puguin desenvolupar-se.

Com es tracta de definir l'escenari de sortida a partir de la informació disponible, el que fem en realitat és un pre-diagnòstic, ja que el diagnòstic pròpiament dit serà el resultat que obtinguem un cop s'hagi fet l'estudi, amb una anàlisi molt més detallada i a un altre nivell després de la recollida de tota la informació específica.



En el cas d'actuacions a gran escala, com pot ser un grup d'equipaments municipals, el pre-diagnòstic ha de realitzar-se a un nivell anterior al de la propi estudi de detall, i a la llarga, aquest pot derivar en la necessitat de realitzar una auditoria energètica completa.

### **Fase 1: Aixecament de dades**

És la primera fase de tot l'exercici, i en depèn el bon resultat i la fiabilitat que se'n puguin derivar en les següents fases de treball. Cal doncs que l'accessibilitat a les diferents fonts d'informació sigui facilitada al màxim pels gestors i diferents usuaris dels edificis.

També s'han de diferenciar els tipus de dades recollides com a “dades estàtiques” i “dades dinàmiques” segons les modificacions que registren al llarg del temps. Així, tenim les característiques arquitectòniques de l'edifici, que en principi no variaran i que es consideren “estàtiques”, mentre que la intensitat d'ús o les condicions de confort d'un edifici es consideren “dinàmiques”. Fem aquesta diferenciació perquè cadascuna d'aquestes dades necessita d'un treball de camp diferent i haurà de reflectir-se, també, en uns formats de documents específics.

### **Fase 2: Avaluació**

Un cop feta la tasca de recollida de dades que, com ja hem indicat, és la més entretinguda i exigeix un grau de precisió important per tal que la documentació sigui fiable, cal fer-ne una avaluació que ens servirà, a la fi, per realitzar el diagnòstic de l'edifici que s'estigui estudiant. Es tracta doncs de processar les dades recollides per tal d'avaluar els següents conceptes:

- Els consums de recursos a partir de la monitorització de comptadors quan sigui possible.
- Els consums de recursos a partir de la lectura i informatització de dades de les factures.
- La caracterització dels sistemes i aparells que consumeixen energia i que cobreixen la demanda per a climatització i il·luminació.
- I quan sigui possible, les condicions de funcionament (pel que fa a l'ocupació, el manteniment i la gestió, i als paràmetres de confort)

Amb aquestes dades es poden extreure el que anomenem índex o valors significatius, que permeten caracteritzar l'edifici.

### **Fase 3: La diagnosi**

El reconeixement del comportament energètic de l'edifici i de les seves possibilitats de millora s'obté dels diagnòstics parcials de cadascun dels àmbits analitzats: l'envolvent arquitectònica, els sistemes energètics, l'ús i la gestió. Aquest diagnòstic pot començar a definir les línies d'actuació amb que millorar l'eficiència energètica i el consum de recursos de l'edifici, sempre tenint en compte la seva viabilitat, tant tècnica, com econòmica i logística

### **Fase 4: Les línies d'actuació**

Finalment, a partir de la diagnosi es poden identificar les mancances de l'edifici i, per tant, es poden començar a plantejar les accions específiques per tal de solucionar-les. Les diferents propostes caldrà agrupar-les en el que anomenem línies d'actuació, que venen determinades per la metodologia emprada durant l'aixecament de dades i l'avaluació.

## **CONCLUSIONS**

Cal deixar ben clar que avançar cap a un consum més eficaç i responsable de l'energia amb l'establiment d'una adequada metodologia no significa reduir necessàriament els paràmetres de confort en els edificis. És més, ha de significar precisament una millora de la qualitat ambiental degut a la reducció d'emissions de gasos amb efecte hivernacle i, fins i tot, un

estalvi econòmic per la reducció de consums. Cal doncs descobrir les oportunitats d'estalvi de cada edifici i com podem reduir-ne els consums.

## REFERÈNCIES

[1] Bosch, Montse; López Fabian; Rodríguez, Inmaculada; Ruiz, Galdric. "Avaluació energètica d'edificis. L'experiència de la UPC una metodologia d'anàlisi". *Edicions UPC*. DL: 30582-2006. (2006).

[2] Rodríguez, Inmaculada; Bosch, Montse, "Involvement of Final Architecture Diploma Projects in the Analysis of the UPC Buildings Energy Performance as a way of Teaching Practical Sustainability". *Journal of Cleaner Production*, 14 (9-11): 958-962. ISSN: 0959-6526 (2006).

## MODELITZACIÓ DEL COMPORTAMENT DELS FERMS SEMIRRÍGIDS PER OPTIMITZAR EL SEU DISSENY I MANTENIMENT

Miró, R.<sup>1</sup>; Rebollo, J.<sup>2</sup>; Pérez Jiménez, F.<sup>3</sup>; Martínez, A.<sup>4</sup>

Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori

e-mail<sup>1</sup>: [r.miro@upc.edu](mailto:r.miro@upc.edu)

e-mail<sup>2</sup>: [jose.rebollo@upc.edu](mailto:jose.rebollo@upc.edu)

e-mail<sup>3</sup>: [edmund.perez@upc.edu](mailto:edmund.perez@upc.edu)

e-mail<sup>4</sup>: [adriana.martinez@upc.edu](mailto:adriana.martinez@upc.edu)

**Paraules Clau:** Ferms semirrígids, Modelització, Fatiga, Reflexió de fissures.

**Resum:** *Els ferms semirrígids estan constituïts per una o dues capes inferiors tractades amb ciment, més unes capes superiors de mescla bituminosa. Aquests ferms es deterioren per un fenomen associat a la fatiga, la reflexió de les fissures de retracció de les capes tractades amb ciment en les capes de mescla bituminosa. Així, els paviments trenquen amb el mateix patró de les fissures predeterminades en la capa inferior, veient-se afectada la durabilitat i la qualitat de la rodada. En aquest treball es vol desenvolupar un procediment de disseny, a partir d'un model 3-D del comportament del conjunt del ferm i de la determinació dels paràmetres significatius en la fatiga del mateix, per tal d'optimitzar el disseny i la rehabilitació d'aquest tipus de ferms.*

### 1. INTRODUCCIÓ

En el marc del Projecte de recerca REHABCAR “Rehabilitación de Carreteras y Autopistas” (Programa INNPACTO, Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica, 2008-2011, Ministerio Ciencia e Innovación), el Laboratori de Camins del Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori pretén analitzar la contribució de les capes superiors de mescla bituminosa per minimitzar la reflexió de les fissures de les capes inferiors tractades amb ciment dels ferms semirrígids, causa de l'acceleració del procés de fatiga i disminució de la capacitat estructural del ferm.

A partir de la determinació de la sensibilitat del conjunt estructural del ferm a les variacions de les característiques geomètriques i resistents de les capes que els constitueixen, l'objectiu es poder desenvolupar una metodologia per dissenyar els ferms semirrígids i a la vegada determinar els possibles reforços dels ferms ja malmesos o amb traces d'inici dels processos de fatiga.

Els ferms semirrígids, formats per capes superiors de mescla bituminosa (MB) i una o dues capes de base tractades amb ciment, sol-ciment (SC) ó grava-ciment (GC), que aporten capacitat resistent a flexotracció a un material granular que abans de ser tractat només tenia capacitat friccional, suposen en aquests moments una alternativa econòmica als tradicionals ferms flexibles. El seu ús s'està estenent poc a poc a reu del món com solució tecnològica per construir ferms amb una vida útil més llarga.

## 2. TREBALL A DESENVOLUPAR

En els treballs sobre ferss semirrígids, molt desenvolupats als EUA dins dels procediments de disseny Mecanicistes-Empírics del NCHRP [2], es considera que aquesta solució tecnològica presenta una alta complexitat, comparats amb els ferss flexibles i inclús amb els situats en l'altre extrem del comportament i del procés de construcció com son els paviments de formigó.

La raó principal de la complicació teòrica de la concepció del ferm semirrígid es que es tracta d'autèntiques estructures mixtes, amb les avantatges dels ferss flexibles i dels rígids, però a la vegada amb la suma de problemes i patologies dels dos sistemes.

La relació entre el mòdul elàstic de les capes superiors de mescla bituminosa i el de les capes inferiors tractades amb ciment ( $E_{MB}/E_{SC}$ ), en situacions normals, pot situar-se entre 1/4 i 1/2, però també poden donar-se situacions amb mescla bituminosa d'alt mòdul, en que el quocient  $E_{MB}/E_{SC}$  sigui de 2. Es molt important la constatació de que aquesta relació no es manté constant al llarg de l'any, donada la sensibilitat del mòdul elàstic de les MB enfront la variació de temperatura (es al estiu quan la relació de mòduls pot arribar a 1/4).

Una primera part de la feina consisteix en preparar un conjunt de models numèrics de comportament del conjunt del ferm semirrígid, per constatar la sensibilitat als paràmetres geomètrics i propietats mecàniques dels materials que els constitueixen i que a la vegada s'han d'ajustar i justificar pel seu disseny i reforç, per posteriorment poder-los calibrar i verificar.

Aquest procediment obliga a proposar una evolució del concepte de solució tecnològica dels ferss, ara amb l'ús d'unes simples taules de solucions donades (Norma 6.1-IC), a on es predeterminen les solucions a partir dels paràmetres de tràfic, capacitat portant de l'esplanada i tipus de material. No es parla de models de simulació de l'estructura del ferm, ni del tipus d'accions directes o indirectes, ni de com es caracteritzen els materials en el procés de disseny, ni de metodologia de càlcul, ni de metodologia d'assaig de comprovació de l'obra executada per comparar-la amb l'obra dissenyada. En canvi si apareixen unes lleis de fatiga, com a lleis constitutives, per comprovar, si arribes el cas, el nombre de cicles que el material, MB, SC, GC o Esplanada, poden arribar suportar al llarg de la seva vida útil, que en general estan inspirades en la línia dels treballs de la NCHRP.

La metodologia de treball endegada pretén, a partir d'eines de modelització de sols i estructures disponibles al mercat, a l'abast de tots els tècnics involucrats, determinar un mètode de disseny analític més uns protocols d'avaluació i assaig de l'obra executada, recolzant-se en l'experiència d'assajos desenvolupats al Laboratori de Camins, per assegurar que l'execució final de l'obra respon al disseny previ i que el disseny coincideix amb la capacitat d'execució al ús.

Igualment el Projecte pretén definir un protocol d'actuació per la rehabilitació d'aquest tipus de ferss, fi últim del Projecte de recerca, dels quals ja es disposen de més de 40 anys d'experiència d'execució en el nostre país, amb uns protocols d'execució determinats (PG-3) i un saber tecnològic recollit per manuals com el "Manual de Firmes con Capas Tratadas con Cemento" [1].

Conèixer i dominar la importància de cada paràmetre que participa en el disseny de la solució del ferm semirrígid es clau per entendre com envelleix i es degrada amb l'ús del tràfic, i per tant per actuar en cas de necessitat de reforç.

Es aquí on la calibració d'un model que inclogui els paràmetres més representatius del disseny es important.

L'anàlisi de la correlació entre els paràmetres analitzats i els motius de la fallida del ferm semirrígid, es basen en les característiques compartides d'aquesta solució tecnològica

respecte a ferms flexibles i ferms rígids, ja que hi ha una sèrie de propietats que comparteixen ambdós:

- 1) Els ferms semirrígids presenten el comportament tridimensional propi dels ferms rígids, ja que la capa de SC inferior, forma un tauler de panys separats per juntes induïdes en la fase de construcció, però, amb unes capes superiors contínues que ajuden a repartir la pressió de l'empremta de les rodes sobre la capa inferior, i a la vegada garanteixen la possibilitat de realitzar un manteniment de la qualitat de la rodada, sense afectar a l'estrat més resistent.
- 2) Aquestes juntes induïdes "a priori" en el SC o GC, amb geometria predeterminada que crea una discontinuïtat ordenada, ajuda a resoldre problemes tensionals que apareixerien si hagués continuïtat, però creen nous problemes tensionals en les bores de la junta i moviments induïts per accions indirectes que acaben afectant a la MB, amb reflexions de fissures i afeccions a la durabilitat del ferm [3]. Igualment aquestes tensions de bora marquen la necessitat de controlar la resistència a la flexotracció del SC.
- 3) La capacitat resistent a flexotracció és fonamentalment de la capa de SC, amb una resistència més baixa a la flexotracció que el formigó i per tant amb condicionants de distàncies entre juntes més forts i amb major necessitat de gruixos superiors de MB que reparteixin la tensió de contacte entre capes de diferents materials, per tal de reduir el nivell tensional de treball de la capa de SC.
- 4) Es dona un bon repartiment de les càrregues de tràfic amb les estructures tipus de ferms semirrígids (sense singularitats geomètriques ni tèrmiques), considerant el ràtio entre la pressió del pneumàtic i la tensió que arriba a l'esplanada just a sota de la vertical d'aquest, envers dels ferms flexibles. En canvi aquest valor disminueix en les zones properes a les juntes i a les fissures del SC. Les fissures fan de frontissa entre panys de SC i acaben reflexant-se en la MB i iniciant el procés de fatiga i deteriorament de l'estructura del ferm.
- 5) El ferm semirrígid, comparat amb el ferm flexible, presenta més baixa sensibilitat a la saturació de l'esplanada donada la rigidesa i capacitat de repartiment de la capa de SC.
- 6) El fet de disposar una capa de SC, rígida i resistent a la flexotracció, fa que hi hagi sensibilitat i resposta estructural a gradients tèrmics (la zona inferior) però amb una capa superior de MB que actua d'aïllant a la transmissió tèrmica a partir de cert gruix, material que també augmenta molt de temperatura per efecte de la radiació solar (pel color negre del mateix), el que també afecta a incrementar els possibles gradients tèrmics.
- 7) Les propietats resistents i aïllants de la capa de MB en la part superior de l'estructura del ferm semirrígid, la fa susceptible de ser conformada amb diferents capes de MB formant una sèrie estratificada concreta, d'un gruix total a optimitzar, més enllà del que ara prescriu la normativa, que pugui aportar qualitat i seguretat de rodada, repartiment de càrregues i aïllament tèrmic, a més de efecte barrera a la formació de fissures i progressió de les discontinuïtats de les juntes.

En conclusió, s'espera poder determinar la sensibilitat d'aquest tipus de ferms a paràmetres com:

- a) Caracterització de l'esplanada, amb un coeficient de balast, a partir de proves de plaques de càrrega o del mòdul elàstic dinàmic determinat a partir de processos inversos com l'ús de deflectòmetres d'impacte.

- b) Caracterització teòrica i determinació d'assajos de control i d'avaluació de les capes de SC i GC, a partir de la resistència a la compressió simple,  $f_{ck}$ , resistència a la flexotracció,  $f_{ct,m,fl}$ , mòdul elàstic de la capa,  $E$ , i coeficient de Poisson,  $\nu$ .
- c) Gruix mínim i màxim executable amb qualitat, del SC i/o GC, per raons tecnològiques.
- d) Espaiament de juntes de construcció dels panys de SC i/o GC. Avaluació de la possible capacitat de fregament entre cares de la junta formada. Profunditat de les juntes a executar.
- e) Caracterització teòrica i determinació de nous assajos de control i d'avaluació de les capes de MB, que expressin la capacitat de les mateixes a propagar fissures de les capes inferiors de SC i determinació de correlacions amb aquests assajos per tal de determinar els paràmetres,  $E$ , i coeficient de Poisson,  $\nu$ , dependents de la temperatura segons l'època de l'any i la localització geogràfica a la península, necessaris per utilitzar els models de càlcul i justificar les solucions de reforç.
- f) Procediment de predeterminació d'accions tèrmiques, gradients, sobre l'estructura del ferm semirrígid, en funció de la situació geogràfica del mateix.
- g) Alternança i disposició de diverses capes de MB, de gruixos i de propietats mecàniques diferents, per tal de compatibilitzar el seu treball amb el de la capa de SC i garantir la no progressió de les juntes de treball, prèviament realitzades en el SC com a part del procés constructiu, com a fissura finalment reflectida en la superfície i que obliga al manteniment i/o el reforç del paviment.
- h) Anàlisi de sensibilitat a la vida útil de diferents lleis de fatiga utilitzades a reu del món.

## REFERÈNCIES

- [1] Jofré, C. y Ruiz, A. (2009): Manual de Firmes con Capas Tratadas con Cemento. CEDEX-IECA.
- [2] NCHRP (2004): Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 3. Chapter 6. HMA Rehabilitation of existing pavements. National Cooperative Highway Research Program, 1-37A. Final Report.
- [3] NCHRP (2010): Models for Predicting Reflection Cracking of Hot-Mix Asphalt Overlays. National Cooperative Highway Research Program, Report 669.

# VALORIZACIÓN DE CENIZAS DE LODOS DE DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES COMO ADICIÓN EN MORTEROS (CONZEN)

Susanna Valls <sup>1</sup>, M<sup>a</sup> Carmen Navarro

<sup>1</sup>Departament Enginyeria de la Construcció

**Palabras Clave:** Cenizas de lodo, adición, morteros, propiedades mecánicas, impacto ambiental.

## Resumen:

*El presente trabajo se basa en la utilización de ceniza de lodo de origen biológico procedente de la depuradora de aguas residuales de EDAR Galindo de Bilbao, como adición en la elaboración de morteros. La adición consistió en substituir parte de la dosificación de la arena por ceniza de lodo (CLD). Se han estudiado los efectos y las consecuencias que la ceniza de lodo (CLD) tiene en el sistema de pasta y morteros, valorando la incidencia de la ceniza para cumplir ciertos requerimientos de estabilidad, propiedades mecánicas y su impacto ambiental.*

*La ceniza de lodo de depuradora (CLD) es un residuo no inerte, pero a su vez, no tóxico, siendo actualmente en su mayor parte vertido en el vertedero.*

*Se han probado 5 mezclas de adición (0, 2.5, 5, 10, 15%) en peso de cemento tanto en pastas de cemento como en morteros, el cemento utilizado ha sido un CEM II/A-L 42,5 R.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En España, hoy en día el destino más habitual de los lodos de depuradora es para usos agrícolas, alrededor de un 54%, mientras que un 22% se dispone en vertedero y un 7% se incinera. El alto contenido de metales pesados presentes limita su uso en la agricultura aumentando así la cantidad de residuo al vertedero en forma de lodo seco. Por este motivo, es de creciente importancia la necesidad del desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas que permitan dar salida a este residuo.

Una de estas salidas para este residuo puede ser la incineración, la cual actualmente, en parte, se utiliza como materia primera en la fabricación de clínquer de Portland. La incineración es el sistema más caro para reducir el volumen de lodo entre un 70% y un 90%, el cual, una vez inerte se puede disponer en vertederos controlados. En cambio en países como Francia, Austria, Dinamarca y Suiza son añadidos en matrices cerámicas.

En los últimos años la producción de lodo ha ido creciendo y, a su vez, las posibles aplicaciones como la valorización energética, los compostajes y la agricultura, son insuficientes por su posible toxicidad. Resulta cada día más evidente el incinerar el lodo para obtener ceniza y, esta utilizarla en otras aplicaciones, como puede ser la reutilización como adición en morteros [1, 2] u hormigones en masa substituyendo parcialmente la arena. Por ello, ha estado determinante su capacidad de cumplir ciertos requerimientos de estabilidad, características mecánicas e impacto ambiental.

## 2. TEXTO

La valorización química de la ceniza de lodo de depuradora (CLD) muestra que se trata de un residuo con un potencial tóxico, clasificándolo según el ensayo de lixiviación de la norma de



prEN 12457-2 como no inerte, no obstante, los niveles detectados no superan los límites de residuo tóxico. Es necesario darle un valor añadido a este residuo y buscarle una aplicación que no sea el destino final del vertido. Este trabajo pretende buscar esta aplicación como es su adición en un material de construcción, (mortero u hormigón).

Para estudiar la influencia de la adición de CLD en las reacciones de hidratación del cemento Portland, se fabricaron cinco mezclas con diferentes porcentajes de CLD (0%, 2.5%, 5%, 10% y 15%). El cemento utilizado ha sido un cemento de adición de filler calizo, CEM II/A-L 42,5 R de Cementos Molins, y la ceniza ha sido previamente molturada y tamizada (tamiz 0,064 mm) para potenciar su reactividad puzolánica.

En trabajos anteriores se pone de manifiesto que las cenizas de lodo (CLD) pueden tener reactividad en mayor o menor medida. Según el ensayo para determinar la reacción puzolánica, norma UNE-EN 196-5, la ceniza (CLD) procedente del EDAR, Bilbao, tiene reactividad siempre que esta haya sido previamente molturada.

El trabajo ha consistido en tres fases experimentales, una primera correspondiente a la adición de CLD en pastas de cemento, una segunda como sustituto parcial de la arena en morteros y por último su valorización ambiental.

#### **1- *Pastas de cemento con adición de CLD:***

En esta primera fase se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de CLD disminuyendo de la misma manera la cantidad en peso de cemento, se necesita más agua para obtener la consistencia normal en la pasta de cemento (UNE EN 196-3), hecho que hace aumentar significativamente la relación agua/cemento en cada una de las dosificaciones.

Fontes, 2004 [1] atribuye la reducción de la trabajabilidad probablemente a la forma irregular de las partículas de ceniza y a la absorción de agua sobre la superficie de las partículas de ceniza de lodo. En cuanto al tiempo que transcurre entre el inicio y final de fraguado no varía mucho entre la dosificación de referencia, la del 2,5 y la del 5%, no obstante, a partir de la sustitución del 10% de CLD este tiempo aumenta considerablemente. Los resultados reflejan que a una mayor cantidad de CLD, mayor es el tiempo de inicio y final de fraguado.

#### **2- *Adición de CLD en morteros:***

En esta fase experimental para determinar la influencia de la adición de CLD en la mezcla para elaborar morteros, también se han utilizado diferentes porcentajes de ceniza con respecto al peso de cemento, pero en este caso manteniendo constante la cantidad del mismo cemento. La adición ha sido en sustitución parcial de la arena. Teniendo en cuenta los resultados de las pastas de cemento, en donde se observaba un incremento de la demanda de agua asociado al aumento del porcentaje de la adición de CLD, que a su vez, incrementa el tiempo de fraguado, se considera mantener constante la relación agua/cemento. Los morteros han sido ensayados a flexotracción y a compresión a 7, 14 y 28 días.

Los valores obtenidos a 7 días tanto de la resistencia a flexotracción como a compresión entre las dosificaciones con ceniza y la de referencia son similares. No obstante, a 28 días los morteros con un 10 y 15% de adición de CLS muestran una mayor resistencia a compresión que el mortero de referencia (0% de CLD). Estos datos corroboran trabajos en los que se afirma que a partir del sexto día de curado se compensa el efecto retardador e incrementando su resistencia [2].

*Tabla de resultados de los ensayos a flexotracción y compresión de los morteros con adición de CLD.*

Muestra	Flexotracción (MPa)			Compresión (MPa)		
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días
Referencia	6,62	6,8	6,89	35,24	37,22	48,84
2,5%	7,15	7,4	7,38	35,81	50,5	47,67
5%	7,12	7,53	7,55	35,92	47,34	53,27
10%	6,81	9,56	8,64	35,17	50,54	59,48
15%	6,62	9,08	9,67	36,29	55,72	63,57

### **3- Impacto ambiental de los morteros con adición de CLD:**

Los morteros elaborados en la fase de caracterización mecánica han sido ensayados para determinar su *impacto ambiental*, teniendo en cuenta que el residuo (CLD) se clasifica como residuo no inerte. Los ensayos de lixiviación (prEN 12457-2) de los morteros con adición de cenizas de lodo de depuradora (CLD) fueron elaborados a la edad de 60 días de su fabricación y así poder clasificar el material para su última disposición.

Las concentraciones obtenidas en los morteros tanto de los metales pesados como de los sulfatos, cloruros y fluoruros analizados están por debajo de los valores límite admitidos por la Directiva para los residuos inertes.

El cemento Portland es el ligante hidráulico más utilizado en la estabilización y solidificación de residuos, cuya composición en el proceso de hidratación conlleva a formar una estructura sólida y porosa que permite englobar los contaminantes del residuo en su estructura cristalina. Una de las grandes ventajas del proceso es el medio alcalino que el sistema crea (pH próximo a 12,5 a 13,5). Esta alcalinidad afecta directamente al proceso de lixiviación, sobre todo en las especies metálicas contenidas en el mismo residuo, CLD. Este sistema alcalino influye en la formación de hidróxidos insolubles, la adsorción de metales pesados en la superficie del silicato cálcico hidratado, la inserción de ciertos metales en las fases hidratadas del cemento Portland, y la simple retención física en la estructura porosa [3].

Estamos en una sociedad cada vez más exigente en la cualidad de las aguas, teniendo en cuenta el impacto ambiental que provoca el aumento de los lodos producidos de depuración y la creciente demanda y construcción de estaciones depuradoras, con la consecuente acumulación de estos residuos en vertederos, pone de manifiesto la importancia de estudios que propongan soluciones sostenibles al destino final de los lodos que provienen de las EDAR. La incineración reduce notoriamente el volumen de estos residuos dando como resultado cenizas de lodo. Una buena gestión de los residuos nos ha de permitir reducir las cantidades de estos destinados a vertederos y garantizar las opciones de reciclaje y valoración.

Este estudio demuestra la viabilidad de su uso como adición, dando una nueva salida a la gestión de este residuo. Por consiguiente las empresas COMSA, PROMSA y ZICLA han sido las promotoras de este estudio y en la actualidad han ejecutado una obra como prueba piloto con dicho material. El control de obra muestra que el hormigón con un 5% de adición de ceniza como sustituto de la fracción arena presenta mejores prestaciones mecánicas que el hormigón de referencia sin adición de CLD.

El material (hormigón con adición de ceniza de lodo como sustituto parcial de la fracción arena) fue bautizado con el nombre de CONZEN, y recibió mención a premio como producto de la construcción en la última edición de Construmat-2011.

## REFERENCIAS

- [1 ] C.M.A. Fontes, M.C. Barbosa, R.D. Toledo Filho, J.P Gonçalves, (2004). Potentiality of sewage sludge ash as mineral additive in cement mortar and high performance concrete; Rilem conference.
  
- [2 ] P. Garcés, M. Pérez Carrión, E. García- Alcocel, J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero.(2008). Mechanical and physical properties of cement blended with sewage sludge ash.Waste Managament, 28 p. 2495-2502.
  
- [3 ] S. Valls (1999). Estabilización física y química de los lodos de depuradora de aguas residuales y material de demolición para su utilización en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.
  
- [4 ] Cyr Martin, M. Coutand, P. Clastres (2007). Technological and environmental behaviour of sewage sludge ash (SSA) in cement – based materials; Cement and Concrete Research; Vol 37; 9; pp. 1278-1289.

# UTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN CON ÁRIDO RECICLADO EN LA CIUDAD DE BARCELONA

**Etxeberria Larrañaga, Miren<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departament d'Enginyeria de la Construcció; e-mail: miren.etxeberria@upc.edu

**Palabras clave:** áridos reciclados mixtos, residuos de construcción y demolición, hormigón.

## **Resumen:**

*Debido a la necesidad de introducir áridos reciclados en el mercado y concretamente en Barcelona, se realizó un exhaustivo trabajo experimental en el laboratorio de Materiales de Construcción donde se determinaron las propiedades físico- químico mecánico de los áridos reciclados producidos de las dos plantas más importantes pertenecientes a Gestora de Runes de Catalunya s.a. (GRC) y se analizó el comportamiento de hormigones fabricados con áridos gruesos reciclados. A partir de los resultados experimentales, Vías y Construcciones S.A. y Lafarge ejecutaron como pruebas piloto la construcción de dos aceras de hormigón reciclado (HR) de adecuadas propiedades en MercaBarna*

## **1.- ANTECEDENTES**

La necesidad de la utilización de árido reciclado (AR) producido por las plantas de reciclaje gestionadas por GRC (1,5Mtn en 2009) en las nuevas construcciones, ha llevado a desarrollar un convenio entre GRC y el Ayuntamiento de Barcelona, mediante el cual se permite la utilización de AR para la producción de hormigones en masa de pocas exigencias estructurales. El interés demostrado por Vías y Construcciones S.A. con la colaboración de Lafarge en el análisis de la aplicabilidad de los AR procedentes de las plantas de reciclaje cercanas al área metropolitana en la fabricación de hormigones, hizo llevar a cabo dos pruebas piloto en Merca Barna a inicios del 2011. Previamente se realizó un estudio experimental en el laboratorio de Materiales de Construcción del departamento Ingeniería de la Construcción de la UPC para comprobar el comportamiento de este tipo de hormigones reciclados.

## **2.- PLANTAS DE RECICLAJE DE RCD**

Se analizó el sistema de producción de las plantas pertenecientes a GRC cercanas a la área metropolitana de Barcelona, su alta actividad y por tanto mayor interés. Las plantas elegidas fueron las de Les Franqueses del Vallés y la del Puerto de Barcelona.

Siguiendo un criterio basado en el nivel tecnológico [1], la planta de tratamiento de Les Franqueses se clasifica como planta de un nivel tres, es decir, una planta fija y estacionaria con un nivel tecnológico avanzado. La planta de Les Franqueses además de contar con una línea de tratamiento completa cuenta con elementos de eliminación de impurezas adicionales. De acuerdo a los datos de GRC de 2009, la planta de Les Franqueses trató 112.000tn de RCD.

La planta de tratamiento del Puerto de Barcelona se sitúa en un nivel tecnológico inferior (nivel 2), de un nivel intermedio. Se trata de una planta de maquinaria móvil establecida en un emplazamiento fijo. Presentan una capacidad de tratamiento inferior a las de nivel 3 y una línea de producción básica. Contrariamente a lo anunciado, la planta de Port de Barcelona trató, en 2009, 1.020.000tn. Un valor muy superior debido a la posibilidad de utilizar múltiples líneas de producción. Considerando el nivel de aceptación del RCD que entra en las plantas, estas se clasifican dentro de la categoría 2 [1]. Categoría debida a que las plantas permiten la entrada de residuos con un contenido de impurezas superior al 10% pero nunca estas impurezas presentan un contenido de materia orgánica mayoritario.

Fueron analizadas 5 fracciones procedentes de Les Franqueses y una fracción del Puerto de Barcelona.

### 3.- PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

En total, se analizaron 3 muestras de AR grueso (2 de Les Franqueses y 1 del Puerto), una muestra de AR fino y 2 muestras de todo-uno, estas de Les Franqueses.

Las propiedades geométricas y fisicoquímicas estudiadas fueron: clasificación de componentes, granulometría, contenido de finos y de arena, índice de lajas, densidad, absorción de agua, coeficiente de Los Ángeles y contenido de sulfatos.

El AR presenta una gran heterogeneidad (29% de cerámicos, 60% de hormigón y áridos, 9% asfalto, 2% impurezas) en sus propiedades debido principalmente a la calidad de RCD original y por lo tanto denominados árido reciclado mixto. Los resultados experimentales se compararon con los límites establecidos por algunas normas internacionales (UK, Brasil, Alemania, Bélgica, RILEM, Japón, España, Australia y Hong Kong) que en su mayoría sólo permiten el uso de AR grueso por su menor riesgo de impurezas y con resultados de otros autores en experiencias anteriores.

El asfalto fue la impureza que presentó mayores porcentajes en las muestras analizadas y por encima de los máximos permitidos por la norma española. Todas las muestras contenían un porcentaje de yeso inferior al recomendado aunque el contenido de sulfatos solubles de la grava de Les Franqueses se situó justo por encima del límite. En consecuencia se puede recomendar la aplicación de un control más exhaustivo del RCD que entra en la planta para minimizar la llegada de estos a la línea de producción.

Todas las muestras analizadas presentaron unas curvas granulométricas adecuadas a la norma según su tipología. Las muestras de grava no cumplieron la limitación de contenido de finos de la EHE pero todas cumplieron con las normas internacionales menos restrictivas en este aspecto. El contenido de arena fue adecuado en Les Franqueses y aceptable en el Puerto.

Con respecto al índice de lajas, todas las fracciones cumplían con solvencia el límite establecido por la EHE ya que estas plantas utilizan los equipos de trituración óptimos para la obtención de partículas con formas adecuadas.

Los valores de absorción obtenidos en áridos gruesos resultaron críticos al ser verificados siguiendo la norma española. En cambio, las principales normativas internacionales proponen valores de absorción alcanzados por estos AR. Además, los coeficientes de Los Ángeles de las muestras analizadas se establecieron, en todos los casos, por debajo del límite actual fijado en la EHE.

Por último se puede afirmar que los AR gruesos seleccionados para la fabricación de hormigón presentan unas características adecuadas de los parámetros estudiados.

### 4.- PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN

Para el análisis de la influencia del árido reciclado mixto en el comportamiento del hormigón, se fabricaron hormigones con 25%, 50% y 100% de árido grueso reciclado en sustitución al árido grueso natural. En todos hormigones se utilizó, la arena caliza y la misma cantidad de cemento con una relación agua-cemento efectiva de 0.60 y superplastificante para conseguir una trabajabilidad adecuada. Para la fabricación de hormigones se utilizaron tres tipos de cemento: CEM I 52.5 R, CEM I 42.5 SR y CEM II A-L 42.5 R para analizar la influencia en la durabilidad respecto a ataque a sulfatos.

Las fracciones de los AR mixtos gruesos utilizados de la planta del Puerto de Barcelona (4/20) y de Les Franqueses (4/16) obtuvieron una densidad y absorción de 2.07 kg/dm<sup>3</sup> y 9.79%, y 2.10 kg/dm<sup>3</sup> y 8.88%, respectivamente.

La metodología de dosificación seleccionada fue por compacidad máxima. Se analizó la resistencia a compresión (a 7, 28 y 56 días), tracción indirecta, flexo-tracción, módulo de

elasticidad, densidad y coeficiente de succión a 28 días. Se analizó la expansión por ataque de sulfatos de cada uno de los hormigones.

## **5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN**

Los resultados obtenidos tanto en estado fresco como endurecido de los hormigones fabricados fueron los siguientes:

### **5.1.- Hormigón fresco**

A medida que aumenta el porcentaje de árido reciclado en el hormigón, se dificulta el control de la trabajabilidad del mismo, siendo difícil a porcentajes superiores al 50%. Se recomienda que los AR se utilicen con alta cantidad de humedad, además de añadir, durante la fabricación, el agua que el AR será capaz de absorber en 10-30 minutos.

La consistencia de todos los hormigones fabricados con aditivos fue aceptable. La gran mayoría de los hormigones fabricados presentaron consistencias blandas- fluidas en el instante de la fabricación pero a unos 20-30 minutos la consistencia pasó a ser plástica.

Los hormigones con áridos del Puerto de Barcelona fueron los menos trabajables, y por consiguiente a los que más aditivo se les tuvo que añadir. Esto fue debido a la cantidad de áridos cerámicos con diámetro nominal de 20 mm (superior a la grava de la planta de les Franqueses aunque con una composición similar).

### **5.2.- Hormigón endurecido**

Respecto a la densidad del hormigón fabricado con AR, se puede decir que cuanto mayor porcentaje de AR se utilizó y menor su densidad, menor fue también la densidad del hormigón reciclado [2].

Debido a un tamaño menor y forma más adecuada del árido procedente de la planta de Les Franqueses, los hormigones fabricados con estos AR obtuvieron mejores propiedades que los hormigones del Puerto de Barcelona. Aunque todos los hormigones fabricados, tanto con el 50% como con el 100% del árido de la planta de Puerto obtuvieron resistencias a 28 días superiores a 17.5 MPa, por convenio estimada por el Ayuntamiento de Barcelona para esta aplicación. A 56 días, los hormigones con 100% con áridos de la planta del Puerto fabricados con CEM 42.5 y CEM I 52.5R obtuvieron 25 MPa y 34 MPa, respectivamente.

Los hormigones fabricados con áridos de Les Franqueses fueron los que obtuvieron las mejores resistencias a tracción, probablemente debido a una muy buena interfase entre la pasta y el árido.

Todos los hormigones estudiados padecieron un descenso del módulo elástico al aumentar el % de sustitución por AR, siendo el menor descenso el producido por los hormigones fabricados con áridos de Les Franqueses.

Respecto a la resistencia a flexo-tracción se detectó que ninguno de los hormigones estudiados alcanzaba los valores de la resistencia a flexo-tracción obtenidos por el hormigón convencional (HC). Sin embargo, todos los hormigones fabricados con 50% de AR de las dos plantas estudiadas consiguieron la mínima resistencia a flexo-tracción requerida para pavimentos portuarios (4MPa).

Respecto la capacidad y absorción capilar, se detectó que el hormigón fabricado con el árido del Puerto tenía el peor comportamiento. Los hormigones fabricados con menos del 50% de AR obtuvieron un coeficiente de succión similar al HC.

El hormigón con 100% de árido procedente de la planta del Puerto y fabricados con CEM I 52.5R o CEM II A-L 42.5 sufrieron la mayor expansión, siendo estas inferiores al 0.1% y por lo tanto muy por debajo de expansiones con riesgo de rotura [3].

## 6. PRUEBA PILOTO: CONSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO EN MERCA BARNA

Se llevaron a cabo dos pruebas pilotos de construcción de aceras de hormigón reciclado en Merca Barna. Las dos pruebas pilotos fueron llevadas a cabo por Vías y Construcciones S.A. en el periodo de noviembre 2010 y febrero del 2011 con la colaboración de Lafarge. De la misma forma, los AR utilizados en la fabricación de los hormigones fueron suministrados por GRC procedentes de la planta de reciclaje del Puerto de Barcelona.

Se determinaron las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los AR utilizados. se definió una dosificación para garantizar como mínimo la resistencia a compresión de 20 MPa. A la hora de la ejecución en obra se determinó la consistencia del hormigón fresco y se fabricación probetas para examinar las propiedades físico-químicas del hormigón endurecido.

Los ensayos de hormigón endurecido llevados a cabo fueron la resistencia a compresión a 7, 28 y 56 días, tracción indirecta, flexo-tracción y módulo de elasticidad a 28 días. Además del análisis de expansión por ataque por sulfatos.

### 6.1 Materiales utilizados

En las dos pruebas piloto se utilizó cemento CEM II A-V 42,5 R fabricado por Lafarge Montcada. En las dos pruebas piloto se utilizó arena 0/4 mm procedente de la cantera del Garraf y gravilla 11/22 de la cantera de Cervelló.

Los AR utilizados en las dos pruebas piloto procedían de la planta de reciclaje del Puerto de Barcelona con una fracción de 8/16mm. Se determinaron las mismas propiedades que en la fase experimental con resultados similares a los obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se destaca una presencia ligeramente elevada de asfalto y un nivel bajo del resto de impurezas.

### 6.2 Dosificación y fabricación del hormigón

Las dos pruebas piloto se realizaron con la misma dosificación: 260 kg/m<sup>3</sup> cemento, 50% de AR en sustitución al árido natural y una relación agua-cemento total de 0,75 (la utilización de AR para la fabricación de hormigones requirió una mayor cantidad de agua debido a su capacidad de absorción). Además, se utilizaron dos aditivos para conseguir una dosificación adecuada.

En todas las series realizadas la consistencia obtenida fue similar aproximadamente de 9 cm y el aire ocluido presente en el hormigón fresco de 2.6%.

### 6.3 Resultados y discusión de las propiedades del hormigón

La densidad del hormigón de la prueba piloto 1 fue de 2.25 kg/dm<sup>3</sup>. De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede afirmar que las propiedades obtenidas fueron más que adecuadas para la aplicación definida ya que obtuvieron resistencias a compresión a 28 días cercanos a 30MPa y de 34 MPa a 90 días. Por este motivo, se recomienda la reducción de la cantidad de cemento para este tipo de aplicaciones para optimizar los recursos.

Por otra parte cabe destacar que el orden de magnitud de los resultados obtenidos se asemejó al de los resultados obtenidos en la fase experimental. Finalmente, se puede también incidir en el hecho de que los resultados a flexo-tracción superan, del mismo modo que los hormigones al 50% fabricados en el laboratorio, los 4MPa requeridos para pavimentos portuarios. Todos los hormigones sufrieron una expansión menor al 0.02% a 6 meses de edad.

[1] Vegas, I.; Lisbona, A. et al.: "Characterization of mixed recycled aggregates for use in non-estructural concrete: influence of the treatment process". International Rilem. Sao Paulo, Brasil. December, 2010.

[2]De Brito J.; Pereira A.S. and Correia J.R.: "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates" Cement and concrete composites 27 (2005) 429-433.

[3] Athan, H.N and Dikme, D.: "Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack" Construction and Building Materials 25 (2011) 3450-3457.



## UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS “UNA OPORTUNIDAD FRENTE A LA SITUACIÓN ACTUAL”

**Marilda Barra, Diego Aponte, Sergio H. Piellarisi, Susanna Valls, Enric Vazquez,**

Departamento de ingeniería de la construcción. mail: [marilda.barra@upc.edu](mailto:marilda.barra@upc.edu),  
[diego.fernando.aponte@upc.edu](mailto:diego.fernando.aponte@upc.edu), [sergio.henrique.pielarisi@upc.edu](mailto:sergio.henrique.pielarisi@upc.edu), [susanna.valls@upc.edu](mailto:susanna.valls@upc.edu),  
[enric.vazquez@upc.edu](mailto:enric.vazquez@upc.edu)

**Palabras claves:** árido reciclado, interfases, sulfatos, hormigón, mortero, suelocemento.

**Resumen:** *El impacto ambiental de la explotación de recursos naturales y el consumo desmedido de territorio con los vertederos impulsa la obtención y aplicación de áridos reciclados. El objetivo de los trabajos de nuestro equipo consiste en abordar los principales problemas que pueden dificultar aún esta aplicación y mejorar el conocimiento del comportamiento de estos nuevos materiales.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material de construcción por excelencia a nivel mundial, y el más utilizado en todos los tipos de trabajos relacionados con la ingeniería civil, incluyendo infraestructuras, edificación, protección ambiental, instalaciones sanitarias, etc. El hormigón es producto de la mezcla de cemento, áridos gruesos y finos, agua, adiciones y aditivos. La cantidad de los áridos (tanto finos como gruesos) forman la mayor parte del hormigón y provienen de arena y grava natural o triturada. Tradicionalmente los áridos han sido de fácil disposición y a precios económicos y de las calidades necesarias para adaptarse a las aplicaciones que se les han solicitado. Sin embargo, en los últimos años, la extracción masiva de éstos debido al crecimiento de las ciudades ha sido cuestionada a nivel mundial. También ha contribuido decisivamente la excesiva ocupación de territorio por los vertederos de residuos.

### 2. ÁRIDOS RECICLADOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Las normas europeas armonizadas establecidas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) definen los áridos reciclados como: “los áridos resultantes del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en construcción”. A nivel español el Pliego de prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) plantea el uso de éstos como zahorras, materiales tratados con cemento y hormigón magro vibrado entre otros. La Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes desarrolla el reciclado in situ y en central. Y la instrucción EHE en el Anejo 15 da las recomendaciones específicas sobre la utilización del árido reciclado en hormigón y, en el Anejo 18, sobre su utilización en hormigón no estructural.

Existen normas técnicas específicas para los áridos reciclados, que suelen incorporar especificaciones para su aplicación y usos recomendados, así como criterios de seguridad ambiental que deben cumplir. Los residuos de construcción y demolición, convenientemente tratados en una instalación de reciclaje, se convierten en áridos reciclados que pueden ser utilizados como materias primas en la construcción civil y en obras públicas y privadas cumpliendo todos los requisitos necesarios.

La transformación de los residuos de construcción y demolición, en productos aptos para ser utilizados nuevamente en ingeniería civil, a través del reciclaje, requiere equipos y procesos industriales específicos y un sistema de control de la producción que garantice la calidad de los productos.

Los áridos reciclados tienen dos criterios básicos de clasificación: (i) por granulometría o tamaño máximo de partícula y, (ii) por composición del material. Esta última permite determinar el porcentaje en peso de los distintos materiales que suelen contener los áridos reciclados. En general, los materiales más usuales son: piedra suelta, hormigón, material cerámico, asfalto y materiales contaminantes, que en alguna medida pueden ser perjudiciales como yeso, materia orgánica y otros.

### 3. USOS DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

Los áridos reciclados pueden ser usados en una amplia gama de aplicaciones, como pueden ser:

- **Zahorra:** pueden ser usados capas de base y subbase.
- **Rellenos:** como material drenante, como relleno en restauraciones.
- **Suelos:** como árido en suelo-cemento o en grava-cemento.
- **Hormigones magros:** como reemplazo parcial del árido natural en hormigones para capas de rodadura en caminos y viales, o capas de base de alta calidad en carreteras.
- **Hormigones en masa:** como reemplazo parcial del árido natural en hormigón estructural en masa, o en hormigón no estructural.
- **Hormigones estructurales:** En ellos se permite ya en España un 20% de árido de hormigón reciclado mayor de 4mm.
- **Prefabricados:** como reemplazo parcial o total de áridos naturales en bloques de hormigón, baldosas, tejas, bordillos, adoquines, mobiliario urbano, etc.

### 4. ALGUNOS ASPECTOS IMPORTANTES DE LA INVESTIGACIÓN EN AR

Dentro del campo de investigación de áridos reciclados cabe destacar algunos aspectos que son relevantes y generan nuestros trabajos de investigación.

(i) **Expansión de áridos reciclados usados en grava-cemento o suelo-cemento:** como se menciona anteriormente, la normativa española permite el uso parcial o total de los áridos reciclados en unión con cemento Portland para producir bases o subbases de carreteras. El punto a resaltar es que los áridos reciclados pueden poseer un porcentaje de yeso que al entrar en contacto con el  $C_3A$  del cemento puede generar un ataque por sulfatos interno, causando la degradación del material. En la situación actual y en un futuro cercano dicha contaminación está y estará presente en la mayoría de las plantas recicladoras españolas. Situación que obliga a plantear estudios sobre la contaminación máxima permitida para no tener daños, combinación de materiales cementantes alternativos y los procesos de generación de los compuestos deletéreos con el tiempo. Este tema es objeto de la tesis de Gustavo Tovar. E

(ii) **Durabilidad de hormigones con áridos reciclados:** en la actual normativa EHE se permite el uso de áridos reciclados como reemplazo parcial de los áridos naturales hasta un 20%. Sin embargo, diferentes estudios muestran que es posible obtener hormigones con mayor contenido de árido reciclado y de igual resistencia a uno convencional, sin generar una disminución en su desempeño en durabilidad. Específicamente se ha observado que es posible que los áridos reciclados tengan un efecto sobre la fijación de cloruros, generando una mejora

en esta propiedad frente a un hormigón convencional. No obstante, se ha estudiado la cantidad máxima de árido permitido para no comprometer la durabilidad, el tipo de árido reciclado a utilizar, el tipo de cementante, y el proceso del diseño de mezcla del hormigón. Este tema forma parte de la tesis de Elaine Varela y de Viviana Andrea Ulloa.

**(iii) Diseño de mezclas de hormigones con áridos reciclados:** hasta la fecha el diseño de mezclas de hormigones con áridos reciclados se ha basado en un incremento del contenido de cemento para reducir la pérdida de resistencia a compresión generada por el mismo árido. No obstante, un incremento del contenido de cemento genera mayores inconvenientes en términos ambientales y de durabilidad. La dirección actual es valerse del contenido de mortero del árido reciclado para minimizar el contenido de cemento, y así obtener resistencias equivalentes a uno convencional sin comprometer los aspectos de durabilidad. Este es objeto de la tesis de Cristian Jimenez.

**(iv) El problema de los áridos reciclados finos:** A nivel mundial los áridos reciclados que se utilizan poseen tamaños que van de 4 a 35 mm. Esto deja un gran porcentaje de material (0 a 4 mm) sin utilizar que en la mayoría de los casos es depositado en vertederos. Al igual que los áridos reciclados de mayor tamaño los finos poseen problemas de contaminación con elementos que pueden generar expansión con el tiempo. Sin embargo, estos materiales se pueden utilizar en la fabricación de prefabricados, buscando generar una estructura interna con una porosidad determinada en la cual los elementos expansivos generados no causen daños, combinado con un cementante alternativo lo suficientemente eficiente para no comprometer las propiedades mecánicas necesarias para estos elementos. El tema forma parte de la tesis doctoral de Gustavo Tovar y las tesis de Andrea Pinochet y Mariana Jamaica.

**(v) La mejora de la calidad de los hormigones de áridos reciclados** a partir del conocimiento estructural y mecánico de las interfases árido reciclado - mortero propio y añadido. Este tema es el de la tesis doctoral de Anna Sidorova, de la tesis de master de Alexandra Descarrega y de la tesis de grado de Marcel Algué.

## 5. CONCLUSIONES

Los áridos reciclados se utilizarán de forma creciente en el hormigón y otras aplicaciones. Es necesario superar los problemas que aun surgen en su utilización. Los problemas citados son los principales temas del trabajo de nuestro equipo.



## ESTUDIO DE HORMIGONES CON ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU)

Verónica Royano<sup>2</sup>, Susanna Valls<sup>1</sup>, Marilda Barra<sup>1</sup>, Enric Vázquez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Departament Enginyeria de la Construcció e-mail: susanna.valls@upc.edu.

<sup>2</sup>Departament de Construccions Arquitectòniques II

**Palabras clave:** polvo de neumático (NFU), hormigón, propiedades mecánicas, flexibilidad, comportamiento al fuego.

### Resumen:

*Pese a las diversas aplicaciones ya estudiadas con los neumáticos fuera de uso, el elevado volumen de los mismos producido anualmente como residuo, justifica el investigar sus nuevas posibilidades de uso. Asimismo, es cada vez más importante encontrar aplicaciones en las que la incorporación de dichos residuos represente un valor añadido desde el punto de vista del desempeño del producto final. En este contexto, se considera que la producción de nuevos hormigones con polvo de neumático fuera de uso (polvo de NFU) con propiedades optimizadas, representa un avance significativo, no solo de cara a una mejor gestión de residuos, como también para la producción de hormigones con mejores prestaciones.*

*Las partículas del polvo de NFU contribuyen para la producción de una microestructura más flexible, dando lugar a un hormigón más resistente a las deformaciones por flexión y con mayor resistencia a la fatiga; que a su vez el hormigón con polvo de NFU presenta una mejora significativa de su capacidad térmica y acústica.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El consumo de neumáticos en los países desarrollados es elevado y va en aumento. Los propietarios y usuarios de vehículos, por el hecho de circular con los mismos, somos responsables del desgaste de los neumáticos que acaban quedando fuera de uso y convirtiéndose en residuo. En la Unión Europea se generaron durante el 2005 cerca de tres millones de toneladas de neumáticos fuera de uso (NFU).

Hasta la implantación de una legislación específica, una vez concluida la rodadura de un neumático, sólo un limitado porcentaje se reciclaba y empleaba como materia prima para otras aplicaciones, mientras que el resto se eliminaban en vertederos o simplemente se acumulaban sin ningún tipo de control, donde además de provocar un efecto visual negativo, se producía un riesgo medioambiental derivado de un posible incendio.

Para que el ciclo de vida del neumático sea considerado como un modelo de desarrollo sostenible, es necesario fomentar el aprovechamiento del potencial material o energético del mismo tras su vida útil. Los NFU se pueden valorizar con aplicaciones diferentes, que van desde su reutilización tras el recauchutado, hasta la valoración energética o la obtención de caucho pulverizado o granulado para fabricar diferentes productos (suelas para el calzado, pistas de atletismo, en betunes asfálticos, etc). Sin embargo, las soluciones hasta hoy existentes no suponen una alternativa efectiva al importante volumen de neumáticos generados por nuestra sociedad.

El presente trabajo desarrolla una alternativa de uso de los NFU previamente triturados mecánicamente como sustituto parcial de los áridos convencionales con el fin de aportar alguna mejora en las propiedades del hormigón.

El objetivo de este estudio experimental es determinar la influencia de la incorporación de diferentes porcentajes de polvo de neumático (5, 10 y 15% del volumen de los áridos convencionales) en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Para ello, se han elaborado diferentes hormigones utilizando dos tamaños de partículas de NFU: 1-4 mm (NFU-F) y 10-16 mm (NFU-G).

## **2. TEXTO**

La producción de nuevos hormigones con polvo de neumático fuera de uso (polvo de NFU) presenta un avance significativo, no solo de cara a una mejor gestión de residuos como también para la producción de hormigones con prestaciones optimizadas. Mediante un estudio detallado del esqueleto granular, de las características del polvo de NFU empleado, del diseño de la microestructura y de la zona de transición entre el pasta-polvo de NFU, sería factible lograr una nueva gama de hormigones con una mayor capacidad como aislante térmico y acústico, una mayor ductilidad y una mayor resistencia al fuego, al “spalling”, a los ciclos de hielo-deshielo y a la fatiga.

El estudio se enmarca en el desarrollo de un hormigón que incorpore polvo de NFU como sustituto parcial de los áridos convencionales enfocado a determinadas aplicaciones (pavimentos y las piezas prefabricadas, por ejemplo). La incorporación de polvo de NFU al hormigón daría lugar a un material que combina la flexibilidad frente a las cargas en los pavimentos asfálticos con la durabilidad y el más bajo coste de mantenimiento de los pavimentos rígidos. Por otra parte, el hormigón con polvo de NFU daría también a lugar a piezas prefabricadas con elevada capacidad aislante térmica y acústica, los cuales podrían usarse como revestimiento para fachadas o como estructura de división para viviendas entre otras aplicaciones.

Para valorar la influencia de la substitución parcial del árido convencional por polvo de NFU en el hormigón se han realizado ensayos tanto en el hormigón en estado fresco como endurecido. Las propiedades estudiadas son la consistencia del hormigón en estado fresco, la absorción capilar, la densidad y la porosidad, la resistencia a compresión y tracción indirecta, el módulo de elasticidad, el comportamiento al fuego y la microestructura en el hormigón endurecido.

Los resultados obtenidos son los siguientes en función de la propiedad estudiada:

### **2.1. Microestructura:**

El estudio de la microestructura nos permite analizar las uniones de los diferentes componentes que forman el hormigón. El árido que forma dicho hormigón es heterogéneo, está compuesto por áridos calizos convencionales y por granos de caucho o polvo de neumático (NFU-G o NFU-F) que conllevan a interfases bien distintas. Previamente el hormigón estuvo bajo un tratamiento térmico de 100°C del cual en el estudio microestructural nos muestra que la dilatación producida en el NFU-G genera tensiones internas dentro de la matriz del hormigón que la pasta de cemento no es capaz de absorber, dando a lugar a fisuras en la interfase, que no suceden en el hormigón convencional, ni tampoco en el hormigón con NFU-F.

### **2.2. Consistencia**

Los hormigones con polvo NFU-G y NFU-F experimentan un asentamiento mayor que el hormigón convencional debido a la baja porosidad del caucho o polvo NFU si se compara con el árido convencional. También se puede afirmar que el hormigón con NFU-F (fino) es más

fluido que el hormigón con NFU-G (grueso). Esto se debe a que el NFU-G tiene una geometría mucho más angulosa y laminar que la grava, dificultando el desplazamiento entre partículas dentro de la mezcla.

### 2.3. Densidad, absorción y porosidad

La incorporación de NFU favorece la aparición de aire en el estado fresco del hormigón debido a la baja adherencia entre el NFU-G y NFU-F y la pasta de cemento. Como consecuencia directa de esto, los hormigones fabricados con NFU ofrecen una mayor absorción y porosidad, aumentando éstas con el tamaño del NFU. Este incremento de huecos en la mezcla, junto con la baja densidad del NFU en relación a la del árido convencional, son factores que influyen en la disminución de la densidad del hormigón endurecido.

### 2.4. Resistencia a compresión, tracción directa y módulo de elasticidad

Tabla de los resultados de la resistencia característica del proyecto ( $f_{ck}$  (N/mm<sup>2</sup>)), resistencia a tracción indirecta ( $f_{ct}$  (N/mm<sup>2</sup>)) (Brasileño) y módulo de elasticidad (E en N/mm<sup>2</sup>).

<i>Tipo de hormigón</i>	<i><math>f_{cm}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i><math>f_{ck}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Designación</i>	<i><math>f_{ct}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Módulo-E (N/mm<sup>2</sup>)</i>
HS/C (referencia)	40	25	H-25	2,50	34.309
H5%-NFU-F	32	20	H-20	2,57	31.278
H10%-NFU-F	26	15		2,42	31.381
H15%-NFU-F	26	15		2,26	29.963
H5%-NFU-G	29	17		2,57	33.934
H10%-NFU-G	24	14		2,29	30.073
H15%-NFU-G	25	15		2,18	29.429

#### 2.4.1. Resultados de la resistencia a compresión:

La presencia parcial del NFU-G o NFU-F como árido en el hormigón disminuye su resistencia a compresión. La reducción de la resistencia no es proporcional, ya que las resistencias de los hormigones con un 10% y 15% de NFU son similares. Esta reducción se ve favorecida por el tamaño del NFU, de tal manera que si éste aumenta de tamaño disminuye la resistencia del hormigón.

Como se observa en la anterior tabla la dosificación H5%-NFU-F es la única que cumple con la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) y sólo se podría emplear en hormigones en masa.

La disminución de la resistencia observada en los hormigones con NFU puede ser debida a varios factores. Existen variaciones a consecuencia del incremento de la cantidad de agua en la pasta de cemento dado que el polvo NFU tiene una absorción inferior a la del árido convencional. También hemos de tener en cuenta que el comportamiento diferencial entre la pasta de cemento y el NFU, los cuales han de estar adheridos y trabajar conjuntamente, cuando el hormigón está sometido a tensiones el polvo NFU tiende a deformarse más elásticamente hecho que no sucede en la pasta, produciéndose tensiones internas dentro del hormigón que facilitan la aparición de fisuras en el contorno o interfase del caucho o NFU, debilitando al elemento frente a las solicitaciones de compresión.

#### 2.4.2. Resultados de la resistencia a tracción indirecta:

En los resultados de la tabla anterior podemos observar que la introducción de un 5% de NFU-F y NFU-G aumenta la resistencia a tracción del hormigón. Esto es debido a que el polvo NFU es más dúctil que el árido convencional y, en pequeñas cantidades mejora las propiedades elásticas del hormigón sin perjudicar la adherencia entre el NFU y la pasta de cemento, al romperse a tracción se fracturan a lo largo del plano diametral pero sin llegar a separarse en dos trozos. En el caso de los hormigones con un 10 % y 15% del volumen del

árido substituido por NFU disminuye la resistencia a tracción con respecto al hormigón de referencia o convencional.

En los hormigones con NFU-F, con respecto a los hormigones NFU-G, hay un ligero incremento en el valor a la resistencia a tracción indirecta. Esto es debido a su mejor adherencia con la pasta de cemento a razón de su geometría que es mucho más esférica consiguiendo un mejor recubrimiento por parte de la pasta de cemento, pero no mejor que en los áridos convencionales.

#### *2.4.3. Resultados del módulo de elasticidad:*

Los hormigones con NFU tienden a disminuir su módulo de elasticidad a medida que aumenta el contenido de éste.

El árido convencional tiene un módulo de elasticidad mayor que la pasta de cemento, al substituir parte del volumen de este por un material mucho más elástico como es el caucho (NFU), disminuye su módulo (E). El hormigón con NFU tiene más facilidad para deformarse en presencia de una sollicitación de compresión inferior a la resistencia a compresión del hormigón, creando tensiones internas dentro de la pasta de cemento que favorecen la aparición de microfisuras entre el árido y la pasta.

Los resultados, a su vez, ponen de manifiesto que no hay variaciones significativas en cuanto al módulo de elasticidad, E, relacionado con el tamaño del NFU substituido.

### **2.5. Comportamiento al fuego**

Debido a la naturaleza del material reciclado se considera oportuno el conocimiento del comportamiento de estos hormigones sometidos a altas temperaturas. Sabemos que los incendios de caucho son extremadamente fuertes y emiten gran cantidad de humo y de productos peligrosos. En este estudio se ha realizado una primera aproximación para poder determinar las cualidades de combustibilidad del hormigón con NFU. El ensayo de reacción al fuego ha sido siguiendo la norma UNE-EN ISO 1182:2002.

Los hormigones con NFU experimentan un proceso de combustión del caucho (NFU) cuando son sometidos a altas temperaturas (800°C), hecho que comporta un aumento de la temperatura superficial de las probetas de hormigón con NFU respecto a las de hormigón convencional. Al someter los hormigones con NFU a un calentamiento rápido a 800°C, estos inflaman produciendo humos, llamas y olores. Las probetas con NFU-G quedaron muy afectados por el efecto de las altas temperaturas, hasta el punto de romperse en el proceso de manipulación. Y en el caso de someter a un proceso rápido de calentamiento hasta 400°C se experimenta una pérdida de peso mayor que los hormigones de referencia o convencional.

Todos los trabajos experimentales realizados hasta el momento concluyen que el hormigón con NFU es un material que puede ser utilizado en diversas aplicaciones para las cuales no sea necesario obtener altas resistencias, planteando: piezas de aplacado como revestimiento, aceras y calzadas, carreteras, barreras de protección, barreras amortiguadoras de sonido, pavimentos flexibles, fijación de los carriles en la vía férrea, elementos delimitadores como vallas y postes.

### **REFERENCIAS**

- [1] Royano, V., Vázquez, E., Jordana, F. (2007) Hormigón con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU). Proyecto final de Carrera. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona.
- [2] Virgili, C. and Vázquez, E. (1995) Formigons hidràulics amb cautxú en pols procedent del reciclatge de neumàtics. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.



# IMPACTO AMBIENTAL EN EL ÁMBITO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

**Marilda Barra, Diego Aponte, Susanna Valls, Enric Vázquez**

Departamento de Ingeniería de la Construcción – Sección de Materiales de Construcción. e-mail:  
[marilda.barra@upc.edu](mailto:marilda.barra@upc.edu), [diego.fernando.aponte@upc.edu](mailto:diego.fernando.aponte@upc.edu), [susanna.valls@upc.edu](mailto:susanna.valls@upc.edu)  
[enric.vazquez@upc.edu](mailto:enric.vazquez@upc.edu)

**Palabras clave:** Impacto ambiental, lixiviación, materiales de construcción, residuos.

**Resumen:** *El proceso de lixiviación en sí es universal, ya que cualquier material expuesto al contacto con el agua filtrará los componentes de su superficie o de su interior en función de la porosidad del material considerado. El contenido total de contaminantes no es determinante para valorar el verdadero impacto ambiental de una sustancia y su aplicación. La lixiviación depende de diversos factores, que deben ser tenidos en cuenta a la hora de aplicar los resultados de laboratorio a la realidad del escenario concreto pero a la vez habrá que establecer elementos de referencia valorables a través de ensayos de laboratorio y tomar decisiones simplificadoras. El estudio del impacto ambiental por lixiviación es una herramienta que permite tomar decisiones respecto al uso, tratamiento o vertido de residuos y debe extenderse también a los materiales de construcción. El equipo ponente se centra en la actualidad en el estudio de la lixiviación de los materiales obtenidos a partir de residuos y pretende contribuir al conocimiento general y a la necesaria divulgación.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En la UE se precisan herramientas que permitan tomar decisiones respecto al uso, tratamiento o vertido de suelos contaminados, lodos de depuradoras, áridos reciclados, subproductos industriales y residuos, debido a los impactos ambientales que pueden provocar dichas actividades y, adicionalmente, éstos deben poder evaluarse.

El estudio del impacto ambiental se extiende también a los materiales de construcción. En todos estos casos los ensayos de lixiviación son el elemento fundamental, pues ya ha quedado claro por la práctica y estudio de estos últimos años [1], que el contenido total de contaminantes no es determinante para valorar el verdadero impacto ambiental de una sustancia y su aplicación. La lixiviación entendida como la fracción del componente investigado que puede solubilizarse es el parámetro realmente significativo. La disponibilidad no solo depende de la situación química de las sustancias, pues hay numerosos factores físicos y biológicos que influyen en ella. Por solo citar los más frecuentes, el pH de los propios materiales o el de los materiales del entorno, la porosidad de la matriz sólida que contienen los elementos de potencial riesgo, su forma geométrica y su tamaño pueden considerarse como factores que condicionan decisivamente los lixiviados y la contaminación correspondiente.

La emisión del material o residuo se mide en el laboratorio con un ensayo de lixiviación normalizado. La validez de estos ensayos llevados a cabo en condiciones de laboratorio comparados con la emisión real en el campo es cuestionable. Hay que incluir una serie de factores específicos del lugar. Así no podrán obviarse:

- La extensión del contacto del material con el agua.

- El grado de percolación.
- La temperatura.
- La acidez.
- El potencial REDOX.
- El envejecimiento del material.

La estructura creada con el material solo lixiviará en contacto con el agua. Puede ser agua de lluvia, agua profunda o agua superficial. En una carretera el contacto con el agua profunda con el material emisor puede evitarse guardando una distancia entre el mismo y la máxima altura del nivel freático predecible y también aislándolo.

Para establecer elementos de referencia valorables a través de ensayos de laboratorio habrá que tomar decisiones simplificadoras. La exacta evaluación de las emisiones reales es muy difícil y cara, y las mediciones de laboratorio si no se adaptan mínimamente a la realidad, corren el riesgo de exagerar o subvalorar el riesgo ambiental.

## 2. CUESTIONES BÁSICAS

La lixiviación es el proceso por el cual los componentes de un material sólido se liberan en contacto con el agua, aunque algunas especies pueden ser de mayor o menor problema ambiental que otros. El proceso de lixiviación es indiscriminado, de tal manera que todos los componentes (por ejemplo, mayores o menores componentes de la matriz, así como inorgánicos, contaminantes orgánicos y de radionúclidos) se liberan bajo un conjunto común de fenómenos químicos, incluyendo disolución de minerales, desorción y procesos complejos.

A su vez, estos fenómenos se ven afectados por la química interna y los factores físicos, agresiones externas del medio ambiente circundante, y la degradación por erosión, grietas o pérdida de los componentes de la matriz por el proceso de lixiviación en sí. El proceso de lixiviación incluye el reparto de los contaminantes entre una fase sólida y una líquida (por ejemplo, tras el supuesto de equilibrio local) y el transporte de masa de contaminantes acuosos (es decir, la suma de la difusión, efectos tortuosidad, superficie efectiva, etc.) a través de la estructura porosa del material al medio ambiente. Los factores químicos son aquellos que influyen en la partición de sólido-líquido (LSP) de un componente como el pH, redox, materia orgánica disuelta y la actividad biológica, mientras que los factores físicos como la relación de conductividad hidráulica, porosidad y la geometría juegan un papel importante en la determinación de la tasa en que los componentes se transportan en una fase líquida que pasa a través de un sólido.

El proceso en sí es universal, ya que cualquier material expuesto al contacto con el agua filtrará los componentes de su superficie o de su interior en función de la porosidad del material considerado.

La lixiviación implica, entonces, que el material se disuelva en el agua. Los procesos implicados en la lixiviación de materiales granulares y monolíticos respectivamente son:

**Lavado:** En una partícula se va disolviendo el material de la superficie en contacto con el agua. El material disuelto es lavado y se diluye en el agua en circulación. No hay límite para la saturación de dicha disolución. El lavado es rápido, si la superficie carece de poros, como por ejemplo un vidrio.

**Difusión:** Si la partícula tiene poros accesibles, el material interior también puede ser disuelto por el agua que penetra en ellos. Como el agua no fluye libremente en este caso, pueden presentarse altas concentraciones de lo disuelto y reducirse fuertemente la velocidad de disolución. El material disuelto será transportado a través de los poros comunicados hacia la superficie. La fuerza motriz será la diferencia de concentraciones entre el agua de los poros y la que fluye libremente. El mecanismo es la difusión.

En partículas pequeñas la longitud de los poros se considera despreciable y la difusión no se tiene en cuenta. En cambio cuando la longitud de los poros es considerable, como en un material consolidado, la difusión existirá y será un proceso lento. La velocidad del proceso de difusión dependerá a su vez del componente difundido y de su forma química.

**Disolución-Erosión:** Si el material considerado consta mayoritariamente de compuestos solubles, la matriz del material no frenará la entrada, ni la salida del líquido lixiviante, y el proceso será muy rápido y continuará hasta el total desmoronamiento. La erosión superficial favorecerá la constante renovación de la superficie de ataque. No hay pues difusión.

### 3. ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

La medición del impacto ambiental puede utilizarse para desarrollar un perfil característico de la lixiviación de diferentes materiales en relación al equilibrio y a la liberación de los diferentes elementos. Cada ensayo está diseñado para variar un parámetro crítico de la liberación o emisión (por ejemplo el pH, la proporción líquido/sólido, el tiempo de lixiviación) para proporcionar datos de lixiviación en un amplio rango de condiciones de prueba.

**Ensayo de lixiviación dependiente del pH:** EN 14429 (influencia del pH sobre la lixiviación con una adición inicial ácido/base). Este ensayo es llevado a cabo en muestras a una relación líquido/sólido de 10 L/kg, y diferentes cantidades de ácido o base son incorporadas para obtener un pH final determinado. El ensayo indica la capacidad buffer del material ensayado.

**Ensayo de lixiviación dependiente de la relación L/S:** (Ensayo de conformidad)

**Ensayo de lixiviación por percolación:** EN 14405 (ensayo de percolación ascendente para determinar el comportamiento de materiales granulares bajo condiciones específicas). El ensayo se realiza usando columnas y la lixiviación es llevada a cabo por agua destilada a pH neutro. Las concentraciones son medidas usualmente en siete diferentes fracciones hasta una relación L/S acumulada de 10.

**Ensayo de lixiviación monolítica:** El mecanismo predominante es la difusión. Existen dos métodos; CEN TC 351 y NEN 7345 (determinación de la lixiviación de componentes inorgánicos a partir de materiales monolíticos) que difieren en la acidificación del agua que actúa. Un material monolítico es colocado en un recipiente y puesto en contacto con agua a un pH neutro o ácido (pH 4). A diferentes tiempos las concentraciones de eluato son medidas y el agua es reemplazada.

### 4. CONCLUSIONES

Existe la necesidad de valorar los distintos ensayos actualmente disponibles en relación con su representatividad y eficacia en la aplicación. Se utiliza la experiencia de las naciones más avanzadas en este campo como referencia.

Los resultados de lixiviación son un parámetro definitivo para la aplicación de todo tipo de materiales cuando se pretende tener en cuenta el impacto ambiental.

En estos momentos el trabajo del equipo se centra en la lixiviación de los materiales obtenidos a partir de los residuos como áridos reciclados, escoria de acería, lodos de depuradora, polvo de pnfu, etc. El trabajo del equipo pretende contribuir al conocimiento general y la vez se realiza una labor de divulgación absolutamente necesaria.

El equipo está formado por el núcleo fijo de profesores e investigadores citado y en la actualidad también por la doctorada Anna Sidorova, y las tesinandas de master Adriana Carolina Sarmiento y Andrea Pinochet.

## REFERENCIAS

[1] Slood, H. A. van der; Heasman, L; Quevauviller, Ph. (1997): Harmonization of leaching extracting test. Edit. Elsevier. Amsterdam.

## INFRAESTRUCTURA Y ESPACIO URBANO. PROYECTOS DE INTEGRACIÓN Y TRANSFORMACIÓN URBANA

Magrinyà, F.<sup>1</sup>, Mayorga, M.<sup>2</sup>

<sup>1 y 2</sup>IntraScapeLab, Departament Infraestructures del Transport i Territori  
e-mail: [francesc.magrinya@upc.edu](mailto:francesc.magrinya@upc.edu) ; [miguel.mayorga@upc.edu](mailto:miguel.mayorga@upc.edu)

**Paraules Clau:** infraestructura, vialidad, proyecto urbano, espacio público, sostenibilidad

### Resum:

*Las infraestructuras viarias y ferroviarias pueden ser generadoras de espacios urbanos de calidad que generen prácticas de cohesión social y articulación urbana. Una revisión de los espacios urbanos asociados a infraestructuras nos muestra que a partir de pequeñas intervenciones de renovación se pueden generar importantes transformaciones en el territorio. El caso de la recuperación de una riera transformada en Parque en Gelida o las experiencias del aprovechamiento de espacios aledaños o intersticiales de las infraestructuras viarias, para prácticas deportivas en Barcelona, son una muestra de ello. Las reflexiones teóricas y prácticas llevadas a cabo en tres talleres proyectación de asignaturas de urbanismo en el Máster de Ingeniería Civil de la ETSECCPB-UPC y en convenios CTT UPC-Ayuntamientos muestran una metodología de trabajo a implementar en este campo, tanto para la investigación como para el proyecto del espacio urbano.*

### INTERESCALARIDAD, INTERDISCIPLINARIEDAD Y SOSTENIBILIDAD, VALORES DE REFERENCIA DEL URBANISMO DE LAS INFRAESTRUCTURAS

Multiplicidad, discontinuidad y dispersión, caracterizan la ciudad actual. La infraestructura en su papel como conformador espacial y como soporte de relaciones y flujos, asume una importancia creciente, siendo objeto de demandas de solución a los problemas de accesibilidad, integración y adaptabilidad del espacio urbano. Las nuevas redes de infraestructura, las diversas técnicas y modos de transporte, y el aprovechamiento de su potencial en términos cuantitativos y cualitativos para la construcción de la ciudad, son los protagonistas de esta nueva fase a la que se asiste en el rediseño de las infraestructuras. Aeropuertos, trazados ferroviarios y estaciones, calles y cruces; estaciones de metro y tranvía; ascensores y escaleras mecánicas; autopistas, carreteras, caminos y senderos configuran un sistema donde los grandes artefactos infraestructurales deben permitir a la vez, y con calidad, recorridos en modos de transporte rápidos y lentos, que se complementen y conviertan estos espacios urbanos en oportunidad de integración y cohesión del territorio.

Interescalaridad, interdisciplinariedad y sostenibilidad deben ser los valores de referencia para el urbanismo y el proyecto de infraestructura. Estas son algunas de las premisas que enmarcan el planteamiento teórico de los diferentes cursos y talleres de proyectación que se desarrollan actualmente en el Departamento de Infraestructuras del Transporte y Territorio. El Máster d'Enginyeria Civil acoge un conjunto de 6 asignaturas, tres de las cuales son talleres en los que se experimenta con estudios de caso representativos de los debates territoriales y urbanos actuales. En estas asignaturas de Taller se pone énfasis en las oportunidades que brinda el proyecto de infraestructura, partiendo de una reflexión teórica que se reelabora sobre la práctica y que a su vez, se ve influida por la investigación sobre la evolución de los modelos

de ciudad y de las herramientas de intervención en el espacio urbano. Esta relación entre teoría y práctica queda patente en una serie de publicaciones de referencia, realizadas por profesores e investigadores de la Sección de urbanismo del ITT-UPC, y que definen unas líneas básicas de trabajo e investigación (HERCE, MAGRINYÀ, MIRÓ, 2007).

En el marco de estas referencias, destacamos dos estudios, propuestas y proyectos urbanos que entre otros, se han desarrollado con la participación de profesores de la sección, y que integran aportes de diversas formaciones disciplinares. Estos estudios han abordado las distintas escalas de intervención, territorial y urbana, bajo una aproximación desde la sostenibilidad, y que han permitido en los últimos años consolidar tres principales temas de análisis y proyecto: los grandes espacios naturales; los espacios intersticiales o espacios de oportunidad; los espacios urbanos y suburbanos asociados a ejes y redes de carreteras y caminos.

En las actuaciones sobre espacios públicos y ámbitos de valor paisajístico, las propuestas plantean la accesibilidad como una variable que potencia su relación con el entorno, partiendo del convencimiento de que un espacio natural o público sólo se valora, se apropia y se conoce si es accesible. Por lo tanto no se trata de aislar espacios libres, construidos en un actitud “proteccionista”, sino de recomponer y rehabilitar una estructura legible del lugar para fortalecer las relaciones con su entorno mediante formas de transición controladas, gestionadas y proyectadas, en una correlación entre la infraestructura con las actividades existentes y propuestas.

## **EL PARC CENTRAL DE GELIDA: INFRAESTRUCTURA, ESPACIO PÚBLICO Y SOSTENIBILIDAD**



La recuperación del ámbito del Torrent de Sant Miquel.  
Parc Central de Gelida. Planta general de la propuesta.

Un primer ejemplo es la propuesta del Parc Central del municipio de Gelida (HERCE & MAYORGA, 2002). El proyecto, concretado a partir de un convenio entre la UPC y el Ayuntamiento de Gelida (2002-2007), se realizó en dos fases. Una inicial, fue un estudio de posibilidades urbanísticas, infraestructurales y medioambientales del municipio, que sirvió de marco al planteamiento y desarrollo de la segunda fase, asociada al diseño del proyecto ejecutivo del parque. El proyecto está localizado sobre una canalización preexistente sobre una riera, que tenía la condición de ser un espacio sometido a la presión de la urbanización y

de ejercer una función de parte trasera de la ciudad, de espaldas al sistema natural. La propuesta se basa en relacionar el espacio natural, generando y potenciando una serie de vínculos urbanos, del parque a la ciudad y de la ciudad al parque, partiendo de una visión integradora y estratégica, con un conjunto de actuaciones que le otorgan un valor central. La recuperación del ámbito a nivel simbólico y ambiental, creando a la vez un espacio de encuentro para los vecinos, y una nueva forma de relación con la riera y el paisaje circundante mediante accesos, conexiones, recorridos y actividades de diverso tipo e intensidad. El conjunto del proyecto se articula alrededor de una explanada, espacios deportivos, terrazas mirador y juegos infantiles, organizados a lo largo de un curso artificial de agua, que dentro del parque, remata en un estanque, rememorando así la riera. Pero a la vez el sistema de recogida y tratamiento de las aguas residuales propuesto para el sector, se enmarca en la visión ecológica del ciclo del agua y de integración con el territorio, así el parque representa un espacio de confluencia y adaptación del sistema urbano y el sistema natural. Un espacio trasero de la ciudad se convierte en un elemento central de equipamientos de la ciudad, de acceso al sistema natural y además en un instrumento de gestión del ciclo del agua en una visión ecológica del metabolismo urbano.

### ESPACIO PÚBLICO, INFRAESTRUCTURA Y PRÁCTICAS DEPORTIVAS: UNA CUESTIÓN DE ANÁLISIS, GESTIÓN Y DISEÑO INTERDISCIPLINAR



Parques y espacios públicos en ámbitos infraestructurales. Relaciones parque-entorno.

Un segundo ejemplo es el estudio “Els espais públics urbans i l’esport com a generadors de xarxes socials a les grans ciutats. El cas de Barcelona” resultado de un proyecto de investigación financiado por AGAUR y en el que participaron INEFC, Ajuntament de



Barcelona a través del Institut Barcelona Esports (IBE), y los Departamentos universitarios ITT-UPC y el Departamento de Antropología, filosofía y trabajo social de la Universitat Rovira i Virgili. Esta fue una experiencia muy positiva de colaboración entre instituciones de promoción de la investigación (AGAUR) junto con instituciones gestoras de espacio público (INEFC y IBE) y departamentos universitarios que complementaban estudios sobre infraestructuras y estudios sociales. Este estudio analiza las prácticas deportivas de 2200 personas, generadoras de 63 redes de prácticas deportivas en 30 espacios públicos (ver figura). Es de destacar que las prácticas deportivas en el espacio público de Barcelona asociadas a los 30 espacios analizados en los que se localizaron redes estables de prácticas deportivas en espacio público se reparten al 50% en parques o plazas de la ciudad, un 25% están junto a infraestructuras viarias y un 17% junto a equipamientos deportivos (MAGRINYA & MAYORGA, 2008). Las infraestructuras viarias y sus espacios aledaños e intersticiales, son espacios abandonados e infrautilizados que convenientemente intervenidos y sin una gran inversión económica pueden ser apropiados por los grupos sociales. El estudio asumió de entrada un enfoque global, que sustentado en variables de análisis y diseño urbano, llegó a explicar el funcionamiento y conformación espacial en cada caso. Se destacan varios aspectos respecto a la accesibilidad, la movilidad y la infraestructura, la condición de segregación o integración derivada de la localización e inserción de estos espacios en la ciudad, donde la infraestructura viaria y el nivel de la consolidación urbana juegan un rol significativo. La relación de continuidad o discontinuidad urbana entorno-parque y parque-entorno, definida por la correspondencia entre el tejido urbano y el sistema de accesos y circulación del parque, su relación con la distribución del programa y las actividades son claves en el diseño de estos espacios urbanos. De la misma forma, la definición de los elementos de urbanización, límites, escaleras, pavimentos, mobiliario, arborización, son instrumentos que en su conjunto deben aportar urbanidad y legibilidad al espacio público.

Por lo tanto, las infraestructuras viarias y ferroviarias pueden ser generadoras de espacios urbanos de calidad que generen prácticas urbanas de calidad. Una revisión de los espacios urbanos asociados a infraestructuras nos muestra que con intervenciones de renovación, con pequeñas inversiones económicas se pueden generar significativos procesos de cohesión social y transformación urbana. El Parque de Gelida como recuperación de una riera y las prácticas deportivas en Barcelona en espacios públicos aledaños a infraestructuras son muestra de ello. Las reflexiones teóricas y prácticas llevadas a cabo en tres talleres implementados en asignaturas de urbanismo, en el Máster de Ingeniería Civil de la ETSECCPB-UPC y en convenios CTT UPC-Ayuntamientos, muestran una metodología de análisis, gestión y proyecto del espacio urbano ligado a las infraestructuras, trabajo que se viene implementando en este campo de investigación, por parte del Grupo de Investigación IntraScapeLab del Departamento de Infraestructuras del Transporte y Territorio de la UPC.

## REFERENCIAS

- [1] HERCE, M.; MAGRINYA, F. & MIRO, J. (2007), *L'espai urbà de la mobilitat*, Barcelona, Edicions UPC, 2007, 223 p. ISBN: 8483019175
- [2] HERCE, M. & MAYORGA, M. (2002-2006), *Estudio de las posibilidades infraestructurales y medioambientales del Municipio de Gelida y ante proyecto de Parque Central*. Barcelona, Dep. ITT- UPC.
- [3] MAGRINYÀ, Francesc & MAYORGA, Miguel Y. (2008), "Diseñar la ciudad para el deporte en los espacios públicos", *Apunts: Educación física y deportes*, ISSN 1577-4015, nº 91, 2008, pp. 102-113 (Ejemplar dedicado a: El deporte en los espacios públicos urbanos).



# CONÈIXER, VALORAR I DIVULGAR LES OBRES PÚBLIQUES COM A PATRIMONI CULTURAL

**Teresa Navas, Francesc Magrinyà**

CIEPAC. Departament d'Infraestructura del Transport i Territori [teresa.navas@upc.edu](mailto:teresa.navas@upc.edu); e-mail: [francesc.magrinya@upc.edu](mailto:francesc.magrinya@upc.edu)

**Paraules Clau:** patrimoni, obres públiques, divulgació, comunicació, potencial cultural, exposicions

**Resum:** *El reconeixement de les obres públiques com a patrimoni històric i cultural gaudeix d'un llarg recorregut que no es correspon a la seva migrada divulgació fora dels àmbits estrictament acadèmics. I això, malgrat la seva espectacularitat i incidència demostrada en l'organització dels territoris que habitem i recorrem. Presentem aquí una línia d'especialització innovadora iniciada en el Departament d'ITT i liderada pel CIEPAC (Centre Internacional d'Estudis del Patrimoni Construït), adreçada a combinar coneixement, valoració i divulgació de les obres públiques que permeti la transferència tecnològica.*

## 1.- LES OBRES PÚBLIQUES SÓN PATRIMONI CULTURAL

Actualment, queda fora de tot dubte el reconeixement de les obres públiques com a patrimoni cultural, amb la mateixa validesa que tradicionalment ha estat atorgat a les obres d'arquitectura. Un dels paràmetres que avala aquest reconeixement és la seva dimensió històrica, que no és altra cosa que haver valorat la seva aportació en un context social i cultural determinat, resultat d'un saber tècnic i científic i concretat en solucions de disseny que donen resposta funcional a les necessitats d'una col·lectivitat. Des d'antic, l'aprofitament de l'aigua, la generació i l'eficiència de diferents tipus d'energia, l'establiment d'infraestructures de comunicació i la recerca de la millora de les condicions sanitàries i de nivell de vida a les ciutats, han creat estructures integrades dins de sistemes amb capacitat d'organització de territoris i d'aglomeracions urbanes. Les obres públiques, enteses en la seva trajectòria temporal, han demostrat la seva capacitat important de modificar el medi i de construir els entorns que habitem, treballem i recorrem. En definitiva, que el territori i paisatge present és el resultat de les actuacions que les diferents societats han portat a terme al llarg del temps, un procés dinàmic el discerniment del qual proporciona una lectura més rica i complexa de l'enginyeria civil, alhora que li confereix un sentit en clau cultural.

Molt breument, valorar les obres públiques com a realitats patrimonials, testimoni d'una herència moltes vegades exemplar de la creació humana, va tenir lloc ja en el segle XIX, quan les transformacions accelerades del món contemporani evidencien la necessitat de catalogar certes obres dins la categoria de monuments. Les obres públiques del passat eren vistes amb veneració però, en paral·lel, també se les va tractar en atenció a la seva essència, és a dir, obres bàsicament funcionals que, malgrat la seva antiguitat, podien seguir servint a usos concrets i integrar-se als nous requeriments. Els ponts il·lustren bé d'aquesta duplicitat, és a dir, peces del passat que podien ser incloses dins la xarxa viària de carreteres que començava a construir-se a Espanya. Resulta rellevant aquesta continuïtat històrica de les obres públiques,

el diàleg interromput que estableixen entre el passat i el present i que es converteix en un element d'identitat d'aquest patrimoni, el més específic i reconeixible.

La transcendència del llegat de l'obra pública ha anat creixent al llarg del segle XX. No va passar per alt a un enginyer com José Antonio Fernández Ordóñez al qui li devem una decidida reivindicació patrimonial de ponts, canals, preses i estacions, dins la categoria de monuments històrics. L'evolució ulterior ha estat ampliar la categoria de patrimoni a les infraestructures lineals, que significa incorporar l'escala territorial i la ineludible relació entre territori i enginyeria. Un exemple són les carreteres històriques.

En síntesi, hi ha un bon conjunt d'estudis i treballs que han donat consistència i gruix intel·lectual a la valoració patrimonial de les obres públiques. En canvi, no podem dir que existeixi un nivell equivalent de coneixement i divulgació, per bé que sovint estem davant d'estructures de gran espectacularitat, que testimonien una supremacia de saber tècnic i científic innegable. Obres que són producte de la creació humana en diferents etapes històriques per tal d'aconseguir un bé d'ús públic el qual l'enginyeria contemporània altament professionalitzada va fer coincidir des dels orígens amb la idea de progrés i benestar social.

## **2.- VALORAR PERÒ TAMBÉ DIVULGAR L' ENGINYERIA CIVIL**

Davant, doncs, el baix nivell de comunicació de l'enginyeria com a patrimoni cultural, dins la Secció d'Urbanisme del Departament d'Infraestructura del Transport i Territori (ITT) es va iniciar fa anys una línia de produccions adreçades a divulgar obres, autors i temàtiques pertanyents a l'enginyeria de camins. Aquestes produccions es basen en les investigacions que en forma de tesis doctorals o recerques concretes s'han realitzat per part d'alguns membres del departament que, al seu torn, són els responsables d'assignatures que inclouen parcialment o total continguts de caràcter històric. De tal manera, que s'ha anat perfilant una especialització basada en la combinació de coneixement, valoració i difusió de l'àmbit de les obres públiques, tot encetant una línia innovadora dins el nostre marc de recerca que ha propiciat la transferència tecnològica amb diferents institucions.

Donar visibilitat a l'enginyeria civil. Aquest ha estat el propòsit preferent. El format de divulgació més practicat ha estat el projecte i muntatge d'exposicions, que s'erigeix com un mitjà de transmissió molt efectiu. Presentem aquí un seguit d'exposicions de les quals han sigut responsables els autors signants d'aquesta ponència juntament amb altres professors membres del nostre departament. Les exposicions tenen una repercussió pública de gran abast que les converteix en productes de primer ordre per a la comunicació de temes que, si bé gaudeixen de potencial cultural, no tenen fàcil arribada al ciutadà atès que solen formar part d'àmbits molt restringits. I això, malgrat la seva incidència sobre realitats territorials diverses, com són totes les intervencions que es refereixen a l'enginyeria civil. Les exposicions, a més, demanen la traducció dels continguts a un nivell de comprensió que sigui intel·ligible i atractiu per a un públic ampli i que no es reservi només a entesos i interessats directes en la matèria. El repte és convertir nocions i conceptes científics i tècnics que sovint s'expressen en textos, fórmules, plànols tècnics i diagrames, en artefactes que configurin recorreguts en l'espai, dissenys de grafisme, imatges en moviment, banda sonora i llum, amb el propòsit d'aconseguir una comprensió tan intel·lectual com també de caràcter sensorial i emocional.

Per tant, l'especialització aconseguida ha estat gestada des de la comunicació dels subjectes i els objectes amb valor patrimonial dins l'enginyeria civil. Els precedents són les exposicions organitzades des dels anys setanta pel Col·legi d'enginyers de camins que recuperaven enginyers il·lustres espanyols com Eugenio Ribera i Ildefons Cerdà. A aquestes exposicions n'han seguit moltes altres i destaquen per la seva qualitat i continuïtat les portades a terme pel

Centre d'Estudis Històrics d'Obres Públiques i Urbanisme (CEHOPU), centre adscrit al Ministeri de Foment.

### 3.- MÉS ENLLÀ DE L'ÀMBIT ACADÈMIC

Dins el nostre Departament, els inicis de la línia d'especialització comentada es troben en la gran exposició de l'any 1994, titulada “Cerdà, urbs i territori”. Els comissaris i responsables científics van ser els professors Albert Serratosa, Salvador Tarragó –qui havia fet, juntament amb Arturo Soria l'exposició anterior dedicada al mateix enginyer- i Francesc Magrinyà. L'encàrrec va procedir de l'Institut Ildefons Cerdà, amb el patrocini del Departament de Política Territorial i Obres Públiques de la Generalitat de Catalunya. El motiu del projecte va ser reivindicar l'obra de Cerdà, a través de mostrar la documentació tècnica original que l'enginyer va elaborar per a Barcelona i Madrid. Plànols i dibuixos de gran format van qualificar l'exposició, celebrada en l'aleshores recent Campus de la Universitat Pompeu Fabra, amb el propòsit d'aproximar la disciplina de l'urbanisme al visitant en general, amb un atenció preferent per als grups escolars. L'exposició va gaudir d'una itinerància internacional força extensa on es van crear sinèrgies amb altres universitats que van produir un efecte de primer ordre: la consideració unànime de Cerdà com un dels referents inqüestionables de l'urbanisme modern.

Per ordre cronològic, la següent exposició rellevant comissariada des del Departament d'ITT va ser “Obres Públiques a Catalunya. Present, passat i futur”, presentada a l'Estació de França de Barcelona el 2003. En aquesta ocasió, la Real Academia de Ingeniería va voler celebrar el seu X aniversari amb un seguit d'iniciatives dins les quals Barcelona va ser la seu escollida per a les activitats relacionades amb les infraestructures. S'adheriren institucions com la Generalitat de Catalunya, l'Ajuntament de Barcelona, Renfe i el Col·legi d'Enginyers de Camins, entre altres. Novament, Salvador Tarragó va ser el responsable científic de la mostra, amb la col·laboració de Teresa Navas per a continguts específics –direcció cartogràfica, evolució de la xarxa viària a Catalunya- i altres professors de les Seccions d'Urbanisme i de Transport hi van col·laborar amb articles al catàleg. L'exposició pretenia ser un reconeixement a la gran tradició constructiva i urbanitzadora del país com una gran tasca social que implicà a col·lectius tècnics i treballadors al llarg del temps, amb una visió de continuïtat entre passat i futur de les obres públiques, atenta a despertar l'interès d'un públic ampli usuari de les infraestructures.

El 2009 es va declarar l'“Any Cerdà” per commemorar els 150 anys d'aprovació del Pla d'Eixample de Barcelona. I altre cop va ser una oportunitat magnífica per revisar nous aspectes de l'insigne enginyer i situar convenientment la seva aportació en relació a la ciutat de Barcelona. Un cop més, el Departament d'ITT va ser cridat a col·laborar en la diversitat d'activitats programades i, més concretament, en dues de les exposicions previstes. En primer lloc, la que es va titular “Cerdà. 150 anys de modernitat”, encarregada per la Fundació Urbs i Territori (FUTIC). Els seus comissaris, Francesc Magrinyà i Fernando Marzá, professor de l'ETSAB, van convertir la mostra en un exercici per fer comprendre què significa planificar, projectar i construir una ciutat. Això va ser possible gràcies a una lectura de l'Eixample de Cerdà en el seu component de modernitat i en atorgar a l'exposició una clara voluntat comunicativa amb el públic.

En segon lloc, l'exposició “La política pràctica. Cerdà i la Diputació de Barcelona”, organitzada per la corporació provincial i on Teresa Navas va assumir les tasques tant de comissariat científic com, alhora, de definició general del projecte expositiu. Va ser l'exposició que va iniciar l'Any Cerdà amb la idea d'explicar la força del binomi polític i tècnic en la personalitat de l'enginyer i urbanista. La complexitat del tema va demanar dues

operacions simultànies: per una banda, constituir un equip d'assessors científics al comissariat que permetés una discussió contrastada sobre Cerdà amb les aportacions d'investigadors universitaris però també d'experts procedents d'altres àmbits de la cultura de la ciutat. I per una altra, una cura especial en la qualitat del disseny gràfic i en la realització de l'audiovisual final, que explicava la teoria de la irradiació de Cerdà respecte les comunicacions viàries a través d'un viatge pel territori de la província de Barcelona compost amb imatges de fa cent anys.

Presentada a Can Serra, l'edifici institucional de la Diputació, l'exposició ha tingut un periple itinerant que l'ha portada, entre altres llocs, a l'Espai Blanquerna de la Generalitat de Catalunya a Madrid. En aquesta ocasió, els continguts van ser revisats per incorporar la comparació dels projectes de Barcelona i Madrid i va propiciar, en paral·lel, la celebració d'uns debats sobre ambdues capitals amb especialistes en urbanisme i història igualment dels dos llocs. A més, les itineràncies van servir per assajar un model compacte d'exposició on es plasmen els continguts bàsics però que, alhora, permet la seva adaptació a espais més reduïts i optimitzar el cost econòmic. Ho il·lustra la versió presentada al Hall de l'Edifici C-2 on es troba la Direcció de la nostra Escola de Camins.

Una altra línia en la producció d'exposicions és la que ha portat a terme un altre professor del Departament d'ITT, Miguel Mayorga des de l'any 2001. Amb una aproximació transversal i interesclar en l'estudi de les ciutats, que inclou mobilitat, centralitat urbana i espai públic, apropant enginyeria i arquitectura, s'han presentat exposicions de temàtiques diverses com la de "Luigi Cosenza. Il Territorio abitabile", "Arquitectura Moderna en Colombia. 50-60" i "Le Corbusier en Bogotá", que han recorregut diversos països europeus i s'han pogut veure en diferents universitats catalanes.

Actualment, el Departament d'Infraestructures, Urbanisme i Habitatge de la Diputació de Barcelona ha encarregat una nova exposició amb motiu d'una altra celebració, els 150 anys del seu servei tècnic de carreteres. El comissariat va a càrrec de Teresa Navas i es vol anar més enllà de la petita mostra que amb el títol "Recorregut històric per les carreteres de la província de Barcelona", es va preparar per acompanyar el Congrés "Movilidad Local y Territorio" (11-13 de juny de 2008), organitzat conjuntament per la Asociación Española de la Carretera i la Diputació de Barcelona. En aquesta nova ocasió, la trajectòria històrica es valorarà a la llum de les característiques intrínseques de la xarxa viària local i, especialment, de la presentació del model d'actuació en carreteres de titularitat provincial, fruit d'una nova visió de la xarxa intermèdia la qual es defineix per la seva multifuncionalitat, integració en els paisatges i espais urbans que travessa, i per la capacitat connectora respecte els territoris i les xarxes urbanes de llarg recorregut. És a dir, la consideració de les carreteres com els carrers del territori.

La línia d'especialització que hem presentat aquí vol ser testimoni d'un seguit d'investigacions i recerques de llarga durada, adreçades a estudiar el patrimoni de les obres públiques i a vehicular els continguts generats dins estratègies de comunicació que permetin crear intercanvis i transferències, tant amb institucions i organismes diversos com establir diàlegs amb agents culturals i acadèmics externs a l'àmbit universitari.

## REFERÈNCIES

- [1] Magrinyà, F., Marzá, F. (2009), *Cerdà. 150 anys de modernitat*. Catàleg de l'exposició.
- [2] Navas, T. (2009), *La política pràctica. Cerdà i la Diputació de Barcelona*. Catàleg de l'exposició.
- [3] Tarragó, S. (2003), *Obres Públiques a Catalunya. Present, passat i futur*. Catàleg de l'exposició.

# LA PARTICIPACIÓ SOCIAL EN ELS PLANS DE MOBILITAT DE LA UPC

Elisabet Roca<sup>1</sup> i Míriam Villares<sup>2</sup>

Laboratori d'Estudis Socials de l'Enginyeria Civil (LESEC). Departament Infraestructura del Transport i Territori. <sup>1</sup> e-mail: [elisabet.roca@upc.edu](mailto:elisabet.roca@upc.edu), <sup>2</sup> e-mail: [miriam.villares@upc.edu](mailto:miriam.villares@upc.edu)

**Paraules Clau:** participació, percepció social, plans de mobilitat, comunitat universitària.

**Resum:** *El Pla de Mobilitat de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès (PMETSAV) i el Pla del Campus del Baix Llobregat (PMCBL) formen part d'un conjunt de plans de mobilitat sostenible que s'estan elaborant en els campus de la Universitat Politècnica de Catalunya. Des del LESEC, integrant de l'equip redactor d'aquests plans, s'està contribuint al desenvolupament metodològic de la participació que, com ja reconeix la Llei 9/2003, de 13 de juny, de la mobilitat, esdevé un element clau en el moment de realitzar estudis de diagnòstic i concretar les posteriors propostes d'actuació. L'objectiu d'aquesta comunicació és presentar l'experiència participativa aplicada a cadascun d'aquests plans i avaluar-ne els resultats obtinguts en la fase de diagnòstic, que permet extreure'n una sèrie de lliçons per a futurs processos planificadors.*

## 1. INTRODUCCIÓ

En el marc d'una línia d'ajuts del Ministeri de Foment per realitzar programes pilot que promoguin la mobilitat sostenible (Ordre FOM/2388/2008), s'estan elaborant un conjunt de plans de mobilitat sostenible en els campus de la Universitat Politècnica de Catalunya. Formen part d'aquest grup de plans, el Pla de Mobilitat de l'Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès (PMETSAV) [1] i el Pla del Campus del Baix Llobregat (PMCBL) essent aquests la motivació de la present comunicació.

L'objectiu d'aquests plans és garantir una adequada accessibilitat als serveis universitaris prestats en aquestes equipaments d'una forma sostenible en la seva dimensió ambiental, social i econòmica. Aquests tipus de plans es conceben en darrer terme com una eina que permeti avançar en la implantació i desenvolupament de la cultura de la mobilitat sostenible en els anys pròxims i, per això, des del seu procés d'elaboració s'insisteix en la capacitat d'involucrar a la comunitat mitjançant metodologies de participació social.

La creixent complexitat que implica la gestió urbana pels interessos contraposats i la freqüent generació de conflictes socials posa de relleu la necessitat de més participació ciutadana en el moment de realitzar estudis de diagnòstic i concretar les posteriors propostes d'actuació. Des de la Llei 9/2003, de 13 de juny, de la mobilitat es reconeix la participació com un element clau i s'estableixen els mecanismes de participació i concertació de les administracions amb organismes i entitats cíviques i socials que poden aportar solucions adequades per a la formulació de les polítiques de mobilitat.

Tenint en compte aquest marc normatiu i conscients de la complexitat en la gestió de la mobilitat esdevé necessari aprofundir en els sistemes d'avaluació i planificació participatius que contemplin l'existència d'una pluralitat d'interessos i de múltiples percepcions de la realitat. Així es va fer explícit en la convocatòria dels plans de mobilitat de la UPC i des del LESEC, com a integrant de l'equip redactor dels Plans de Mobilitat de l'ETSAV i del CBL estem contribuint a l'aplicació de metodologies participatives.

L'objectiu d'aquesta comunicació és presentar l'experiència participativa aplicada a cadascun d'aquests plans i avaluar-ne els resultats obtinguts en la fase de diagnosi dels plans. L'anàlisi i la discussió de la participació realitzada en els plans de mobilitat que s'estan desenvolupant a l'ETSAV i el CBL ens permeten esbossar una sèrie d'observacions i recomanacions sobre els processos de participació per futurs plans de mobilitat, especialment aquells previstos en el Decret 152/2007, de 10 de juliol, que estableix que els centres de treball d'administracions públiques i d'empreses públiques amb més de 200 treballadors propis o externs o els centres generadors de mobilitat amb més de 500 visitants habituals s'han de dotar de plans de desplaçaments d'empresa.

## 2. METODOLOGIES PARTICIPATIVES PER A LA MOBILITAT

Segons la Guia Bàsica per a l'Elaboració de Plans de Mobilitat Urbana [2] es poden assenyalar tres moments especialment rellevants per a la participació directa:

- la diagnosi: per tal de recollir les percepcions i valoracions sobre l'estat actual de la mobilitat.
- la formulació d'objectius i creació d'escenaris,
- la discussió i avaluació de propostes per desenvolupar els objectius.

Però més que parlar d'un moment òptim o més adient per projectar l'experiència participativa, aquesta hauria d'acompanyar tot el procés d'elaboració d'un pla. Per garantir aquesta constància, en els casos treballats s'ha creat un grup de mobilitat, que tracta de ser representatiu dels diferents col·lectius i garanteixi el seguiment del procés.

Al final del procés planificador caldrà arribar a un Pacte per a la Mobilitat que implica un consens i la programació de propostes així com l'establiment dels mecanismes de seguiment del pla.

Durant les diferents fases de l'elaboració d'un pla es poden fer ús de tècniques participatives molt variades [3]. Seguidament descrivim les tècniques utilitzades en els plans de mobilitat de l'ETSAV (Escola Tècnica Superior d'Arquitectura del Vallès) i del CBL (Campus Baix Llobregat). En un primer nivell s'han aplicat tècniques passives de recollida d'informació mitjançant enquestes als estudiants a través de la matrícula. Aquestes atorguen un valor quantitatiu als resultats però l'estudiant no n'és conscient de la seva participació, per tant, no s'afavoreix el debat ni s'aprofundeix en la complexitat de les problemàtiques. Per això, en un pla més qualitatiu s'han realitzat una sèrie d'entrevistes en profunditat a responsables dels diferents estaments de la comunitat universitària. S'ha sondejat l'opinió de perfils amb un grau d'implicació diferent: la direcció, la gerència, el PDI, el PAS i l'alumnat han caracteritzat els grups interns que s'han complementat amb una opinió experta i externa des de l'administració municipal. Això ha permès recollir i aprofundir en els principals discursos i captar les percepcions sobre les problemàtiques de mobilitat més rellevants a cada escola.

Finalment, també s'han realitzat tallers o grups de discussió amb estudiants. Aquests es basen en tècniques deliberatives, afavoreixen el debat i són la base per començar la definir prioritats i consensuar propostes d'actuació. En concret, a l'ETSAV es va desenvolupar *el Fòrum Eppure si muove*, realitzat el 21 de juny de 2010, que consistia en una sessió de mitja jornada que va servir per discutir i reflexionar de forma conjunta entre l'equip del pla i els participants sobre qüestions similars a les tractades anteriorment i de manera individualitzada en l'entrevista en profunditat. La metodologia emprada en aquests tallers va ser la del grup de discussió. Aquests van formats per entre 10 i 15 participants als quals on es va afavorir la discussió de problemàtiques i abordar propostes, des de les solucions d'immediata aplicació, fins a la projecció del curt i llarg termini.

Mentre que al CBL, els tallers organitzats amb grups estudiants es van desenvolupar en el marc de diferents assignatures de les titulacions d'Enginyeria de Telecomunicacions i d'Agricultura.

### 3. ANÀLISI DE LES EXPERIÈNCIES

A banda de les metodologies aplicades i del moment en què es porten a terme, hi ha altres criteris que juguen un paper fonamental i que cal tenir en compte a l'hora d'avaluar el procés participatiu. Així, els objectius inicials, el context de partida, el nombre i la qualitat dels participants són aspectes que influeixen en els resultats. En la taula inferior s'ha fet una caracterització dels diferents processos participatius en funció d'aquests criteris.

Taula 1. Taula comparativa dels diferents processos participatius estudiats.

	CBL	ETSAV
Els Objectius	<p>Generals:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Informa i legitimar</li> </ul> <p>Específics:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisió d'objectius</li> <li>• Anàlisi de percepcions.</li> <li>• Prioritzar i discutir propostes.</li> <li>• Crear xarxa</li> </ul>	<p>Generals:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• sensibilitzar, conscienciar i responsabilitzar a la comunitat.</li> <li>• Transformar cap a una mobilitat més sostenible.</li> <li>• Dotar de Transparència el procés d'elaboració del pla.</li> <li>• Enfortir i dinamitzar les xarxes socials</li> <li>• Garantir la implementació del Pla.</li> </ul> <p>Específics:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Realitzar una diagnosi compartida</li> <li>• Consensuar i prioritzar objectius, línies d'actuació i propostes.</li> </ul>
Antecedents participació per la mobilitat sostenible	<p>Docència: assignatura ITINERA (ETSET)</p> <p>Sistema de préstec de bicicletes municipal (ara ja no està en funcionament).</p>	<p>Grup de Mobilitat Sostenible actiu des de 2007 format per estudiants, PDI i PAS.</p> <p>Setmana de la Mobilitat. (2008)</p> <p>Pràctica un sistema de préstec de bicicletes municipals (2008)</p> <p>Participació en la Comisió de Seguiment de l'Agenda 21 i altres iniciatives municipals. (2008)</p> <p>Dimarts de mobilitat (2010)</p>
Nivells de participació	<p><b>Informació:</b></p> <p>Reunió amb representants PDI, PAS i gerència del CBL.</p> <p><b>Consulta:</b></p> <p>Entrevistes en profunditat a agents representatius dels diferents col·lectius i responsables.</p> <p>Tallers amb 4 grups d'estudiants.</p>	<p><b>Informació:</b></p> <p>Conferència Eppur si Muove (març 2010)</p> <p>Taula rodona sobre la mobilitat urbana i sostenible a la UPC (maig-2010 COAC).</p> <p><b>Consulta:</b></p> <p>Entrevistes en profunditat a agents representatius dels diferents col·lectius i responsables.</p> <p>Jornada Taller per discutir diagnosi i generar propostes.</p>
Participants Qui?	<p>Agents claus amb responsabilitats sobre la gestió de la mobilitat</p> <p>Estudiants de l'Escola d'Agricultura i de Telecomunicacions.</p>	<p>Representants de PDI + PAS + Estudiants seleccionats.</p> <p>El taller obert a tothom, va agrupar més de 50 persones procedents de col·lectius diversos, però majoritàriament escolars.</p>
Moments Quan?	<p>Diagnosi i discussió de la de les mesures.</p>	<p>Diagnosi</p> <p>Formulació d'objectius i discussió d'estratègies.</p>
Mètodes com?	<p>Enquesta</p> <p>Entrevista en profunditat a agents claus.</p> <p>Taller amb estudiants.</p>	<p>Enquesta</p> <p>Entrevista en profunditat a agents claus.</p> <p>Jornada participativa oberta a tota la comunitat.</p> <p>Retorn informació: en forma d'actes, informe i web.</p>

L'experiència ha constatat que la participació pot prendre moltes formes i assolir nivells de profunditat i de transformació molt diferents. D'una banda, des de l'ETSAV, s'està portant a terme una experiència de base que pretén integrar en el procés la màxima diversitat de discursos (responsables de gestió, estudiants, PAS i PDI); una estratègia extensiva i transformadora que convida a la implicació de la comunitat en el pla i, en darrer terme, a l'acció i al canvi social en l'àmbit de la mobilitat sostenible.

Un dels principals reptes quan es porten a terme processos participatius és la constància i la intensitat al llarg de tot el procés d'elaboració del pla, fet que ha de construir les bases per garantir-ne la seva continuïtat un cop aquest s'hagi aprovat. Per això, evidentment els recursos disponibles són una qüestió fonamental però també ho és el context i antecedents en la matèria treballada. Per això, cal posar en valor els antecedents en accions de conscienciació i activitats participatives a l'ETSAV des de l'any 2000 que han generat unes dinàmiques que tenen certa autonomia i es podran sostenir més enllà del pla. També el context de proximitat i l'escala més local de l'ETSAV faciliten la circulació i transmissió d'informació fet que repercuteix positivament en el procés participatiu que ha vingut sobretot acompanyat per un fort lideratge per part d'un grup d'estudiants. Per contra, la manca d'antecedents en la gestió de la mobilitat al CBL esdevenen una barrera a l'hora d'implicar a la comunitat i de buscar complicitats. Tanmateix, la relativa joventut d'aquest campus i un pròsper escenari de futur pot esdevenir una oportunitat que caldrà explorar en la fase propositiva del Pla. Per això, seria aconsellable, més enllà de l'elaboració dels plans, establir mecanismes que garanteixin la seva implementació i seguiment, com la formalització d'òrgans permanents de participació que siguin representatius de tota la comunitat amb tasques i objectius concrets.

## **REFERÈNCIES**

- [1] Balbas, D. Roca, E. Villares, M. Masides, A. Martínez, M. Amat, L. & Llop, C. (2010): Movilidad Sostenible en los centros universitarios: el Plan de Movilidad de la ETS d'Arquitectura del Vallès. Comunicación Congreso de Ingeniería
- [2] DPTOP (2006): Títol Guia Bàsica per a l'Elaboració de Plans de Mobilitat Urbana. DPTOP
- [3] Pindado, F. (coord); Rebollo, Ó.; Martí, J. (2007). Eines per a la participació ciutadana: Bases, mètodes i tècniques (versió actualitzada). Col. Papers de participació ciutadana, 19. Diputació de Barcelona; Barcelona



# L'AVALUACIÓ DE L' IMPACTE SOCIAL EN ELS PROCESSOS DE CONSTRUCCIÓ D'INFRAESTRUCTURES I REFORMA URBANA.

Míriam Villares<sup>1</sup> i Elisabet Roca <sup>2</sup>

Laboratori d'Estudis Socials de l'Enginyeria Civil (LESEC).

Departament Infraestructura del Transport i Territori.

<sup>1</sup> e-mail: [miriam.villares@upc.edu](mailto:miriam.villares@upc.edu), <sup>2</sup> e-mail: [elisabet.roca@upc.edu](mailto:elisabet.roca@upc.edu)

**Paraules Clau:** Impacte social, percepció, urbanisme, infraestructures.

**Resum:** *La intervenció territorial en la construcció de noves infraestructures i la localització d'activitats en els processos d'urbanització, desencadenen una sèrie d'impactes socials i ambientals -directes o induïts- positius i negatius. La modificació de l'espai on es desenvolupen les activitats econòmiques i les formes de vida, afecta també la qualitat de vida i els hàbits de la societat. Així s'inicia un procés de transformació més o menys dinàmica, però sempre irreversible. Aquest conjunt d'efectes requereix una avaluació de l'impacte, per després integrar-la tant en la planificació territorial i urbanística com en la projectació de noves infraestructures, que consideri previsions en un llarg horitzó temporal i diferents escales espacials. En aquest àmbit, les metodologies d'estudi d'impacte s'ha plasmat en una línia de recerca desenvolupada des del Laboratori d'Estudis Socials de l'Enginyeria Civil (LESEC), del Departament d'Infraestructura del Transport i Territori*

## 1. INTRODUCCIÓ

La investigació basada en l'anàlisi dels impactes socials de les infraestructures demostra que els col·lectius humans no presenten realitats idèntiques, i en conseqüència, la relació causa-efecte no pot estandarditzar-se. Alguns afectats són més dinàmics, més oberts a la possibilitat de transformar les seves estructures. D'altres, són més tancats i endogàmics i poden presentar dinàmiques adverses i no canalitzar l'oportunitat de transformació que una nova infraestructura o canvi urbanístic pot proposar.

Els impactes directes tenen conseqüències immediates: expropiacions, molèsties de las obres, efecte barrera, etc., però també beneficis econòmics derivats de las obres. Els impactes indirectes, més difícils de captar, ofereixen possibilitats d'intervenció respecte les potencialitats que contenen. Els impactes indirectes o induïts es desencadenen a ritmes diferents: canvis demogràfics, de la jerarquia urbana i de la localització d'activitats, de potenciació/marginació regional, però també es reproduïx en el sistema econòmic (modificació del nivell de rendes, de la estructura socio-profesional, de l'activitat productiva, de la productivitat, etc.). En concret, des del LESEC s'han fet aportacions rellevants en l'avaluació de l'impacte socio-econòmic de les infraestructures del transport, en el marc de la participació i resultats en Projectes Europeus, i des de la col·laboració en projectes internacionals [1].

D'altra banda, en la branca d'estudi territorial s'ha incidit especialment en l'anàlisi dels impactes de les intervencions d'actuació i ordenació del litoral i dels espais naturals. Aquí la producció s'ha expressat tant des de la participació en Projectes Europeus, com en el Plan

Nacional de I+D+i i els resultats s'han fet palesos en contribucions a publicacions especialitzades [2]. El desenvolupament s'ha centrat en els estudis de percepció social que constitueixen un mètode d'anàlisi i de valoració basat en el sondeig. Així, en el cas d'una intervenció tècnica o d'una avaluació de la qualitat de l'entorn, es valoren una sèrie d'elements físics i morfològics, la qualitat ambiental, el nivell d'equipament i de serveis, i les característiques estètiques del paisatge. Es tracta d'una línia d'investigació iniciada amb l'objectiu de conèixer la percepció i les preferències dels actors socioeconòmics, de les administracions i dels usuaris davant l'actuació o la gestió sobre el sistema litoral en particular, i de manera general, sobre espais naturals protegits.

Els estudis de percepció analitzen actors i conflictes i es basen en la valoració. L'objectiu final s'encamina a trobar uns paràmetres bàsics d'avaluació que permetin millorar futures estratègies de gestió, i establir criteris d'intervenció que atenguin expectatives dels usuaris, de les administracions i dels agents econòmics que intervenen en el territori.

## **2. L' OBJECTE DE LA RECERCA SOBRE EL MEDI URBÀ**

Amb aquests referents d'escala territorial, ara ens interessem en l'escala local: l'avaluació de l'impacte social i ambiental dels processos de canvi i reforma urbana. Una qüestió que actualment focalitza el nostre interès, cap a un avenç en la recerca de metodologies d'avaluació de la qualitat urbana que integrin indicadors socials, ambientals, urbanístics i econòmics. Constatem que en els processos de reforma urbana es produeixen impactes diversos i nombrosos, positius i adversos relacionats amb els canvis socio-demogràfics, fenòmens de gentrificació, inducció de noves activitats econòmiques, etc. Les polítiques de desenvolupament urbà basades en la ubicació d'una nova infraestructura o en la recuperació d'una àrea degradada requereixen una previsió de les repercussions que s'estendran en el temps i l'espai i que poden esdevenir l'origen de conflictes socials. Entenem que els processos de renovació urbana han de fer-se d'acord amb les noves necessitats de les ciutats i dels seus habitants. És així com la perspectiva social, esdevé un marc d'anàlisi per afrontar l'avaluació d'impactes, la finalitat és articular eines metodològiques que a més, s'ajustin a les condicions locals i a les demandes globals de sostenibilitat.

Aquí es focalitza l'interès d'aquesta línia que busca consolidar una recerca, de moment, emergent en el nostre Laboratori. En concret, aprofundir en l'avaluació de dos fenòmens de diferent origen, d'una banda, els canvis produïts per un intervenció en infraestructura a la ciutat i de l'altra, els generats per l'actuació en teixits urbans obsolets i la conseqüent aparició de nous usos i activitats. La recerca es desenvolupa des de l'anàlisi i la comparació d'una sèrie de casos d'estudi.

## **3. EL METODE**

Es pren de referència el mètode clàssic dels Estudis d'Impacte, una estructura d'anàlisi Ex-ante, el període de construcció i l'Ex-post, es a dir, diagnòstic de la situació prèvia i previsió dels efectes o transformacions, sense oblidar que, entremig en el període de construcció, també es produeixen pertorbacions que cal preveure i establir mesures correctores. Així en tres parts ben definides es proposa:

1-Estudi del medi social i ambiental en les fases de planificació i projectació (demografia, estructura productiva, estructura territorial, formes de vida...)

2-Previsió dels impactes i pertorbacions en la vida quotidiana durant la fase d'execució.

3-Comparació dels impactes positius i negatius, directes i indirectes o induïts que es produiran. Proposta de mesures correctores i compensatòries. Proposta de polítiques d'acompanyament i de mesures d'ordenació per impulsar les potencialitats.

A la primera part és interessant conèixer el context territorial, econòmic i social, la història recent de la població afectada i la seva organització i formes de vida. Conèixer els actors en presència. Durant les obres es produeixen molts impactes negatius que s'ha de preveure amb formules per evitar el màxim les molèsties a la població i les pèrdues econòmiques. A la tercera part, tenir en compte els impactes positius que es poden potenciar i els negatius per o bé eliminar-los o minimitzar-los. Potenciar els efectes estructurants, en especial sobre l'economia local i els induïts sobre la població, ja que es prolongaran al llarg del temps. Cal reforçar el procés i proposar polítiques que dinamitzin la zona afectada.

La diagnosi de la situació urbana determina la problemàtica morfològica, les dotacions de serveis i equipaments, la xarxa viària, etc. i s'estructura a partir d'un reconeixement "territorial", l'anàlisi dels Plans d'Ordenació Urbanística i amb entrevistes a tècnics i agents socials. La fórmula "territorialitzar el projecte" vol dir convidar/proposar a la societat afectada, coneixedora del seu territori (barri o ciutat), a participar, aprofundir i impulsar les potencialitats en la proposta de mesures.

Formalment, el mètode s'aplica amb una enquesta-participació per copsar la percepció: els temors i les expectatives de la societat afectada i recollir-los per exposar als tècnics i a polítics que prenen la decisió sobre el projecte. Aquest pot constituir el primer pas per participar i conciliar el projecte. En una segona etapa, la realització d'un conjunt d'entrevistes en profunditat als actors claus (tècnics i polítics) ha d'aportar els elements tècnics de les propostes d'actuació i mesures a aplicar.

#### 4. APORTACIONS I RESULTATS

La principal contribució i benefici general d'aquesta de recerca és l'avanç en les metodologies d'avaluació social, ambiental i territorial de l'enginyeria civil en el medi urbà. Fer aportacions valuoses en els procediments de planificació i disseny de projectes d'infraestructura i d'urbanisme amb la finalitat de minimitzar els seus impactes negatius i potenciar els efectes positius.

Els resultats específics es concreten en una comparativa dels dos grups de casos d'estudi: el primer relacionat amb la construcció de grans infraestructures de transport a la ciutat i el segon amb la reforma d'espais urbans degradats. De cada àmbit de casos i la posterior sistematització d'un panell d'indicadors es fa una anàlisi comparativa per extreure'n propostes d'actuació i recomanacions per a intervencions similars en altres contextos urbans.

En el marc d'aquesta línia de recerca centrada en l'avaluació dels impactes socials, amb objectiu d'aprofundir en les valoracions dels impactes dels processos de reforma urbana, darrerament s'ha desenvolupat una sèrie de tesines que nodreixen la casuística en estudi De fet, complementen, enriqueixen i es mantenen des d'un parell d'assignatures presents en programes de master ofertats des de la nostra escola [3].

#### REFERÈNCIES

- [1] Junyent, R. (2008) : Effets Régionaux et Sociaux des Megaprojets. Etude des effets régionaux du projet de tunnel ferroviaire sous le détroit de Gibraltar.
- [2] Villares, M; Roca, E. et alt (2006): Social Perception as a Tool for Beach Planning: a Case Study on the Catalan Coast. Journal of Coastal Research 48. pp. 118-123
- [3] Web del LESEC: <http://itt.upc.edu/recerca-i-publicacions/laboratoris/lesec>.



## MEDIDA DE LA CONGESTIÓN DEL TRÁFICO EN CIUDADES

José Magín Campos Cacheda<sup>1</sup> y Francesc Robusté Antón<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento ITT e-mail: magin.campos@upc.edu, <sup>2</sup>Departamento ITT e-mail: f.robuste@upc.edu

**Palabras clave:** congestión, tráfico, metropolitano

**Resumen:** *La congestión del tráfico en entornos urbanos y metropolitanos perturba la eficiencia de la logística de la ciudad contemplada como “fábrica de movilidad”, afectando a todos los colectivos sociales de forma directa e indirecta, empeorando la calidad de vida y penalizando las actividades comerciales y el acceso y entrega de productos en “la última milla”. Esta investigación define indicadores objetivos simples y sus homólogos subjetivos (a partir de la percepción de los usuarios) de forma genérica, lo que permite comparar distintos escenarios temporales y territoriales, y extender el análisis a distintas ciudades. Los indicadores definidos incorporan la distribución espacial de la congestión (para una franja horaria definida) y la distribución temporal a lo largo del día (para una zona concreta) dentro de un indicador global de congestión.*

### 1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

La ciudad es un ente vivo que necesita desarrollar una serie de funciones para garantizar el adecuado desarrollo de las actividades propias de las personas que se relacionan con la misma. Entre estas funciones podemos destacar los desplazamientos de las personas que residen o visitan la ciudad por cualquier motivo de viaje, el aprovisionamiento de toda una serie de mercancías necesarias para su devenir cotidiano y la transformación y difusión de información (DIDO, data in - data out) . Estas funciones ligadas a la movilidad de las personas y las mercancías deben convivir con el resto de las funciones urbanas y puede llegar a entrar en conflicto con ellas. La priorización de una determinada actividad urbana (como por ejemplo la circulación de los ciudadanos, que son a la postre los clientes finales del ente urbano) posibilita la aparición de interacciones y problemas de ubicación y desplazamiento, que pueden dificultar la actividad diaria de la ciudad llevándola incluso a su colapso.

Desde este punto de vista, y considerando que hoy en día la ciudad se compone de toda una serie de redes físicas y logísticas que estructuran una entidad compacta y compleja, podemos afirmar que la eficiencia en la organización de la ciudad como ente unitario complejo depende directamente de una buena organización de las redes logísticas que la componen, es decir, depende de la eficiencia de dichas redes.

Como elemento perturbador del funcionamiento adecuado de la eficiencia de las redes logísticas de la ciudad podemos considerar que la congestión de tráfico en las áreas urbanas es un problema cada vez más corriente en la sociedad de nuestros días y está tomando una gran relevancia en el devenir cotidiano, ya que afecta a todos los colectivos sociales de una forma directa, empeorando la calidad de vida de los ciudadanos y penalizando las actividades comerciales en el entorno urbano. Esta afirmación se apoya en el hecho innegable que la red de calles de la ciudad es no sólo una de las redes logísticas de la ciudad en sí misma, sino que es el soporte físico para muchas de las demás.

Dentro de la congestión de tráfico se ha estudiado mucho sobre su naturaleza, definición y motivos de su aparición, pero de forma desconectada e individual, enfocada en muchas ocasiones en casos concretos. De igual manera se ha trabajado en la definición de indicadores que permitan cuantificar sus características y efectos. El problema es que estos indicadores suelen también recoger valores muy genéricos o muy específicos de casos concretos, sin permitir una comparación adecuada entre casos diferentes.

Por este motivo se ha realizado un estudio que ha servido para definir adecuadamente una serie de indicadores de congestión en entornos metropolitanos, profundizando dentro de las causas que la generan, definiendo los impactos derivados de su existencia y cuantificando los efectos sobre los distintos colectivos afectados.

Este estudio define una metodología de análisis que permite cuantificar los impactos de este fenómeno, permitiendo realizar la actualización temporal de los parámetros definitorios del problema para su comparación en escenarios futuros de forma sencilla.

Así, la investigación desarrollada establece un marco de referencia moderno y eficaz en el cual se define una herramienta que sirve como elemento de toma de decisiones para la implantación de medidas en los diferentes ámbitos de afección del problema.

Dicha investigación se encuadra dentro del marco de la colaboración entre el Centro de Innovación del Transporte (CENIT) y el Ministerio de Fomento, plasmada en el estudio denominado "La Congestión del Tráfico en Áreas Metropolitanas"; y en la participación en el grupo de expertos "Working Group on Tackling Traffic Congestion in Larger Metropolitan Areas" de la OECD-ECMT (Organisation for Economic Co-operation and Development - European Conference of Ministers of Transport), plasmada en el libro "Managing urban traffic congestion".

El estudio realizado ahonda en las raíces de la congestión del tráfico metropolitano, determinando sus principios de funcionamiento y analizando sus componentes operativas para poder obtener una metodología sencilla para la caracterización de sus pautas de actuación que permita comparar entre diferentes escenarios, ya sean temporales para un mismo marco físico o físicos para un mismo marco temporal, permitiendo así un mayor conocimiento de este fenómeno que resulte en una mejor gestión del viario para minimizar su impacto negativo y garantizar su agilidad y su eficiencia.

Por lo tanto, el objetivo era definir una metodología de análisis para los efectos de la congestión de tráfico metropolitano, de tal manera que, mediante modelos sencillos fácilmente aplicables y reproducibles, sirva de herramienta orientativa en el proceso de toma de decisiones. Ante una problemática compleja, como la descrita aquí, es sin duda necesario comenzar a modelizar los aspectos que hasta hoy solo han sido tratados desde el punto de vista estratégico. La modelización propuesta se basa fundamentalmente en aplicar las principales investigaciones realizadas en el ámbito de la ingeniería de tráfico y la investigación operativa a temas concretos de la congestión de tráfico metropolitano.

Adicionalmente se perseguía también obtener, como objetivos secundarios, una formulación de análisis de la percepción de la congestión por parte de los usuarios inmersos dentro del flujo circulatorio de los ámbitos metropolitanos; así como una relación entre las características urbanas más representativas de las ciudades desde el punto de vista urbanístico y el nivel de congestión existente en las mismas.

El resultado final ha conllevado la definición de una metodología destinada a mejorar la eficiencia en la gestión del viario y cuya aplicación pueda extenderse a cualquier ciudad, con la caracterización de sus impactos sobre el resto de actividades presentes en el espacio público urbano.

## 2. RESULTADOS OBTENIDOS

La consideración del inicio de la congestión por parte de los usuarios inmersos en la misma está basada en la percepción de la densidad de vehículos presentes en la vía en la que están circulando o, lo que es lo mismo, en la percepción del nivel de servicio prestado por dicha vía. Desde luego resulta cuanto menos curioso el constatar cómo las variables más empleadas para medir o reproducir la existencia de congestión de tráfico (velocidad de circulación y tiempo de viaje) no son la que los usuarios consideran que define el inicio de la congestión de tráfico. Esto se puede afirmar teniendo en cuenta que un total del 78% de los usuarios encuestados en seis ciudades distintas consideraron que el inicio de la congestión se produce cuando la cantidad de vehículos presente en la calle por la que circulan en ese momento no permite una circulación cómoda y fluida. Lo cual, según los propios encuestados, se asocia a la presencia de una cantidad de vehículos en la calle que representa un estado de circulación forzada, con interrupciones sucesivas de la circulación independientes de la regulación semafórica o a un bloqueo de la calle.

Los usuarios internalizan de forma directa el incremento del tiempo de viaje debido a la congestión en sus previsiones de trayectos a realizar, de modo que para ellos la fiabilidad de la red respecto al viaje proyectado ya incluye el tiempo extra debido a la congestión de tráfico (congestión recurrente). Esta aseveración surge de la constatación por parte de los usuarios de una mayor importancia como efecto derivado de la congestión de tráfico del incremento del tiempo de viaje que de la fiabilidad de la red respecto al viaje a realizar. Además también se constata en cuanto que los usuarios reconocen que el tiempo de viaje en condiciones de congestión se incrementa en un valor medio de veinte minutos. Por otra parte también se recoge en las encuestas que los usuarios salen de su casa con mayor antelación cuando consideran que van a encontrar congestión.

Los indicadores objetivos y subjetivos de congestión definidos en el estudio aquí presentado constituyen una herramienta sencilla y eficaz para definir la congestión urbana y comparar sus efectos entre ciudades de diferente tamaño, densidad y población. Esta aseveración surge de la constatación de que la aplicación de la metodología definida en este trabajo da lugar a unos valores lógicos y perfectamente definidos que nos permiten discernir el comportamiento de las diferentes tipologías de redes viarias de cada área urbana de una forma ajustada a la realidad. En este sentido, si concentramos la congestión de tráfico existente en las diversas áreas metropolitanas españolas en un periodo homogéneo de máximo impacto sobre los usuarios (circulación forzada con frecuentes interrupciones de tráfico no debidas a la regulación semafórica), dicho periodo abarcaría entre un 9,8 % y un 13,4 % de la movilidad total expresada en vehxkm según el área metropolitana considerada. Igualmente se obtiene que la probabilidad de que exista congestión de tráfico en un punto de la red a lo largo del día presenta valores comprendidos entre un 73 % y un 100%. Asimismo resulta que, en las áreas metropolitanas españolas, existe congestión de tráfico en sus redes viarias en un intervalo temporal que comprende entre el 27 % y el 60% de las 24 horas de cada día. Por otro lado, también se obtuvo que la congestión de tráfico en las áreas metropolitanas españolas afecta a un número de usuarios comprendidos entre el 34 % y el 54% del total de los que emplean sus redes de tráfico a lo largo del día.

De la aplicación de los indicadores topológicos de congestión se puede inferir que una ciudad con menor población y mayor compacidad que otra tendrá menor índice de congestión que la respectiva. Por contra, una ciudad con mayor población y menor compacidad tendrá mayor índice de congestión. Es decir que los parámetros más influyentes sobre la congestión son la compacidad y la población del área de estudio. De las ciudades con similar compacidad, tienen menor índice de congestión las que tienen menor población. Ello significa que para

ciudades grandes no es suficiente la compacidad para tener un índice de congestión aceptable. Las ciudades difusas tienen un índice de congestión más elevado que las compactas incluso siendo éstas mayores. Es decir, que los casos de ciudades menos compactas (o más difusas) presentan índice de congestión menos optimizados. En términos generales, la contribución de las vías principales en términos de congestión de tráfico aumenta respecto a la contribución del total de vías en las áreas metropolitanas de menores dimensiones. Pero la conclusión principal que se puede inferir del análisis realizado en lo que se refiere a la aplicación de indicadores topológicos es que es posible estimar los impactos de la congestión de tráfico mediante datos topológicos relacionados con las redes de calles y carreteras de las áreas metropolitanas, datos de población y superficies urbanas. Esta aseveración surge del hecho de constatar la existencia de una correlación lineal con un coeficiente de correlación muy elevado ( $R^2 = 0,9728$ ) entre los resultados del índice objetivo de congestión (IOC) y los del índice topológico I10.

## REFERENCIAS

- [1] OECD-ECMT (2007): Managing urban traffic congestion
- [2] Campos Cacheda, José Magín (2011): Una metodología para el análisis de la congestión del tráfico metropolitano
- [3] Robusté, F. e I. Sarmiento (1998): Els costos derivats de la congestió del trànsit a Barcelona



# DISSENY EFICIENT DE XARXES DE TRANSPORT PÚBLIC COL·LECTIU EN ZONES URBANES

M. Estrada.<sup>1</sup>, F. Robusté<sup>2</sup>, H. Badia<sup>3</sup>

**Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori**

<sup>1</sup>Catedràtic de Transport, e-mail: f.robuste@upc.edu, <sup>2</sup>Professor Lector, e-mail: miquel.estrada@upc.edu, <sup>3</sup>Estudiant de doctorat, e-mail:hugo.badia@upc.edu

**Paraules Clau:** Transport Públic, Disseny xarxes, optimització.

**Resum:** *Aquest treball presenta i valida un mètode de disseny de xarxes de transport públic d'altres prestacions. El mètode proposa diferents esquemes conceptuals de xarxes per idealitzacions geomètriques d'una ciutat particular, que després són adaptades a les condicions reals. Aquests esquemes conceptuals són caracteritzats per mitjà de quatre variables de decisió: la separació de línies, separació de parades, interval de pas i la grandària d'una zona central amb millor cobertura espacial. El millor esquema per a una aplicació específica es tria a través de l'optimització. La funció objectiu es compon de fórmules analítiques per al cost de l'operador i les prestacions als usuaris. El disseny òptim proposat per a la ciutat de Barcelona planteja la utilització d'un terç dels recursos per a oferir un menor temps de viatge en relació a la xarxa actual d'autobusos.*

## 1. INTRODUCCIÓ

La població mundial presenta un fenomen de concentració en ciutats, fet que provoca una demanda de mobilitat creixent en quantitat i qualitat. Malgrat que la innovació en l'eficiència energètica dels vehicles millorarà la sostenibilitat ambiental del sistema de transport, els mitjans de transport individuals (cotxe, taxi, vehicles a lloguer) no podran combatre la sostenibilitat econòmica i social del sistema ni respondre a les necessitats de mobilitat de la societat pels problemes derivats de congestió i seguretat. Davant d'això es fa necessària l'aposta per modes de transport col·lectiu que representin un menor cost social i economies d'escala amb la consolidació de viatges.

Aquest treball desenvolupa un model matemàtic de disseny de xarxes de transport públic col·lectiu en base a aproximacions contínues dels costos d'operació i les prestacions dels usuaris del sistema. Amb aquest model es busca superar els esquemes de disseny actuals que conformen sistemes compostos per un gran nombre de línies, sense visió sistèmica, dispersos en el territori i de complexa llegibilitat. El model continu elaborat es desenvolupa en Estrada et al. (2011). Permet representar diferents tipologies d'estructures de xarxes de transport i és fàcilment transferible a qualsevol ciutat. El model es fonamenta en un esquema híbrid on es diferencien dues zones, la part central on l'estructura de la xarxa és una malla ortogonal (Holroyd, 1965), i la zona perifèrica amb un esquema ramificat o hub-and-spoke (Newell, 1979) on els corredors es ramifiquen progressivament. La xarxa dissenyada ha de servir un territori amb una forma ideal rectangular amb una demanda determinista i uniformement distribuïda.

Els atributs que caracteritzen la xarxa són: una cobertura temporal constant a la malla central sobrejuda de la Figura 1, decreixent a mesura que les línies es ramifiquen en l'àmbit perifèric i una cobertura espacial constant a tot el territori. Cal notar que els usuaris de la perifèria reben cobertura a partir d'una sola línia mentre que al centre es pot tenir accés a les

línies en dues direccions perpendiculars. Això succeeix perquè el rectangle central inclou el doble de quilòmetres d'infraestructura per unitat de superfície en relació a la perifèria.

Les parades a l'àrea central es situen en les interseccions dels corredors garantint així la possibilitat de realitzar viatges a tota l'àrea d'estudi mitjançant desplaçaments horitzontals i verticals amb zero, una o dos transferències.

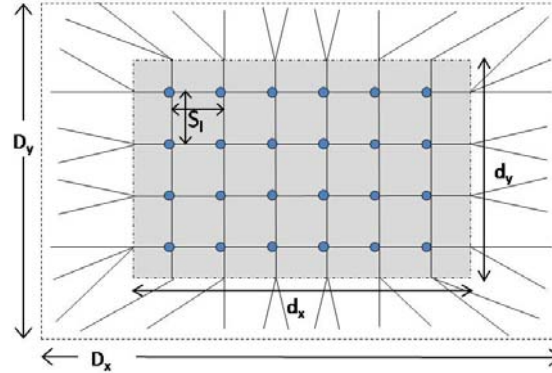


Fig. 1 – Esquemes de Xarxa Híbrida en zones rectangulars.

L'esquema proposat permet una fàcil comprensió per part de l'usuari i l'aplicació de mesures de prioritització en els corredors per a millorar la velocitat comercial i regularitat del servei.

## 2. FORMULACIÓ BÀSICA

La metodologia desenvolupada defineix la xarxa de transport col·lectiu a partir de quatre variables de disseny:  $\alpha$  (percentatge de territori corresponent a la malla central),  $H$  (interval de pas a la malla central),  $s$  (espaïament de parades) i  $sl$  (espaïament entre línies). A partir d'aquestes variables es determinen els costos del sistema i les seves prestacions a partir dels quals es defineix la funció objectiu (1) a minimitzar del model.

Els costos operatius consideren la longitud d'infraestructura necessària ( $L$ ), la longitud promig recorreguda pels vehicle per hora d'operació ( $V$ ) i els vehicles-hora en hora punta ( $M$ ). Per altra banda, els usuaris han d'invertir un temps en cada una de les diferents etapes de la cadena de transport col·lectiu, accés ( $A$ ), espera en parada ( $W$ ), trajecte en vehicle ( $T$ ) i processos de transferència ( $R$ ). La determinació de les variables anteriors es pot realitzar a partir de les quatre variables de decisió aplicant conceptes de probabilitat geomètrica (veure Estrada et al., 2011).

Així mateix, el model permet estimar la velocitat comercial de circulació de l'autobús ( $v_c$ ) mitjançant l'equació (2) a partir de les característiques de l'estructura de disseny de xarxa. L'estimació de les variables anteriors es realitza a partir del coneixement de les característiques de la grandària del territori rectangular a servir (representat per la longitud dels costats  $D_x$  i  $D_y$ ), la demanda del sistema en hora punta  $A$ , la velocitat de circulació  $v$ , el temps perdut per realitzar la parada  $\tau$ , el temps que un usuari consumeix en pujar al vehicle  $\tau'$  i la velocitat dels vianants  $w$  per accedir al sistema.

$$Z = [\pi_v V + \pi_M M + \pi_L L] + [A + W + T + R] \quad (1)$$

$$1/v_c = [1/v + \tau/S_l] + (1 + e_T) \left[ \frac{1}{2} \tau' \Lambda S_l H / D^2 \right] / [3\alpha - \alpha^2] \quad (2)$$

El model permet la introducció de restriccions que condicionen el disseny de la xarxa, és el cas de l'ocupació del sistema en el punt de màxima càrrega que no pot superar la capacitat

dels vehicles C, un nombre màxim de corredors a implantar o un pressupost màxim per a desenvolupar la xarxa.

El desenvolupament de les fórmules estimatives del model permet un procés d'optimització molt senzill per enumeració (quatre variables). La solució d'aquest problema per a una aplicació específica en una ciutat determina disseny o esquema idealitzat. A partir d'aquest esquema, l'analista ha de construir una xarxa de trànsit detallada que utilitzi els carrers disponibles, arribi als pols generadors i atractors de major demanda però que encara s'ajusti a l'esquema ideal tant com sigui possible. Aquest segon pas és un art més que una ciència, però el procés es pot dur a terme amb força facilitat. Per regla general, la xarxa final ha de presentar menor distància a peu que l'ideal, ja que s'ha adaptat a la demanda real (no homogènia).

D'aquesta forma, el planificador pot estimar el cost de diferents combinacions d'estructura de xarxa per analitzar quina proporciona el menor cost social per a la seva ciutat sense haver de recórrer a sistemes de simulació de la demanda. Per tant, en qüestió de segons es pot avaluar les prestacions d'un esquema específic de xarxa independentment de la modelització de la xarxa de carrers existents per on poder circular.

### 3. VALIDACIÓ DEL MODEL A BARCELONA

El model ha estat aplicat a la ciutat de Barcelona amb l'objectiu de definir una xarxa de bus d'altres prestacions com a nou servei que complementi l'actual. La nova xarxa busca ser una alternativa a la resta de modes de transport ja siguin públics o privats per aquells viatges de determinades longituds, que actualment impliquin uns costos temporals de temps de viatge en bus molt elevats per la baixa velocitat del servei convencional, 11km/h.

El resultat òptim del model en el cas de Barcelona ha definit una xarxa conformada per 12 corredors capaç de transportar fins a 60.000 usuaris en hora punta. La seva àrea central ocupa un 72% del territori, amb una distància entre línies entre els 650 i 1300 metres, un espaïament de parades de 430 m (zona central) i 650 m (perifèria) i un interval de pas de 3 minuts. La xarxa resultant implica una longitud d'infraestructura de només 227 km i operada amb 282 vehicles, assolint una velocitat comercial de 15 km/h. Els recursos necessaris d'aquest esquema únicament representa un 31% dels recursos utilitzats en la xarxa actual. Amb una bona gestió del trànsit, el sistema proposat per Barcelona permetria augmentar la velocitat mitjana de l'usuari porta-a-porta al voltant d'un 37% i reduir el cost total de l'operador de l'autobús per un percentatge encara més gran.

El resultat és un servei d'altres freqüències, ràpid i fàcil d'explotar, encara que implica un cert descens de l'accessibilitat que ha estat acotat amb la introducció de més parades en aquells indrets on la demanda ho ha justificat. La simulació dels costos operacionals i prestacions a l'usuari de la implantació detallada de la xarxa difereixen de les del model idealitzat (esquema conceptual) en menys del 10%. Aquest fet permet assegurar la correcta validació de l'estimació dels costos i prestacions del model conceptual. Així mateix, les solucions òptimes del model teòric en ciutats com Londres, Chicago o Stockholm presenta esquemes molt pròxims a les xarxes reals existents.

### REFERÈNCIES

Estrada, M., et al. (2011) Design and implementation of efficient transit networks: Procedure, case study and validity test. *Transport. Res. Part A*, doi:10.1016/j.tra.2011.04.006

Holroyd, E.M. (1965). The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area. In L. C. Edie, R. Herman, and R. Rothery (Eds.), *Vehicular Traffic Science, Proceedings of the 3rd International Symposium on the Theory of Traffic Flow*. New York: Elsevier.

Newell, G.F. (1979). Some issues relating to the optimal design of bus routes. *Transportation Science* 13(1), 20–35.

## SPACE ALLOCATING STRATEGIES FOR IMPROVING IMPORT YARD PERFORMANCE AT MARINE TERMINALS

Sergi Saurí<sup>1</sup> and Enrique Martín<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departament d'ITT and CENIT <sergi.sauri@upc.edu>, <sup>2</sup>CENIT <enrique.martin@upc.edu>

**Key Words:** Container terminal. Import operations. Storage strategy. Rehandles

**Abstract:** *This paper focuses on the organization of the import storage yard at container port terminals. Three new stacking strategies are introduced which take into account the containers' arrival and departure rates and the storage yard characteristics. A mathematical model based on probabilistic distribution functions is developed to estimate the number of rehandles required to manage an import container yard. The model is applied to the three proposed stacking strategies. Results show that the optimal strategy depends on stacking height and the relationship between vessel headway and container dwell time.*

### 1. INTRODUCTION

Maritime transportation currently represents over 80% of world freight trade. Container trade is estimated to have increased by a factor of 5 during the last 20 years, which is equivalent to an average annual growth rate of 9.8%. This trade is forecast to double by 2016 and further increase by 2020 to exceed 371 million TEUs (Twenty Equivalent Units). Due to container trade growth, ports and terminal managers are having to increase terminal productivity and are trying to achieve the optimum terminal capacity.

The container terminal is considered to be a system made up of four subsystems, whose effectiveness and productivity affect the performance of the next subsystem. These subsystems can be considered as independent processes but their operation is influenced by the global system as a whole. The four main subsystems are: ship to shore, transfer, storage, and delivery/reception.

Likewise, one of the main problems of container terminals is their lack of space for storing goods. The difficulty in extending the premises combined with the increase in freight volumes transported by container ships makes it necessary to increase the terminals' productivity and efficiency. One of the most common solutions is to apply multi-level stacking of containers, increasing the yard storage productivity and density, although overstacking has some negative effects regarding additional rehandling moves (reshuffling) of containers during the retrieval process, thereby increasing the turnaround time of trucks in the terminal and the operating cost.

The stacking problem is considered to be quite complex because of the uncertainty regarding which container will be needed first. Import container operations are especially uncertain because the information available on the departure time is unknown while containers are stacked, since trucks' arrival time at the terminal to pick up the containers is random. Container stacking affects the time needed to retrieve the containers already in the yard as well as future container moves.

In light of this, this paper focuses on the organization of import bays by evaluating several different stacking strategies aimed at using the storage space efficiently in order to minimize unproductive moves and their associated operating costs.

The strategies developed in this study involve both a static and a dynamic stage aiming to eliminate the wasted space in the yard after applying mixed and segregation strategies. The methodology developed here will allow determining which strategy generates the fewest number of rehandles, which is the primary objective of this paper.

## 2. IMPORT STORAGE STRATEGIES

Each strategy has two stages: in the first stage, the containers from different ships are segregated (static strategy); and in the second stage, each strategy has its own procedure to mix the containers from different vessels, trying to make efficient use of the storage space by applying a combination of both static and dynamic strategies. In the second stage, each strategy can be described as follows:

- Strategy 1 ( $S_1$ ). The first strategy consists in starting to fill the oldest group of sub-blocks of the storage yard (the one composed by the containers that have been at the storage yard for a longer time), that is, stacking new containers on top of the ones that are already stored in the yard and belong to the oldest group of containers.
- Strategy 2 ( $S_2$ ). The second strategy follows the same operative as the first strategy did, although the filling order in the import block is just the opposite: it starts mixing those groups of containers with a shorter time at the terminal with those that have just arrived, in other words, the last group that has been stored in the terminal with the new inbound containers.
- Strategy 3 ( $S_3$ ). The third strategy requires clearing movements and rehandles during the operational planning. It consists in replacing old containers that are still in the terminal when new cargo is ready to be unloaded in the terminal. These new containers will be stored in those bays with fewer remaining containers, which in turn have the highest probability of leaving the terminal.

## 3. METHODOLOGY

The methodology consists on developing a mathematical model to calculate the expected number of rehandles over the time a container remains in the storage area (dwell time).

Assumptions:

- Ships' interarrival time is constant.
- The number of containers is constant for all ships.
- The dwell time in the storage area follows a Weibull distribution. Other authors such as Watanabe (2001) assumed an exponential distribution to characterize the containers' departure process. This exponential distribution function is a specific case of the Weibull distribution.
- The import block is divided into  $K$  groups of bays (sub-blocks) and each sub-block has the same capacity.
- The maximum stack height is limited.
- It is not allowed to mix containers from more than two different ships in the same sub-block.

- It is assumed that the time-planning horizon is cyclical.
- Secondary rehandles have not been taken into consideration in the model.

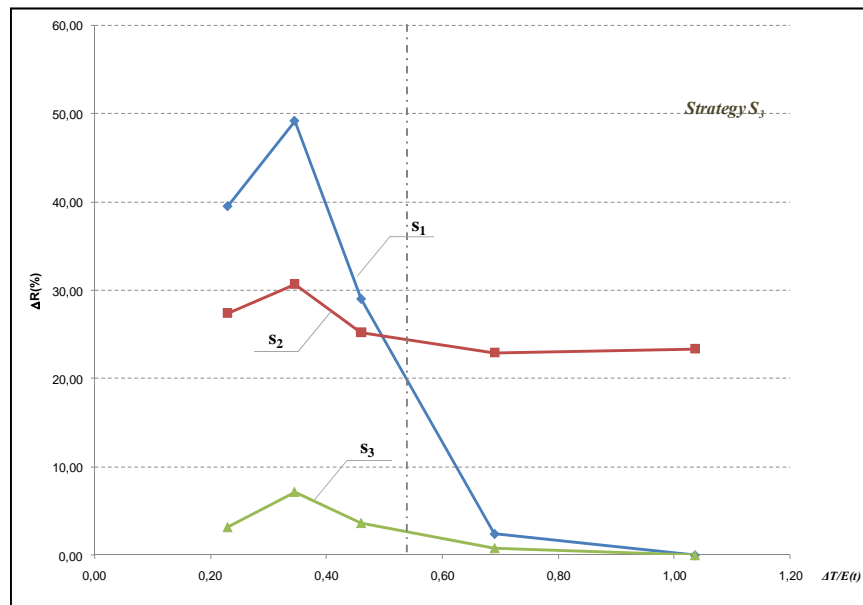
### 3.1 A numerical case

The import storage yard has five sub-blocks ( $K=5$ ) with the same capacity, which equals the number of containers per vessel. Each sub-block is divided into ten slots (length) and six rows (width). Containers are stacked up to three or five tiers high, where  $h=3$  represents a container terminal with moderate volume, while  $h=5$  represents a terminal operating close to its maximum capacity (congested). The terminal will be operated by rail-mounted gantry cranes (RMG), which have a maximum operative stacking height of six containers.

The arrival time of each containership is determined by the long-term schedule. It is assumed that the arrival rate of import containers follows a cyclic pattern equivalent (in terms of time) to seven ships arrivals, that is, the capacity of the import storage yard is designed to accommodate, at least, the unloaded container volume from seven ships ( $N=7$ ). The amount of unloaded import containers per ship is 180 ( $n$ ) when the stacking height is three tiers and 300 ( $n$ ) when it is five tiers high.

The ship interarrival time  $\Delta T$  is assumed to be constant. Different scenarios have been defined by increasing  $\Delta T$  from 0 to 4.5 days. We assume that the dwell time in the storage  $t$  follows a Weibull distribution with parameters  $c$  and  $\lambda$ , whose values are:  $c=1$ ,  $\lambda=0.230$  (scenario (a)) and  $c=1.5$ ,  $\lambda=0.073$  (scenario (b)).

In the case of  $c=1$ , the dwell time,  $t$ , follows an exponential distribution. The terminal departure rate ( $\lambda$ ) has been calibrated so that the dwell time reaches 4 or 5 days (the normal values for this type of freight in these terminals).



Optimum strategy depending on  $\Delta T/E(t)$  for scenario (a) and stacking height 5 ( $h$ ).

As an example of optimal strategies, in the following figure the optimal strategy for each specific value of  $\Delta T/E(t)$ ,  $h=3$  and scenario a is shown.

#### 4. CONCLUSIONS

This paper has analyzed the performance of different storage strategies aiming to reduce the number of unproductive moves in the import container storage area. These strategies have been evaluated using the methodology described in this paper. The model that was developed enables the quantification of the expected number of rehandles (vertical rehandles and clearing moves) that result from combining containers with different departure probabilities in the same stack.

The main contributions of this paper are the following:

This model takes into account the different probabilities of leaving the terminal with regard to the time at which each container arrives. Therefore each container has a different probability of departure depending on time. This enables us to quantify the number of rehandles that result from having a mix of containers with different probability of departures in the same stack. This approach differs from previous studies which assumed that all containers have the same departing probability.

Three new storage strategies were defined for inbound containers, allowing the operations to be analyzed more in depth than the strategies developed in previous contributions. Castilho and Daganzo (1993) followed by Kim and Kim (1999) only considered two cases for import: segregation and non-segregation.

More specifically, we can observe that strategies S1 and S2, which are comparable to the non-segregation strategy, are recommended for terminals with a short average stacking height and a ship headway-to-container dwell time ratio less than 0.5, or when container dwell time is high. In contrary, for terminals with a small storage area and high traffic volume (when storage capacity must increase by way of higher container stacking), strategy S3 becomes preferable for inbound yard management, requiring fewer rehandling moves and thus demonstrating the advantage of dynamic strategies in these situations.

In this study, an analytic methodology based on probabilistic distribution functions was developed. This allows us to evaluate each strategy in a stochastic context and avoiding excessive computational calculations.

#### REFERENCES

- De Castilho, B. and Daganzo, C. (1993). Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transp. Res. Part B* 27B(2), 151-166.
- Kim, K.H. and Kim, H.B. (1999). Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals. *Int. J. Prod. Econ.* 59, 415-423.
- Watanabe, I. (1991). Characteristics and analysis method of efficiencies of container terminal – an approach to the optimal loading/unloading method. *Contain. Age* March, 36-47.



## Mejorando el *project appraisal*. Aportaciones a la evaluación de nuevas líneas de alta velocidad

Marta Sánchez Borràs <sup>1</sup>, Francesc Robusté Antón <sup>1</sup>, Mateu Turró Calvet <sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITT e-mail: [marta.sanchez-borras@upc.edu](mailto:marta.sanchez-borras@upc.edu), [f.robusté@upc.edu](mailto:f.robusté@upc.edu), [m.turró@upc.edu](mailto:m.turró@upc.edu)

**Palabras Clave:** project appraisal, alta velocidad, ferrocarril

### Resumen:

La presente investigación presenta la colaboración entre el CENIT y Renfe, que ha consistido en la elaboración de una metodología específica para la evaluación económica y social de la Alta Velocidad (AV) ferroviaria, con un enfoque innovador y de sistema, que permite evaluar la realidad de la AV ferroviaria en España de una forma rigurosa y a la vez imaginativa que supera los habituales CBA desarrollados para aspectos operativos (la AV incluye aspectos tácticos y estratégicos también).

### 1. INTRODUCCIÓN

Dada la importancia de una correcta evaluación de las inversiones, tanto por sus repercusiones económicas como sociales, es imprescindible disponer de una metodología eficiente que garantice la mejor utilización de los recursos económicos disponibles, entendiendo como mejor utilización aquella que garantice una rentabilidad adecuada y beneficios para los distintos actores afectados por la construcción de un proyecto (ej. nueva LAV) o la implementación de una medida (ej. incremento de la frecuencia de paso o incremento del canon por uso de la infraestructura ferroviaria).

La evidencia empírica muestra que tanto los individuos como los gobiernos toman decisiones estratégicas independientemente de su racionalidad económica. Ello se debe a que si bien todas las inversiones de dinero público deberían someterse previamente a un análisis coste-beneficio (CBA), algunos proyectos de transporte especiales como los proyectos de Alta Velocidad (AV) ferroviaria pueden contener atributos ocultos para los usuarios que van más allá de las consideraciones del tiempo, coste, confort, fiabilidad, etc., de un modo similar a como se asigna dinero público a las artes y la educación, por ejemplo. Es por ello que surge la cuestión de si la racionalidad económica debería predominar en todas las inversiones de infraestructuras de transporte o sólo a la parte realmente asociada al transporte (otras perspectivas de la AV pueden incluir aspectos intangibles pero valorados socialmente como la fiabilidad y aprovechamiento del servicio, iconos culturales del siglo XXI, orgullo tecnológico, estación de AV como puerta de entrada a una gran ciudad con un papel similar al de los grandes aeropuertos como la T1 de Madrid o la T4 de Barcelona, desarrollo económico, extensión del “*commuting*” a escala regional, cohesión territorial y social, re-estructuración urbanística de corredores, etc.).

Del mismo modo que el desarrollo de la Unión Europea y la necesidad de la red TEN-T constituyen propuestas estratégicas, algunas decisiones relativas a la implementación de líneas o redes de alta velocidad son más estratégicas que operacionales y deberían, por consiguiente, considerar todos los efectos de los proyectos para todos los actores involucrados, incluyendo a los usuarios, no usuarios, operadores, modos competidores, industria y sociedad. Para ello, el CBA debería complementarse con tablas input-output y/o análisis multicriterio,

tales como los descritos por las Guías de Evaluación de Proyectos Ferroviarios de la Comunidad Europea y el Banco Europeo de Inversiones, elaboradas por el CENIT (no implantadas en [www.railpag.org](http://www.railpag.org)).

Por consiguiente, es preciso desarrollar una nueva metodología cuantitativa para evaluar decisiones estratégicas, es decir, para evaluar la Alta Velocidad ferroviaria.

## 2. METODOLOGÍA Y APORTACIONES

La metodología de trabajo propuesta para alcanzar el objetivo general planteado se ha estructurado en 4 actividades (cf. figura 1):

- Actividad 1: Identificación de la realidad de la Alta Velocidad
- Actividad 2: Caracterización de la realidad de la Alta Velocidad
- Actividad 3: Cuantificación de la realidad de la Alta Velocidad
- Actividad 4: Conclusiones del estudio

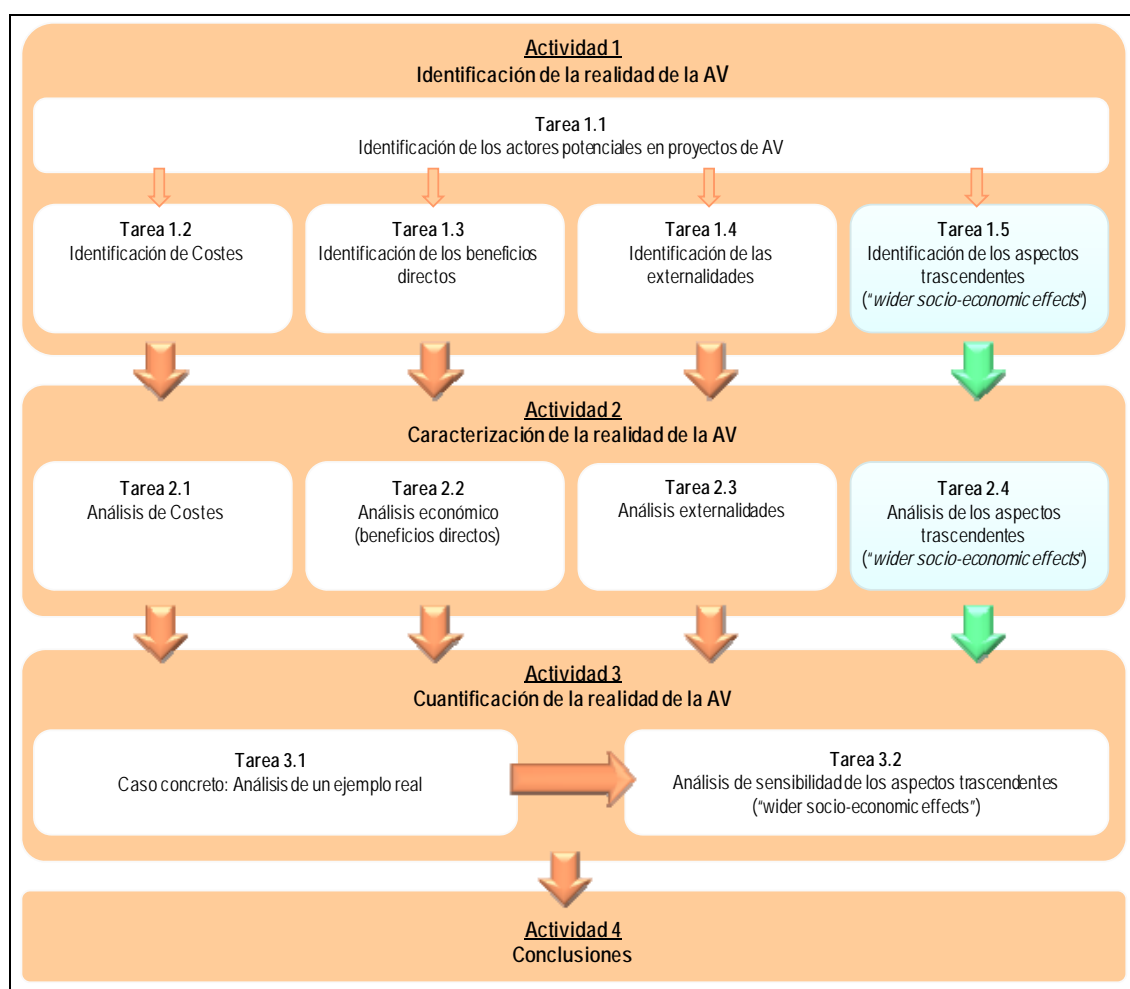


Figura 1. Metodología de trabajo

Utilizando los inputs de las Actividades 1 y 2, la Actividad 3 se ha centrado en:

- La evaluación económica de un proyecto de AV en España actualmente en explotación, partiendo de las contribuciones de RailPag, elaborado por el CENIT para el BEI bajo la dirección de Mateu Turró.

- El análisis de sensibilidad de los aspectos trascendentes en la evaluación económica de la realidad de la Alta Velocidad.

La aplicación de la metodología propuesta, basada en el análisis económico presentado en formato de matriz, en el que a cada celda de la matriz se le ha asociado el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), es decir, se le ha asociado el cálculo del VAN a cada efecto específico (identificado en la Actividad 1) respecto a un actor en concreto (identificado también en la Actividad 1) para toda la vida útil del proyecto (valores incrementales respecto a una alternativa de referencia), permite:

- Facilitar la comprensión de todos los flujos económicos y financieros, al conocer los actores que perciben cada uno de los efectos.
- Realizar el cálculo típico de los análisis de caja y de coste-beneficio, gracias a que la matriz de incidencia representa la relación natural entre el análisis coste-beneficio y el análisis multicriterio.
- Proporcionar los datos básicos necesarios para el cálculo de indicadores estándar de rentabilidad, como el Valor Actual Neto (VAN), la Relación Coste – Beneficio (RCB) o la Tasa Interna de Retorno (TIR).
- Obtener el coste-beneficio neto para cada actor *o stakeholder* si se suman todas las celdas de la columna correspondiente a dicho actor.
- Valorar el peso relativo de los aspectos hasta hoy considerados “intangibles” (efectos tácticos y estratégicos cualitativos en todos los agentes o stakeholders) respecto al peso de los aspectos cuantitativos habituales del análisis Coste-Beneficio (efectos directos u operativos) y por consiguiente, hacer una valoración crítica sobre las ópticas actuales de evaluación de proyectos de Alta Velocidad y justificar si realmente existen razones específicas que justifiquen un tratamiento especial tanto en la fase de construcción como en la de explotación.
- Comparar la factibilidad socioeconómica para la sociedad con la factibilidad financiera para operadores específicos, lo que permite deducir aquellas inversiones que podrían ser apropiadas desde el punto de vista social pero bastante inviables desde el punto de vista del operador privado o muy arriesgada desde el punto de vista de un banco.

## REFERENCIAS

- [1] Criado, O.; Sánchez-Borràs, M.; Robusté, F. (2011), “The value of time influence in the profitability of railway projects: theoretical formulation and case study”. *Transportation Research Record*. Accepted for publication in October 2010.
- [2] Sánchez-Borràs, M.; Robusté, F., Criado, O. (2010), “High-Speed railways in Spain: Example of success?”. *Transportation Research Record*. Accepted for publication in January 2011.
- [3] CENIT (2011). Metodología específica para la evaluación económica y social de la Alta Velocidad ferroviaria (ME3SAVE).



## ASESORAMIENTO SOBRE LAS MEDIDAS DE GESTIÓN DE LA VELOCIDAD IMPLANTADAS EN LA C-32

Josep Maria Torné Santos<sup>1</sup>, Francesc Soriguera i Martí<sup>2</sup> y Dulce María Rosas<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departament ITT e-mail: josep.maria.torne@upc.edu <sup>2</sup> Departament ITT e-mail: francesc.soriguera@upc.edu, <sup>3</sup> Departament CENIT e-mail: dulce.rosas@upc.edu

**Palabras Clave:** velocidad variable, emisiones, accidentalidad, congestión.

**Resumen:** *La ponencia versa sobre la evaluación de los efectos de la gestión variable del límite de velocidad en las autopistas metropolitanas del entorno de Barcelona, medida instaurada desde el 1º de enero de 2008, requiere de un análisis cuantitativo en términos de fluidez, polución y accidentalidad, teniendo en cuenta que la comparación debe realizarse en escenarios homogéneos de demanda. A partir de una colección de datos obtenidos mediante detectores de espira, situados en la metropolitana C-32 entre Sant Boi de Llobregat y Castelldefels, se presenta el proceso que se ha seguido para llegar a la evaluación de la rentabilidad social de la medida, prestando especial atención a la construcción de un escenario de comparación homogéneo, la modelización macroscópica del corredor basada en un modelo de transmisión de celdas y la evaluación mediante una función objetivo.*

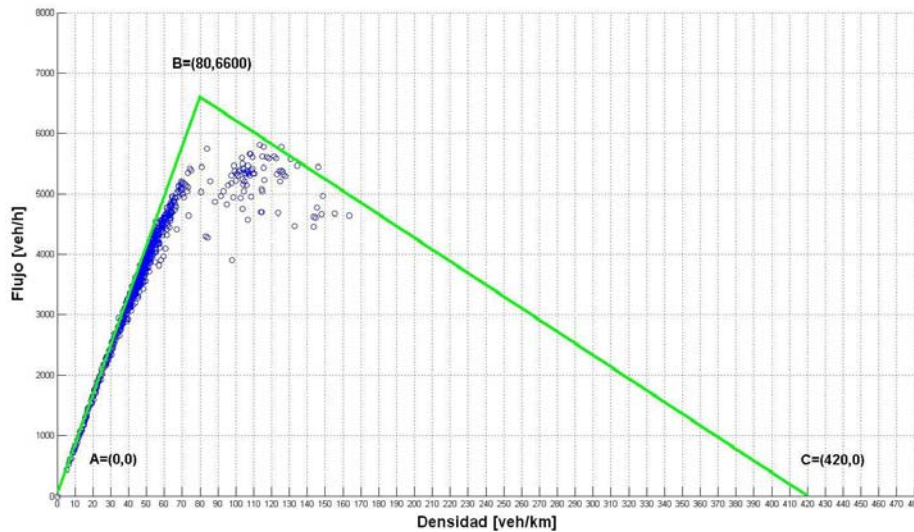
### 1. INTRODUCCIÓN

Desde la introducción de los denominados sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), los Sistemas Avanzados de Gestión de Tráfico han constituido una de sus aplicaciones paradigmáticas. Durante las últimas décadas se han ido desarrollando una amplia variedad de aplicaciones urbanas e interurbanas, cuyo progreso ha venido marcado por una combinación de las necesidades, las tecnologías disponibles y la evolución de los sistemas. En el ámbito interurbano, las actuaciones se han centrado en las estructuras lineales de las autopistas, con el desarrollo de sistemas de detección de congestiones, incidentes, control de accesos e información de tráfico, además de la gestión dinámica del límite de velocidad que se analiza en este artículo

A priori, se pueden considerar diferentes ventajas desde el punto de vista del flujo de tráfico que introduce la implantación de estos sistemas de limitación de la velocidad: mejorar la fluidez del tráfico retrasando o previniendo el inicio de situaciones de stop and go, hacer más fiable el tiempo de viaje y reducir los accidentes [1]. Esta mejora de la fluidez en el flujo de tráfico se debería conseguir con reducciones automáticas de los límites de velocidad en las horas punta en respuesta al flujo y la velocidad observados. De este modo, se consigue homogeneizar el tráfico haciéndolo más estable y así poder trabajar a flujo máximo durante más tiempo.

A las consideraciones generales, en el caso de nuestro país hay que añadir la necesidad de reducir los altos niveles de concentración de sustancias nocivas en el aire, que ha sido la razón por la cual el Gobierno de Cataluña ha decidido implantar este tipo de medidas. En una primera fase, se determinó reducir el límite de velocidad en las autopistas de acceso a Barcelona a 80 km/h, a la vez que se tomaron medidas sancionadoras que asegurasen dicho cumplimiento. Asimismo, en enero de 2009 se inició una segunda fase con la aplicación de un

sistema de gestión variable del límite de velocidad (GVV) en un corredor piloto C31-C32 en el acceso sur a Barcelona.



**Figura 1** Caracterización triangular del diagrama fundamental a partir de datos del detector de espira doble ubicado en la C32 pk 50+840 [2].

## 2. METODOLOGÍA

Se realiza un análisis cuantitativo de los efectos que estas dos medidas han tenido sobre el flujo de tráfico en términos de fluidez, polución y accidentalidad. Teniendo en cuenta que la comparación debe realizarse en escenarios homogéneos de demanda (i.e. mismas productividades), se requiere realizar una modelización macroscópica de 14.5km de la autopista metropolitana C-32 entre Castelldefels y Sant Boi de Llobregat en sentido Barcelona, basándose en diagramas fundamentales medidos que definen la dinámica del flujo del tráfico en la vía (Figura 1). Se evaluaron tres escenarios mediante el macrosimulador CTMSIM:

1. **Antes de la aplicación de la medida de limitación de velocidad, caso real (escenario Antes Real).** Situación para antes del uno de enero de 2008 donde los límites de velocidad eran los correspondientes a una vía interurbana (mayoritariamente 120 km/h). Se observa que los límites de velocidad están generalmente por encima de la velocidad libre de estas autopistas metropolitanas y por lo tanto, generalmente las velocidades medias en condiciones de circulación libre son sensiblemente inferiores al límite de velocidad.
2. **Después de la aplicación de la medida de limitación de velocidad, caso ideal (escenario Después Ideal).** Situación a partir del uno de enero de 2008 donde los límites de velocidad se fijaron a 80 km/h en todo el eje de estudio. Se trabaja con diagramas fundamentales ideales suponiendo un cumplimiento estricto de los límites de velocidad establecidos.
3. **Después la aplicación de la medida de limitación de velocidad, caso real (escenario Después Real).** Situación idéntica a la anterior, aunque se trabaja con los diagramas fundamentales medidos donde se observa que los límites de velocidad no se

cumplen de manera estricta y por lo tanto, las velocidades medias en condiciones de libre circulación son ligeramente superiores a las límite.

De este modo, se evalúa el corredor mediante una función objetivo en términos monetarios proporcionando una estimación de la rentabilidad social de la medida. Dicha función objetivo evalúa el corredor en términos de fluidez (retrasos respecto al tiempo de viaje en flujo libre), polución (emisiones respecto al óptimo de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y PM<sub>10</sub>) y accidentalidad (riesgo de sufrir un accidente en función del límite de velocidad establecido).

### 3. CONCLUSIONES

Se concluye que las medidas de gestión del límite de velocidad en las autopistas metropolitanas de acceso a una gran ciudad no pueden aportar por sí solas beneficios significativos en términos de fluidez del tráfico. Es cuando se aplican conjuntamente con otras estrategias de gestión del tráfico que las sinergias generadas pueden resultar en unos beneficios notables [3].

La limitación a 80 km/h fijos ha supuesto un pequeño aumento en el tiempo de viaje en periodos de baja demanda y una variación inapreciable para los periodos de hora punta [2]. Sin embargo, la falta de cumplimiento en los límites de velocidad hace que los retrasos en circulación libre sean menores a los esperados por la medida y por tanto, se produce una suavización de la falta de fluidez entre el escenario Después Ideal y el Después Real.

En términos de emisiones totales, se observa una disminución de las emisiones de aproximadamente un 5% en los periodos circulación libre para todos los escenarios analizados y una menor reducción para los periodos de hora punta en los escenarios Después Ideal y Después Real [2]. Hay que subrayar que sólo se conseguirá reducir las elevadas concentraciones de contaminantes en hora punta cuando se consiga mejorar la fluidez del corredor.

La siniestralidad es el indicador que más ha mejorado debido a la implantación de las diversas medidas. Ahora bien, hay que ser muy cuidadoso en la interpretación de los resultados ya que estos no son concluyentes debido a las limitaciones metodológicas que presenta el tratamiento estadístico de los fenómenos de accidentalidad [3].

Para los escenarios evaluados con la misma demanda, la rentabilidad social de la medida ha sido negativa ya que ha supuesto un aumento en los costes. Esto es debido a que los principales efectos de la medida se producen en situaciones de circulación libre e implican un incremento del tiempo de viaje, que supone un coste a los usuarios de estas vías. No obstante, se debe ser consciente de la gran sensibilidad de este resultado ante el valor que los usuarios otorgan al tiempo de viaje. Los valores considerados son estándares en el coste de un retraso, y podría ser lógico que los retrasos marginales de unos pocos minutos fruto de circular a una velocidad libre menor fueran ligeramente menores. Este análisis, que podría cambiar el signo de los resultados aquí expresados, debería ser objeto de investigaciones futuras.

### REFERENCIAS

- [1] Soriguera, F. (2010): "Gestión variable del límite de velocidad en autopistas metropolitanas: un análisis conceptual", Proceedings of the IX Congreso de Ingeniería del Transporte, Madrid, edited by Francisco Aparicio Izquierdo, ISBN 978-84-96398-41-2
- [2] Torné J.M., D. Rosas and F. Soriguera (2011): "Evaluation of speed limit management on C-32 highway access to Barcelona", Paper #11-2397, Proceedings of the TRB 90th Annual Meeting, Washington, D. C. January 23-27th, 2011.

[3] Torné, J.M., D. Rosas and F. Soriguera (2010): “Evaluación de la gestión variable del límite de velocidad en la autopista metropolitana C-32 en el acceso a Barcelona”, Proceedings of the IX Congreso de Ingeniería del Transporte, Madrid, edited by Francisco Aparicio Izquierdo, ISBN 978-84-96398-41-2.



## ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIAJE EN AUTOPISTAS

Francesc Soriguera.<sup>1</sup>, Francesc Robusté<sup>2</sup> y Dulce María Rosas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departament ITT e-mail: francesc.soriguera@upc.edu, <sup>2</sup>Departament ITT e-mail: f.robuste@upc.edu,

<sup>3</sup>Departament CENIT e-mail: dulce.rosas@upc.edu

**Palabras Clave:** tiempo de viaje, fusión de datos.

**Resumen:** *El tiempo de viaje (TV) para conducir por carretera es la información más apreciada de tráfico. La medición del TV en tiempo real es también un indicador perfecto del nivel de servicio en una carretera, y por lo tanto es una medida útil para los gestores de tráfico para mejorar las operaciones en la red. Entonces, la medición exacta del TV es uno de los factores clave en los sistemas de gestión del tráfico. Por otro lado, el desarrollo de nuevos sistemas de control del tráfico y el creciente interés de los operadores de las carreteras e investigadores en la obtención de mediciones fiables del TV ha llevado al desarrollo de múltiples fuentes de datos de TV y algoritmos de estimación. Esta situación proporciona un contexto perfecto para la aplicación de metodologías de fusión de datos para obtener la máxima precisión de la combinación de los datos disponibles.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de moderar la construcción de nuevas infraestructuras debido a las restricciones territoriales, ambientales y económicas, y dada la gran explosión de la movilidad en las últimas décadas en todos los sectores, la gestión del sistema de transporte adquiere un papel fundamental como un optimizador de los recursos disponibles. Esto requiere la aplicación de nuevas políticas dirigidas a lograr dos objetivos principales: la sostenibilidad y la competitividad.

La gestión de la movilidad es el gran problema. Las tecnologías de la información y las comunicaciones son las herramientas. Por lo tanto, es necesario un sistema de gestión que vincule a estos objetivos con las herramientas disponibles. Este sistema de gestión debe basarse en información del tráfico cuantitativo en tiempo real. El tiempo de viaje y su fiabilidad se destacan como principales factores en los sistemas de gestión del tráfico, ya que son los mejores indicadores del nivel de servicio en una carretera, y quizás la variable más importante para medir la congestión. Además, el tiempo de viaje es la mejor información sobre el tráfico y la variable más apreciada por la mayoría de usuarios de las carreteras, ya que desempeña un papel fundamental en el proceso de planificación del viajero (viajes o no viajes, tiempo de viaje, ruta y modo de elección...). Al mismo tiempo, la medición del tiempo de viaje de la carretera y predicción cuantitativa en condiciones de congestionadas presentan un llamativo desafío metodológico.

## 2. METODOLOGÍA

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una metodología capaz de proporcionar a un conductor que entra en una carretera información precisa del tiempo de viaje que realizará. Notar que esta información consta de dos componentes: la medición de tiempo de viaje actual y la estimación de la evolución de las condiciones del tráfico durante el tiempo necesario para el viaje. Un requisito adicional de la investigación es que la estimación del tiempo de viaje se debe obtener haciendo el mejor uso posible de las múltiples fuentes de datos disponibles de carreteras. Por lo tanto, el objetivo es agregar valor a los datos de tráfico que está siendo medido.

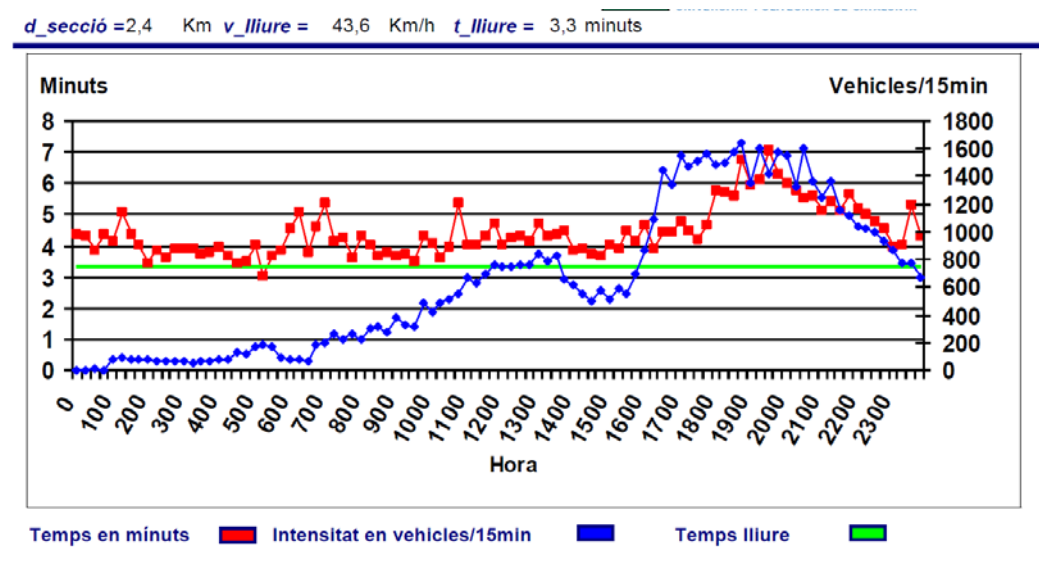
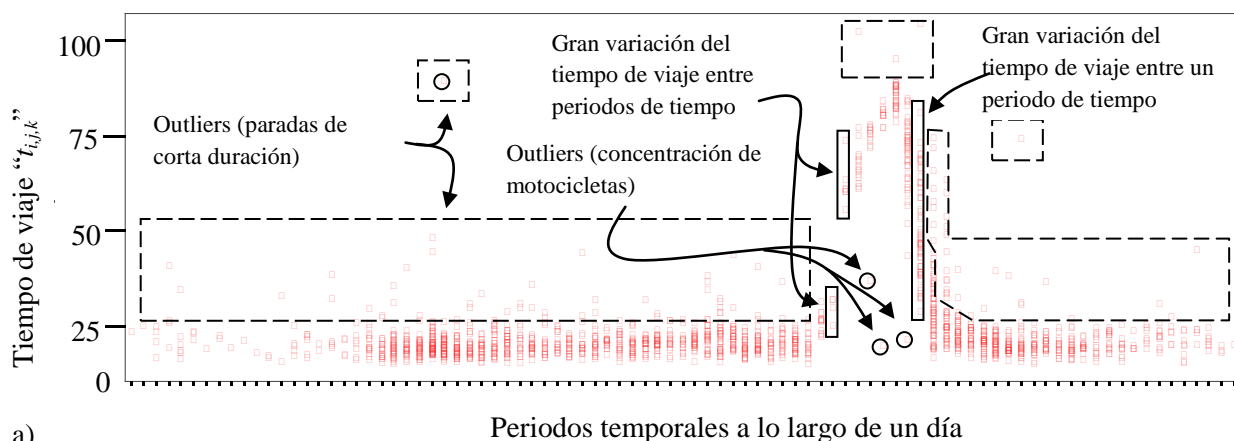
Aparecen dos líneas de investigación al enfrentarnos con la cuestión de la monitorización en tiempo real de la evolución del tráfico. La primera y más intuitiva es saber cuantitativamente lo que ocurre en un tramo de autopista mediante la medición. En la práctica esto no es una tarea fácil. Los equipos de medida son limitados. Además, no se pueden medir la mayoría de las variables importantes. Entonces, la cantidad de mediciones pueden no ser representativas del flujo de tráfico promedio. Ya que su cobertura espacial puede ser limitada. También, las agregaciones temporales necesarias para reducir la cantidad de datos que se transmiten pueden sesgar la medición y puede añadir un poco de retraso a la información. La existencia de valores atípicos añade adicionales complejidad [1]. Y, por último, una cantidad de medidas por lo general pueden estar fuera de orden. La alternativa consiste en el modelado.

En un sistema de peaje cerrado donde las plazas de peaje se encuentran en las rampas de entrada/salida y a cada vehículo se le cobra una tasa específica en función de su origen y destino, los datos del cobro de peaje también se pueden utilizar para medir los tiempos de viaje troncales de la carretera. El método propuesto [2] permite calcular la estimación de tiempos de viaje troncal de secciones individuales de la carretera (se define como una sección al tramo de la carretera entre dos rampas vecinas) usando diferentes itinerarios abarcando diferentes orígenes-destinos. El método proporciona estimaciones de tiempo de viaje sin necesidad de invertir en cualquier tipo de infraestructura o tecnología. Esto supera algunas de las limitaciones de otros métodos, como el retraso de la información y el exceso en la estimación de tiempo de viaje debido a la acumulación de tiempos de salida (es decir, el tiempo requerido para viajar a lo largo del enlace de salida, más el tiempo requerido para pagar la cuota en el número de puerta).

También se presenta un enfoque sencillo para la predicción a corto plazo de tiempos de viaje de la carretera, lo que representa una estimación precisa del tiempo de viaje esperado para un conductor que parte de una ruta en particular. El algoritmo se basa en la fusión de diferentes tipos de datos que provienen de fuentes diferentes (detectores de espira inductivos y datos de peaje), así como también el cálculo de diferentes algoritmos [3]. Aunque el algoritmo de fusión de datos que se presenta se aplica a estas fuentes de datos en particular, fácilmente podría generalizarse a otros tipos de datos equivalentes.

El objetivo del proceso de fusión de datos propuesto es obtener un valor fusionado más fiable y preciso que cualquiera de las estimaciones individuales. La metodología supera algunas de las limitaciones de los algoritmos de estimación del tiempo de viaje basados en fuentes de datos únicas, como la limitada cobertura espacial de los algoritmos basados en puntos fijos de mediciones o la demora la información de mediciones directas de los itinerarios de viaje cuando la difusión de la información a los conductores es en tiempo real.

Los resultados obtenidos en una prueba piloto en la autopista AP-7 de peaje, cerca de Barcelona en España, muestran que la metodología desarrollada es apropiada (Figura 1).



**Figura 1** a) Ejemplo de diferentes tipos de “outliers” para una muestra de tiempos de viajes  
b) Ejemplo de resultados de tiempo de viaje en la autopista AP-7

### 3. CONCLUSIONES

El método propuesto es capaz de estimar los tiempos de viaje sola sección (es decir, el tiempo requerido para viajar entre dos cruces consecutivos en el tronco principal de la autopista) y también el tiempo de salida en cada cruce (es decir, el tiempo requerido para viajar a lo largo del enlace de salida más el tiempo necesario para pagar la cuota en la caseta de peaje). A partir de la combinación de ambas estimaciones es posible calcular todas las combinaciones necesarias de itinerarios de viaje de viaje, incluso en aquellas secciones con muy pocas observaciones donde la medida directa sería problemática, evitando el retraso de la información en la aplicación en tiempo real.

La precisión en la estimación de tiempo de viaje ayuda al desarrollo de un sistema de detección de incidentes robusto, mediante la comparación de las estimaciones en tiempo real con los tiempos de viaje recurrentes. Dado que el método proporciona información de salida de tiempo, también es posible detectar si el incidente fue en la carretera principal o en la plaza de peaje de la rampa. Esta es una información valiosa para los operadores de las carreteras.

El algoritmo de fusión de datos es un proceso de dos niveles utilizando la lógica difusa y un enfoque probabilístico que se aplica la regla de Bayes. Los tiempos de viaje se encuentran fusionados para ser más confiables que los iniciales y más precisos si el proceso de aprendizaje es cuidadosamente desarrollado.

Los resultados de la prueba piloto que se llevó a cabo en la autopista AP-7 en España indican la idoneidad del método para estimar el tiempo de viaje en el enlace de un sistema de peaje cerrado. También se muestra la adecuación del sistema de fusión de datos para un mejor aprovechamiento de la supervisión de diferentes equipos ya instalados en las carreteras.

Futuras investigaciones son por ejemplo, analizar los efectos de mejorar la exactitud de los datos de origen para fusionar en la estimación final, o la definición de los requisitos en el proceso de aprendizaje para mejorar la fusión probabilística.

### REFERENCIAS

- [1] Soriguera, F. and F. Robusté. (2011-b) Estimation of Traffic Stream Space-Mean Speed from Time Aggregations of Double Loop Detector Data. *Transportation Research Part C* **19**(1), 115-129.
- [2] Soriguera, F., D. Rosas and F. Robusté. (2010) Travel Time Measurement in Closed Toll Highways. *Transportation Research Part B* **44**(10), 1242–1267.
- [3] Soriguera, F. and F. Robusté. (2009) Highway Travel Time Accurate Measurement and Short-Term Prediction Using Multiple Data Sources. *Transportmetrica* iFirst 1-25.

# OPTIMITZACIÓ D'OPERACIONS EN AEROPORTS

César Trapote-Barreira.<sup>1</sup>, Francesc Robusté.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departament ITT e-mail: cesar.trapote@upc.edu, ... <sup>2</sup>Departament ITT e-mail: f.robuste@upc.edu

**Paraules Clau:** optimització, operacions, processos, aeroports, temps, costos, fiabilitat.

**Resum:** *La ponència tracta les operacions aeroportuàries des de la perspectiva de sistema de transport, desenvolupant models d'optimització per millorar el rendiment del sistema en base a la reducció de les variables temps i costos i la millora de la fiabilitat dels processos.*

## 1. INTRODUCCIÓ

La reducció dels endarreriments en el transport aeri és una de les qüestions que més interessin a la Comissió Europea ja que impacten molt negativament en l'eficiència del sistema. En particular, les operacions als aeroports és responsable d'un 25% dels endarreriments de vols segons estudis d'Eurocontrol. Fins ara, diferents projectes impulsats des d'Europa han treballat sobre la qüestió, com el SESAR (*Single European Sky ATM Research*), el TAM (*Total Airport Management*) o el CDM (*Collaborative Decision Making*); però s'han centrat més en les operacions en el costat aire que tenen a veure amb l'aeronau i s'ha deixat de banda la operativa al costat terra.

En realitat el costat aire i el costat terra de l'aeroport no estan desacoblats. Els processos en la terminal impacten en l'escala de l'aeronau, a través dels processos associats als passatgers i els associats a l'equipatge dels que es responsabilitza l'agent de handling. Per això, l'operativa aeroportuària és complexa. Es requereix un enfocament sistèmic en l'anàlisi de la sensibilitat dels processos i una proposta de models i tècniques d'optimització orientades a millorar l'eficiència i la fiabilitat del sistema.

## 2. METODOLOGIA

La ponència exposa diferents models per estudiar i optimitzar els fluxos d'aeronaus, passatgers i equipatges que impacten en l'escala de l'aeronau, que es considera l'*output* productiu de l'aeroport (grups de passatgers desembarcats i embarcats en aeronaus que aterren i s'enlairen en una finestra de temps determinada). Una rotació elevada, o temps d'escala curts, afavoreix que els sistemes tinguin una producció més elevada però no necessàriament més eficient (també cal contenir els costos i optimitzar processos).

Per produir unes escales de forma eficient cal disposar dels mitjans adequats en el moment adequat allà on cal, és a dir, cal anticipar-se a les necessitats en comptes de reaccionar contra els esdeveniments. Però la realitat és que degut als endarreriments i la falta de ciència en la gestió aeroportuària, s'està treballant més amb el segon paradigma, sobredimensionant els recursos per donar qualitat i robustesa a la prestació dels serveis. Al contrari, per treballar en base al primer paradigma cal entendre que la sincronització de passatgers, equipatges i aeronaus és el resultat d'uns processos que estan entrelligats i que s'han d'executar de forma coordinada.

Considerant el primer dels fluxos, el d'aeronaus en l'aeroport, es presenta el problema clàssic del *Gate Assignment* en el que s'ha fet una aportació incloent en el model el temps de rodatge de l'aeronau [1]. La modelització del sistema i la posterior optimització amb un algoritme de *Tabu Search* ha produït uns resultats molt interessants en termes de reducció de costos per aeroport i companyia aèria.

D'altra banda, el temps de *gate* (o *stand*) té una component estocàstica associada a la naturalesa dels processos aeroportuaris. Per donar robustesa a aquests processos s'ha de treballar en la coordinació de les operacions, fonamentalment les de *handling* per atendre passatgers i equipatges, i en el desenvolupament de models causals a partir dels mapes de processos.

Un altre flux important que es tracta és el d'equipatges que es desacoblen de la traça dels passatgers en la facturació per passar als moderns sistemes automàtics de tractament i després a l'operativa de handling. La facturació es treballa normalment amb assignacions estàtiques degudes a criteris comercials però aquí es desenvolupa un model d'assignació de mostradors descentralitzat que ha estat aplicat sobre la facturació de la T2 de Barcelona amb uns guanys importants d'eficiència [2]. El model es basa en l'anàlisi del procés i el plantejament d'un model analític que es contrasta amb simulació en diferents escenaris.

Finalment, la gestió òptima del flux de passatgers és una clau competitiva pels aeroports, especialment pels que es volen consolidar com hubs i oferir serveis de connexió, ja que suposa una component extra de temps important pel passatger a l'hora de triar el seu itinerari [3]. Per aquest motiu, el temps mínim de connexió és un paràmetre de qualitat valorat per les companyies aèries i agents de handling a l'hora de planificar les seves xarxes i la localització de les seves bases.

La informació del temps necessari perquè un passatger arribi des de la porta de la terminal fins a la porta d'embarcament, o entre portes d'embarcament si és una connexió, és beneficiosa, en primer terme, pel passatger que vol treure rendiment al temps que estarà en la terminal i, en segon terme, als gestors aeroportuaris perquè poden predir com evolucionen les corbes de densitat de passatgers a la terminal i adequar els seus recursos. Un exemple d'aquest tipus de procés aeroportuari és el que es té lloc als filtres de seguretat que suposen actualment un dels colls d'ampolla de la capacitat de la terminal (en els últims anys s'ha incrementat el requeriment de seguretat i també el volum d'equipatge de mà per passatger).

A la ponència es presenta un model de gestió integrada del procés de filtres, partint del modelatge d'una línia de filtres (constituïda pels equips de detecció i els recursos humans) amb l'aplicació de la teoria de cues tàndem i estocàstiques per tractar el problema del rendiment des d'una perspectiva probabilista. Això està justificat perquè cal treure major rendiment de l'equip unitari abans de proposar nous dissenys de *layout* o mètodes de gestió de conjunt, de cara a poder fer front als pics de demanda. Tot seguit, es proposa un model de gestió del conjunt de línies, això consisteix en una assignació temporal per activar les línies actives en funció de com es generen les arribades de passatgers des de la facturació al filtre i les arribades directes al filtre del passatgers amb *check-in on-line*.

L'aplicació a un cas real ha demostrat unes millores significatives de fins un 30% en termes de rendiment del flux pel subsistema i una percepció de la qualitat molt millor per part dels passatgers.

### 3. CONCLUSIONS

La realitat aeroportuària és complexa i constitueix un camp interessant pel desenvolupament de nous models i tècniques d'optimització. Els processos i models presentats demostren que existeix un marge de millora important en l'eficiència i la qualitat del servei en aeroports. També que aquesta millora només es pot assolir si s'orienten els anàlisis a la producció del transport i s'integra en l'anàlisi el costat terra i l'aire.

### REFERÈNCIES

S'adjuntaran tres referències com a màxim.

- [1] Fernández, R. (2009): Optimización de la asignación de aeronaves a puertas de embarque en aeropuertos considerando el tiempo de rodadura.
- [2] Llorens, P., M. Estrada, L. Thorson i F. Robusté (2006): Descentralización del proceso de facturación del equipaje en el aeropuerto de El Prat (Barcelona).
- [3] Trapote, C. i F. Robusté (2008): Un modelo sobre la viabilidad del desarrollo de un hub en el aeropuerto de Barcelona.





## Robustesa de serveis ferroviaris

Òscar Criado<sup>1</sup>, Marta Sánchez Borràs<sup>1</sup>, Francesc Robusté<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ITT, CENIT – Centre d'innovació del transport

e-mail: [oscar.criado@upc.edu](mailto:oscar.criado@upc.edu), [marta.sanchez-borras@upc.edu](mailto:marta.sanchez-borras@upc.edu), [f.robuste@upc.edu](mailto:f.robuste@upc.edu)

**Paraules Clau:** Robustesa, Estabilitat, Horaris, Optimització ferroviària

**Resum:** *La robustesa de serveis ferroviaris, també anomenada estabilitat d'horaris, consisteix en l'elaboració d'horaris i itineraris de ferrocarril per a línies en condicions pròximes a saturació de manera que permetin una explotació dels serveis sense experimentar retards. La recerca i innovació en aquest àmbit s'ha centrat principalment en el desenvolupament d'una metodologia de mesura de la robustesa, basada en mètodes de simulació de serveis ferroviaris. La metodologia s'ha aplicat als horaris actuals de la línia Barcelona – Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, així com també en casos pràctics de modificació d'horaris per a escenaris futurs d'obres a la xarxa.*

### 1. INTRODUCCIÓ

L'explotació de línies ferroviàries pròximes a la saturació de la seva capacitat presenta una gran complexitat. L'elaboració d'horaris per a aquestes línies es centra en l'ús màxim de la capacitat disponible, mesurada en funció de la infraestructura existent, del sistema de senyalització i seguretat i de l'explotació comercial que se'n faci, assegurant una experimentació de retards mínima. En aquest sentit, la recerca s'ha focalitzat en la cerca de metodologies per a la determinació de la robustesa d'un horari de serveis, entesa com una acotació dels retards que experimenten els serveis i l'establiment d'una metodologia sòlida per al cas de la línia Barcelona – Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat.

Així doncs, s'han realitzat dos passos:

- Anàlisi de diferents metodologies existents i de la aplicabilitat de cada una d'elles.
- Aplicació d'una metodologia escollida a la línia Barcelona – Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC).

### 2. RECERCA REALITZADA

S'han identificat tres metodologies d'avaluació de la robustesa de serveis ferroviaris: les metodologies alemanya i suïssa i el mètode de Hürlimann et al.

La metodologia alemanya es basa en la verificació de què, després d'introduir una interrupció del servei igual a 10 minuts a la secció més limitant de la línia ferroviària considerada, la suma dels retards registrats a la sortida del sistema (trens que abandonen el sistema i trens que acaben en el sistema) és inferior a la suma dels retards introduïts al sistema (trens que entren al sistema i trens que comencen al sistema) i que l'horari de servei teòric es recupera com a molt tard al cap de dos cicles complets per a cada circulació.

La metodologia suïssa es basa en establir un valor probabilístic de retard i verificar si els retards produïts per aquest valor probabilístic en diverses simulacions del funcionament del sistema tendeixen a decreixer al llarg de la línia i, per tant, l'horari és estable/robust.

Finalment, el mètode de Hürlimann et al. consisteix en calcular un "Índex de freqüència de retard" F, consistent en una nova mesura de la fiabilitat dels serveis ferroviaris i que depèn

d'un llindar de no retard prefixat i del nombre de trens que arriben amb retards en el període d'estudi.

Les diferències entre aquestes metodologies determinen la seva aplicabilitat, sobretot, pel que fa a les dades que requereixen.

### 3. APLICACIÓ DE LA RECERCA

S'ha aplicat la metodologia alemanya a la línia Barcelona – Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. S'ha escollit aquesta metodologia pel fet que és un mètode ja utilitzat per una empresa ferroviària i que ha provat un correcte funcionament provat, i per disposar de les dades necessàries per aplicar-la. Aquesta metodologia es pot resumir en els següents passos:

1. Introducció d'un retard de 10 minuts en el punt més desfavorable de la xarxa (punt de capacitat consumida més gran).
2. Simulació del funcionament de la xarxa (mitjançant un model de simulació) amb la introducció dels 10 minuts de retard esmentats. En aquest sentit, s'ha elaborat un model de la línia d'FGC, que consta de la caracterització de tots els elements de la línia, incloent la infraestructura (longituds, pendents, curvatures, presència de túnel, desviaments), la senyalització (senyals, trams existent), el material rodant (pes, potència, velocitat màxima) i els horaris (horaris d'arribada i sortida, material rodant assignat als serveis). S'ha validat el model amb dades de l'explotació real de la línia. La simulació dels serveis de la línia en base al model s'ha fet mitjançant el simulador ferroviari OpenTrack.
3. Anàlisi dels retards obtinguts amb el model a cada una de les estacions de la línia i per a cada un dels serveis. S'han estudiat, específicament, els retards a l'inici de cada circulació o servei (retards a l'estació on s'inicia la circulació d'un servei) i al final de cada circulació o servei (retards a l'estació on finalitza la circulació d'un servei) durant el període d'hora punta del matí.
4. Verificació del compliment de la condició que la suma dels retards al final de la línia ( $\sum_m t_m^f$ ) és menor que la suma dels retards a l'inici de la mateixa ( $\sum_k t_k^i$ ) (cf. figura per exemple gràfic simplificat):

$$\sum_m t_m^f \leq \sum_k t_k^i$$

Si aquesta condició no es compleix, l'horari no es considera robust/estable i, per tant, la metodologia finalitza en aquest pas. Si es compleix la condició, es procedeix al pas 5 de la metodologia.

5. Càlcul dels marges de regularitat i dels marges de recuperació per a cada cycle.
6. Càlcul del quocient de recuperabilitat ( $q_{recuperabilitat,j}$ ) per a diferents cycles consecutius de cada circulació que es trobi dins del sistema durant el període d'hora punta:

$$q_{recuperabilitat,j} = \frac{t_{j,k}^i}{t_{j,k}^{reg} + t_{j,k}^{rec}}$$

on:

- $t_{j,k}^i$  correspon al retard a l'inici de la circulació o servei per a una circulació  $j$  donada i el cycle  $k$  de la circulació considerada.
- $t_{j,k}^{reg}$  correspon al marge de regularitat de la circulació  $j$  per al cycle  $k$  de la mateixa.

- $t_{d,k}$  correspon al marge de recuperació de la circulació  $j$  per al cicle  $k$  de la mateixa.

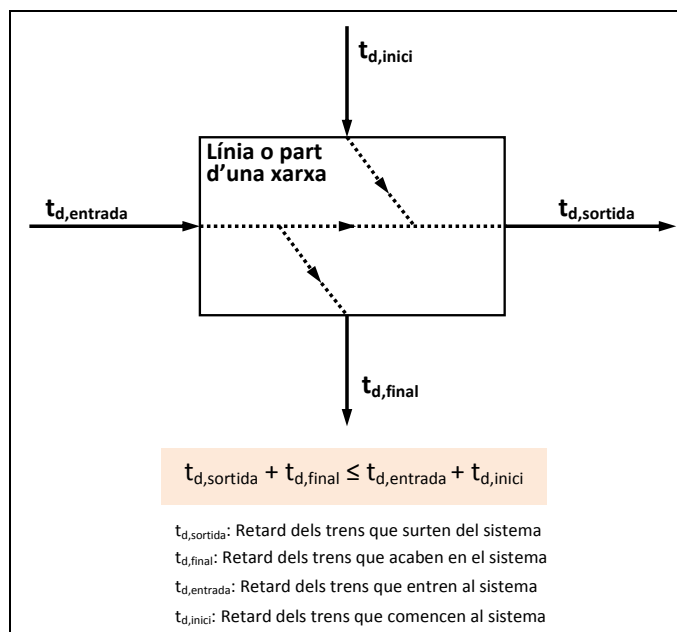


Figura. Criteri per a la recuperabilitat d'un horari segons el mètode alemany.

Font: Adaptat de Pahl (2009)

7. Comprovació que el quocient de recuperabilitat ( $q_{\text{recuperabilitat},j}$ ) és inferior a 2,00 per al retard inicial de 10 minuts introduït, és a dir, comprovació que el retard inicial de 10 minuts es compensa completament al cap de dos cicles com a molt per a totes les circulacions que tenen lloc en el període analitzat:

$$q_{\text{recuperabilitat},j} \leq 2$$

L'aplicació d'aquesta metodologia a la línia Barcelona – Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat ha permès determinar que l'horari en què es presta el servei actual compleix la condició de robustesa. Pel que fa al quocient de recuperabilitat s'ha comprovat que totes les circulacions compleixen la condició de recuperabilitat, a excepció de tres circulacions que tenen el seu horari d'inici de servei en l'instant d'introducció del retard de 10 minuts. No obstant, s'ha comprovat que aquestes circulacions necessiten tot just un cicle més per recuperar el seu horari normal. En conclusió, doncs, s'ha determinat que l'horari en què es presta actualment el servei ferroviari a la línia Barcelona – Vallès és robust.

## REFERÈNCIES

- [1] Pahl, J. (2009). Railway Operation and Control. VTD Rail Publishing. ISBN 978-0-9719915-8-3
- [2] CENIT (2011). Informe 1: Establiment de la base teòrica per a definir el Nou Model d'explotació del Metro del Vallès d'FGC. Assessorament tècnic per al projecte de Nou Model d'explotació del Metro del Vallès.



## IMPACTO DE LA TARIFICACIÓN DINÁMICA SOBRE EL BIENESTAR SOCIAL EN CARRETERAS METROPOLITANAS

Sergi Saurí<sup>1</sup>, Francesc Robusté<sup>2</sup> y Albert Gragera<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departament d'ITT y CENIT <f.robuste@nobel.upc.edu>, <sup>2</sup>Departament d'ITT y CENIT <sergi.sauri@upc.edu> y <sup>3</sup>CENIT <albert.gragera@upc.edu>

**Palabras Clave:** Pricing, congestión y asignación dinámica

**Resumen:** *La aplicación de una tarifa dinámica se fundamenta en la aplicación de precios variables según segmentos horarios del día para motivar el cambio en la elección del momento del desplazamiento, con lo que se busca un laminando de la demanda en los momentos de mayor congestión. Se desarrolla un algoritmo para la aplicación de una tarifa dinámica para el caso de modelizar el tráfico mediante asignación dinámica. Ello se aplicará a un corredor metropolitano concreto para validar la bondad del modelo. Los resultados de la simulación permitirán analizar el impacto de este tipo de tarifas sobre el bienestar social y valorar así su idoneidad como medida contra la congestión.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La introducción de cualquier esquema *road pricing* conlleva la aplicación de una tarifa al usuario sujeta a distintas variables, si bien todas ellas significan un aumento en el coste generalizado del desplazamiento y por tanto un cambio en la utilidad percibida por este sobre la decisión tomada. Con lo que cualquier esquema tarifario tiene un impacto sobre las decisiones de desplazamiento del usuario.

En lo que se refiere a la elección del momento de desplazamiento hay que tomar en consideración la teoría inicialmente desarrollada por Vickrey (1969) en la que se toma en consideración el *schedule delay* dentro de la función de coste generalizado del usuario, lo que define un incremento de coste para la desviación entre el momento preferido para el inicio del desplazamiento más el tiempo de viaje respecto del tiempo requerido de llegada. Esto significa que el usuario planea su decisión, tomando en consideración experiencias pasadas, en base a qué hora debe iniciar el viaje para llegar en un momento determinado a destino, tal como demuestra Small (1982) en su verificación empírica del comportamiento de los usuarios. En la literatura existente podemos encontrar comparativas entre los distintos esquemas y sus efectos sobre la toma de decisión del usuario, como por ejemplo Arnott, De Palma y Lindsey (1993).

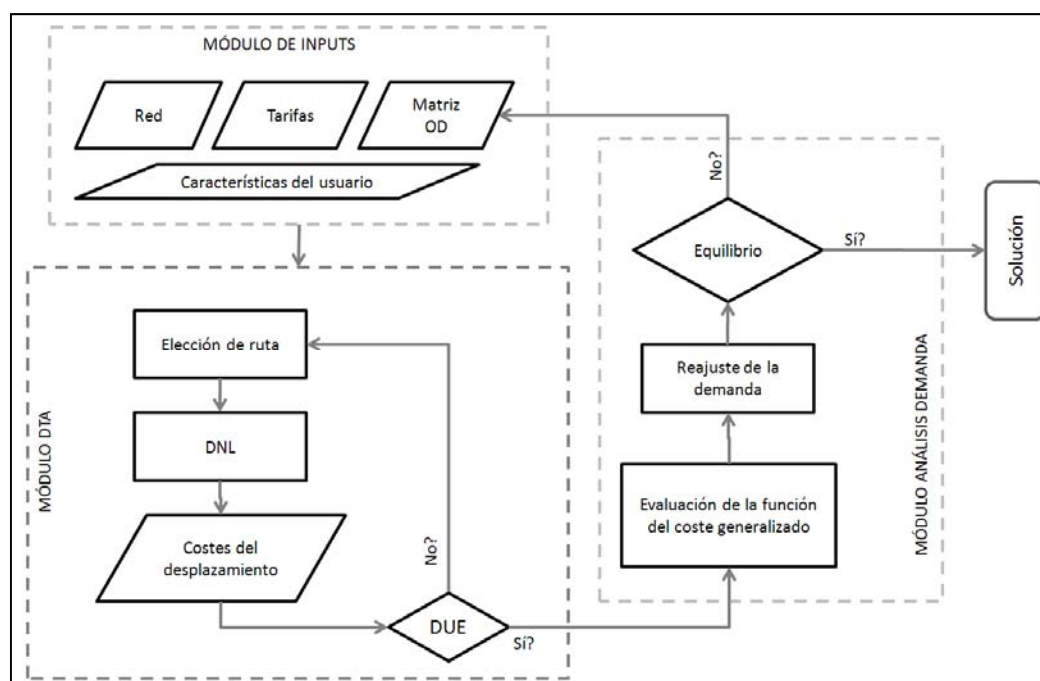
El objetivo de la presente comunicación es analizar el impacto de la tarificación dinámica (por franjas horarias) sobre el bienestar social. Para ello, se desarrolla un algoritmo para modelizar las decisiones de cambio de franja horaria de usuarios habituales (*commuters*) de una red metropolitana. Los resultados permitirán establecer cómo deben de articularse estas medida tarifaria (número de franjas y valores de las tarifas) para que sea lo más eficiente posible.

## 2. MODELIZACIÓN DEL TRÁFICO

El modelo propuesto para el análisis de los efectos sobre el comportamiento del tráfico por la implantación de esquemas tarifarios está ideado de forma modular. Está formado por dos módulos distintos, que se retroalimentan mutuamente para realizar los cálculos apropiados que permitan la evaluación que actualmente ningún software comercial tiene disponible.

Los datos que alimentan el modelo, que incluye la definición de los esquemas y topologías tarifarias, son aplicados sobre una red definida en base a una caracterización de la demanda de desplazamientos con una matriz origen-destino. En primer lugar, todos estos datos son introducidos en un módulo de asignación dinámica de tráfico (*Dynamic Traffic Assignment – DTA*) capaz de calcular los flujos, tiempos de viaje y costes que esa demanda conlleva sobre la red analizada, a través de un simulador dinámico del tráfico (AIMSUN). Éste, a partir de la modelización de la elección de rutas, plasma éstas sobre la red aplicando el *Dynamic Network Loading* (DNL) y evalúa los costes de desplazamiento en los que incurren los usuarios. En La figura adjunta se muestra el esquema de funcionamiento del mismo.

Una vez tratados por el módulo DTA y asegurada la situación de equilibrio, estos datos son introducidos en el módulo de análisis de la demanda, en el que se busca evaluar la decisión del momento de desplazamiento del usuario a través del *schedule delay* para modificar de nuevo la matriz origen-destino reasignando a los usuarios en nuevos intervalos de salidas, hasta alcanzar una situación de equilibrio que se acerque lo más posible al mínimo coste para cada uno de los usuarios.



Esquema del funcionamiento general del modelo e interacción entre sus distintos módulos

El módulo de análisis de la demanda, por su parte, será el encargado de modificar la matriz de origen-destino para tomar en consideración la posible modificación del comportamiento del usuario en cuanto a su elección del momento de salida del desplazamiento, a través del coste generalizado del desplazamiento (el coste inducido por la diferencia entre el momento

deseado de salida y el momento realmente elegido para cumplir con las restricciones temporales impuestas por el momento deseado de llegada y las condiciones del tráfico).

Proceso dentro del módulo de análisis de la demanda es el siguiente:

- Paso 1: Lectura de datos procedentes del módulo DTA y parámetros requeridos.
- Paso 2: Definición de los inputs del módulo de análisis de la demanda (transformar datos de DTA al formato requerido por el algoritmo time-swapping)

Para cada par  $ij \in N$  y para cada grupo de usuarios  $m \in M$  se realizan los siguientes pasos.

Establecer distribución de desplazamientos  $D_{ij}^m(n)$  en base a la matriz  $OD_{ij}^m(t)$ .

Establecer la matriz de costes mínimos de desplazamiento  $C_{ij}^m(n)_{\min}$  en base a  $C_{ij}^m(t)_{\min}$ .

Exportar datos de la matriz de coste generalizado del desplazamiento  $C_{ij}^m(t)$  para todo par  $ij$  y categoría  $m$ . Establecer la parrilla de costes de desplazamiento según intervalo de salida en base al schedule delay para cada posible par  $(t, t^*)$  para  $t = 1, \dots, T$  y  $t^* = 1, \dots, T$ .

- Paso 3: Obtener la matriz de diferencias de costes entre intervalos  $(t^*, T)$ ;

Modificación de la matriz de distribución de la demanda proporcional a la diferencia de costes (*time-swapping*).

Computar el cambio total de demanda y comprobar criterio de convergencia. Si  $\text{Total.D.change}_{ij}^m(n) < \text{tolerancia}$ ; detener la ejecución. De lo contrario establecer  $n = n + 1$  i ejecutar paso 5.

# Otros criterios de parada pueden ser aplicables. Por ejemplo, debido a los condicionantes relativos a la posibilidad de programación de aplicaciones externas para el software de simulación elegido, se puede establecer un límite de iteraciones a realizar.

- Paso 4: Traducir datos al formato requerido por el módulo DTA

### 3. APLICACIÓN A LA C-32

El escenario base se realiza sobre una red simplificada que describe la relación entre Mataró y Barcelona en el corredor de transporte formado por la autopista C-32 y la carretera N-II. Estas dos ciudades están separadas unos 30 km y el desplazamiento en vehículo privado puede realizarse: a) a través de la autopista (C-32) de 3 carriles por sentido, en la que se aplica un peaje y supone una velocidad media de circulación de 100 km/h; o b) bien a través de la carretera (N-II) libre de peaje, por la que la velocidad media se supone de 60 km/h debido a sus múltiples tramos urbanos.

La demanda de desplazamientos entre el origen y destino se ha aproximado, para todo el corredor, en base a los datos extraídos del contaje realizado en el peaje de la autopista a la

altura de Vilassar de Mar y las IMD de los aforos de la N-II (siguiendo la misma distribución que los datos facilitados por la autopista). Ello supone unos 108.000 desplazamientos al día para ambos sentidos, con puntas de hasta 5.000 veh/h en dirección Barcelona para la hora punta de la mañana.

## REFERENCIAS

Arnott, R., De Palma, A. & Lindsey, R. (1993) A structural model of peak-period congestion: a traffic bottleneck with elastic demand. *American economic Review*, 83 161-179.

Small, K. (1982). The scheduling of consumer activities: Work trips. *American Economics Review*. Issue 72 pp. 467-479.

Vickrey (1969). Congestion theory and transport investment. *American Economic Review*. Issue 59 pp. 251-260.



# SLOW PULSE DUE TO CALCIUM CURRENT INDUCES PHASE-2 REENTRY IN HETEROGENEOUS TISSUE

Inma R Cantalapiedra, Angelina Peñaranda, Blas Echebarria

Departament de Física Aplicada, inma@fa.upc.edu.

**Paraules Clau:** Phase-2 reentry, ventricular fibrillation

## Abstract:

*Phase-2 reentry is a basic mechanism for the transition to VT and VF in the heart. It is thought to underly many causes of idiopathic ventricular arrhythmias as, for instance, those occurring in Brugada syndrome. Reentry is usually linked to heterogeneity in tissue repolarization. We study some circumstances under which a region of depolarized tissue can reexcite adjacent regions that exhibit shorter action potential duration (APD), eventually inducing reentry. Simulations are performed using a simplified ionic model that reproduces well the ventricular action potential (AP). We analyze first the conditions that lead to very short action potentials (APs). Then, we show that reexcitation takes place via a slow (calcium current induced) pulse that propagates into the region of short APs until it encounters excitable tissue. In two dimensions, this may give rise to reentry with the formation of counter-rotating spiral waves.*

## 1. INTRODUCTION

In patients with structurally normal hearts polymorphic ventricular tachycardia (VT) and ventricular fibrillation (VF) account for 4% to 12% of the total sudden deaths each year. Most arrhythmias, including VT and VF, are associated with the formation of rotors (spiral or scroll waves), that impose a fast, and often irregular, cardiac rhythm. A possible mechanism for the formation of rotors is based on the existence of dispersion of AP repolarization in a region of cardiac muscle. This provides the substrate for reentry via, for instance, conduction block under rapid pacing, or phase-2 reexcitations. In this latter mechanism, the AP dome is lost at some regions of tissue, but not at others, that can therefore reexcite the already repolarized tissue. Often, the loss of dome results from the interplay between the fast sodium current  $I_{Na}$  responsible of the depolarization of the cell (phase 0 of the AP), and the transient outward current  $I_{to}$ , that creates the notch of the action potential (phase 1). If, as a result of the competition of these two currents, the transmembrane voltage remains below the threshold value for activation of the L-type calcium current  $I_{CaL}$ , then the dome of the AP is lost. This is particularly relevant in the right ventricle (RV), where  $I_{to}$  has been shown to be stronger. Phase-2 reentry due to regions with loss of dome has been observed in situations resembling ischemia, or under conditions of elevated extracellular calcium with rapid pacing. Another prominent example is Brugada syndrome [1]. Theoretical studies show that an inhomogeneous distribution of  $I_{to}$  can give rise to very disparate values of action potential duration (APD) in neighbouring cells, leading to reexcitation. This takes place via phase-2 reentry, where electrotonic currents from a depolarized region of tissue (during calcium current entrance, or phase-2 of the AP) are enough to provoke the firing of an AP in an adjacent area. However, in these studies  $I_{Na}$  is never triggered at the exact same point of the fiber where the discontinuity is located [2]. At the discontinuity point, rather, the recovery of the dome due to the activation of the L-type calcium current  $I_{CaL}$  produces a gradient of

transmembrane voltage, which results in a front in voltage that propagates slowly into the region of short APs. This proceeds until the front reaches a point where the sodium gates have had enough time to recover, producing an influx of  $I_{Na}$  and a fast depolarization pulse. In the present paper we use two-dimensional simulations to study the formation of phase-2 reentry in tissue with heterogeneity in electrophysiological properties. We perform the analysis using a simplified cardiac model [2] that allows us to gain further insight into the mechanisms of reexcitation, although the results do not depend on the specific cardiac model considered.

## 2. MATERIALS AND METHODS

We study propagation of transmembrane potential in a 2D cardiac tissue by means of the standard monodomain propagation model:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla V) - (I_{ion} + I_{stim}) / C_m, \quad (1)$$

where  $\nabla$  is the nabla operator,  $V$  is the membrane potential,  $C_m$  is the membrane capacitance,  $D = \sigma / (SC_m)$  is the anisotropic conductivity tensor,  $\sigma$  is the electrical conductivity and  $S \equiv S/V$  is the cell surface to volume ratio. Cardiac excitation and propagation are simulated using a simple five-variable model [2]. We decompose the total membrane current into four components, i.e.,  $I_{ion} = I_{fi} + I_{si} + I_{so} + I_{to}$ , where the sum contains a fast inward current  $I_{fi}$  ( $Na^+$  current plus the fast part of the  $Ca^{2+}$  current); a slow inward current,  $I_{si}$  (correspondingly,  $Ca^{2+}$  current); a slow outward time-independent current,  $I_{so}$ ; and a fast transient outward current,  $I_{to}$ , these last two corresponding to the sum of several  $K^+$  currents in detailed models. Note that it is important to take it into consideration if one is interested in describing the Brugada syndrome. Indeed, the  $I_{to}$  current is responsible for counteracting the effect of the sodium entry into the myocytes. In the Brugada syndrome, due to the weakness of sodium fluxes, the entrance of  $I_{to}$  is often enough to result in a loss of dome of the action potential. The model is simulated first for a single cell, to study the change of action potential duration (APD) as a function of several parameters. Then, we simulate it in a patch of epicardial tissue of dimensions  $L = 6\text{cm} \times 6\text{cm}$ , with reduced  $Na$  current inactivation time,  $\tau_{h-}$ , and increased transient outward current conductance,  $g_{to}$ , except in a circular central region of radius  $0.675\text{ cm}$  where  $g_{to}$  takes its normal value [3]. The cable equations are then solved using a simple Euler method with  $dt = 0.01\text{ ms}$  and  $dx = 0.015\text{ cm}$ . We use the same values of the parameters as in Ref.[3].

## 3. RESULTS

We have computed the action potential duration (APD) as a function of both  $I_{to}$  conductance  $g_{to}$  and sodium current  $I_{Na}$  inactivation time  $\tau_{h-}$ . A fast sodium inactivation time is thought to underly many cases of Brugada syndrome, while an increase in  $I_{to}$  has been related to epicardial dispersion of repolarization leading to VT via phase-2 reentry in isolated canine ventricular myocytes. As both effects alter the equilibrium that results in the phase 0 of the AP, it is to be expected an increased notch and, eventually, the loss of the dome. It can be observed that in both cases the transition from large to short APs is very sharp. This suggests that small changes of the electrophysiological properties can have a big effect, making tiny spatial variations potentially proarrhythmic.

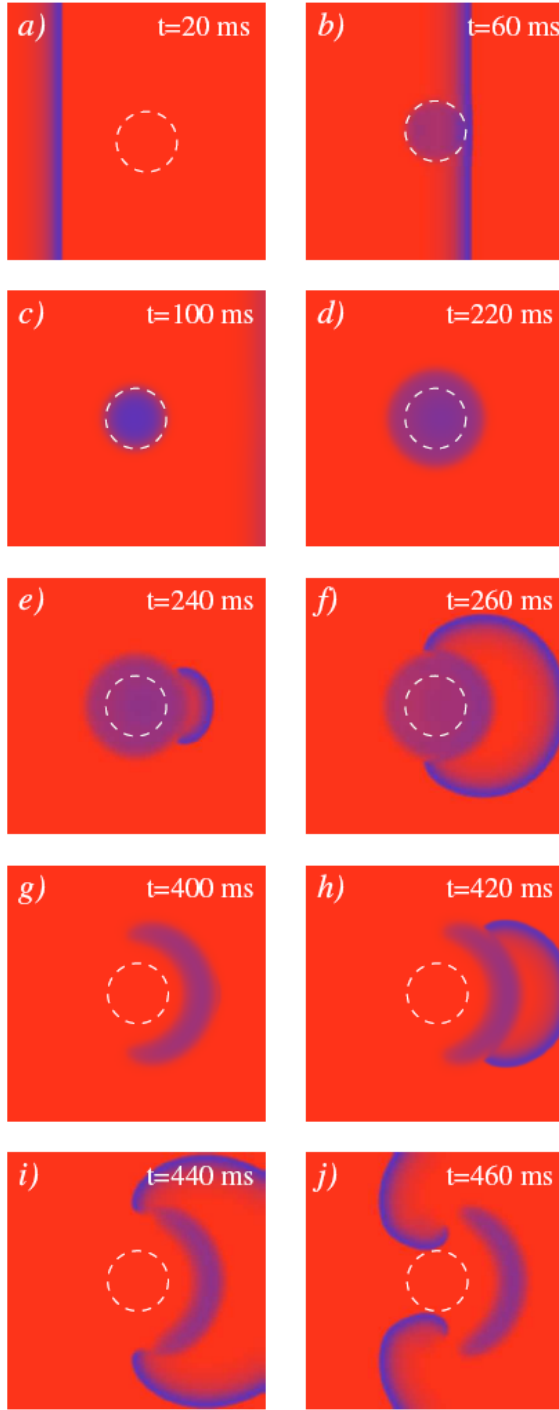


Figure 2. Action potential propagation in a square tissue of size 6 cm x 6 cm with fast sodium inactivation and a heterogeneous  $g_{to}$  distribution. The dashed white circle denotes the limits of the central region of lower  $g_{to}$ . The tissue is stimulated from the left side. We show frames at different times after stimulation.

(short APD), but recovers the dome as it enters the central area with low  $g_{to}$ . Depolarization persists in the central zone and a voltage pulse, induced by the calcium current, spreads to the

We confirm this point with numerical simulations of the cable Eq. (1) in two-dimensional tissue, stimulated from the left hand side, and with the distribution of  $g_{to}$  explained previously. As the excitation propagates from left to right in the tissue, the resulting AP is very short everywhere (due to increased  $g_{to}$ ), except in the central region, where it recovers the dome (see Fig. 2). The size of depolarized tissue then increases beyond the boundaries of this central region (marked by a discontinuous line in Fig. 2), as calcium current during phase-2 activates. This region of depolarized tissue thus continues expanding until it encounters newly recovered tissue, where a (short) AP fires due to the opening of INa.

One interesting point to notice is the appearance of a slow pulse, due to the calcium current (Fig. 2g), that produces fast reexcitations repetitively. This increases greatly the possibility of forming reentrant waves. Typically, the speed of the slow pulse is an order of magnitude lower than that of the sodium induced fast excitations (for details, see the calculation in [3]). This gives a speed of the order of a few centimeters per second. Thus, in the current configuration, the slow pulse persists for a time interval close to a second. Considering that the sodium inactivation gates recover in a time scale of the order of 50-100 ms, it has time to give rise to about ten reexcitations before it disappears.

In the present simulations, in fact, after several reexcitations, two counter rotating reentrant waves are formed (see Fig. 2j).

In the initial stages, the stimulus propagates along the domeless region

adjacents regions, until it encounters tissue able to be excited. Excitation can be produced in the direction of initial stimulus propagation, named as reexcitation, or in the opposite direction, named as reflection.

#### 4. DISCUSSION AND CONCLUSION

Phase-2 reentry is a basic mechanism for the transition to VT and VF in the heart. In this respect, a good understanding of the relevant ingredients that participate in its appearance may contribute to the development of treatments to prevent it. As discussed in the paper, reexcitation due to phase-2 reentry needs two conditions to be met: first, that a heterogeneous loss of dome is produced in tissue and, second, which the spike-and-dome regions are able to reexcite the loss-dome areas. The complication with respect to treatment is that, conditions that diminish the probability of losing the dome may also increase the probability of reexcitation. For instance, drugs that increase the strength of  $I_{CaL}$  may eventually help recovering the dome, and decrease dispersion of repolarization, but until this occurs, they increase the probability that a reexcitation occurs (see, for instance, Fig. 7 in Ref. [10]). This happens because an increase in  $g_{CaL}$  stabilizes the slow calcium pulse, which then is able to reexcite adjacent tissue.

Thus, drugs that decrease  $I_{to}$  would seem more suitable candidates to avoid dispersion of repolarization while maintaining a low probability of reexcitation, as they do not change much the stability of the slow pulse.

In this paper we have used a simplified five-variable model of the action potential to study the occurrence of reexcitations in a tissue with dispersion of repolarization. We have focused on the case where it appears as a result of a heterogeneous distribution of fast outward current  $I_{to}$  (together with modified sodium recovery kinetics), but similar results would be obtained if this heterogeneity was created by a variation of other suitable electrophysiological parameter, as for instance the fast inward sodium inactivation time. The origin of reexcitation is based on the existence (often transiently) of a slow pulse that propagates into the region of short APs until it reaches excitable tissue. One interesting thing to notice is that the region of APs with dome can be very small, and still give rise to reexcitations. Finally, we would like to emphasize the utility of considering simplified descriptions of the cardiac dynamics that, although they cannot provide complete description of the molecular mechanisms involved in the origin of channelopathies, they provide very valuable tools to study wave dynamics, and the origin of wave instabilities.

#### REFERENCES

- [1] Brugada P and J. Brugada J. Right bundle block, persistent ST segment elevation and cardiac death: A distinct clinical electrocardiographic syndrome - a multicenter report. *J Am Coll Cardiol* 1992; 20: 1391-1396.
- [2] Cantalapiedra IR, Peñaranda A, Mont L, Brugada J, and Echebarria B. Reexcitation mechanisms in epicardial tissue: Role of  $I_{to}$  density heterogeneities and  $I_{Na}$  inactivation kinetics. *J Theor Biol* 2009; 259: 850-859.
- [3] Cantalapiedra IR, Peñaranda A, Echebarria B, and Bragard J. Phase-2 reentry in cardiac tissue: Role of the slow calcium pulse. *Physysical Review E* 2010; 82: 011907.