



1^{AS} JORNADAS DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA CIVIL

MIERES, 8 DE NOVIEMBRE DE 2017
MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

LIBRO DE RESÚMENES



EPM
ESCUELA
POLITECNICA DE
MIERES



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

© Universidad de Oviedo

© Luis Ángel Sañudo Fontanera, Mario López Gallego, Pedro Plasencia Lozano, Antonio Navarro Manso y Aitor Fernández Jiménez.

Universidad de Oviedo.

Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias, España).

Tel. 985 10 95 03. Fax 985 10 95 07.

[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)

servipub@uniovi.es

ISBN: 978-84-17445-08-9

DL AS 2417-2018

Diseño de la portada: Aitor Fernández Jiménez

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo de soporte, si la preceptiva autorización.

Presentación

La presente publicación recoge las comunicaciones presentadas en las primeras Jornadas de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería Civil celebradas en la Escuela Politécnica de Mieres de la Universidad de Oviedo en noviembre de 2017, un encuentro de investigadores diversos cuyo punto en común ha sido y es la ingeniería de caminos, canales y puertos.

Debe indicarse, en primer lugar, que este evento fue impulsado por un grupo de alumnos de la primera promoción del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, recién implantado en la Universidad de Oviedo durante el curso académico 2016-2017. Por ello, justo es reconocerles el enorme valor de poner en funcionamiento una iniciativa que, confiamos, encuentre continuidad con las siguientes promociones de la titulación.



Foto de grupo en la clausura de las JIDIIC2017

Audentes fortuna iuvat, pues las jornadas resultaron un éxito en cuanto al seguimiento por parte del profesorado y alumnado de las diferentes titulaciones que se imparten en la Escuela Politécnica de Mieres. Así mismo, fueron escaparate del talento de los numerosos comunicantes que, en muchos casos, realizaban su primera aproximación al mundo de la investigación científica. Este libro, en fin, es muestra de la seriedad y el rigor del trabajo realizado.

Pero la importancia de estas jornadas va más allá de la mera reunión científica, como si esto no fuera ya suficiente. La implantación de una titulación de tanto peso como es la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos en una universidad con solera y en una escuela de larga tradición, ha supuesto un reto mayúsculo para todos aquellos que hemos estado implicados en la misma: profesorado, personal de administración y servicios y, citémoslos de nuevo, alumnos. Todo estaba por hacer unos pocos meses atrás: desde normativas y reglamentos, pasando por las guías docentes hasta la organización y coordinación de aulas y laboratorios de prácticas. Si bien creemos estar aún al inicio del camino, no son pocos los puertos ya cruzados.

Las jornadas simbolizan el ánimo general que ha envuelto al conjunto de la comunidad universitaria y, en cierto modo, sintetizan cómo va canalizándose, cómo va cristalizando, el empeño

que unos y otros ponemos para que el Máster alcance desde el primer momento la calidad que debe tener una titulación como ésta en una institución como la universidad asturiana. La ingeniería de caminos, canales y puertos ha ocupado siempre un papel destacado en el conjunto de la sociedad de nuestro país, y la Escuela Politécnica de Mieres debe contribuir a ello ofreciendo egresados con una formación acorde a los estándares actuales de otras escuelas de mayor recorrido temporal y animando la vida académica y profesional mediante reuniones científicas, publicaciones y otras actividades que trasciendan más allá de los muros académicos.

A continuación, se presentan los resúmenes de todos los trabajos presentados en las jornadas, las cuales abarcan gran variedad de áreas de conocimiento de la ingeniería civil: desde las más novedosas técnicas de análisis de estructuras y aplicaciones a la ingeniería del terreno, hasta los últimos avances en simulación y experimentación en ingeniería hidráulica. Se recogen además las experiencias de diferentes proyectos, muchos de ellos con carácter internacional, en los que el lector podrá descubrir los nuevos horizontes de la ingeniería de caminos, canales y puertos.

Los editores,

Luis Ángel Sañudo Fontaneda

Coordinador y profesor del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Área de Ingeniería de la Construcción, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo

Mario López Gallego

Profesor del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo

Pedro Plasencia Lozano

Profesor del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Área de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo

Antonio Navarro Manso

Profesor del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo

Aitor Fernández Jiménez

Estudiante y representante de alumnos del Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Oviedo

Índice de contenido

1. Análisis de estructuras en entornos Software as a Service	7
2. Caracterización de parámetros estructurales para la detección de daño.....	9
3. Propagación de ondas en ensayos no destructivos de tipo sónico.....	11
4. Detección e interpretación de posibles ruinas de la época Romana mediante GPR en La Morgal (Asturias, España)	13
5. Problemática geotécnica e hidrogeológica en el Túnel de Burata (LAV Galicia)	15
6. Diseño y construcción de un nuevo túnel aerodinámico de capa límite	17
7. Caracterización de dolinas mediante técnicas geofísicas en el metro de Riyadh (Arabia Saudí)	19
8. Análisis del problema de equivalencia en la interpretación de los SEDT para delimitar el nivel freático en una presa de lodos	21
9. Optimización del Diseño de una Casa Tradicional Asturiana, según las Metodologías de Evaluación Medioambiental BREEAM, LEED y VERDE	23
10. Rehabilitación energética en edificios.....	25
11. Caracterización geológica y geotécnica para la construcción de la línea 3 del metro de Riad (Arabia Saudí).....	27
12. Contribución de una modelización preliminar 2D en el desarrollo de un modelo hidrogeológico a escala regional	29
13. Un algoritmo genético simple para la determinación de los parámetros físicos presentes en las ecuaciones de Saint-Venant.....	31
14. Comprobación numérica de las condiciones de contorno de un modelo conceptual de flujo en un caso real.....	33
15. Nueva implementación de una condición de contorno de nivel piezométrico variable en COMSOL Multiphysics®	35
16. Avances en evaluación de daños estructurales en el marco del proyecto TRUSS Marie Skłodowska-Curie ITN.	37
17. Concepto de plataforma modular flotante para la recarga de embarcaciones eléctricas. ...	39
18. Generación de energía eléctrica por turbinado de EDAR.....	41
19. Análisis de los fenómenos convectivos de transferencia de calor y su aplicación a la caña de un pozo de mina.	43

Análisis de Estructuras en entornos Software as a Service

Gracia, J.

* Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo

RESUMEN

Las mejoras experimentadas en los mecanismos de comunicación digital, así como el abaratamiento del hardware y el crecimiento exponencial de la capacidad de cálculo, han permitido el desarrollo de nuevos métodos de distribución de software. Dentro de esta nueva familia, Software como un Servicio (ScuS), o “Software as a Service (SaaS)” en inglés, es uno de los más interesantes y con más protagonismo actualmente.

ScuS presenta claras ventajas frente a los métodos tradicionales de distribución software y el desarrollo de software para el análisis de estructuras es un campo que se puede beneficiar claramente de esta nueva metodología. Esta investigación se centra, a través del desarrollo de varias aplicaciones, de estudiar los retos que supone adaptar aplicaciones orientadas al análisis y el diseño de estructuras a un entorno ScuS.

Palabras clave: Software como un servicio, estructuras.

1. INTRODUCCIÓN.

La madurez de Internet, así como las nuevas tecnologías soportadas por los navegadores web han creado un nuevo paradigma en el desarrollo de aplicaciones. Hasta hace una década las aplicaciones desarrolladas se podían englobar en dos tipos: aplicaciones de escritorio y aplicaciones cliente-servidor, siendo estas últimas aplicaciones de escritorio conectadas a servidores a los que solicitar información. Internet ha hecho posible el desarrollo de nuevos tipos de aplicaciones, la más importante las aplicaciones web. Las primeras aplicaciones vinieron de la mano de Google, Microsoft y Yahoo en forma de clientes de correo web. Actualmente, muchas de las aplicaciones de escritorio, suites ofimáticas, editores de fotos, etc, han sido portadas de forma satisfactoria a la web. El incremento exponencial en el desarrollo de este tipo de aplicaciones se debe a las ventajas que ofrecen sobre los modelos tradicionales de distribución de software. Entre estas ventajas se encuentran:

1. Acceso a la aplicación y a la información generada desde cualquier lugar y dispositivo. Lo único necesario es una navegador web y conexión a Internet.
2. Posibilidad de trabajar de forma colaborativa y en tiempo real.
3. Aplicaciones siempre actualizadas a su última versión de formas transparente al usuario.
4. Nuevos modelos de monitorización. Se paga por uso no por tener una licencia en propiedad.

En el caso de la ingeniería las aplicaciones de escritorio suelen demandar más recursos que lo que suelen necesitar las suites ofimáticas. No obstante, el desarrollo y madurez de APIs como WebGL y WebSocket, entre otras, nos han dado las herramientas necesarias para desarrollar aplicaciones web que antes solamente eran viables como aplicaciones de escritorio.

2. RESULTADOS DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

Algunas de las investigaciones realizadas, que apoyan la teoría del autor de que Internet ya es una plataforma madura para permitir el desarrollo de aplicaciones de estructuras como un ScuS son:

1. Pre-dimensionado de naves industriales y edificios comerciales en zonas sísmicas. Consiste en una aplicación web parte del proyecto de investigación internacional “PRECIOUS” financiado por la Unión Europea. La aplicación consiste en una base de datos de estructuras pre-calculadas, tanto industriales como comerciales, y una interfaz web para el acceso guiado a dicha información. Mediante una serie de sencillos formularios el usuario introduce, de entre las opciones ofrecidas, las características de la dotación que se quiere pre-dimensionar. Al finalizar, el programa proporciona información gráfica, documentos .dxf, y económica relativa al pre-dimensionado. Esta información económica puede ser editada online para ajustarla a los criterios del proyectista.
2. Análisis y diseño de estructuras en 3D. Esta aplicación actualmente está en desarrollo. El primer prototipo se publicó en la revista “Journal of Computing in Civil Engineering” en 2013. El prototipo permite interactuar en 3D con estructuras predefinidas, como si se tratase de una aplicación de escritorio, aunque en este caso se trata de una aplicación web ejecutada por un navegador. La implementación de la API WebGL fue clave para poder mostrar de forma nativa y óptima contenido 3D. Actualmente se está desarrollando una versión más completa, con una nueva interfaz, capaz analizar cualquier tipo de estructura 3D definida por elementos barra de

12 grados de libertad. La Figura 1 muestra una imagen del prototipo de la aplicación. En esta imagen aparece la deformada de la cubierta tridimensional de la plaza de toros de San Sebastián utilizada para hacer pruebas.

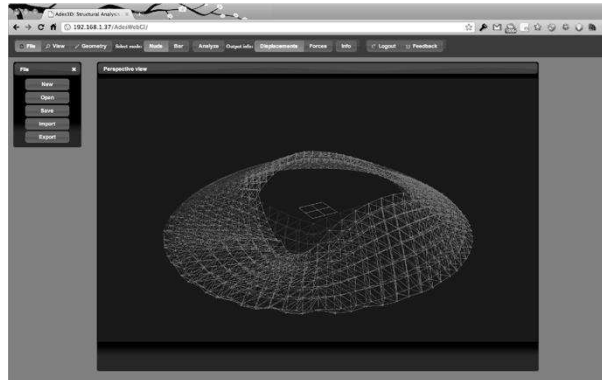


Figura 1. Prototipo de ScuS para el análisis y diseño de estructuras 3D

3. Análisis de uniones 2D de acero. La experiencia acumulada de la investigación anterior nos llevó al desarrollo de una aplicación web para la verificación de uniones 2D de acero. Actualmente la aplicación contempla dos tipos de unión: articulada con angulares y rígida con chapa de testa soldada a la viga y atornillada al pilar. La aplicación cuenta con una ventana 3D donde comprobar de forma gráfica los parámetros introducidos. Una vez definida la unión y los esfuerzos, la aplicación muestra de forma visual y sencilla un gráfico de araña donde se muestra el rendimiento de la misma y los posibles fallos. La Figura 2 muestra el interfaz de la aplicación.

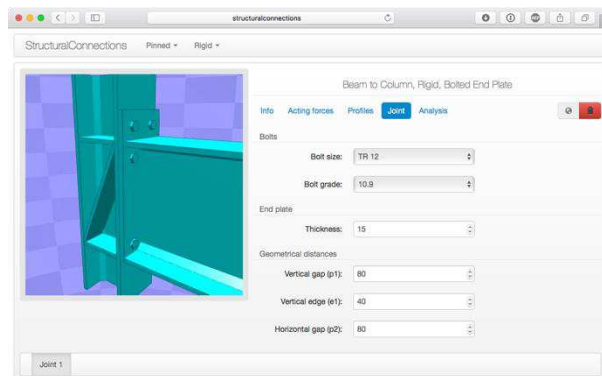


Figura 2. Prototipo de ScuS para el análisis de uniones de acero 2D

3. ARTÍCULOS Y PONENCIAS

Fruto de estas investigaciones se han publicado los siguientes artículos:

1. Stream Sockets vs. Web Services for High Performance and Secure Structural Analysis in Internet Environments (2009). *The Journal of Computing in Civil Engineering*, 23 (pp. 47 – 56).
2. An integrated 3D Web Application for Structural Analysis Software as a Service (2013). *The Journal of Computing in Civil Engineering*, 27 (pp 1-8).
3. Aplicación web para el análisis y diseño de estructura (2012). CMMoST 2012, *2nd International Congress on Mechanical Models in Structural Engineering*, Granada, España.
4. Aplicación web para el análisis y diseño de estructuras (2014). *Informes de la Construcción*, edición digital.
5. Robust design to optimize client-server bi-directional communication for structural analysis web applications or services (2017), 112 (pp. 136-146). *Advances in Engineering Software*. Pendiente de publicación.
6. An effective and user-friendly web application for the collaborative analysis of steel joints (2018). *Advances in Engineering Software*, 119 (pp. 60-67).

Caracterización de parámetros estructurales para la detección de daño

Casero Flórez, M.*

*School of Civil Engineering, University College Dublin

RESUMEN

En este resumen se plantean dos posibles métodos para la caracterización de parámetros estructurales con el objetivo de determinar la presencia de daño en una estructura. El primero de los métodos se basa en el algoritmo de la entropía cruzada y su objetivo es estimar el perfil de rigidez a flexión de una viga a partir de la medición de flechas para una carga conocida. El segundo de los métodos evalúa las condiciones en los apoyos de una estructura real empleando flechas medidas mediante taquímetro electrónico junto con la técnica L-curve y el criterio de Pareto para combinar la información procedente de varios estados de carga.

Palabras clave: detección daño, puentes, entropía cruzada, L-curve.

1. INTRODUCCIÓN.

En general, la evaluación del estado de una estructura y, en particular, de puentes de carretera, se realiza mediante inspección visual. No obstante, parece necesario desarrollar nuevos métodos que permitan detectar aquellos daños en una estructura que no son aparentes a simple vista. Esta circunstancia cobra especial relevancia teniendo en cuenta que muchas estructuras están alcanzando el final de su vida útil y, además, soportando cargas mayores que aquellas para las que fueron diseñadas. En general, el daño puede ser modelizado como una pérdida de rigidez a flexión en una determinada parte de la estructura y, por tanto, se pueden encontrar en la literatura numerosos ejemplos de métodos enfocados a detectar daño a partir ensayos de estáticos. Entre ellos se encuentra el algoritmo de la entropía cruzada (Walsh & González, 2009) que consiste en un proceso iterativo en el que el parámetro estudiado (en este caso la rigidez) es tratado como una variable normal aleatoria.

Por otro lado, uno de los puntos más sensibles al daño en puentes son los apoyos. Esto se debe a que se trata de zonas de concentración de cargas que además pueden ser fácilmente expuestas a fenómenos de filtración de agua, entre otros problemas. Es ésta una de las razones por la que en los últimos años se tiende a construir puentes integrales. El segundo apartado de este resumen describe un ejemplo real (González *et al.*; 2014) en el que se evalúa la condición de los apoyos de un vano de un puente en Carbajal de la Legua (León).

2. ESTIMACIÓN DE LA RIGIDEZ A FLEXIÓN MEDIANTE EL ALGORITMO DE LA ENTROPÍA CRUZADA.

La ecuación de equilibrio estático de una estructura se puede escribir como $f = K \cdot u$, donde f representa el vector de fuerzas, K es la matriz de rigidez y u , el vector de desplazamientos. Conocidos f y K , esta ecuación tiene solución única (problema directo); no obstante, la complejidad en la estimación de la rigidez reside en que el problema inverso (obtener K a partir de f y u) tiene infinitas soluciones. En este contexto, la entropía cruzada propone un proceso iterativo basado en la comparación entre la respuesta de un modelo discretizado de la estructura y los desplazamientos medidos o simulados (desplazamientos objetivo). En dicho proceso, la rigidez de cada elemento es tratada como una variable normal, caracterizada por su media y desviación típica. Los pasos básicos son:

- 1) Creación de un número determinado (N_{TB}) de “trial beams”, es decir, se crean N_{TB} perfiles de rigidez mediante la obtención de valores aleatorios para la rigidez de cada elemento a partir de sus distribuciones de probabilidad.
- 2) Cálculo de desplazamientos para cada “trial beam” en los puntos donde existen desplazamientos objetivo.
- 3) Obtención del error cuadrático entre desplazamientos calculados y objetivo para cada “trial beam”.
- 4) Selección de “trial beams” con menor error cuadrático; se elige un porcentaje, fijado por el usuario, del total de “trial beams”.
- 5) Actualización de las distribuciones de rigidez de cada elemento en función de las “trial beams” retenidas en el paso previo.

La Figura 1 muestra la predicción de rigidez para un caso de una viga biapoyada, con daño del 40% simulado a 12 m del apoyo izquierdo, sometida a dos cargas puntuales y una carga uniformemente repartida. Dada la aleatoriedad del algoritmo (distintas simulaciones llevan a ligeramente distintos resultados), se muestran los resultados de cinco tests y la media entre ellos.

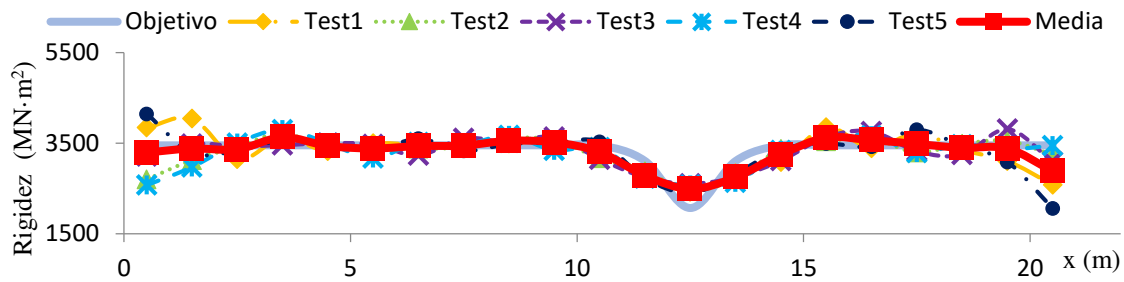


Figura 1. Ejemplo de predicción de rigidez del algoritmo de la entropía cruzada.

Se puede apreciar que el algoritmo es capaz de detectar la pérdida de rigidez correspondiente al daño, aunque lo identifique en un área más ancha y menos profunda que el perfil objetivo. Por otro lado, se observa que el algoritmo pierde precisión en la predicción cerca de los apoyos, esto es debido a la poca contribución al desplazamiento total de estos elementos. No obstante, una ventaja de un método probabilístico como es la entropía cruzada, frente a métodos determinísticos, es que los valores de la desviación típica se incrementan cerca de los apoyos, señalando la menor fiabilidad de estas predicciones.

3. EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE APOYO EN UN PUENTE.

La Figura 2 muestra el vano del puente cuyos apoyos son objeto de análisis, así como el camión empleado para generar flechas en la estructura. Estas flechas son medidas mediante taquimetría electrónica como diferencia entre las coordenadas de una serie de puntos en reposo y sus coordenadas una vez el camión se encuentra sobre la estructura. Se consideran cuatro posiciones distintas del camión y, por tanto, se obtienen cuatro deformadas del puente. La sección del puente es en doble T y se modeliza mediante dos vigas independientes (norte y sur), siendo la hipótesis de trabajo que la carga se reparte de forma simétrica entre ambas vigas y que la rigidez a flexión es constante en toda su longitud.



Figura 2. Puente analizado en Carbajal de la Legua (León).

Dado que el objetivo es analizar el estado de los apoyos, estos se modelizan mediante muelles rotacionales permitiendo así explorar el rango completo de condiciones de apoyo entre simplemente apoyada y empotrada. Asimismo, dado que se dispone de cuatro estados de carga distintos, es necesario buscar una técnica que permita combinar la información proporcionada por cada uno de ellos. La metodología propuesta consiste en:

- a) Para cada par de valores de los muelles rotacionales se obtiene el valor de la rigidez que minimiza el error cuadrático en desplazamientos, este cálculo se repite para cada carga.
- b) Se calcula el coeficiente de variación (COV, definido como el cociente entre desviación típica y media) de la rigidez considerando los cuatro estados de carga.
- c) Se dibuja un gráfico (L-curve) con COV en el eje horizontal y error medio cuadrático total en el eje vertical; cada punto representa una combinación de valores de rigidez y constantes de los muelles.
- d) Se seleccionan las soluciones dominantes mediante el criterio de Pareto y, entre ellas, se selecciona como idónea aquella más próxima al origen de coordenadas.

El resultado final muestra condiciones en ambos apoyos cercanas a una viga simplemente apoyada; no obstante, el valor para uno de los apoyos de la viga sur difiere ligeramente al de la viga norte. Esto sugiere la presencia de cierto nivel de daño, lo cual se corresponde con la inspección visual del puente.

REFERENCIAS.

- Gonzalez, A., Covián, E., Casero, M., & Celemín, M. (2014). Evaluation of the true behavior of the end supports in the Carbajal de la Legua old bridge. *En: Proceedings of the Istanbul Bridge Conference*.
- Walsh, B., & Gonzalez, A. (2009). Assessment of the Condition of a Beam Using a Static Loading Test. *Key Engineering Materials*, 413-414, 269-276.

Propagación de ondas en ensayos no destructivos de tipo sónico

Enol FERNÁNDEZ¹, José P. FERNÁNDEZ²

¹ Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y Ensayos No Destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, Mieres, Asturias, España; enol@hydrogeophysicsndt.com

² Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, Mieres, Asturias, España; pauli@uniovi.es

RESUMEN

Los ensayos no destructivos de tipo sónico son empleados frecuentemente en los entornos civil e industrial. Permiten determinar espesores, parámetros elásticos, o evaluar la integridad del objeto de estudio sin alterar sus propiedades originales. Este tipo de ensayos se basan en el estudio de las ondas mecánicas que se propagan por el interior del material, por lo tanto, es de vital importancia conocer en profundidad su comportamiento. Para ello se emplea un bloque debido a que es una forma recurrente en los entornos donde se aplican los ensayos no destructivos de tipo sónico. En dicho bloque, se determinan las ecuaciones que rigen el comportamiento de las ondas que se propagan por el mismo, y se resuelven posteriormente de forma analítica para un caso sencillo. Además, se formulan las ecuaciones que permiten resolver el caso planteado previamente empleando software de elementos finitos. Estos resultados se comparan posteriormente con los obtenidos de forma analítica.

Palabras clave: ensayos no destructivos; propagación de ondas; elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN.

Los ensayos no destructivos son un tipo de examen, test o evaluación que permite determinar la presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener efecto en la usabilidad u operatividad de un objeto sin cambiarlo ni alterarlo en ningún sentido (Hellier, 2003).

Existen diversos tipos de ensayo no destructivo como los líquidos penetrantes, las partículas magnéticas, la radiografía, la termografía infrarroja o la emisión acústica.

La emisión acústica, también llamada ensayo no destructivo de tipo sónico, se basa en el estudio de la propagación de ondas mecánicas en el interior del objeto de estudio. Este tipo de ensayo resulta muy útil en la caracterización de medios multicapa, de los cuales permite determinar espesores, parámetros elásticos o detectar grietas.

La motivación del presente estudio viene dada por la necesidad de conocer el espesor del revestimiento de un contenedor de transporte de material a alta temperatura. El revestimiento de dicho contenedor está formado por una estructura multicapa cuya parte más interna se ve sometida a un proceso de desgaste. La aplicación de ensayos no destructivos de tipo sónico resulta, por lo expuesto previamente, especialmente indicada en este caso.

Para aplicar los ensayos no destructivos de tipo sónico de forma satisfactoria, resulta de vital importancia conocer cómo se comportan las ondas por el interior del material, concretamente en lo respectivo a su velocidad de propagación. Para ello, se empleará como geometría de partida un bloque, debido a que es el tipo de geometría usado en la construcción del revestimiento del contenedor.

En el estudio del comportamiento de las ondas en el interior del material, se parte de un elemento unidimensional, ya que resulta mucho más sencillo su análisis y formulación matemática.

Se plantea entonces la ecuación de ondas unidimensional con unas condiciones de contorno fijas en ambos extremos del elemento (véase ecuación 1).

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; u(0, t) = 0; u(L, t) = 0 \quad (1)$$

2. RESULTADOS

Los resultados obtenidos mediante el método de separación de variables se separan en dos partes, la solución espacial (véase ecuación 2) y la solución temporal (véase ecuación 3) (Haberman, 1987).

$$\text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (2)$$

$$A_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi ct}{L}\right) + B_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi ct}{L}\right) \quad (3)$$

Las soluciones de la ecuación dependen de un factor n , el cual determina el modo de vibración del elemento unidimensional. La representación gráfica de estos tres primeros modos puede verse en la Figura 1.

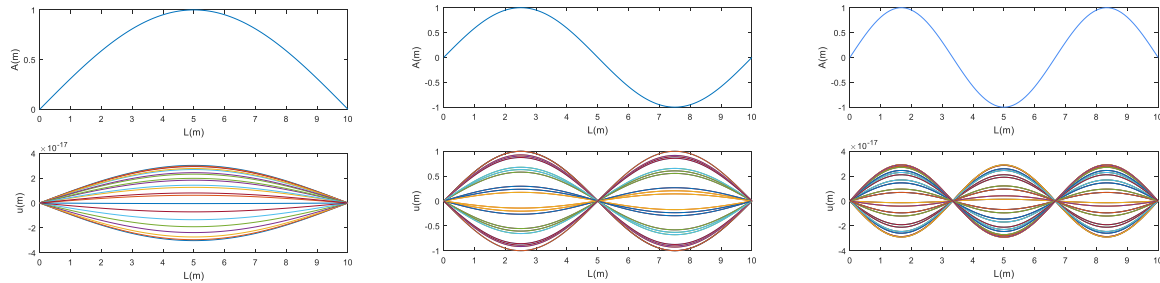


Figura 1: Representación gráfica de los tres primeros modos de vibración arriba, representación gráfica de los tres primeros modos de vibración para distintos tiempos abajo.

De la parte temporal de la solución a la ecuación de onda, puede obtenerse la frecuencia angular (véase ecuación 4), la cual depende del parámetro c , que es la velocidad de propagación de la onda en el medio.

$$\omega = \frac{n\pi c}{L} \quad (4)$$

Si se reformula la ecuación 4 en términos de frecuencia se obtiene la ecuación 5, la cual proporciona una relación entre la frecuencia natural de vibración, la longitud del elemento unidimensional y la velocidad de propagación de la onda. De forma que para una frecuencia natural de vibración podría determinarse la velocidad de propagación de las ondas.

$$f = \frac{nc}{2L} \quad (5)$$

Como se ha explicado previamente, se pretende determinar la velocidad de propagación de las ondas en el material que forma el revestimiento del contenedor, para ello, se traslada el desarrollo teórico realizado para el elemento unidimensional a un bloque.

Si se asume la simplificación de que las dos dimensiones que no se corresponden a la dirección de estudio son mucho mayores que la otra dirección, los límites del bloque no afectan al análisis y se trata entonces la dirección analizada como un elemento unidimensional.

Realizando un estudio de frecuencias propias mediante un programa de elementos finitos sobre el bloque se obtienen los resultados mostrados en la Figura 2.

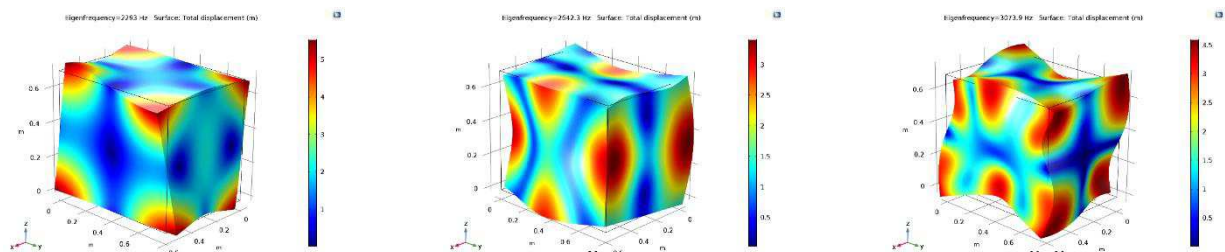


Figura 2: Representación gráfica de los tres modos de vibración asociados a cada una de las direcciones principales.

Las frecuencias asociadas a las direcciones principales son 2293 Hz, 26242.3 Hz y 3073.9 Hz. Aplicando la ecuación 5 se obtienen unas velocidades de propagación en el bloque de 3666.8 m/s, 3699.2 m/s y 3688.68 m/s respectivamente.

REFERENCIAS.

- Haberman, R. (1987). Haberman - Elementary Applied Partial Differential Equations with Fourier Series and Boundary Value Problems(1987)(T)(2Ed). *Isbn 0-13-252875-4*.
- Hellier, C. J. (2003). *Introduction to nondestructive testing. Handbook of Nondestructive Evaluation*. [https://doi.org/10.1016/0308-9126\(88\)90483-X](https://doi.org/10.1016/0308-9126(88)90483-X)

Detección e interpretación de posibles ruinas de la época Romana mediante GPR en La Morgal (Asturias, España)

Cebada-Relea, A.J.^{*}, Fernández-Álvarez, J.P.[†]

^{*}Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos. Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo – alejandro.cebada@hydrogeophysicsndt.com

[†]Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad de Oviedo – pauli@uniovi.es

RESUMEN

La técnica de prospección GPR (Ground-Penetrating Radar) o georradar se basa en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas que se propagan por un medio y, se reflejan al alcanzar otro con propiedades EM diferentes. El equipo mide el tiempo total que tarda la onda en penetrar en el subsuelo y reflejarse con precisión de nanosegundos, lo que proporciona una profundidad aproximada del objetivo. En las últimas décadas se han realizado numerosos ensayos GPR con multitud de propósitos: forenses, hidrogeológicos, estratigráficos, arqueológicos y estructurales. De entre estos se ha decidido mostrar el proceso llevado a cabo en uno de los ejemplos.

Se presenta un ensayo en la localidad de La Morgal (Asturias), lugar en el que, presuntamente, se encuentran enterradas estructuras de época Romana. El ensayo consiste en trazar con el equipo GPR una malla de perfiles (62x55m) localizada dentro de una de las zonas estratégicas, seleccionada gracias a estudios de teledetección por satélite. Posteriormente, se escoge una estrategia iterativa de procesado para los datos adquiridos en campo, con el fin de generar un modelo electromagnético del subsuelo en 3D que pueda facilitar el posicionamiento y la interpretación de las presuntas ruinas.

Palabras clave: GPR, arqueología, estructuras romanas, Luccus Asturum.

1. INTRODUCCIÓN

El GPR es un método geofísico electromagnético basado en la emisión y recepción de impulsos electromagnéticos en el rango de frecuencias de 10 MHz hasta 2 GHz. Esta técnica se ha utilizado con propósitos arqueológicos desde hace varios años (Unseen 2008), hasta la actualidad (Fernández-Álvarez et al. 2017; Leucci et al. 2017). Los métodos de teledetección por satélite sobre los que se basa este estudio apuntan a una zona de interés de gran extensión. El GPR se emplea en este trabajo para corroborar los patrones hallados en una subzona más concreta, elegida gracias a los estudios de reflectividad y microelevaciones realizados en las inmediaciones de la zona de estudio y, coordinados por el profesor Javier Fernández Calleja (Departamento de Física, Universidad de Oviedo).

2. ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

Se ha empleado un equipo GPR ProEx de la marca MALÅ Geosciense con una antena biestática (apantallada) de 250 MHz de frecuencia central. Se mide sobre una malla de 62 x 57 m que contiene 63 perfiles, separados 1 m entre sí, trazados en la dirección NE-SO, aproximadamente perpendicular a la orientación de las lineaciones observadas por teledetección por satélite. Sobre cada perfil, medido con odómetro, se toman datos cada 5 cm. Tras pruebas previas se emplea una ventana temporal corta de 140 ns, ya que por debajo de 2 m la señal se atenúa debido a la humedad retenida en el terreno. La calidad de la señal obtenida se ha considerado buena.

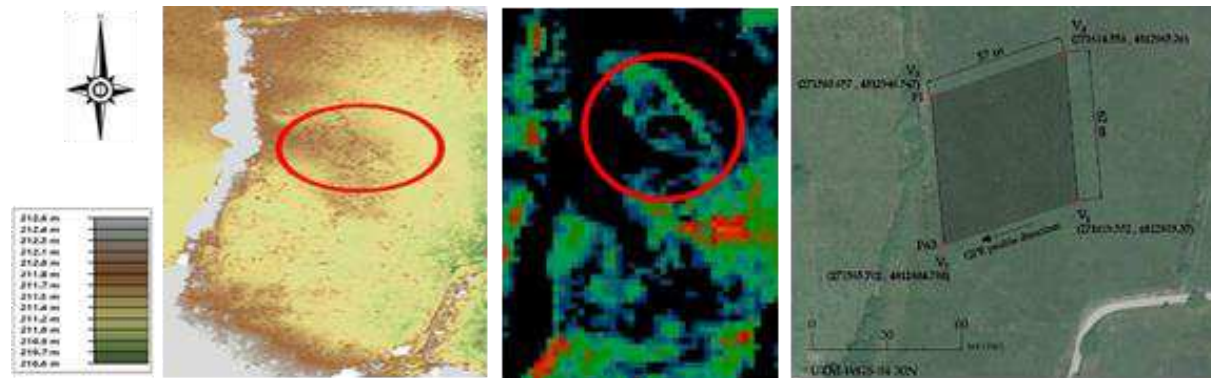


Figura 1: Mapa de microelevaciones con el patrón resaltado en rojo (izqda.), mapa de reflectividad (centro) y malla GPR sobre la zona 2 de investigación (dcha.). Las coordenadas de los vértices se han obtenido con GPS diferencial.

3. RESULTADOS GPR

Tras el procesado de las señales realizado en gabinete, se observa que los radargramas obtenidos con el equipo GPR muestran un patrón de señal claro. Esta es capaz de profundizar hasta 1 m (aproximadamente) y, a partir de ahí, comienza a atenuarse. Sin embargo, se observa en diferentes perfiles que la señal es capaz de penetrar a más profundidad en zonas puntuales y en zonas con mayor dimensión. Además, se observa cómo esto ocurre en radargramas consecutivos. En la Figura 2 se presenta el radargrama correspondiente al perfil 21, donde se pueden apreciar ambos tipos de anomalías sobre una misma sección vertical.

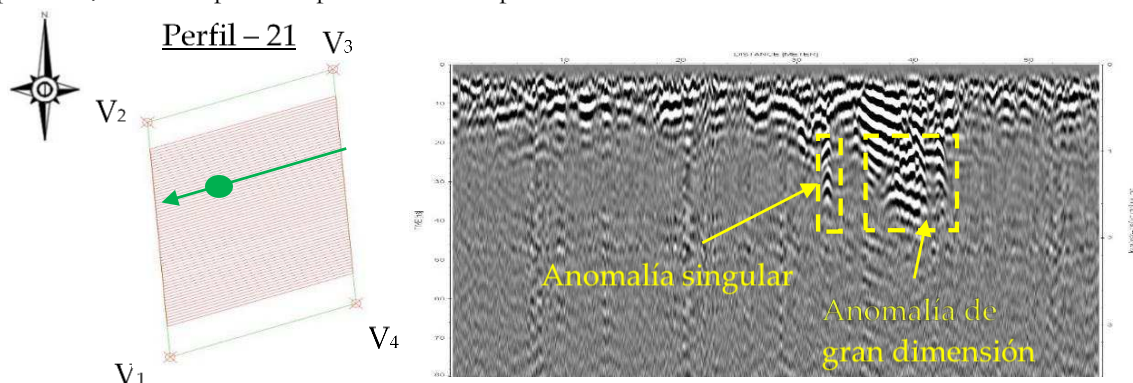


Figura 2: Situación del perfil 21 y radargrama procesado obtenido. Se resaltan los dos tipos de anomalía donde la señal profundiza más y de forma diferente.

La Figura 3 muestra la slice obtenida para una profundidad de 50 cm. En ella se aprecia una alta correspondencia entre patrones obtenidos con dos metodologías diferentes. En la parte NO y S-SE de la malla se observan dos zonas de gran dimensión donde la señal es capaz a profundizar más, aunque el patrón que se distingue es bastante irregular. Por contrapartida, en la parte central de la malla se observa que el patrón de la señal GPR se dispone de forma lineal, con unas dimensiones y orientaciones muy similares a las que se aprecian en los patrones de reflectividad y de microelevaciones.

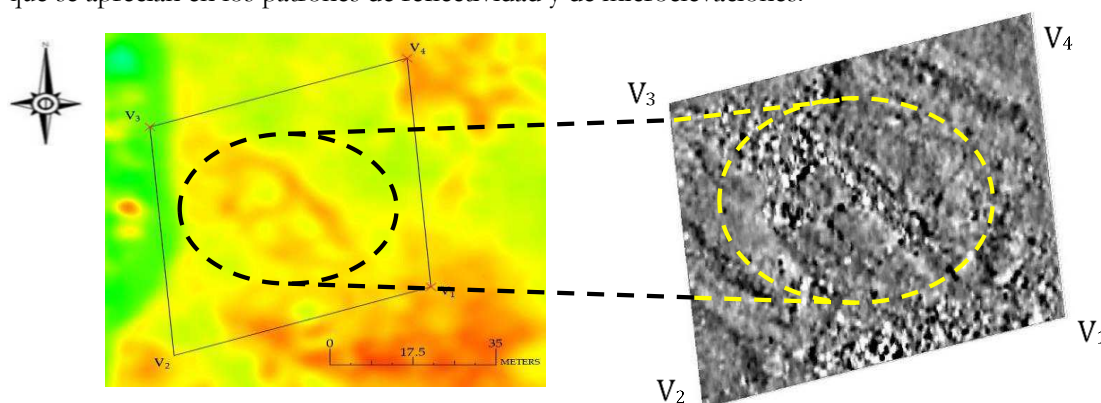


Figura 3: A la izquierda, se muestra en rojo el patrón de microelevaciones dentro del contorno de la malla realizada con GPR. A la derecha se muestra la slice correspondiente a una profundidad de 50 cm. Notar como el GPR reproduce el patrón de microelevaciones de manera casi exacta.

4. REFERENCIAS

- Fernández-Álvarez, José Paulino et al. 2017. "Combined GPR and ERT Exploratory Geophysical Survey of the Medieval Village of Pancorbo Castle (Burgos, Spain)." *Journal of Applied Geophysics* 144: 86–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.07.002>.
- Lasaponara, Rosa et al. 2016. "Towards an Operative Use of Remote Sensing for Exploring the Past Using Satellite Data: The Case Study of Hierapolis (Turkey)." *Remote Sensing of Environment* 174: 148–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.016>.
- Leucci, Giovanni et al. 2017. "The Research on the Buried Public Monumental Complexes of Lupiae (Lecce) by Geophysical Prospecting." *Exploration Geophysics* 48(4): 523–32.
- Unseen, Seeing T H E. 2008. *Seeing the Unseen*. Geophysics and Landscape Archaeology.

Problemática geotécnica e hidrogeológica en el Túnel de Burata (LAV Galicia)

Pando, L.¹, López-Fernández, C.¹, Arias, D.¹, Castells, E.², Díaz-Díaz, L. M.¹, y Olona, J.¹

¹ Departamento de Geología, Universidad de Oviedo

² Grupo Isolux-Corsán

RESUMEN

Se presenta la problemática acontecida durante la construcción de un túnel ferroviario en materiales graníticos. La investigación llevada a cabo para revisar y completar el modelo geológico, geotécnico e hidrogeológico del terreno evidenció una marcada alteración del sustrato, subestimada en los estudios previos. Un análisis detallado de dicha alteración permitió entender su naturaleza y ayudó a modificar la tramificación prevista del túnel, anticipando problemas constructivos y con ello facilitando la finalización de la obra, aquejada de numerosas incidencias, retrasos y sobrecostes.

Palabras clave: sustrato granítico; alteración; saprolita; drenaje; túnel.

1. INTRODUCCIÓN.

La zona de estudio forma parte del tramo Ourense-Santiago de la LAV Madrid-Galicia, en concreto del subtramo Ourense-Amoeiro de 6.420 m. Las obras comenzaron en 2005 y la puesta en servicio tuvo lugar en 2011, con 886 m de viaductos y dos túneles. Burata consiste en un tubo de vía doble y galería de emergencia paralela conectada cada 250 m, que suma 3.998 m de longitud en mina (4.068 en total) con sección de 90 m². El túnel transcurre a una profundidad media de 93 m y su perforación se planificó desde ambos emboquilles con NATM en avance y destroza, usando como sostenimiento cerchas, gunita y bulones. La galería se excavó avanzada con decalaje variable (75-150 m).

Tras comenzar la perforación (2006) al amparo de paraguas de micropilotes (Fig. 1A) comenzaron tiempo después los problemas. Eventualidades como la aparición de frentes inestables (Fig. 1B), el desarrollo de fuertes convergencias y una importante afluencia de agua, exigió medidas como incrementar el sostenimiento, disponer soleras provisionales, recalzar apoyos, revestir cunetas, drenar, etc. Esto llevó a un replanteo del contexto geológico de la obra, ya que las condiciones de excavación eran mucho más críticas que las previstas según el proyecto. Tras ello las obras continuaron no sin dificultades pero ya con un mejor conocimiento del subsuelo, recurriendo a tratamientos del frente, contrabóvedas, paraguas de micropilotes, inyecciones de resinas y microcemento, *jet grouting*, etc.

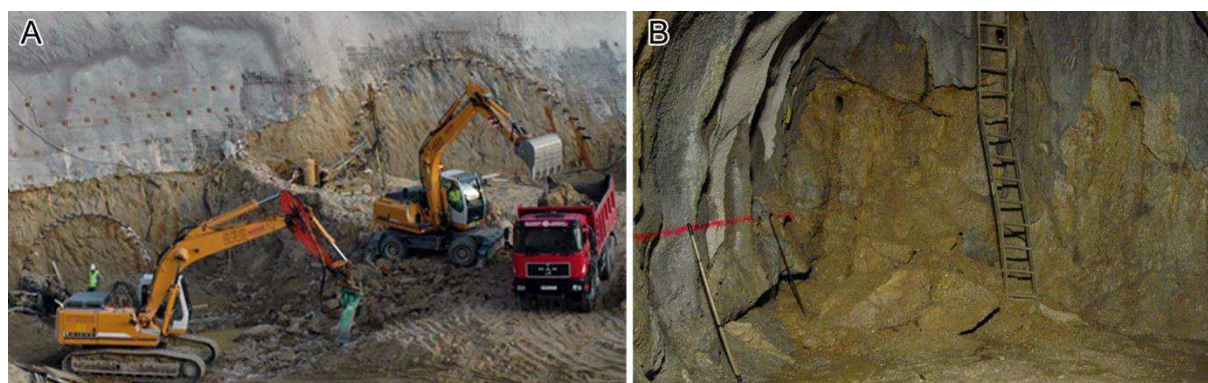


Figura 1. A) Comienzo de la excavación en la boca norte; B) Frente inestable en la galería.

2. METODOLOGÍA.

Para abordar el nuevo estudio, además de revisar los datos previos se efectuó una campaña de investigación complementaria que integró: i) cartografía geológica; ii) sondeos mecánicos; iii) pruebas in situ; iv) ensayos de laboratorio; v) inventario de pozos y seguimiento piezométrico. Esto permitió reinterpretar las unidades geológicas a seccionar y proponer un modelo geológico revisado; empezando por un nuevo perfil geotécnico del trazado del túnel, que sirvió para identificar el origen de los problemas acaecidos y utilizado como base para afrontar la excavación restante. Como corresponde se prestó especial atención al proceso de alteración en cuanto a su naturaleza, incidencia sobre el sustrato y alcance en profundidad. También fue posible establecer un modelo hidrogeológico del entorno.

3. RESULTADOS.

El contexto geológico-geotécnico fue redefinido discriminando 4 unidades (Fig. 2A): a) sustrato rocoso de granitoide ‘sano’ con tres familias de juntas; b) sustrato alterado o *saprock*; c) saprolita arenosa con textura preservada (‘jabre’); d) encajante metasedimentario. El nuevo perfil evidenció que el túnel secciona mucha más saprolita que lo previsto de acuerdo al corte geológico del proyecto constructivo. Por otro lado el alcance de la alteración en profundidad es muy significativo, con un frente indentado que excede localmente los 250 m bajo la superficie; frente que posee un fuerte control estructural relacionado con la foliación varisca y el diaclasado (Fig. 2B).

Por otro lado, el estudio detallado tanto de muestras de rocas (sobre todo petrográfico) y de la saprolita mediante análisis químicos y mineralógicos permitió investigar cómo ha evolucionado el proceso de alteración (Arias *et al.*; 2016). Asimismo los ensayos geotécnicos pusieron de manifiesto que la alteración del sustrato mermó notablemente su comportamiento; ello está ligado a una disminución de la densidad y resistencia mecánica (< 25 MPa bajo compresión uniaxial), y un empeoramiento de la calidad de los macizos rocosos en la *saprock* respecto al basamento inalterado. En el extremo de la saprolita, que encarna el estadio más avanzado de alteración, pudieron distinguirse dos tipologías granulométrica y composicionalmente diferenciadas que representan a su vez diferentes grados de evolución durante la alteración, una más cohesiva (denominada C-R) y otra casi exclusivamente granular (C-P). Estos materiales ofrecen una severísima reducción de la resistencia, densidad muy baja (15-33 % menor que la roca) y una elevada porosidad (hasta el 30 %) que incrementa la permeabilidad de los materiales hasta valores de $2 \cdot 10^{-4}$ m/s propios del comportamiento que presenta un acuífero. Cabe señalar a este respecto que el drenaje vinculado a las obras causó un abatimiento piezométrico y una subsecuente subsidencia en superficie (López-Fernández *et al.*; 2013), llegando a los 11 cm de asiento sin consecuencias graves para el entorno inmediato al trazado.

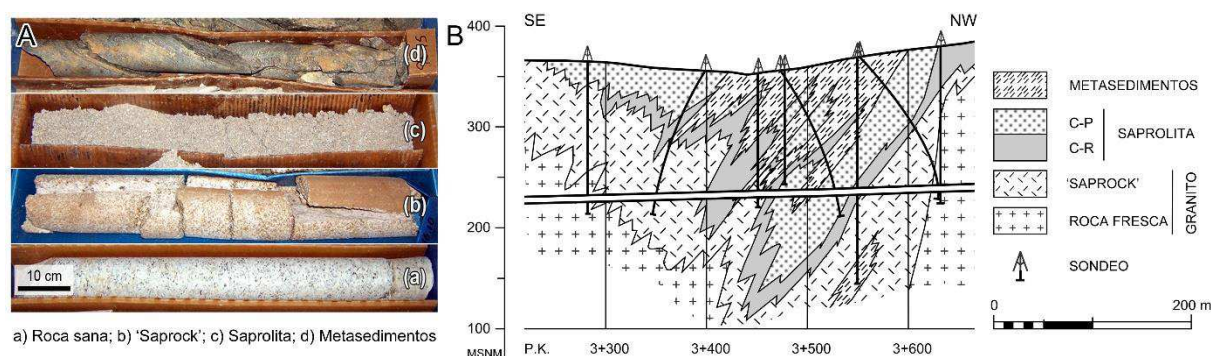


Figura 2. A) Unidades geológicas seccionadas; B) Extracto del perfil geológico del túnel.

4. CONCLUSIONES.

La construcción del túnel de Burata ejemplifica las dificultades técnicas derivadas de una definición imprecisa del contexto geológico y geotécnico en una obra lineal. Los estudios previos fallaron al discriminar unidades geotécnicas y prever su comportamiento, en particular por no haber caracterizado en detalle proceso de alteración sufrido por el sustrato. Una aproximación válida en un entorno como este exige investigar la composición química y mineralógica de los materiales atravesados, y entender cómo actúa el proceso de alteración y los factores que lo controlan, para así no infravalorar su incidencia sobre los macizos rocosos con todo lo que ello supone a efectos de excavabilidad, sostenimiento y drenaje del agua subterránea.

REFERENCIAS.

- Arias, D., Pando, L., López-Fernández, C., Díaz-Díaz, L. M., & Rubio, A. (2016). Deep weathering of granitic rocks: A case of tunnelling in NW Spain. *Catena*, 137, 572-580.
- López-Fernández, C., Arias, D., Fernández-Viejo, G., Pando, L., & Castells, E. (2013). Surface subsidence induced by groundwater drainage tunneling in granite residual soils (Burata railway tunnel, Spain). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(5), 821-824.

Diseño y construcción de un nuevo túnel aerodinámico de capa límite

Navarro, A.^{*}, Uche, R.^{*} y Vallina, N.^{*}

^{*}Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

El objetivo del artículo es describir el proceso de diseño y construcción de esta infraestructura, de grandes prestaciones, y que supera a los otros cuatro túneles aerodinámicos de los que ya disponemos en nuestra Universidad. Un aspecto innovador y enriquecedor es la participación de los propios alumnos en la ejecución del túnel, lo que les facilita un extraordinario complemento práctico a la asignatura Ingeniería del Viento, que se imparte en nuestro Máster de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos.

Palabras clave: túnel de viento; aerodinámica; construcción de estructuras de madera; CFD.

1. INTRODUCCIÓN.

Este artículo tiene como finalidad presentar el proyecto de diseño y construcción de un túnel aerodinámico de capa límite en la Escuela Politécnica de Mieres (EPM), en la Universidad de Oviedo, llevado a cabo por el Área de Ingeniería Hidráulica y el Área de Mecánica de Fluidos del Departamento de Energía. La construcción se está realizando por parte de profesores y alumnos del Grado de Ingeniería Civil y el Máster de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

El objetivo buscado con su construcción es el desarrollo de investigación básica y el desarrollo de prácticas para los alumnos, enfocadas al estudio de la interacción del viento con estructuras civiles: puentes, edificios, aerogeneradores, paneles, cubiertas, etc.

Es bien sabido que en muchas ocasiones las normas técnicas menosprecian en demasía los efectos del viento, y en muchas ocasiones estas cargas de naturaleza dinámica son las responsables del dimensionamiento de puentes muy expuestos y flexibles, edificios singulares, cubiertas, fachadas, etc. Es también frecuente por parte de la normativa el sobredimensionamiento de ciertos efectos aerodinámicos. Es por ello que, con la finalidad de estudiar estos efectos sobre las estructuras, en modelos reales o a escala, los túneles aerodinámicos se han desarrollado como herramienta fundamental del proceso de diseño de esas construcciones.

2. DISEÑO.

El diseño general del túnel de viento propuesto se muestra en la Figura 1. El flujo de aire circula en el sentido contrario a las agujas del reloj. Aguas arriba de la cámara de ensayo encontramos los dos componentes principales del túnel de viento: la contracción y la cámara de remanso. El otro componente crucial es, por supuesto, la fuente de potencia. El resto de componentes solo sirven para cerrar el circuito y minimizar la pérdida de energía. Sin embargo, el difusor 2 y el diseño de la curva contigua también tienen una influencia importante en la calidad del flujo y son responsables de más del 50% de las pérdidas totales.

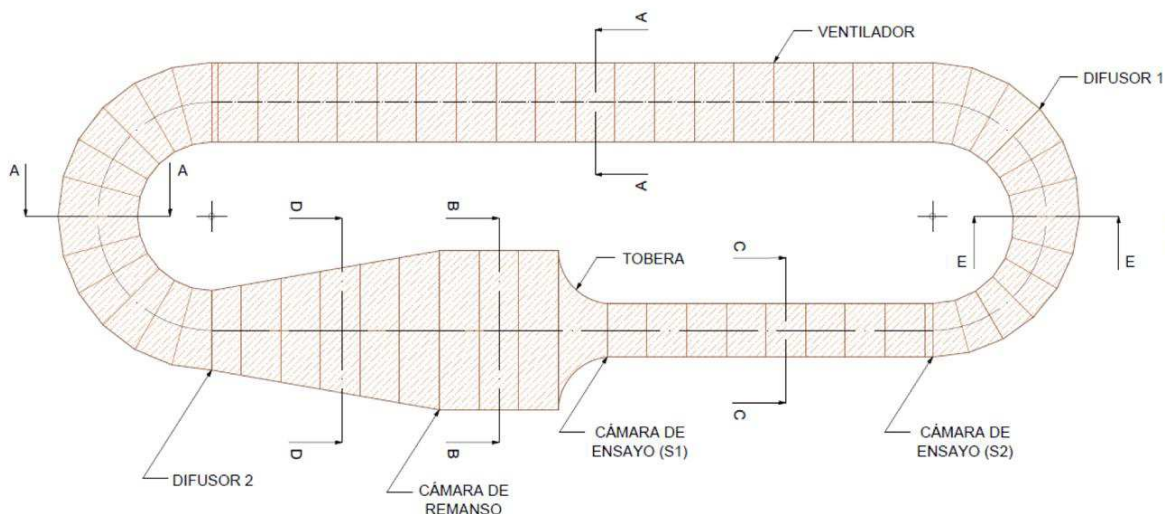


Figura 1: Planta del túnel aerodinámico de la EPM.

3. MODELO CFD.

Se presenta a continuación el modelo CFD (Fluent V16.2) realizado específicamente para afinar el diseño del túnel. Este modelo debe de reproducir de la forma más exacta los distintos elementos del túnel aerodinámico descritos anteriormente.

La simulación se realiza en estado estacionario y régimen subsónico. Se ha modelizado el túnel a escala 1:1. A continuación se describen las características de los dos modelos construidos:

1. El primer modelo contiene un ventilador en su posición original y no incorpora ningún tipo de enderezador de flujo. Este modelo tiene un número de elementos (volúmenes finitos) de 605.674 tetraedros; la máxima relación de aspecto es 1,58, el máximo “skewness” es 0,68 y el tiempo de cálculo de cada uno de los casos es de unos 3,5 min. para 300 iteraciones en flujo estacionario.
2. Se construye un segundo modelo con los cuatro ventiladores variando la posición de los mismos, incorporando enderezadores de flujo en las curvas y simulando el conjunto de “honeycomb” y “screen” con una condición de contorno porosa. Este modelo tiene un número de elementos (volúmenes finitos) de 1.046.841 tetraedros; la máxima relación de aspecto es 1,57, el máximo “skewness” es 0,65 y el tiempo de cálculo de cada uno de los casos es de unos 5 min. para 300 iteraciones en flujo estacionario (Figura 2).

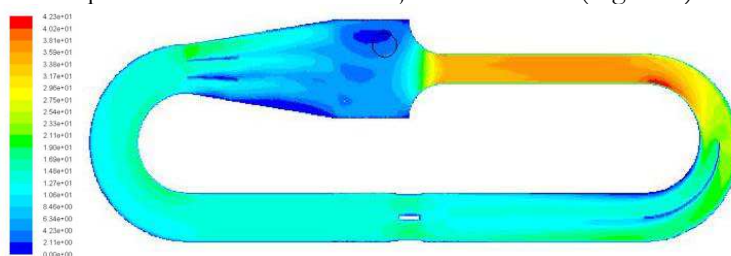


Figura 2: Velocidades en el modelo 2 con honeycomb y rigidizadores.

4. CONSTRUCCIÓN.

En este artículo se ha descrito el proceso de diseño de construcción de un túnel aerodinámico llevado a cabo por los alumnos y profesores de la Universidad de Oviedo, en la Escuela Politécnica de Mieres.

La construcción del túnel aerodinámico se está llevando a cabo en uno de los laboratorios del Área de Ingeniería Hidráulica. Todos los conductos y elementos necesarios se están realizando con madera aglomerada DM y con madera contrachapada en algunos elementos, además de listones de pino, entre las que se encuentran tres tipos de piezas: paneles DM de 2.440 mm. x 2.440 mm. x 30 mm; paneles contrachapados de 15 y 10 mm de espesor; y listones que ha sido necesario cortar para adecuarlas a la geometría impuesta, tratando de optimizar al máximo sus dimensiones.

4. CONCLUSIONES.

Desde el punto de vista del alumno, este proyecto supone la oportunidad de comprender la necesidad de estudiar la influencia del viento en las estructuras civiles, y desarrollar con ello el conocimiento necesario para investigar en este campo de la mecánica de fluidos. A su vez, la propia construcción de un túnel aerodinámico permite fomentar el aprendizaje concreto sobre este tipo de herramientas de investigación, y conocer el proceso de diseño y construcción de esta infraestructura, de grandes prestaciones. Un aspecto innovador y enriquecedor para los propios alumnos, que reciben un complemento práctico a los conocimientos teóricos impartidos en el Máster.

REFERENCIAS.

- García, P.J., Del Coz, J.J., Castro, D., Ballester, F. (2010). Numerical simulation of the performance of a snow fence with airfoil snow plates by FVM, J. Comput. Appl. Math. 234 (2010) 1200-1210.
- Navarro, A., Del Coz, J.J., Fresno, D., López, M. C., Navarro, A., Simón, J. M. (2011). Análisis de pasarela giratoria en la desembocadura del río Nalón mediante Dinámica de Fluidos Computacional apoyada con un Diseño de Experimentos, V Congreso ACHE, Barcelona, España, 25 al 27-10-2011.
- Del Coz, J.J., García, P.J., Suárez, F.J. (2006). Numerical analysis of pressure field on curved self-weighted metallic roofs due to the wind effect by the FEM, J. Comput. Appl. Math. 192 (1) (2006) 40-50.
- Del Coz, J.J., García, P.J., González, J.A., Martín, A. (2009). Numerical analysis of the pressure field on curved and open self-weighted metallic roofs due to the wind effect by the finite volume method, Appl. Math. Comput. 209 (1) (2009) 31-41.

Caracterización de dolinas mediante técnicas geofísicas en el metro de Riyadh (Arabia Saudí)

Olona, J.^{*}, Cueto, M.[†], López-Fernández, C.^{*}, Pando, L.^{*}, Fernández-Viejo, G.^{*} y Arias, D.^{*}

^{*}Grupo de Geología Aplicada a la Ingeniería, Departamento de Geología, Universidad de Oviedo

[†]IDOM, Consulting, Engineering, Architecture

RESUMEN

En el presente trabajo se presentan los resultados de una investigación geofísica desarrollada en una de las obras de ingeniería más grandes del mundo (el metro de Riyadh). Gracias a la utilización conjunta de los métodos de sísmica de refracción y de tomografía eléctrica, se pudo obtener un modelo geológico-geotécnico avanzado del terreno, que permitió caracterizar una dolina de varios cientos de metros de longitud con implicaciones críticas para el desarrollo del proyecto.

Palabras clave: geofísica; metro; dolina; Riyadh; geotecnia.

1. INTRODUCCIÓN

El metro de Riyadh es uno de los mayores proyectos de ingeniería del mundo, en el que actualmente se están desarrollando de un modo simultáneo seis líneas de transporte que suman 176 km de longitud y un presupuesto aproximado de 16.300 millones de euros. Esta singular obra constituye todo un reto de la ingeniería por su entidad, por su desarrollo en un medio urbano y por la complejidad de las condiciones geotécnicas. El presente estudio se circunscribe a la línea de metro número 3 (41 km de longitud), en la cual IDOM e investigadores del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo desarrollaron y supervisaron una campaña geológica, geotécnica y geofísica. En este sector, donde predominan las litologías carbonatadas, se desarrollan estructuras cársticas de cientos de metros de longitud y varias decenas de metros de profundidad. Para la identificación y caracterización de dolinas se integraron dos metodologías geofísicas (sísmica y eléctrica), con el objetivo de obtener un modelo avanzado del terreno.

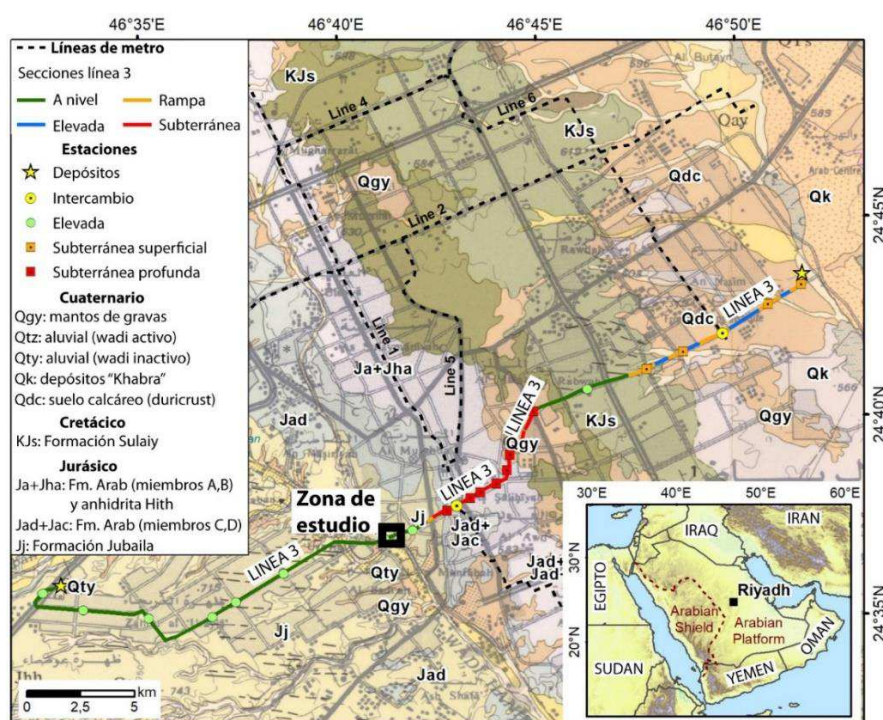


Figura 1: Esquema general del proyecto de metro de la ciudad de Riyadh, y localización de la línea 3 sobre el mapa geológico de la hoja Ar Riyadh 24I (modificado de Vaslet et al. 1991). La posición de la zona de estudio se ha indicado mediante un cuadrado negro.

2. CONTEXTO GEOLOGICO-GEOTECNICO

La línea de metro 3 discurre sobre materiales jurásicos y cretácicos, en los que predominan las calizas calcareníticas con intercalaciones de brechas carbonatadas de colapso. En la dolina objeto de estudio, se encuentran formaciones superficiales de distinta compacidad, constituidas por materiales de origen antrópico y natural, sedimentos limo-arcillosos de lacustres (sabkha), arenas eólicas, e intercalaciones de sedimentos granulares correspondientes a canales aluviales. Bajo estas formaciones superficiales se sitúan paquetes de brechas cársticas y calizas calcareníticas colapsadas.

3. METODOLOGIA

En la campaña geofísica se aplicaron los métodos de sísmica de refracción y tomografía eléctrica a lo largo de una línea de unos 1.100 m de longitud. El registro de datos sísmicos se realizó en dos perfiles independientes, con un equipo de 58 geófonos de 10 Hz espaciados cada 10 m. Como fuente sísmica se utilizó un sistema de peso acelerado tipo AWD-A200 (United Service Alliance, Inc), que se aplicó a intervalos de 10 m. Los datos se trataron con el programa SeisImager (Geometrics, Inc.), con el que se realizó una inversión tomográfica para el cálculo de dos secciones de velocidades de ondas P (Fig. 2a). El registro de datos eléctricos se realizó con un resistivímetro SyscalPro de IRIS, y 208 electrodos metálicos que se hincaron en el terreno a espaciados de 5 m. Como dispositivo de registro se utilizó el denominado Wenner-Schlumberger. La inversión de datos se realizó con el programa EarthImager 2D (AGI), con el que se obtuvo una sección de resistividad eléctrica sustentada en 3.435 medidas (Fig. 2b).

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La sección de velocidad sísmica de ondas P permitió caracterizar la estructura de la dolina (Fig. 2a). A partir de la velocidad sísmica se estableció la posición del sustrato calcáreo, de mayor calidad geotécnica y velocidad sísmica (unos 4.500 m/s), y de las formaciones superficiales presentes en la dolina. De estas últimas se diferenciaron dos en función de su compacidad. Una superficial, correspondiente a un suelo blando con velocidades inferiores a los 1.100 m/s, y otra perteneciente a un suelo de mayor competencia y rigidez, cuyas velocidades se sitúan entre los 1.200 a 3.000 m/s. La sección de resistividad eléctrica presenta una configuración sujeta a factores fundamentalmente litológicos (Fig. 2b). En este caso se identificó la posición de un sustrato rocoso de alta resistividad (220-700 Ωm), así como dos anomalías de baja resistividad dentro del mismo, posiblemente asociadas a fracturas (metros 340 y 950). En la parte central se aprecia un sector de resistividades bajas-medias organizadas de techo a muro según el tipo de materiales: suelos antrópicos y residuales (1-15 Ωm), sedimentos lacustres (22-60 Ωm) y una unidad constituida por brechas cársticas y un sector del sustrato rocoso fracturado (50-180 Ωm).

Las técnicas geofísicas proporcionaron dos puntos de vista únicos, y gracias su integración se pudo obtener un modelo avanzado del terreno que fue validado por 19 sondeos (Fig. 2). La investigación geofísica fue determinante en la caracterización geotécnica del terreno, y permitió abordar los actuales proyectos constructivos de forma eficaz y segura. El presente resumen muestra una parte de un trabajo que será publicado este año bajo el título “Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia)” en la revista “Near Surface Geophysics”.

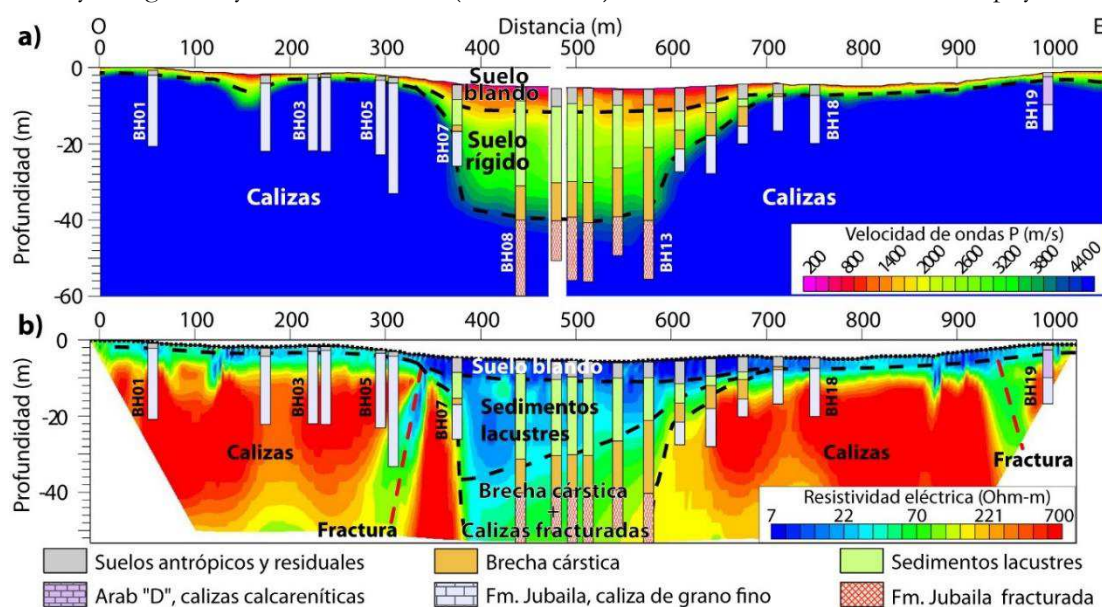


Figura 2: Interpretación de los modelos de velocidad de ondas P (a) y de resistividad eléctrica (b). En los modelos se incluye la testificación de 19 sondeos de investigación. Escala del eje vertical exagerado x4.

REFERENCIAS.

Vaslet, D., Al-Muallem, M.S., Maddah, S.S., Brosse, J., Fourniquet, J., Breton, J. and Le Nindre, Y. (1991). *Geologic map of the ArRiyadh Quadrangle, sheet 24 I, Kingdom of Saudi Arabia*. Deputy Ministry for Mineral Resources, Jeddah, Geoscience Map GM-121.

Análisis del problema de equivalencia en la interpretación de los SEDT para delimitar el nivel freático en una presa de lodos.

Cimadevilla Fuente, D¹, Fernández Álvarez, J.P.²

¹Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y Ensayos No Destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo - dcimadevilla@hydrogeophysicsndt.com

²Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo - pauli@univoi.es

RESUMEN

La presa de lodos de la mina de oro Valle-Boinás almacena un volumen total de 4.000.000 m³ de material procedente de la planta de tratamiento mineral. La normativa vigente referente a residuos de las industrias extractivas exige a la empresa minera hacerse cargo de la monitorización y control de este tipo de estructuras al menos treinta años después de su clausura. Esta exigencia incluye el control de las aguas almacenadas, con alta concentración de metales pesados, que no pueden ser directamente drenadas al cauce natural.

La técnica geofísica de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) resulta una herramienta eficaz para medir distribuciones de conductividad en el subsuelo. Un problema recurrente al que se enfrenta este tipo de técnica es la obtención de varios modelos que permiten ajustar unas mismas medidas a varias soluciones, lo que implica cierto grado de incertidumbre en la interpretación.

Se ilustra esta problemática en el estudio realizado en la presa de lodos del Valle-Boinás con la técnica SEDT y como las restricciones incorporadas al modelo permiten reducir el grado de ambigüedad en la delimitación del nivel freático.

Palabras clave: presa de lodos; SEDT; problema de equivalencia, información a-priori.

1. INTRODUCCIÓN.

La actividad minera en España ha dejado, según el último inventario del IGME, 7096 instalaciones para depositar residuos procedentes de la extracción minera, 524 abandonadas y sólo 54 han sido restauradas, como ejemplo, la Presa de lodos del Valle Boinás en Asturias (Noroeste de España). La función que realiza este tipo de depósito es la separación de líquidos y sólidos que constituyen los lodos. Los líquidos se drenan y recirculan para el tratamiento del mineral (Ministerio de industria y energía, 2000) y los sólidos quedan depositados, por decantación, en este tipo de instalaciones. El riesgo que suponen este tipo residuos para el medio ambiente hace que la normativa española exija a las empresas mineras hacerse cargo del mantenimiento y monitorización de estas instalaciones durante, al menos, 30 años después de su clausura.

La técnica geofísica SEDT responde a este tipo de requerimiento ya que permite medir la distribución de conductividad del terreno. Los materiales, en general, aumentan su conductividad en condiciones saturadas que hace que este tipo de técnica sea la más adecuada para delimitar el grado de saturación en los materiales. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en estudios hidrogeológicos para detección de acuíferos (Danielsen et al., 2003) y contaminación salina en pozos de abastecimiento (Goldman and Kafri, 2006).

Un problema en la interpretación de los datos obtenidos, sin más información que la adquirida con la técnica geofísica, es el problema de equivalencia, es decir, la obtención de varios modelos que ajustan de igual modo a los datos adquiridos en campo. Este fenómeno supone cierto grado de incertidumbre en la interpretación de los datos. Para ello, de forma complementaria a la geofísica, se integran en la modelización información procedente de otras fuentes.

Se analiza el problema de equivalencia en los resultados obtenidos en una presa de lodos en el norte de España en la que se almacenan, actualmente, 4000000 m³ de lodos procedentes de la actividad minera del oro durante el periodo 1998-2006, año en el que fue clausurada y restaurada. El estudio comprendió el análisis de los caudales drenados, medidas de la conductividad de ese agua y medidas de resistividad eléctrica con la técnica geofísica de los Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del Tiempo (SEDT).

2. METODOLOGÍA

En la campaña de campo se realizaron un total de 22 SEDT, con el equipo TerraTEM, en la técnica de lazo coincidente y lazos de 40x40m, distribuidos en una malla regular sobre la base de la balsa con el objetivo de abarcar toda la superficie. La información a-priori se obtuvo a partir de la reconstrucción de la geometría de la balsa con la información procedente de los planes constructivos. A partir de estos datos se generó un modelo digital de elevaciones que fija el espesor máximo de lodos admisible. Por

otro lado, la medición de los caudales en los drenes dispuestos en el dique de contención, a distintas alturas, permitió analizar la dinámica del agua en el interior de los lodos. También se midieron valores de conductividad eléctrica en el agua drenada de 10.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos datos permiten, de forma cualitativa, aproximar el orden de magnitud de la resistividad de los lodos almacenados.

Con el programa de inversión ZondTEM, en un proceso iterativo, se ajustan los datos de campo, medidas de voltaje inducido en el receptor frente a tiempo, adquiridos con la técnica SEDT, al modelo más simple posible. La media cuadrática (RMS) determina el grado de desajuste entre los datos observados y calculados.

3. RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan los ajustes obtenidos para los datos observados en uno de los sondeos para un modelo homogéneo, dos capas y tres capas, con RMS de 16,46; 15,32 y 5,4 respectivamente.

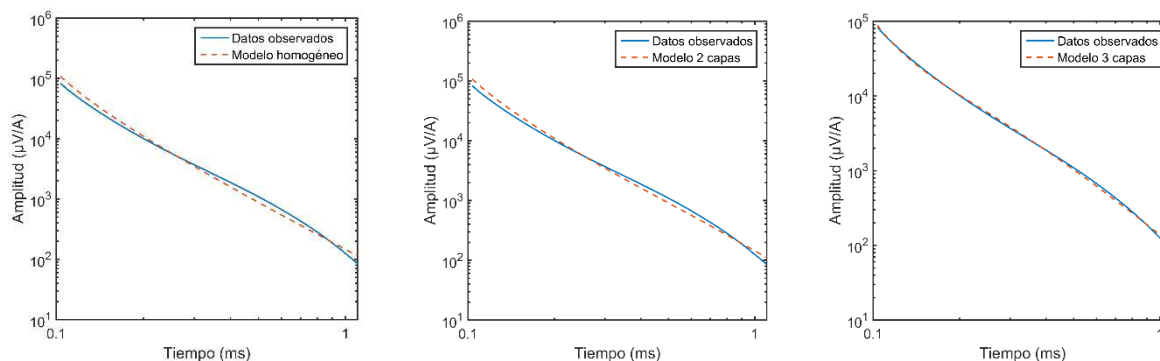


Figura 1. De izquierda a derecha, ajuste de los datos observados en campo con datos calculados en un modelo homogéneo, un modelo de dos capas y un modelo de tres capas.

Tomando como referencia el modelo de tres capas se han encontrado varios modelos que se ajustan de igual forma a los datos observados. En la Tabla 1 se sintetiza el rango de valores para los modelos de tres capas. Nótese el efecto de la equivalencia; es posible encontrar un modelo con un nivel intermedio con una potencia de 6 m y 1 $\Omega \cdot \text{m}$ de resistividad y de igual forma, un modelo de 33 m y 4 $\Omega \cdot \text{m}$. El nivel freático queda delimitado, según cada modelo, por el techo del nivel 2.

Tabla 1. Valores máximos y mínimos calculados para los modelos de tres capas

Parámetros	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$)	10-100	1-4	>200
Potencia (m)	12-25	6-33	
Profundidad techo (m)		12-25	33-45

4. CONCLUSIONES

El problema de equivalencia con la técnica geofísica SEDT queda patente a partir del análisis de los datos observados en la balsa de lodos del Valle-Boinás. Es posible obtener modelos con un mismo grado de ajuste, lo que supone un grado de incertidumbre, a tener en cuenta, en la interpretación de los datos calculados.

REFERENCIAS.

- Danielsen, J.E., Auken, E., Jørgensen, F., Søndergaard, V., Sørensen, K., 2003. The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. *J. Appl. Geophys.* 53, 181–198. doi:10.1016/j.jappgeo.2003.08.004
- Goldman, M., Kafri, U., 2006. Hydrogeophysical Applications in coastal aquifers 233–254.
- Ministerio de industria y energía, 2000. ORDEN de 26 de abril de 2000 por la que se aprueba la Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01 del capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera «Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas», BOE.

Optimización del Diseño de una Casa Tradicional Asturiana, según las Metodologías de Evaluación Medioambiental BREEAM, LEED y VERDE

Lage-Cal, S.^{*}, Folgueras-Díaz, M. B.[†] y Luengo-García, J. C.[†]

^{*} Departamento de Energía, Área de Máquinas y Motores, Universidad de Oviedo

RESUMEN

De entre todas las metodologías disponibles para evaluar la Sostenibilidad Global en edificios, se seleccionaron BREEAM Vivienda, VERDE NE Vivienda Unifamiliar y LEED v4 Homes. Las tres son susceptibles de ser aplicadas a la etapa post-construcción de gran cantidad de inmuebles residenciales y, además, se caracterizan por disponer de un triple sistema de evaluación, clasificación y certificación. Una vez determinada su idoneidad para la Casa Tradicional Asturiana (CTA) objeto de estudio, se obtuvieron tanto las calificaciones pertinentes como una serie de eventuales medidas de mejora. Finalmente, el trabajo se completó: 1) Clasificando las acciones a tomar según los costes asociados. 2) Determinando los resultados de implementar dichas medidas en la valoración final.

Palabras clave: arquitectura tradicional; medio ambiente; BREEAM; LEED; VERDE.

INTRODUCCIÓN

Lo que hace que la CTA elegida resulte verdaderamente singular son sus elementos de *estilo inglés* y el hecho de haber sido construida a finales del siglo XIX en lo que entonces se denominaba *camino de Corros*. Sus valores de elemento de *Arquitectura Culta* la han hecho acreedora de su inclusión en el *Plan Especial de Protección y Catálogo Urbanístico del Ayuntamiento de Avilés*, con nivel de *Protección Parcial*, lo que ha resultado determinante para que se mantuvieran tanto la envolvente como la distribución interna originales, muy especialmente durante la renovación que se llevó a cabo en el año 2010.

Sus características más significativas son: 1) Una superficie habitable de 450 m², repartida entre tres plantas (Figuras 1 y 2). 2) Una fachada principal con orientación NE, debido a la presencia de un vial (Figura 2). 3) La disposición de sendas galerías acristaladas en las fachadas SE y SO de la planta primera (Figura 1). 4) La presencia de una zona ajardinada de 2500 m² (Figura 1), asociada a la casa y que resulta una rareza en el actual entorno urbano de la misma (barrios de *Versalles* y *La Magdalena*).



Figura 1. CTA. Orientación Sur



Figura 2. CTA. Orientación Norte-Noroeste

OBJETIVOS

La CTA, como elemento de *arquitectura tradicional* que es, se ajusta a un modelo perfectamente adaptado a las características del territorio y emplea materiales de construcción de origen local. Además, su antigüedad la hace acreedora de un *ciclo de vida* muy largo, lo que se traduce en la disminución de los impactos ambientales específicos y, por ende, en un mayor grado de sostenibilidad. Es por ello que los objetivos del presente trabajo pasan tanto por refrendar y cuantificar éste último como por establecer estrategias que permitan mejorarlo.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Elegidos los procedimientos *BREEAM Vivienda*, *VERDE NE Vivienda Unifamiliar* y *LEED v4 Homes*, la primera etapa a cubrir pasa por determinar su validez para nuestro *estudio de caso*. De este modo, se observa que la CTA incumple seis de los quince prerequisites que *LEED v4 Homes* exige para

considerarla evaluable (Figura 3). Algunos de ellos, como son la presencia obligatoria de sistemas de ventilación mecánica y de filtrado del aire, chocan frontalmente con sus características y nivel de protección. Y otros, como son los objetivos de compactidad, resultan imposibles de alcanzar en una vivienda unifamiliar de estas dimensiones (Figura 3).

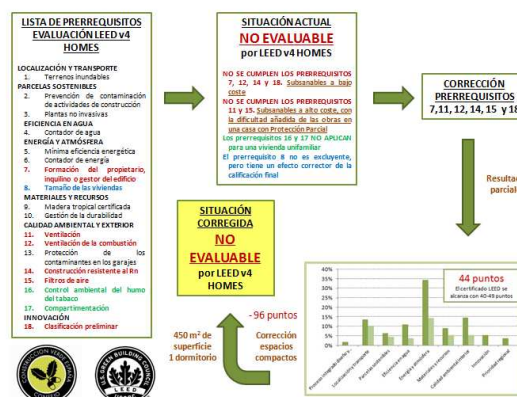
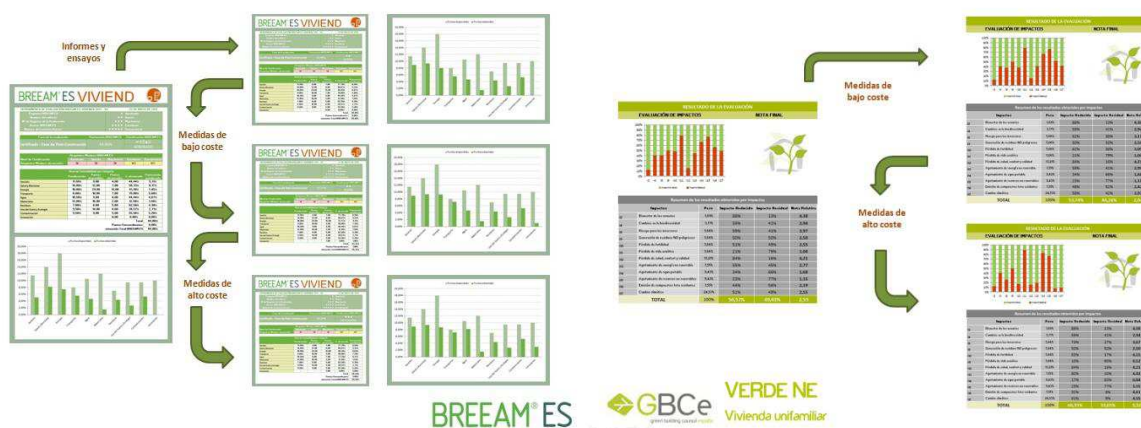


Figura 3. CTA. Justificación de la inadecuación de **LEED v4 Homes**

Por el contrario, las metodologías *BREEAM Vivienda* (CO₂ equivalente) y *VERDE NE Vivienda Unifamiliar* (Ciclo de vida) resultan perfectamente aplicables. Así, la evaluación de la CTA con *BREEAM Vivienda* se llevó a cabo en torno a la gran reforma que sufrió ésta en el año 2010, arrojando la calificación de APROBADO (44,86%). Para convertir esta nota en la inmediatamente superior (BUENO (50,48%)) bastaría con llevar a cabo una serie de ensayos y justificar documentalmente algunos puntos (Figura 4).

Por otra parte, la metodología *VERDE NE Vivienda* establece que el comportamiento de la CTA en su estado actual mejora en 2,43 veces el de un edificio de referencia con la misma superficie y que se limite a cumplir la normativa y/o a seguir los estándares característicos de la zona. Para elevar este coeficiente hasta el 3,43 habría que tomar una serie de medidas encaminadas tanto a una minimizar el consumo de energía en general (por ejemplo, la sustitución de las luminarias actuales por otras de bajo consumo) como el de combustibles fósiles en particular (instalación de una caldera de biomasa y placas solares) (Figura 5).



Figuras 4 y 5. CTA. Evaluación y optimización de la sostenibilidad según **BREEAM Vivienda** y **VERDE NE Vivienda Unifamiliar**

CONCLUSIONES

En las condiciones actuales, la CTA puede ver certificado su nivel de sostenibilidad según las metodologías *BREEAM Vivienda* y *VERDE NE Vivienda Unifamiliar*. Tanto las características constructivas y adaptativas de la vivienda como las condiciones del entorno contribuyen a que ésta tenga carácter de *edificio verde*. Por otra parte, ha quedado demostrado que las calificaciones pueden mejorar tras la toma de una serie de medidas de bajo coste (o, incluso, de coste nulo), pero que resultan buenos indicadores del grado de compromiso medioambiental existente.

Rehabilitación Energética en Edificios

Castro García, M.P.*

* Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

La rehabilitación energética en una vivienda consiste en realizar las obras necesarias para minimizar el consumo de energía de la misma. Esta medida es una inversión rentable y segura, que contribuye a mejorar la calidad y confort térmico en la vivienda.

En este trabajo se muestra el proceso de rehabilitación energética, llevada a cabo, en un bloque de viviendas ubicado en Gijón. La obra realizada ha consistido en ejecutar una fachada ventilada que no sólo ha mejorado la estética de la misma, sino que ha reducido significativamente las pérdidas de energía a través de los puentes térmicos, lo que ha dado lugar, a una disminución del consumo energético en las viviendas que conforman el bloque.

Palabras clave: rehabilitación; energética; edificios; fachada; ventilada.

1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los principales consumidores de energía en las ciudades, desde su construcción hasta el final de su vida útil, son los edificios. Independientemente de la actividad para los que se destinen (residencial, administrativo, comercial, industrial, etc.) todos consumen energía (climatización, funcionamiento de equipos, iluminación, etc.) y contribuyen a las emisiones de CO₂. En la búsqueda del denominado desarrollo sostenible ha surgido el concepto de eficiencia energética en la edificación (Directiva 2010/31/CE).

La eficiencia energética de un edificio se define como la cantidad de energía consumida para satisfacer las necesidades asociadas a un uso estándar del mismo (calefacción y refrigeración, calentamiento de agua, ventilación e iluminación). Para calcular dicha energía se deben tener en cuenta las características técnicas de la instalación, el diseño, orientación solar, la influencia de construcciones próximas, la propia generación de energía y las condiciones ambientales. El objetivo es construir edificios de consumo de energía casi nulo y minimizarla en aquellos que hayan sido construidos previamente.

Con el fin de incentivar y promover la realización de actuaciones de reforma que favorezcan el ahorro energético, la mejora de eficiencia energética, el aprovechamiento de las energías renovables y la reducción de emisiones de dióxido de carbono, en los edificios existentes, con independencia de su uso, así como para alcanzar los objetivos establecidos en la Directiva 2010/31/CE, relativa a la eficiencia energética, y en el Plan de Acción 2014-2020 se pone en marcha un programa específico de ayudas y financiación en el Principado de Asturias (programa PAREER), destinado a algunas de las siguientes actuaciones en edificios existentes: 1. -Mejora de la eficiencia energética de la envolvente térmica; 2. -Mejora de la eficiencia energética de las instalaciones térmicas y de iluminación; 3.-Sustitución de energía convencional por biomasa en las instalaciones térmicas; 4. -Sustitución de energía convencional por energía geotérmica en las instalaciones térmicas.

En este trabajo, se presenta la rehabilitación energética del edificio Rey Pelayo ubicado en la plaza Marqués, 10 (Gijón). La rehabilitación ha sido llevada a cabo por la empresa Esfer, y subvencionada para actuar sobre la mejora de la eficiencia energética de la envolvente térmica del edificio.

2. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIO REY PELAYO EN GIJÓN

En el año 2010, el edificio Rey Pelayo formado por trece plantas de viviendas, una de entresuelo y otra de uso comercial, adolece de un notable deterioro en la fachada como consecuencia de una exposición prolongada a un medio corrosivo típico de una zona costera (Figura 1). Este hecho, tiene una repercusión económica en los vecinos, ya para alcanzar la sensación de confort durante los meses de invierno, requieren de unos altos consumos de energía. Por este motivo, deciden actuar sobre el problema, y entre junio de 2010 y octubre de 2011 tienen lugar la rehabilitación energética del edificio.



Figura 1. Deterioro de la fachada y de la estructura del edificio Rey Pelayo previo a su rehabilitación energética. (Esfer, 2010)

La solución elegida es una fachada ventilada, que consiste en incrementar la resistencia térmica de la envolvente con el fin de reducir el consumo de calefacción (Figura 2). Asimismo, este sistema no solo reduce el consumo, sino que también permite la integración del edificio en el medio urbanístico.

Educar el consumo, sino que también permite la integración del camino en el medio urbano.											
EXTERIOR	A	B	C	D	E	F	G	INTERIOR			
A. Prefabricado de piedra 2 cm, $\lambda=1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ B. Fábrica de ladrillo 14,5 cm, $\lambda=0,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ C. Cámara de aire 5cm $\lambda=0,18, \text{ W/m}\cdot\text{K}$ D. Poliestireno proyectado 3 cm, $\lambda=0,34 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ E. Enfoscado 2 cm , $\lambda=1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ F. Fábrica de ladrillo hueco 7 cm, $\lambda=0,42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ G. Enlucido de yeso, $\lambda=1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$											
EXTERIOR				A	B	C	D	E	F	G	INTERIOR
A. Prefabricado de piedra 2 cm, $\lambda=1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ B. Fábrica de ladrillo 14,5 cm, $\lambda=0,60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ C. Cámara de aire 5cm $\lambda=0,18, \text{ W/m}\cdot\text{K}$ D. Poliestireno proyectado 3 cm, $\lambda=0,34 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ E. Enfoscado 2 cm , $\lambda=1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ F. Fábrica de ladrillo hueco 7 cm, $\lambda=0,42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ G. Enlucido de yeso, $\lambda=1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 1. Hormigón Polímero 2. Cámara de aire 3. Aislamiento Lana Roca											

Figura 2. Arriba, envolvente térmica antes de la rehabilitación. Debajo, envolvente térmica después de la rehabilitación energética.

3. RESULTADOS.

La empresa Esfer ha llevado a cabo la rehabilitación energética en un edificio existente, ubicado en una zona climática caracterizada por ser altamente corrosiva. La metodología seguida ha consistido en ejecutar una fachada ventilada. Esta medida, ha supuesto una reducción en el consumo de energía en periodos fríos y una buena integración del edificio en el entorno urbanístico en el que se encuentra ubicado.

REFERENCIAS.

DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición).
Programa de Ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios Existentes (programa PAREER)

Caracterización geológica y geotécnica para la construcción de la línea 3 del metro de Riad (Arabia Saudí)

Pando, L.¹, Cueto, M.², López-Fernández, C.¹, Arias, D.¹ y Olona, J.¹

¹ Departamento de Geología, Universidad de Oviedo

² IDOM Internacional

RESUMEN

Se presenta la campaña de investigación geológica y geotécnica desarrollada para el proyecto constructivo de la línea 3 del metro de Riad. La realización de prospecciones, pruebas de campo y ensayos de laboratorio, ha permitido una precisa identificación y caracterización del comportamiento geotécnico de las unidades de suelo y roca presentes. Así, la ejecución del tramo en la actualidad sin incidencias valida la adecuación de los estudios previos que se efectuaron sobre el terreno.

Palabras clave: Riad; geología; geotecnia; suelos; rocas.

1. INTRODUCCIÓN.

La aglomeración urbana de Riad alberga más de seis millones de habitantes y ocupa ya una extensión superior a 1.200 km². Por ello las autoridades han concebido la construcción de una red completa de metro, en lo que hoy día supone el proyecto de obra civil de este tipo más grande del mundo. Con un presupuesto de 16.300 M€ y un plazo de ejecución de 5 años, la red contará con 6 líneas que totalizan 176 km de longitud y 85 estaciones. La línea 3 tendrá una longitud de 42 km (la mayor de la red de metro) y su construcción corre a cargo del consorcio *ArRiyadh New Mobility*. La línea integra 22 estaciones, 2 pozos de evacuación, 2 cocheras y 2 *park&ride*. Su trazado con rumbo SW-NE combina tramos en viaducto (63 % de la longitud total), superficiales (14 %) y subterráneos (23 %); estos últimos han sido excavados en zanja, *cut&cover* y –un tramo de 5,7 km– mediante tuneladora de tipo EPB.

2. METODOLOGÍA.

La campaña de investigación que se planificó y ejecutó previa construcción de la línea 3, comprendió una profusa exploración directa del terreno mediante sondeos y estaciones geomecánicas, y una detallada inspección indirecta llevada a cabo utilizando varias técnicas geofísicas a lo largo de todo el trazado (Fig. 1A). También se efectuaron pruebas in situ, tanto de evaluación del comportamiento mecánico como de la permeabilidad, y una intensa campaña de ensayos de laboratorio normalizados tanto de identificación y estado como mecánicos sobre las muestras tomadas de suelos y rocas (Fig. 1B). Cabe destacar que respecto a lo habitual en ingeniería geológica, se prestó particular atención a la correcta identificación de los materiales, con más de 450 muestras en las unidades rocosas destinadas a análisis de composición geoquímica y mineralógica, y estudio petrográfico en lámina delgada.

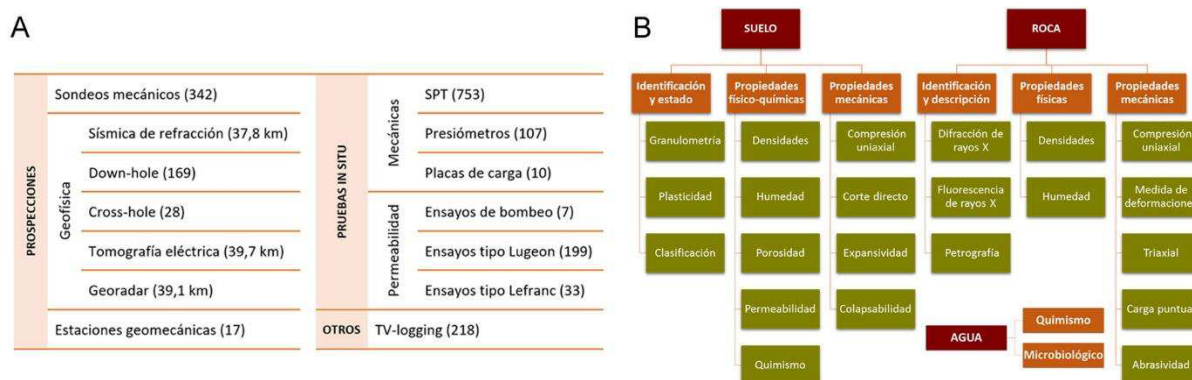


Figura 1. A) Trabajos de campo ejecutados; B) Ensayos de laboratorio realizados.

3. RESULTADOS.

El marco geológico de Riad lo constituye en profundidad un sustrato rocoso mesozoico de naturaleza eminentemente carbonatada (Fig. 2A), integrado por unidades subhorizontales buzando el conjunto levemente hacia el NE. Sobre este se dispone una cobertera cuaternaria de materiales no consolidados de procedencias eólica, fluvial, lacustre y residual. Este recubrimiento alcanza potencias de decenas de metros en el sector oriental de la urbe. La caracterización geotécnica de este subsuelo permitió la

parametrización y la definición del comportamiento de 14 unidades geotécnicas (8 de rocas y 6 de suelos) a efectos de excavabilidad, estabilidad y capacidad portante; también fueron estudiados fenómenos como la agresividad, colapsabilidad, expansividad y pegajosidad. A ello se sumó un análisis específico de medidas contra la flotabilidad de las estaciones, y la modelización del efecto del paso de la TBM en zonas con cavidades y estaciones en distintas fases de ejecución (Cueto *et al.*; 2016).

A pesar de contar con temperaturas elevadas ($>45\text{ }^{\circ}\text{C}$) y pluviometría escasa ($<100\text{ mm/año}$), se corroboró que en Riad existe problemática hidrogeológica (Fig. 2B). Al agua subterránea colgada en suelos y sobre todo la presente en *Arriyadh aquifer* se suma la recarga procedente de las conducciones ($> 2\text{ mm/día}$). Aparte de la necesidad de bombeos esto motivó un estudio de la evolución piezométrica para evaluar la incidencia del agua para las estaciones. Además, pudo evidenciarse la presencia de fenómenos de disolución a modo de epikarst afectando a todas las unidades, con dolinas (Cueto *et al.*; 2018), así como endokarst en la Fm. Jubaila (Fig. 2C) y niveles de las formaciones Arab y Hith. También se reconocieron brechas y pliegues de colapso kárstico (p. ej., Fm. Sulaiy).

En este contexto la ejecución de las obras precisa diferentes soluciones técnicas (Fig. 2D). Las cimentaciones se resuelven mediante zapatas, pilotes y losas ancladas ocasionalmente con llave de cortante para contrarrestar la potencial subpresión. Las excavaciones están siendo acometidas a cielo abierto o habilitando contención sobre todo con pantallas ancladas de pilotes (discontinuas y secantes) y micropilotes; así como apuntalados, mallazo, hormigón proyectado y *soil nailing*. Por su parte la evacuación del agua se realiza por bombeo con anillos perimetrales de pozos y drenes subhorizontales.



Figura 2. A) Principales unidades del subsuelo; B) Afluencia de agua en una excavación; C) Karstificación profunda; D) Imágenes de la obra (Idom, Fernando Pérez y José Ignacio Peñas).

4. CONCLUSIONES.

El proyecto de la línea 3 del metro de Riad ha conllevado unos estudios previos amplios en cuantía y diversos en tipología, con los que se alcanzó un elevado grado de conocimiento sobre la configuración geológica y geotécnica del subsuelo urbano, conformado por 14 unidades geotécnicas de suelos y rocas. La adecuación de las previsiones respecto al comportamiento de los materiales ha quedado confirmada durante el desarrollo actual de la obra, en ejecución sin incidencias reseñables.

REFERENCIAS.

- Cueto, M., Mayordomo, S., Martín, M., De la Puente, P., Pando, L., & Arias, D. (2016). Geotechnical modelling of deep underground section in Riyadh metro line 3: lessons learnt towards the site works. *En: 1st National Congress on Tunneling and Underground Space, Ankara (Turkey)*.
- Cueto, M., Olona, J., Fernández-Viejo, G., Pando, L., & López-Fernández, C. (in press). Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia). *Near Surface Geophysics*, 16.

Contribución de una modelización preliminar 2D en el desarrollo de un modelo hidrogeológico a escala regional

Álvarez-Álvarez, L.* y Fernández-Álvarez, J.P.†

* Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo – lorena@hydrogeophysicsndt.com

† Departamento de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo – pauli@uniovi.es

RESUMEN

Las áreas carboníferas son estudiadas en detalle debido al potencial energético que poseen en forma de combustibles fósil, pero cuando ese valor parece agotarse, comienzan estudiarse otros tipos de aprovechamientos para estas zonas. El uso del agua de mina como recurso energético y posible abastecimiento, el aprovechamiento del gas metano presente en el carbón, el almacenamiento de dióxido de carbono en capa y el estudio del impacto que produce el cierre de minas son las principales líneas de investigación que se llevan a cabo en la actualidad. Estas actuaciones tienen una afección directa en los acuíferos que es necesaria caracterizar para un buen uso del aprovechamiento.

En este trabajo se realiza una modelización numérica preliminar 2D a escala regional del flujo subterráneo de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana, que comprende la recopilación de los datos disponibles, elaboración de un modelo conceptual, construcción del modelo numérico con el código de simulación COMSOL Multiphysics® y valoración preliminar de resultados.

Este modelo numérico 2D es de gran utilidad para la comprensión inicial del comportamiento de flujos generales, la detección de zonas de recarga y descarga principales, la gestión de recursos hídricos a gran escala y la generación de modelos base para futuras modelizaciones.

Palabras clave: modelización numérica; modelo regional 2D; Cuenca Carbonífera Central Asturiana; Comsol multiphysics.

1. INTRODUCCIÓN.

La Cuenca Carbonífera Central Asturiana (CCC) presenta materiales de edad carbonífera con una potencia de unos 5800 m. Estos materiales están compuestos por una alternancia repetitiva de lutitas, areniscas y carbón, que alterna en la mitad inferior con calizas y en la parte superior con conglomerados.

Desde el siglo XVIII y hasta la actualidad la explotación de carbón ha tenido una gran importancia. Esto supone una modificación de las características de los materiales geológicos, modificando su comportamiento hidrogeológico, así como la necesidad de realizar bombeos de agua subterránea en las zonas mineras para la adecuada explotación del carbón y para el mantenimiento de los pozos ya clausurados.

La modelización numérica de flujo subterráneo es una de las técnicas más utilizadas para la caracterización de los flujos y la implicación en ellos que podrían tener nuevos aprovechamientos de la zona. Los modelos hidrogeológicos, además de ser utilizados como modelos de predicción, también pueden utilizarse como modelos interpretativos (Anderson et al. 2015). La integración de todos los datos disponibles en un modelo hidrogeológico permite la comprensión de diferentes fenómenos hídricos localizados y además puede proporcionar datos adicionales de gran interés.

La modelización 2D es ampliamente utilizada en diversos trabajos relacionados con modelos de inundación (Liang et al. 2015; Bates et al. 2010); con modelos de densidad variable (transporte de contaminantes) y densidad y viscosidad variable (transporte de calor) (Cremer & Graf 2015; Van_Dam et al. 2014).

2. METODOLOGÍA.

La modelización numérica del flujo subterráneo de la CCC requiere primeramente la recopilación de toda la información útil disponible de la zona de estudio consistente en datos hídricos, geológicos, mineros y meteorológicos. Esta información debe de ser correctamente organizada y generalmente requiere de un laborioso procesado para su utilización en la modelización. A partir de esta información se define el modelo conceptual, para posteriormente construir el modelo numérico. Se plantean escenarios útiles y se valoran los resultados.

3. RESULTADOS.

Se ha diseñado una metodología para la organización de la información disponible mediante base de datos. Esta organización permite realizar una gestión de la información, caracterizando a la misma en función de la localización, tipo de información, fuente y formato. Por otro lado permite la extracción de la información relevante (documental y espacial) de cada documento consultado (Fig.1).

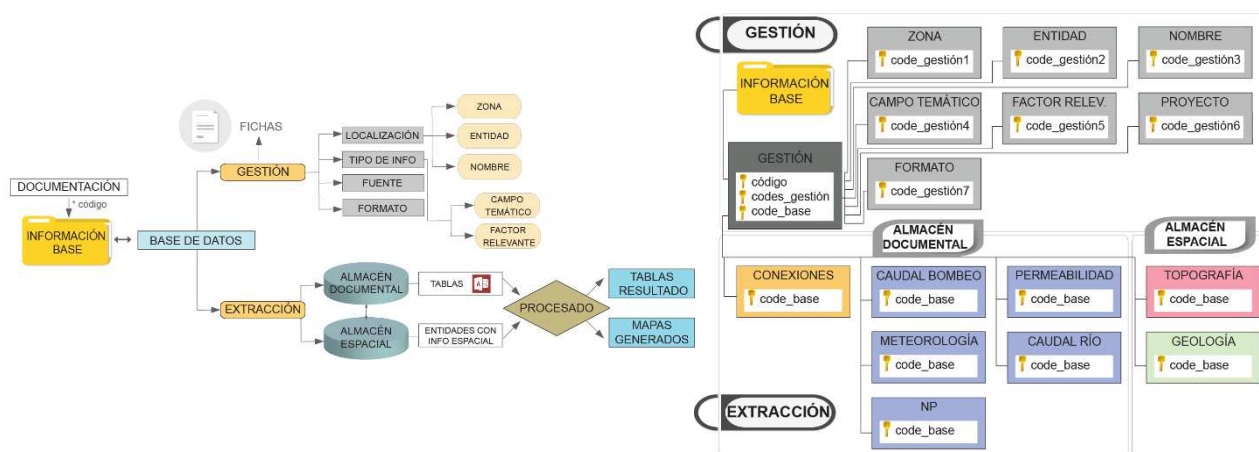


Figura 1. Organización de la documentación. Izq.: Metodología de organización. Drcha.: Organización en base de datos.

Se elabora el modelo conceptual de la zona de estudio, en el que se definen las hipótesis conceptuales, la geometría del modelo, las unidades hidrogeológicas y las condiciones de contorno (Fig. 2).

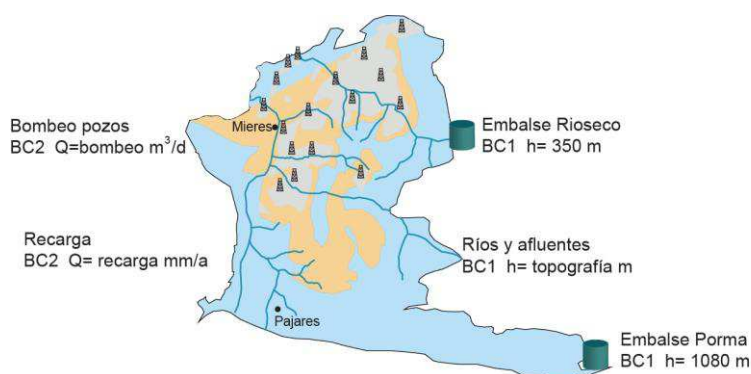


Figura 2. Modelo conceptual de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana

4. FASE ACTUAL.

Se está construyendo del modelo numérico 2D de la CCC con el código de simulación COMSOL Multiphysics®, los resultados de este modelo permitirán tener una comprensión inicial del comportamiento de flujos generales de la zona de estudio, detectar posibles zonas de recarga y descarga, valorar las incertidumbres del modelo conceptual y servirá como modelo base para futuras modelizaciones.

REFERENCIAS.

- Anderson, M.P., Woessner, W.W. & Hunt, R., 2015. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press – Elsevier. ISBN: 978-0-12-058103-0.
- Bates, P.D., Horritt, M.S. & Fewtrell, T.J., 2010. A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387, pp.33–45.
- Cremer, C.J.M. & Graf, T., 2015. Generation of dense plume fingers in saturated-unsaturated homogeneous porous media. *Journal of Contaminant Hydrology*, 173, pp.69–82.
- Liang, X., Zhang, Y-K. & Schilling, K.E., 2015. Analytical solutions for two-dimensional groundwater flow with subsurface drainage tiles. *Journal of Hydrology*, 521, pp.556–564.
- Van Dam, R.L., Eustice, B.P., Hyndman, D.W., Wood, W.W. & Simmons, C.T., 2014. Electrical imaging and fluid modeling of convective fingering in a shallow water-table aquifer. *Water Resources Research*, 51, pp.954–968.

Un algoritmo genético simple para la determinación de los parámetros físicos presentes en las ecuaciones de Saint-Venant

Soler, J.†

† Dep. de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

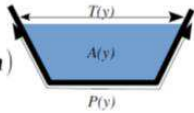
RESUMEN

Los algoritmos genéticos son una familia de métodos computacionales inspirados en la evolución. Para poder aplicar estos algoritmos a un problema de optimización se siguen los siguientes pasos: 1) codificación del problema mediante definición de una función "Adaptabilidad" y establecimiento de "estructura genotípica", 2) se construye una generación de individuos al azar con la misma estructura como semilla inicial del algoritmo, 3) mediante combate singular dos a dos, se seleccionan aquellos individuos con mayor adaptabilidad, 4) se aplican los operadores de recombinación y mutación a dichos cromosomas, 5) se vuelve al punto 3). El algoritmo ha sido aplicado a la identificación de parámetros del modelo de Saint-Venant.

Palabras clave: algoritmos genéticos; ecuaciones de Saint-Venant; Manning.

1. INTRODUCCIÓN.

En esta comunicación se describe sucintamente un algoritmo genético simple (AGS) que ha sido implementado para la obtención de los parámetros físicos del modelo de simulación del flujo en lámina libre 1D en un canal; parámetros como los coeficientes de rugosidad de Manning de las ecuaciones de Saint-Venant:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} + \frac{g}{c} \frac{dy}{dt} &= g[S_0 - S_f(y, v)] \text{ a lo largo de } \frac{dx^+}{dt} = v + c(y) \\ \frac{dv}{dt} - \frac{g}{c} \frac{dy}{dt} &= g[S_0 - S_f(y, v)] \text{ a lo largo de } \frac{dx^-}{dt} = v - c(y) \end{aligned} \right\} \rightarrow y = Y(n)$$


donde: $c(y) = \sqrt{\frac{gA(y)}{T(y)}}$, $S_f(y, v) = n^2 \frac{v^2}{R_h^{4/3}}$ y n : coeficiente de rugosidad de Manning

Figura 1. Ecuaciones de Saint-Venant en su forma en características mostrando la presencia de los coeficientes de rugosidad de Manning de los tramos de canal susceptible de ser encontrados mediante el AGS. $Y(n)$ representa la dependencia de dichos coeficientes del modelo de Saint-Venant.

2. CODIFICACIÓN Y ESTRUCTURA GENOTÍPICA

El problema consiste en encontrar los parámetros que maximizan la función «Adaptabilidad»:

$$J(n) = \frac{1}{[Y(n) - Y^*]^2} \quad (1)$$

donde: $n = (n_1, \dots, n_p)$ es el vector que contiene el conjunto de parámetros a encontrar, Y^* es el vector de niveles de agua del canal medidos en diferentes secciones e instantes de tiempo e $Y(n)$ es el vector-modelo de niveles de agua simulados en los mismos lugares e instantes de tiempo que Y^* . Si un conjunto de variables n_1 genera unos niveles simulados $Y(n_1)$ más parecidos a los medidos Y^* que otro conjunto n_2 , entonces $J(n_1) > J(n_2)$ y se podrá decir que n_1 está más adaptado que n_2 .

Las variables pueden ser representadas mediante cadenas de bits mediante una primera transformación a variables enteras y su posterior cambio a base 2. Supongamos que el rango de variación del parámetro físico n_i es $[n_{min}, n_{max}]$ y que disponemos de L bits para su transformación, entonces existen $n_v = 2^L$ posibles de valores discretos con lo que su equivalencia en entero será:

$$I_i = \text{Entero}\left[\left(\frac{n_i}{n_{max} - n_{min}}\right)n_v\right] \quad (2)$$

Todos los valores I_i de todos los parámetros físicos del canal pueden ser escritos en base dos. Si el modelo contiene n_p parámetros y cada uno de ellos escrito mediante L bits, entonces se define el vector genotipo de un individuo como el vector de $n_G = n_p \times L$ componentes que contiene la concatenación de los n_p valores en base dos en una única secuencia de "ceros" y "unos". El AGS empieza por la definición al azar de una generación de N individuos:

$$\begin{aligned}
G_1 &= [0001001100001100010010110001.....00000101010000110001000011000100] \\
&\vdots \\
G_i &= [1001000100001100010000110001.....01110100010000110001000011000100] \\
&\vdots \\
G_j &= [01010000100101101010101010101.....00011110010110110001001011010100] \\
&\vdots \\
G_N &= [1011001111001100011100110001.....00001100000000110001000011000100]
\end{aligned}$$

Figura 2. Genotipos de N individuos de una generación.

3. EL ALGORITMO.

En la Fig.3 puede verse un esquema del AGS descrito en Whitley (1994). El primer paso del AGS empieza por asignar la adaptabilidad (1) a cada genotipo (individuo) de la generación (Fig.2). El segundo paso consiste en establecer una generación intermedia mediante el combate singular entre todos los pares (i,j) de genotipos que han sido emparejados al azar. Dicho combate se dirige comparando adaptabilidades: si $J(G_i) > J(G_j)$ se asignan dos copias de G_i a la generación intermedia y ninguna a G_j , y vice-versa. El tercer paso consiste en aplicar los operadores "Cruzamiento" y "Mutación" (Fig.3) a dicha generación intermedia para crear la siguiente generación. Se vuelve al segundo paso. El proceso se repite hasta encontrar una adaptabilidad suficientemente buena.

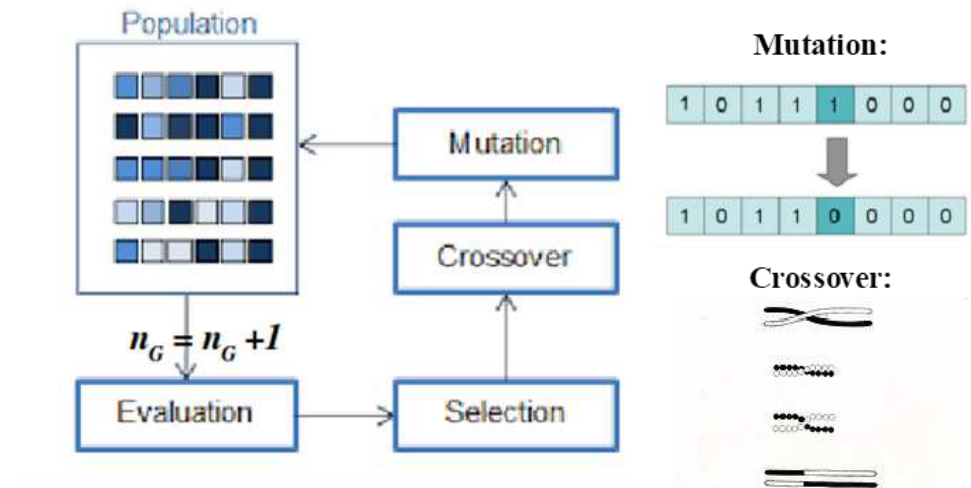


Figura 2: esquema del AGS y sus dos operadores principales.

REFERENCIAS.

Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. Statistics and computing, 4(2), 65-85.

Comprobación numérica de las condiciones de contorno de un modelo conceptual de flujo en un caso real

Calvo-Buelga, L.^{*}, Fernández-Álvarez, J.P.[†]

^{*}Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos. Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo – luis.calvo@hydrogeophysicsndt.com

[†]Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad de Oviedo – pauli@uniovi.es

RESUMEN

La modelización de sistemas reales de la naturaleza es un trabajo que debe aumentar su complejidad de forma gradual, comenzando por evaluar diferentes situaciones a partir de modelos lo más simplificados posibles. El caso de estudio propuesto es la explotación minera de Candín–Fondón (Langreo), del que se evalúan las condiciones de contorno definidas en los límites de un modelo conceptual de flujo elaborado para dicha zona. Se han planteado distintos escenarios para estimar los posibles radios de influencia del bombeo producido en los pozos de estudio, y definir así una zona de afección preliminar. Para ello se utilizan las simplificaciones de la ley de Thiem, sus aproximaciones para acuífero libre y el problema de Theis, herramientas útiles para observar la extensión y evolución de los conos de depresión causados por el bombeo en base a unas hipótesis simplificadoras de partida. Las simulaciones numéricas se han realizado con el software de modelización COMSOL Multiphysics®, y se comprueban con la solución analítica obtenida mediante códigos programados con Matlab®. Los resultados conseguidos permiten evaluar la calidad de las condiciones de contorno implementadas en el modelo conceptual, especialmente aquellas de flujo nulo.

Palabras clave: modelización; condiciones contorno; hidrogeología; minería; COMSOL.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han clausurado muchas explotaciones mineras subterráneas de carbón europeas, y se prevé el cierre total de estas minas para el año 2018 (C. Klinger *et al.* 2012). Al finalizar su actividad extractiva se inundan de forma natural debido al cese del bombeo, que permite mantener la mina seca durante su fase de explotación. Por tanto, estas minas constituyen depósitos de agua que resultan inaccesibles por el estado que presentan tras su abandono. Debido a su gran profundidad (centenas de metros), el agua contenida en sistemas mineros presenta una mayor temperatura a medida que se desciende (gradiente geotérmico natural). Así, estas explotaciones constituyen importantes reservorios energéticos de los que se puede aprovechar el calor del agua que allí se encuentra por medio de la geotermia.

Las herramientas de simulación numérica permiten estudiar y analizar fenómenos de flujo y transporte de calor que se dan en el interior de estas minas inundadas. Previo a la construcción de estos modelos numéricos es indispensable realizar modelos conceptuales, en los que se representan las propiedades hidrogeológicas del sistema, las posibles fuentes o sumideros existentes, y se definen unas condiciones de contorno adecuadas y representativas de los procesos que tienen lugar en el sistema.

La motivación del presente trabajo nace de la necesidad de evaluar la calidad de las condiciones de contorno establecidas en un modelo conceptual de flujo ya existente, aplicado al sistema minero inundado de Candín–Fondón (Langreo, Asturias). En base a esto, se plantean una serie de objetivos parciales:

1. Estudiar, analizar y justificar los rangos de valores utilizados en los parámetros que intervienen en base a bibliografía consultada.
2. Comprobar la coincidencia entre las soluciones analíticas y numéricas en el estudio de la afección del bombeo en el Pozo Fondón sobre los límites del modelo conceptual.
3. Plantear distintos escenarios de complejidad creciente.
4. Estimar radios de influencia producidos por el bombeo en el Pozo Fondón.
5. Una vez introducida la motivación y los objetivos se da paso a la descripción del modelo conceptual.

2. MODELO CONCEPTUAL EVALUADO

El caso de estudio se corresponde con la explotación minera de los pozos Candín y Fondón. El modelo conceptual está delimitado y consta de un dominio definido por sus características hidrogeológicas (en base a datos bibliográficos), los puntos de entradas y salidas de agua al sistema, y sus condiciones de contorno, un total de 6 que se explican a continuación (véase Figura 1):

1. Límite NO. Condición de contorno tipo *Neumann* de caudal nulo (capa geológica impermeable).
2. Límite SO. Condición de contorno tipo *Neumann* de caudal nulo (macizo inalterado).
3. Límite SE. Condición de contorno tipo *Neumann* de caudal nulo (divisoria de aguas subterránea).

4. Límite NE. Condición de contorno tipo *Robin*, de intercambio de caudal con el exterior del dominio (macizo alterado, nivel externo conocido).
5. Límite superior. Condición de contorno tipo *Neumann* con caudal de entrada al sistema (infiltración de la lluvia útil).
6. Límite inferior. Condición de contorno tipo *Neumann* con caudal nulo (poca afección a gran profundidad).

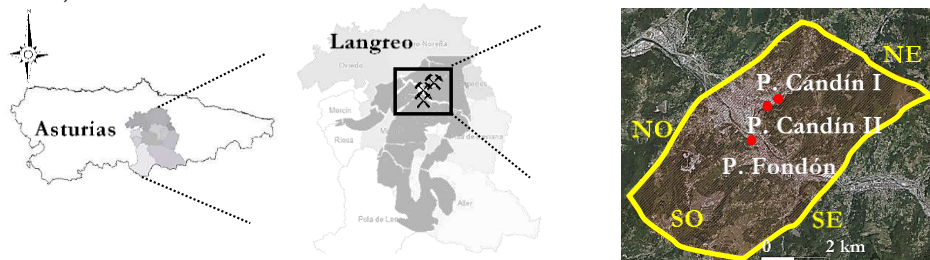


Figura 1. (Izda.) Localización del área de estudio. (Dcha.) Modelo conceptual de Candín-Fondón.

3. MODELOS NUMÉRICOS. EVALUACIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO

Los modelos numéricos se han realizado con el software de simulación *COMSOL Multiphysics*[®], y se utilizan para evaluar la validez de las condiciones de flujo definidas en función de la afección del bombeo en el Pozo Fondón a los límites definidos, con especial atención a aquellos bordes de flujo nulo.

En primer lugar se comienza por modelos muy simplificados, cuyos resultados pueden ser comparados con las soluciones analíticas disponibles de Thiem y Theis para régimen estacionario y transitorio respectivamente (Villanueva *et al.* 1984). Una vez validado el simulador para los casos más sencillos (véase coincidencia de resultados en la Figura 2-a-b), se añade complejidad al modelo numérico de forma gradual.

Los resultados obtenidos en algunos de estos modelos ya parecen indicar que no existe una importante influencia del bombeo en Fondón sobre los límites del dominio. Como ejemplo el modelo nombrado como 2DM3, que con una única modificación sobre el modelo simple como es la introducción de otro dominio alterado (heterogeneidad), disminuye su afección significativamente respecto al modelo más simplificado (véase Figura 2-c).

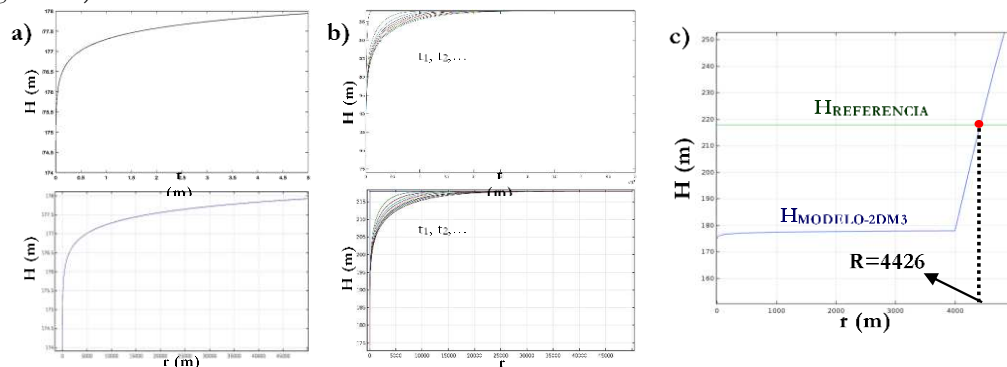


Figura 2. Comparativa entre la solución analítica (arriba) y la solución numérica (abajo) en los problemas de Thiem (a) y Theis (b). (c) Resultado del modelo 2DM3. Dominio heterogéneo: macizos alterado e inalterado.

4. CONCLUSIONES

En vista de los resultados obtenidos en los modelos básicos –tanto en las soluciones numéricas como analíticas– se valida el uso de la herramienta *COMSOL*[®] para resolver los problemas de Thiem y Theis.

Los resultados de los modelos simples homogéneos e isótropos indican que el radio de influencia es menor cuanto menor es la transmisividad asignada al medio. Los modelos heterogéneos muestran que la influencia del bombeo tiene una fuerte dependencia de la extensión del medio o alterado, ya que es la zona que presenta una mayor facilidad para el flujo de agua. Aunque es necesario aumentar aún más la complejidad del modelo (anisotropía, otros bombeos, recarga, etc.), estos primeros resultados parecen indicar que no existe una influencia importante sobre los límites definidos.

REFERENCIAS

- Klinger, C., Charmoille, A., Bueno, J., Gzyl, G., Súcar, B.G. (2012). Strategies for follow-up care and utilisation of closing and flooding in European hard coal mining areas. *Int. J. Coal Geol.* 89 51–61.
- Villanueva Martínez, M., Iglesias López, A. (1984). Pozos y acuíferos. *Civil Engineering Journal*, 2, 52-62.

Nueva implementación de una condición de contorno de nivel piezométrico variable en COMSOL Multiphysics®

Rodríguez Pereira, C.^{*}, Fernández Álvarez, J.P.[†]

^{*}Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, cesar.rodriguez@hydrogeophysicsndt.com

[†]Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, pauli@uniovi.es

RESUMEN

El estudio de las balsas de lodos mineras es una labor de gran importancia medioambiental, que engloba varios campos como son la hidrogeología, geoquímica de aguas o la mecánica de suelos. Para determinar el nivel de agua en una balsa de lodos clausurada se consideró necesario realizar experimentos con un permeámetro de carga variable y la ampliación de los resultados experimentales mediante modelos numéricos. Se debe implementar una condición de contorno de nivel piezométrico variable en COMSOL® para poder simular el permeámetro y el estado de la balsa durante la fase de adición de lodos. Se ha implementado esta condición mediante la definición de una ODE (Ordinary Differential Equation) en un contorno, que representa una infiltración unidimensional. El método escogido es viable para modelos de cualquier dimensión (1D, 2D, 3D), supone un bajo coste computacional, y presenta resultados que se ajustan a la solución analítica de un caso sencillo. La condición implementada permite la simulación de casos más complejos que una infiltración unidimensional, como es la variación de nivel en un lago, reformulando la ODE y aplicando una serie de condiciones y restricciones que permiten representar fielmente la infiltración lateral.

Palabras clave: COMSOL, condición de contorno, nivel piezométrico.

1. INTRODUCCIÓN.

Las balsas de lodos mineras clausuradas suponen un problema ambiental fuertemente relacionado con la hidrogeología. El estudio de un caso real de una balsa situada en Asturias motivó la realización de experimentos con un permeámetro de carga variable, cuyos resultados debían ser complementados mediante modelos numéricos, que tuvieran la capacidad de replicar los resultados originales y permitieran estudiar situaciones de mayor complejidad que los experimentos realizados. Para poder representar las situaciones que se dan tanto en el permeámetro como en la balsa de lodos es necesario implementar una condición de contorno que represente la variación del nivel de agua con el tiempo.

Una condición de contorno es una restricción que permite que la ecuación diferencial a resolver - en este caso la ecuación de flujo en medio poroso- tenga una solución única. En este caso se quiere establecer la variable dependiente, por lo que la condición de contorno a implementar se denomina condición de tipo 1 o Dirichlet.

Una vez formulada la condición de contorno de manera matemática, esta se implementa en el software de modelización por elementos finitos COMSOL MultiPhysics® mediante una “ODE” (Ordinary Differential Equation), para proceder a comprobar los resultados que aporta, y compararlos con la solución analítica de un caso sencillo.

2. CONDICIÓN DE CONTORNO PARA EL CASO UNIDIMENSIONAL.

En primer lugar se formula una condición que establezca un nivel piezométrico que varíe con la infiltración en un caso unidimensional, similar al permeámetro. En este caso se establece que la variación del nivel de agua será igual a la velocidad de Darcy dentro del dominio poroso (Wilson *et al.* 2014). El nivel piezométrico en el contorno se establece de la siguiente manera (1)

$$\frac{dH_{ext}}{dt} = \vec{V}_D \cdot \vec{n} \quad (1)$$

donde:

H_{ext}	Nivel piezométrico en el contorno [L]
t	Tiempo [T]
V_D	Velocidad de Darcy en el contorno del dominio poroso [L/T]
n	Vector normal al contorno

La comparación de una solución analítica de este caso unidimensional y de un modelo que incluye esta condición de contorno muestra una superposición perfecta de los resultados, por lo que se considera que la implementación de la condición es correcta (Fig. 1).

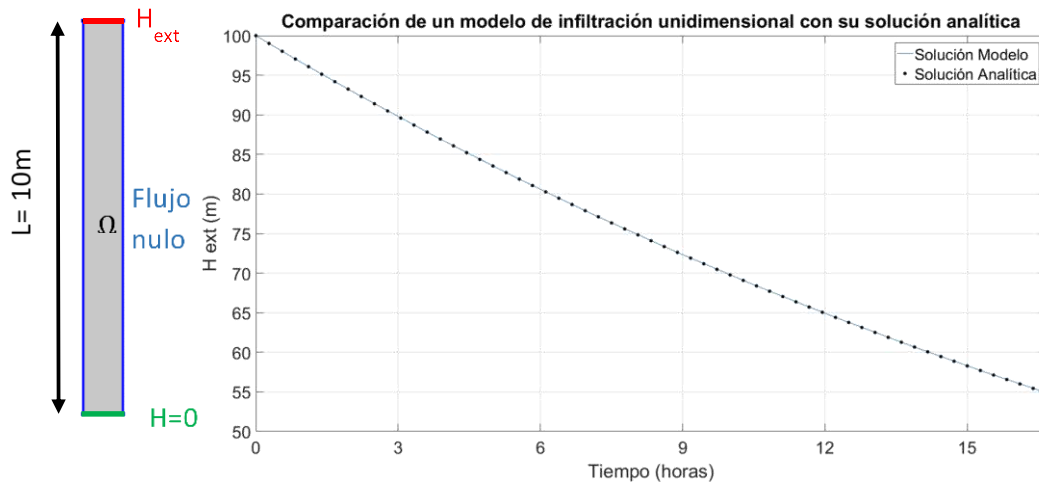


Figura 1. Comparación entre los resultados analíticos y del modelo.

3. CONDICIÓN DE CONTORNO EN CASOS 2D Y 3D.

Para casos en los que la infiltración lateral también esté presente, se debe reformular la condición de contorno. Estos casos son de mayor complejidad, ya que el nivel se define respecto a la dimensión vertical. Debido al criterio de signos que utiliza COMSOL® al calcular la velocidad de Darcy, se decide alterar la formulación, de manera que sea función de los flujos másicos y las áreas de paso. El área de paso lateral varía con el tiempo, por lo que se debe añadir una restricción que impida el paso del agua en las partes del contorno cuya cota sea superior al nivel de la condición (Fig. 2).

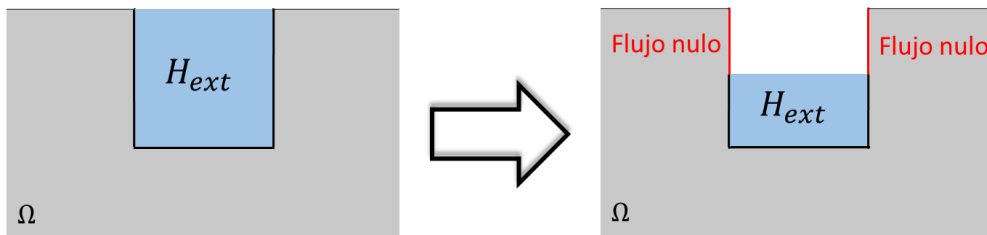


Figura 2. Conceptualización de la condición de contorno en un caso 2D.

La implementación de esta condición de contorno en COMSOL® es más compleja que en el caso unidimensional, ya que además de la ODE (2) es necesario implementar la condición de flujo nulo y escoger cual se aplica mediante una sentencia condicional.

$$\frac{dH_{ext}}{dt} = \frac{1}{A_b} \int_{A_t} \frac{\vec{M}_F}{\rho} \quad (2)$$

donde:

M_F	Flujo másico a través del contorno [M/L ² T]
A_b, A_t	Área de la base y área total del contorno [L ²]
ρ	Densidad del fluido [M/L ³]

4. CONCLUSIONES.

La condición implementada se ajusta bien a la solución analítica del problema. En los casos 2D y 3D, donde el área de infiltración lateral no es constante, se logra representar esa variación mediante una restricción adicional. Esta condición supone un bajo coste computacional, ya que solo añade grados de libertad en los nodos del contorno. Además, el sistema es flexible, permitiendo añadir otras aportaciones o pérdidas de agua al nivel exterior de manera sencilla.

REFERENCIAS.

Wilson, M. A., Hoff, W. D., Brown, R. J. E., & Carter, M. A. (2000). A falling head permeameter for the measurement of the hydraulic conductivity of granular solids. *Review of Scientific Instruments*, 71(10), 3942–3946.

Avances en evaluación de daños estructurales en el marco del proyecto **TRUSS Marie Skłodowska-Curie ITN**

González, A.*

*Civil Engineering School, University College Dublin, Irlanda

RESUMEN

El crecimiento de las ciudades, el impacto del cambio climático y el enorme coste de las nuevas infraestructuras son las razones detrás del proyecto TRUSS (Training in Reducing Uncertainty in Structural Safety). Se trata de un proyecto Marie Skłodowska-Curie ITN con un presupuesto de 3,7 millones de euros financiado por el programa Horizonte 2020 de la Unión Europea y cuyo objetivo es maximizar el potencial de la infraestructura ya construida (<http://trussitn.eu>). Por esta razón, TRUSS propone una colaboración internacional, inter-sectorial y multidisciplinar entre seis instituciones académicas y doce industriales de cinco países europeos. El proyecto abarca infraestructuras de carretera y ferroviarias, edificación e infraestructura marina y energética. TRUSS ha producido avances en campos tales como soluciones de monitorización estructural mediante sensores avanzados – drones, reflectometría de retrodispersión óptica, sensores equipados sobre vehículos – así como algoritmos innovadores para el diseño de estructuras y la evaluación a corto y largo plazo del estado estructural de edificios, puentes, pavimentos, barcos, grúas, componentes nucleares y torres eólicas que serán de utilidad a operadores y propietarios de infraestructuras para su gestión.

Palabras clave: infraestructura; estructuras; monitorización; edificios; puentes; pavimentos; barcos; grúas; componentes nucleares; torres eólicas.

1. INTRODUCCIÓN.

Los edificios y la infraestructura de energía y de transporte son elementos clave para apoyar a la sociedad en sus actividades cotidianas. La red de infraestructura está envejeciendo y deteriorándose rápidamente bajo una creciente demanda de cargas operacionales y medio-ambientales. Si bien una red de infraestructura eficiente proporciona beneficios económicos y sociales, caos de la infraestructura en términos de capacidad o fiabilidad puede implicar un severo coste económico y una menor calidad de vida. Para que la infraestructura siga siendo efectiva y estructuralmente segura, se necesita una estrategia de gestión que garantice el mantenimiento adecuado y el mejor uso de los recursos disponibles. Sin embargo, esta es una tarea compleja debido a las incertidumbres asociadas a la capacidad estructural y a la demanda sobre una estructura. TRUSS es un proyecto ITN (Innovative Training Network) de 4 años dentro del marco Marie Skłodowska-Curie (European Commission 2014a), coordinado por University College Dublin, que comenzó en enero del 2015 con el objetivo de mejorar la gestión de infraestructura a través de métodos avanzados para su monitorización estructural y para el cálculo de su vida útil. Figura 1 muestra la composición de TRUSS. González (2017), González *et al.* (2017) y González *et al.* (2018) dan una versión detallada de las actividades llevadas a cabo por TRUSS en su conjunto.



Figura 1. TRUSS Consorcio.



Figura 2. Programa de Formación en TRUSS.

2. OBJETIVOS.

TRUSS tiene dos objetivos principales:

- 1) Desarrollar sistemas fiables de monitorización y modelos estructurales, de materiales y de carga que contribuyan a: (a) un más eficiente diseño, evaluación, monitorización y gestión de la infraestructura, (b) mantener el inventario de infraestructura en operación al tiempo que se minimizan los riesgos de fallo estructural, y (c) reducir los costos de infraestructura y la demanda de recursos no renovables y de uso intensivo de carbono mientras se mantienen o mejoran los niveles de seguridad.
- 2) Ofrecer educación intersectorial y multidisciplinaria de nivel doctoral en seguridad estructural a una nueva generación de jóvenes investigadores (Early Stage Researchers o ESRs) a través de

actividades locales u organizadas por la red TRUSS en su conjunto. El programa de aprendizaje, ilustrado en la Figura 2, combina la investigación bajo la supervisión de expertos académicos e industriales, junto a módulos impartidos en clases o seminarios, y la experiencia de pasar periodos de tiempo trabajando en distintas instituciones de la red, lo que permite a los ESRs mejorar sus perspectivas de trabajo en ambos sectores industrial y académico. Una descripción detallada de la formación proporcionada por TRUSS se puede encontrar en <http://trussitn.eu/training/>.

Con el fin de alcanzar estos dos objetivos, se han contratado 14 ESRs que llevan a cabo investigación en 14 proyectos listados en la Tabla 1 y cuyos avances se pueden seguir en <http://trussitn.eu/research/>. De esta manera, mientras TRUSS hace progresar el estado del arte, también prepara a los ESRs para enfrentarse a los desafíos relacionados con la evaluación y gestión del envejecimiento de estructuras de gran escala. TRUSS es muy consciente de la importancia no solo de producir y presentar resultados de investigación para la comunidad científica y las partes interesadas (es decir, a través de conferencias, talleres, publicaciones e informes), sino también de involucrar al público en general, de acuerdo con los objetivos de la Unión (European Commission, 2014b). Más información sobre los canales de divulgación de TRUSS se puede encontrar en <http://trussitn.eu/dissemination/>.

Tabla 1. Lista de proyectos de investigación.

Título
ESR1 Reliability of Concrete Structures Reinforced with Braided FRP
ESR2 Reduction of Uncertainty in Assessing Concrete Strength of Existing Structures
ESR3 Reduction of Uncertainty in Design of Free Standing Nuclear Spent Fuel Rack
ESR4 Probabilistic Optimization of the Design of Offshore Wind Turbine Towers
ESR5 Integrity Management of Ship Structures
ESR6 Residual Life Assessment and Management of Ship Unloaders
ESR7 Railway Bridge Safety and Condition Assessment
ESR8 Probabilistic Modelling of Bridge Damage based on Damage Indicators
ESR9 Railway Bridge Condition Monitoring and Fault Diagnostics
ESR10 Assessment of Bridge Condition and Safety based on Measured Vibration Level
ESR11 Development of Optical Fibre Distributed Sensing for Monitoring of Large Scale Structures
ESR12 Bridge Damage Detection Using an Instrumented Vehicle
ESR13 Using Truck Sensors for Road Pavement Performance Investigation
ESR14 Reduction of Uncertainty through Regularized, Automated Road Inspection

AGRADECIMIENTOS.



Este proyecto ha recibido financiación del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie n.º 642453.

REFERENCIAS.

- European Commission (2014a). Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 Marie Skłodowska-Curie Actions European Commission Decision C (2014) 4995 of 22 July 2014.
- European Commission (2014b). State of the Innovation Union, Taking stock 2010-2014 Commission Staff Working Document Accompanying the Document ‘Communication from the Commission to the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions’ Research and innovation as sources of renewed growth COM(2014) 339.
- González, A. (2017). Developments in damage assessment by Marie Skłodowska-Curie TRUSS ITN project. *Journal of Physics: Conference Series*, 842(1): 012039.
- González, A., Huseynov, F., Heitner, B., Vagnoli, M., Moughty, J.J., Barrias, A., Martinez, D., Chen, S., O'Brien, E., Laefer, D., Casas, J.R., Remenye-Prescott, R., Yalamas, T., & Brownjohn, J. (2017). Structural Health Monitoring Developments in TRUSS Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network. *8th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-8)*, Brisbane, Australia, 5-8 December.
- González, A., Perrotta, F., Milana, G., Zou, G., Teixeira, R., González Merino, A., Sourav, S-N A., Antonopoulou, S., McNally, C., Al-Sabah, S., Costas, L., O'Connor, A., Nogal, M., Banisoleiman, K., Faber, M.H., Parry, T. & Neves, L. (2018). Contributions by Marie Skłodowska-Curie TRUSS-ITN towards reducing uncertainty in structural safety of buildings, roads, energy and marine infrastructure. *7th International Symposium on Uncertainty Modelling and Analysis (ICVRAMISUM42018)* Florianópolis, Brazil, 8-11 April.

Concepto de plataforma modular flotante para la recarga de embarcaciones eléctricas

Uche, R.[†], Costales, C.[†], Rodríguez, N.[†], Díaz, M.[†], Blanco, H.[†] y López, M.^{*}

[†]Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

^{*} Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

En este trabajo se presenta el proyecto EnergyMod: un diseño conceptual de una estación de servicio para la recarga de barcos eléctricos. La propuesta se basa en cuatro pilares fundamentales: un diseño modular, el aprovechamiento de energías renovables in-situ, una configuración flotante y la adaptación del modelo de estación de servicio terrestre al transporte marítimo-fluvial. Además de describirse los aspectos clave del diseño y un caso real de aplicación en el Puerto Deportivo de Gijón (Asturias, España), se presenta el plan de desarrollo del proyecto.

Palabras clave: energía renovable; electrolinera; EnergyMod; Asturias; Gijón.

1. INTRODUCCIÓN.

Hoy en día existe un alto nivel de concienciación sobre los efectos nocivos del transporte terrestre sobre el medio ambiente. Sin embargo, hay un gran desconocimiento sobre los efectos negativos del transporte por barco y de las posibles medidas que puedan mitigar sus efectos (Wang *et al.*, 2017). Actualmente se están tomando medidas para reducir la contaminación generada por los barcos, como son: el uso de combustibles bajos en azufre, la incorporación de *scrubbers* para la depuración de las emisiones, la mejora de la eficiencia de los motores de combustión o la utilización de combustibles alternativos (IMO, 2012). Sin embargo, el uso conjunto de sistemas de propulsión eléctricos y fuentes de energía renovables es la única medida posible para garantizar una reducción significativa de la huella de carbono de las embarcaciones y una mejora de su eficiencia energética.

Aunque actualmente el uso de la propulsión eléctrica en embarcaciones presenta ciertas limitaciones como la baja autonomía, se está produciendo un incremento de demanda de forma continuada en ciertos sectores como el de las embarcaciones de recreo o la piscicultura (con la reciente entrada en operación del primer barco alimentado con energía eléctrica en Noruega para este fin). Es previsible, por tanto, que la propulsión eléctrica eclosione en los próximos años y cruce la frontera de las pequeñas potencias gracias a las mejoras en las tecnologías de las baterías.

Para satisfacer las necesidades de la futura flota de barcos eléctricos será necesaria una infraestructura de suministro energético adecuada, para lo cual habrá que establecer una red de puntos de recarga eléctrica semejante a la existente para el transporte terrestre. Es más, mientras que no se mejore la autonomía de las embarcaciones eléctricas, la red tendrá que ser muy densa, garantizando el suministro en zonas alejadas de la costa y, especialmente, de los puertos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.

Para dar respuesta a los objetivos establecidos, se propone como solución una “Electrolinera flotante para embarcaciones mediante módulos de energía renovable” o EnergyMOD (Fig. 1). El diseño está basado en cuatro pilares fundamentales: un diseño modular, el uso de energías renovables, una solución flotante y la adaptación del concepto de estación de servicio al transporte por barco.

Los diseños modulares consisten en piezas universales prefabricadas que son ensambladas en el emplazamiento y admiten una gran variedad de combinaciones y disposiciones. Los módulos que se contemplan para la electrolinera son:

- módulo base;
- módulos energéticos: solar y eólico;
- módulo de conexión y transformación eléctrica;
- módulo higiénico-sanitario; y
- módulos complementarios: transitables, de recarga de embarcaciones y recreativos.

Las ventajas que ofrece este sistema modular son muchas. Por una parte, la fabricación en serie de los módulos permite abaratar los costes de fabricación. Además, se permite experimentar cambios en la funcionalidad de la electrolinera agregando o quitando módulos en función de las necesidades y condicionantes de cada emplazamiento.



Figura 1. Propuesta de implantación de la plataforma EnergyMOD en Gijón.

Otra de las características diferenciadoras de la solución adoptada es que incluye módulos de generación eléctrica a través de fuentes de energía renovable. Aunque se han considerado exclusivamente la eólica y la solar, podrían incluirse en el futuro otras fuentes disponibles en el medio acuático como las corrientes de marea y el oleaje. La energía generada será utilizada tanto para la recarga de embarcaciones eléctricas como para satisfacer las necesidades energéticas de la electrolinera. Con esto se promocionará el uso de este tipo de barcos y se contribuirá a reducir los efectos negativos del transporte por barco en el medio ambiente.

La apuesta por una plataforma flotante también conlleva una serie de ventajas. Desde el punto de vista constructivo, las estructuras flotantes presentan mayor seguridad, accesibilidad y flexibilidad en la elección del sistema de anclaje que las soluciones fijas y las obras previas necesarias para su instalación son menos agresivas con el entorno. Además, la flotabilidad facilita el transporte, colocación y reposición de los módulos.

Por último, la colocación de la plataforma servirá para estimular otras actividades económicas en poblaciones cercanas al emplazamiento. Por una parte, la actividad turística se verá favorecida, ya que la singularidad de la plataforma puede atraer visitantes. Por otra parte, la fabricación e instalación de las plataformas requerirá de mano de obra cualificada y contribuirá a la recuperación económica de sectores estratégicos como el naval y la industria.

En la Figura 1 se muestra una recreación de una propuesta de implantación de EnergyMOD en el Puerto Deportivo de Gijón. En este caso, se ha propuesto una plataforma con un módulo eólico y dieciséis solares. Teniendo en cuenta los recursos energéticos disponibles en el emplazamiento, se podría abastecer energéticamente a un más de cuarenta embarcaciones eléctricas al día.

3. FUTURAS LÍNEAS.

Una vez presentado el concepto EnergyMOD, su plan de desarrollo comprenderá las siguientes acciones:

- Ejecutar un proyecto de demostración, preferiblemente en Gijón, donde se ha planteado en el presente proyecto.
- Presentar la idea ante los diferentes actores con potencial interés en el proyecto.
- Desarrollar un plan de comunicación en las redes sociales y otros medios.
- Buscar fuentes de financiación tanto a nivel nacional como internacional, ya sea mediante fondos públicos, inversiones privadas o incluso mediante técnicas de *crowdfunding*.
- Registro de patentes que pudieran surgir durante el desarrollo de la idea.
- Evaluación de la posibilidad de incorporar el aprovechamiento energético de las olas, de las mareas o de la biomasa, y su correspondiente desarrollo técnico.

REFERENCIAS.

- IMO (2012). Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP). IMO-International Maritime Organization, MEPC 63/4/11.
- Wang, H., Zhou, P., & Wang, Z. (2017). Reviews on current carbon emission reduction technologies and projects and their feasibilities on ships. *Journal of Marine Science and Application*, 16(2), 129-136.

Generación de energía eléctrica por turbinado de Estación Depuradora de Aguas (EDAR)

Aitor Fernández Jiménez*, Daniel Fernández de la Cruz*, Víctor Manuel Fernández Pacheco*, Eduardo Álvarez Álvarez*, Daniel Martínez Otero*Álvaro García Martínez*

* Área de Ingeniería Hidráulica, Departamento de Energía

Escuela Politécnica de Mieres – C/Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n 33600-Mieres, Asturias, Universidad de Oviedo

RESUMEN

La implantación de estaciones de microgeneración en cauces y canales es una realidad gracias al uso de turbinas mejoradas y sistemas de rectificación avanzada de la señal eléctrica. Estos avances permiten pequeñas inversiones iniciales y reducir los costes de operación y mantenimiento. Este proyecto presenta un sistema modular, compuesto por microturbinas tipo Darrieus - Gorlov, cuyo objetivo principal es el de generar energía eléctrica turbinando el caudal de salida de una estación depuradora de aguas (EDAR). Se ha analizado su viabilidad técnica y económica; obteniéndose valores de rentabilidad e inversión inicial. A partir de estos estudios, se ha obtenido qué parámetros afectan a su viabilidad, simulándose en diferentes escenarios y obteniéndose los límites a partir de los cuales es interesante acometer la inversión. Para ello, se ha tenido en cuenta el precio de la electricidad y de inversión inicial dentro del mercado eléctrico español.

Palabras clave: generación de energía eléctrica, renovables, SmartGrids, EDAR.

1. INTRODUCCIÓN.

El mercado eléctrico mundial ha sufrido en los últimos tiempos, importantes variaciones en cuanto a la forma de producción energética. Esto se debe, principalmente, a la incipiente aparición de energías renovables y a nuevos sistemas de generación de energía eléctrica. Además, la concienciación medio ambiental de la sociedad impulsa el desarrollo de sistemas novedosos que sean muy respetuosos con la naturaleza y con el medio que los rodea.

La energía hidroeléctrica es una energía renovable de gran uso, cuya producción a nivel mundial es de 2.200 TWh, lo que aproximadamente representa el 19% de la energía total producida. Se estima que este mercado pueda crecer un 70% en las próximas décadas, gracias, principalmente, a la implantación de centrales de microgeneración (potencia menor de 10 MW).

Gracias al desarrollo de nuevos tipos de turbinas, con diseños efectivos y que son ideales para poca altura y grandes caudales, el aprovechamiento energético de las estaciones depuradoras de aguas (EDAR) es posible. En este sentido existen algunos precedentes de aprovechamiento energético, como es el caso de la depuradora Madrid-Sur donde hay una potencia instalada de 0,15 MW.

A continuación, se presenta un sistema único y modular formado por una turbina Darrieus-Gorlov, a la cual se le va a acoplar un acelerador de flujo que tiene una función multiplicadora de la velocidad. El sistema está controlado por una serie de dispositivos electrónicos que permiten operar a alto rendimiento controlando el par de giro.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema modular está formado por una microturbina hidrocínética de eje vertical Darrieus-Gorlov (ver Figura 1), que es capaz de aprovechar la energía cinética de la corriente del canal de salida. Se ha seleccionado esta tipología por tener un rápido autoarranque y buenos rendimientos incluso bajo flujos de gran turbulento o escasa velocidad. El acelerador de flujo tiene una acción multiplicadora (pasar de 0,5 m/s a 2,5 m/s) y permite direccionar el flujo de modo que se minimiza la turbulencia.

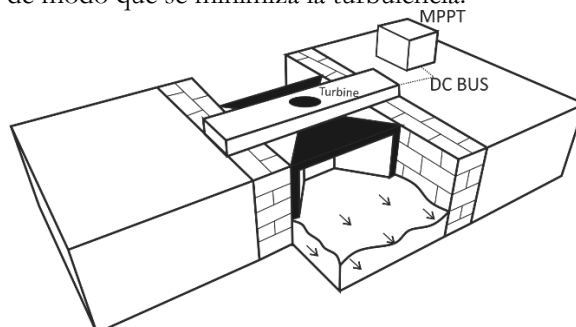


Figura 1. Sistema mecánico.

El sistema está controlado por un sistema electrónico formado por un generador síncrono con imanes (PMG) y una unidad de control (MPPT), que permite mediante un algoritmo, trabajar en puntos de máxima eficiencia variando el par de giro. Por último, el sistema se sustenta sobre una estructura metálica que se ancla al canal de salida. Todos los sistemas fueron simulados mediante la utilización de software CFD para obtener su comportamiento.

Para el sistema modular presentado se obtuvieron los valores de TIR (Tasa Interna de Retorno) y Periodo de Retorno (TR), teniendo diferentes configuraciones y variando el número de turbinas. Se obtuvieron valores de TIR del 14%, por lo que pueden considerados atractivos para los inversores (ver Figura 2).

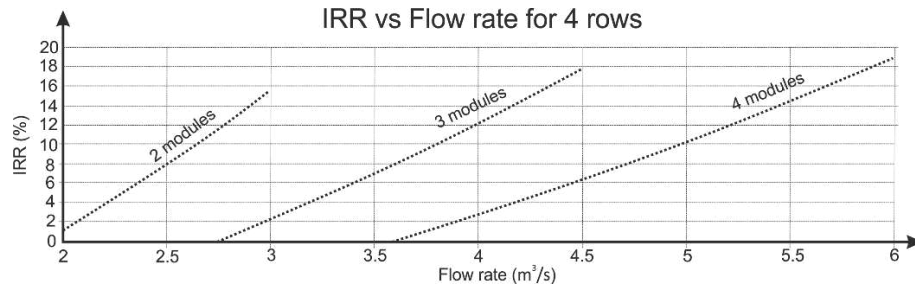


Figura 2. Variación de TIR según el número de módulos.

3. CONCLUSIONES

Se ha descrito un sistema modular compuesto por microturbinas hidrocínicas colocadas en el canal de salida de una estación depuradora de aguas, simulando su funcionamiento mediante software CFD. Además, se realizó un análisis de rentabilidad aplicando TIR y TR; de modo que se pudiera evaluar su atractivo para inversores.

REFERENCIAS.

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Plan de Energías Renovables 2011 - 2020 (IDAE, Madrid. 2011).
- Lago, LI. Ponta and L. Chen. "Advantages and trends in hydrokinetic turbine systems". Energy for sustainable development 14.4 (2010): 287-296.
- Vennell, Ross, et al. "Designing large arrays of tidal turbines: a synthesis and review" Renewable and Sustainable Energy Reviews 41 (2005): 454 – 472.
- Gorban, Alexander N., Alexander M. Gorlov, and Valentin M. Silantyev. "Limits of the turbine efficiency for free fluid flow". Journal of Energy Resources Technology 123.4 (2001): 311 – 317.
- Rico-Secades, M.; Calleja-Rodriguez, A.J.; Quintana-Barcia, P.J.; "eWRE project: Overview and proposed modules". Workrooms Journal. ISSN: 2386-2483. Issue: 4. July 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.15592/workrooms.2016.0001>

Análisis de los fenómenos convectivos de transferencia de calor y su aplicación a la caña de un pozo de mina

Martínez García, E.¹, Fernández Álvarez, J. P.²

¹Unidad de Modelización Hidro-Geofísica y Ensayos No Destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, Mieres, Asturias, España; UO267991@uniovi.es

²Departamento de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, Mieres, Asturias, España; pauli@uniovi.es

RESUMEN

La obtención de energía geotérmica mediante la utilización aguas termales, géiseres o antiguas explotaciones mineras inundadas, constituyen un nuevo vector energético de origen renovable con creciente cabida en el mercado de la energía mundial. Este trabajo comprende el estudio de los distintos fenómenos de transferencia de calor mediante convección que aparecen en un fluido de trabajo, en el interior de una cavidad de geometría determinada o en un medio poroso saturado, el análisis de los modelos matemáticos que los gobiernan, la determinación de las propiedades del fluido y la relación entre ellas; su finalidad es aplicar los resultados al caso real de la caña de un pozo de mina inundado, de geometría cilíndrica y rodeado de un gran volumen de roca afectado térmicamente por la influencia de un flujo de calor subterráneo. Se estudiará en qué medida este aporte energético influye sobre los patrones de flujo que aparecen en el seno fluido y su comportamiento. Los resultados indicarán la relevancia de elaborar un modelo numérico para visualizar y validar cuantitativamente los fenómenos de transferencia de calor, caracterizar las variables que influyen en el rendimiento de esta fuente de energía renovable y evaluar su capacidad de mejora.

Palabras clave: geotermia; transferencia de calor; convección; pozo minero.

1. INTRODUCCIÓN.

La Cuenca Carbonífera Central Asturiana ha sido durante años una fuente de energía fósil que ha abastecido de carbón al sistema energético de la Península Ibérica. La tendencia del sector al cierre de las minas supone una pérdida importante del tejido económico de la zona. Las minas de carbón clausuradas, quedan inundadas por el agua que al estar a profundidades superiores a 200 m bajo el nivel del mar se encuentra a temperaturas superiores a las de la superficie. El fenómeno llamado gradiente geotérmico (aumento de la temperatura de la corteza terrestre en 3°C cada 100 metros de profundidad) da lugar a la aparición de diferencias de temperatura en la columna de agua de los pozos de las minas. Esta energía térmica puede ser aprovechada como fuente de energía limpia y renovable, geotermia.

2. FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La geotermia está directamente relacionada con los fenómenos de transferencia de calor y depende de la potencia térmica de cada zona del subsuelo. En concreto, los fenómenos de transferencia que aparecen en la caña de un pozo de mina son conducción y convección.

La conducción (o difusión) se da cuando en un cuerpo sólido, líquido o gas aparece una diferencia de temperatura en sus partes, lo suficientemente alta que provoca una excitación molecular dando lugar a la aparición de una excitación del volumen a nivel molecular que hace migrar la energía térmica desde el extremo más caliente al más frío. Esta razón de transferencia de calor gobernado por la Ley de Fourier (Çengel, 2007):

$$\dot{q}_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (1)$$

donde $\dot{q}_{cond}$, en W, es el calor de conducción; k , en W/(m·K), es la conductividad térmica; dT , en K, es la derivada de la temperatura; y dx , en m, es el espesor de la superficie a través de la que se propaga el calor.

La convección (o advección) es un fenómeno más complejo que el anterior; En él se dan la difusión y advección. La advección es un fenómeno que ocurre en la interacción entre fluido-sólido o fluido-fluido en los que existen diferencias de temperatura. Cuando entran en contacto una de estas dos sustancias, la de mayor temperatura cederá energía térmica a la de menor interviniendo en este proceso fuerzas propias de la dinámica de fluidos. Este fenómeno está gobernado por la Ley de enfriamiento de Newton (Çengel, 2014):

$$\dot{q}_{conv} = hA(T_s - T_f) \quad (W) \quad (2)$$

donde $\dot{q}_{conv}$, en W, es el calor de convección; h , en W/(m²·K), es el coeficiente de transferencia de

calor; A , en m^2 , es la superficie a través de la que se produce la transferencia; T_s , en K, es la temperatura de la superficie sólida; T_f , en K, es la temperatura del fluido.

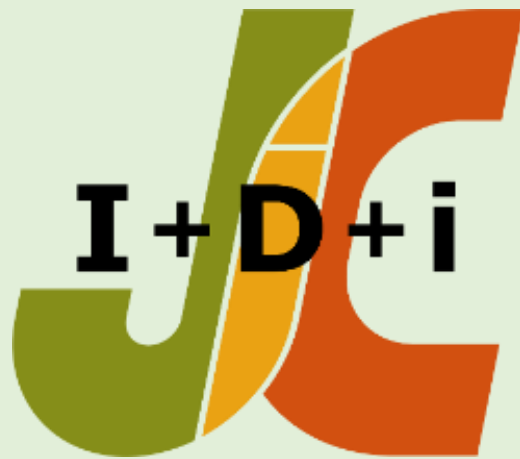
3. GEOTERMIA: CASO DE POZO BARREDO

En el municipio asturiano de Mieres, se encuentra el pozo Barredo, que proporciona agua a alta temperatura para abastecer térmicamente de calefacción al hospital, el edificio de I+D+i de la Escuela Politécnica de Mieres y la fundación FAEN. El sistema de explotación geotérmica es de tipo abierto, en el que se toma agua del pozo llevándola a una bomba de calor donde se produce el intercambio de calor y el agua del primer circuito cede su calor al fluido caloportador del circuito secundario que conduce el agua caliente a su destino (Self *et al.*, 2013). Una vez cedido su calor, el fluido caloportador del circuito primario abierto es vertido al cauce más cercano, que gracias a la permeabilidad del terreno y nivel freático volverá a ser aportado como caudal de inundación a la mina.

El estudio de los fenómenos de transferencia de calor en el sistema de bomba de calor implementado en el pozo Barredo es importante para poder describir de forma exhaustiva los procesos térmicos y dinámicos que aparecen en el fluido de la caña del pozo; A su vez, permite analizar la capacidad de mejora de eficiencia del sistema energético en explotación.

4. REFERENCIAS

- Cengel, Y. (2014). Heat and mass transfer: fundamentals and applications. McGraw-Hill Higher Education.
- Self, S. J., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. Applied Energy, 101, 341-348.



MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



EPM
ESCUELA
POLITECNICA DE
MIERES



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo