



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

EPM
ESCUELA
POLITECNICA DE
MIERES



LIBRO DE RESÚMENES

2^{as} Jornadas de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería Civil



Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Mieres, 7 y 8 de noviembre de 2018



© Universidad de Oviedo

© Mario López Gallego, Luis Ángel Sañudo Fontaneda, Pedro Plasencia Lozano, Luis Calvo Buelga, Alejandro Cebada Relea y César Rodríguez Pereira.

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: 978-84-17445-32-4

DL AS 1869-2019

Diseño de la portada por Alejandro Cebada Relea y Luis Calvo Buelga.

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, sin la preceptiva autorización.

Presentación

En estos tiempos, tras la profunda crisis económica que asoló a todo el mundo, debemos valorar la gran importancia que tiene para la sociedad la inversión en las labores de investigación en el campo de la Ingeniería Civil. Muchos han sido los compañeros y compañeras que se han visto obligados a buscarse la vida en otros países para llevar a cabo sus labores como profesional, ya sea en el campo científico-investigador o en el campo de la consultoría o construcción de obras civiles. Todos ellos han llegado a una conclusión: debemos reinventarnos cada día si queremos seguir siendo la punta de lanza dentro del sector a nivel global. Es en este punto donde la investigación y la innovación toman gran relevancia y sentido.

Sin dejar de lado que el objetivo y cometido principal de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos no es otro que el de proyectar las infraestructuras que permitan continuar con el desarrollo del territorio, no debemos perder de vista que la investigación y la innovación son pilares básicos para poder responder a la sociedad con las herramientas, métodos o prácticas que consigan estar a la altura de sus necesidades en cada momento. Ya no solo por resolver un problema de manera funcional, sino en el sentido de poder dar respuesta a este problema utilizando materiales, técnicas y procesos que sean menos dañinos al medioambiente y, a su vez, para que la implementación de estos en las labores cotidianas de la construcción sea factible y económicamente sostenible.

Por todo lo anterior, quiero expresar mi total apoyo y gratitud a la Universidad de Oviedo y, en concreto, al magnífico equipo de la Escuela Politécnica de Mieres por promover y hacer posible estas Jornadas de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería Civil, las cuales confío se sigan promoviendo en años posteriores.

Fdo.: D. Joaquín Pertierra Brasa



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Vocal de la Junta Rectora de la Demarcación de Asturias del CICC

Índice de contenidos

# Título del trabajo	Pág.
1. Monitorización de los parámetros modales de la Torre de la Laboral mediante análisis modal operacional (OMA)	1
2. Modelización estadística de cargas verticales sobre pasarelas peatonales.....	5
3. Aplicación del ensayo SPT en la obtención de las propiedades mecánicas de una soldadura CrMoV	9
4. Modelización bifásica de inyección de aire en un medio poroso parcialmente saturado: estudio de la velocidad de drenaje de una balsa de lodos mineros	13
5. Evaluación del uso del GPR como herramienta de detección de filtraciones en la geomembrana inferior de un vertedero RSU.....	17
6. Nuevas herramientas para predecir el daño originado por las voladuras en las estructuras	21
7. Evaluación numérica de las condiciones de contorno de flujo de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana	25
8. Evolución del parque de vehículos ligeros en España y su repercusión.....	29
9. Implantación de técnicas SUDS para la reducción del consumo de agua en el riego de materiales a granel en el puerto de El Musel, Gijón	33
10. Aprovechamiento de residuos siderúrgicos como elemento reductor de ruido en obras civiles	37
11. Importancia de los elementos geométricos de mina en la modelización numérica de flujo de una explotación subterránea de carbón inundada	41
12. Tomografía eléctrica resistiva sobre láminas mediante elementos finitos y modelos a escala: optimización de la metodología de medición	45
13. Estudio de problemas de cimentación mediante OMA en aerogeneradores	49
14. Determinación del espesor óptimo de recubrimiento galvanizado en estructuras de acero.....	53
15. Rendimiento térmico de cunetas húmedas diseñado como sistemas multifuncionales de infraestructura verde para la gestión del agua y el aprovechamiento energético	57
16. Potencial de aprovechamiento de las energías eólica y solar mediante estructuras flotantes en Asturias	61
17. Influencia de los materiales de construcción en el confort térmico interior de una casa tradicional asturiana.....	65
18. Procedimiento para la certificación energética de edificios	69
19. Reconstrucción tridimensional de superficies mediante SEM para la evaluación de la vida a fatiga de componentes estructurales.....	73
20. Conexiones más eficientes en estructuras metálicas utilizando pernos soldados	77
21. Evaluación del fraguado del hormigón mediante el análisis de la coda. Modelización numérica	81
22. Interpretación geofísica y preliminar de flujo en la microcuenca Agua Blanca, Oaxaca México.....	85
23. Influencia de la topografía 3D en tomografía eléctrica 2D (ERT). Modelización con el código ‘open source’ BERT.....	89

Monitorización de los parámetros modales de la Torre de la Laboral mediante análisis modal operacional (OMA)

Health monitoring of the City of Culture Tower using OMA

M. López-Aenlle, R.P. Morales, G. Ismael, F. Pelayo y A. Martín

Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo

RESUMEN

La Laboral Ciudad de la Cultura (antigua Universidad Laboral) es un edificio ubicado en la ciudad de Gijón y fue construido en los años 50. La torre, con una altura total de 130 m es el edificio más alto de Asturias. En el año 2017 se realizaron unos ensayos experimentales sobre la torre para determinar los parámetros modales de la misma. Además, se realizó un modelo numérico tridimensional de la torre, que se readaptó utilizando los resultados experimentales. En este trabajo se describen los ensayos realizados y los resultados numéricos y experimentales obtenidos.

ABSTRACT

The building of the Laboral City of Culture is located in the city of Gijón (Spain) and it was built in the 1950s. The tower, with a height of 130 m, is the highest building of Asturias. Experimental tests were carried in 2017 in order to determine de modal parameters of the tower. Moreover, a numerical model was assembled, which was updated using the experimental data. In this work, the experimental tests are described and the numerical and the experimental results are presented.

Palabras clave: Análisis modal operacional, monitorización de estructuras, monumentos históricos.

Keywords: Operational modal analysis, Structural health monitoring, historic monuments.

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad Laboral de Gijón se encuentra situada en el municipio de Gijón. Fue construida entre 1946 y 1956 y es la obra arquitectónica más importante realizada en el siglo XX en Asturias (Zatón y Álvarez 1993). Con sus 270 000 m², es el edificio más grande de España y está declarada Bien de interés Cultural con la categoría de Monumento desde 2016.

La torre de la Universidad Laboral de Gijón, con una altura total de 130 m, es el edificio más alto de Asturias y también el más característico del conjunto arquitectónico conocido actualmente como Laboral Ciudad de la Cultura. Prácticamente todo el desarrollo arquitectónico de la torre es de sección cuadrada excepto la linterna de sección circular. La torre tiene 21 plantas y está coronada por una cruz metálica de unos 25 m de altura. El primer tramo inferior hasta la 5ª planta está integrado en el edificio. El mirador turístico de la torre está situado en la planta 17 y los relojes en la planta 12 (Figura 1).

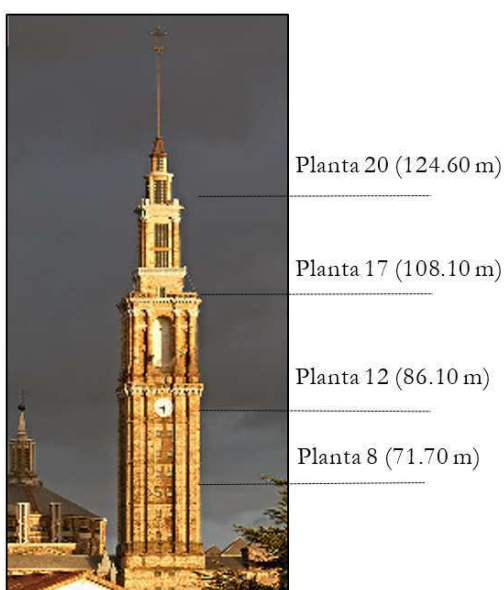


Figura 1. Torre de la Universidad Laboral de Gijón.

En este trabajo se presentan los parámetros modales obtenidos experimentalmente obtenidos mediante técnicas de análisis modal operacional a partir de los resultados de los ensayos modales realizados sobre la estructura. Además, se realizó un modelo de elementos finitos de la estructura, el cual se readaptó utilizando los resultados experimentales.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los ensayos experimentales se realizaron en marzo de 2017 registrando la respuesta de la estructura durante 24 horas. Durante los ensayos se registraron ráfagas de viento de hasta 13 m/s y la temperatura promedio fue de 14.36 °C. La respuesta de la estructura se midió con sensores de aceleración colocados de la siguiente forma:

- 9 sensores uniaxiales (Güralp CMG- 5U) en las plantas 8, 12 y 21 (tres en cada planta).
- 2 sensores triaxiales (Güralp CMG-5TC) en la planta 17.

Para el registro de los datos se utilizaron los equipos Güralp CMG-DM24S12EAM (12 canales) y CMG-DM24S6EA (6 canales), utilizando una frecuencia de muestreo de 50 Hz. En la Figura 2 se muestra la ubicación y orientación de los equipos de adquisición y de los sensores en dichas plantas.

La descomposición en valores singulares de la respuesta se muestra en la Figura 3.

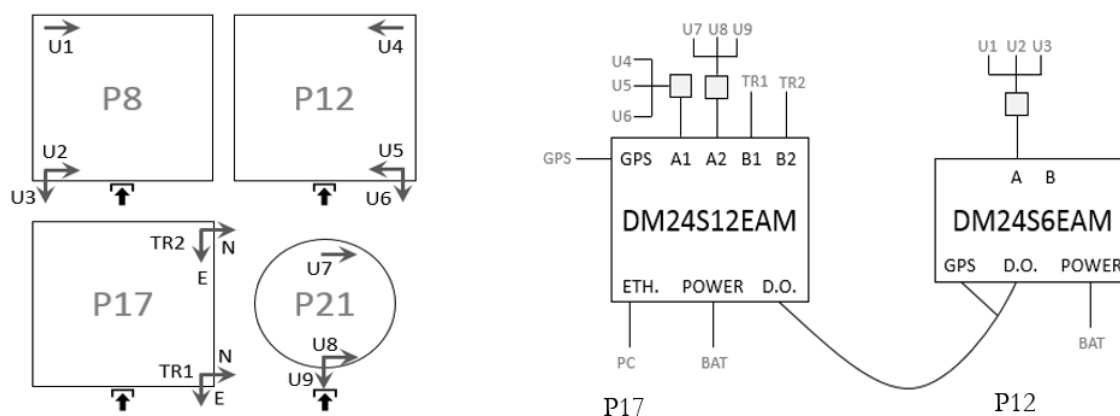


Figura 2. Esquema de los puntos de medida sobre la torre y de los sistemas de registro de datos.

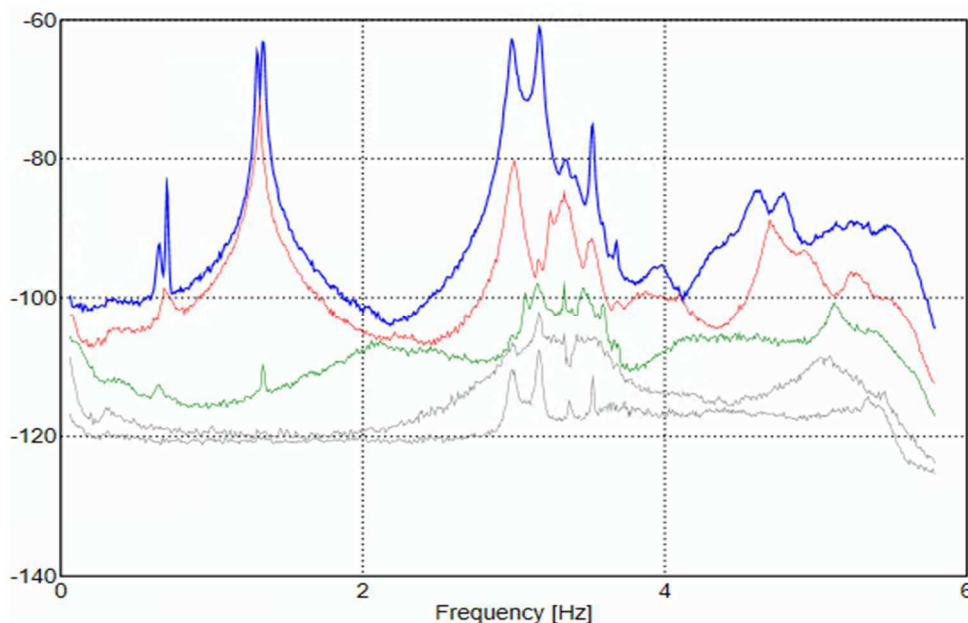


Figura 3. Descomposición en valores singulares (SVD) de la respuesta de la estructura.

Los parámetros modales de la estructura se estimaron mediante la técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD) (Brincker et al. 2003). Las frecuencias naturales obtenidas se presentan en la Tabla 1.

3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Se implementó un modelo numérico de la torre utilizando el programa ABAQUS, utilizando elementos tridimensionales C3D8R (Figura 4). En la modelización se consideraron los siguientes materiales:

- Acero para la cruz.
- Hormigón para pilares y forjados.
- Ladrillo y piedra para las paredes.
- Masas concentradas y distribuidas para tener en cuenta pesos de elementos no estructurales.

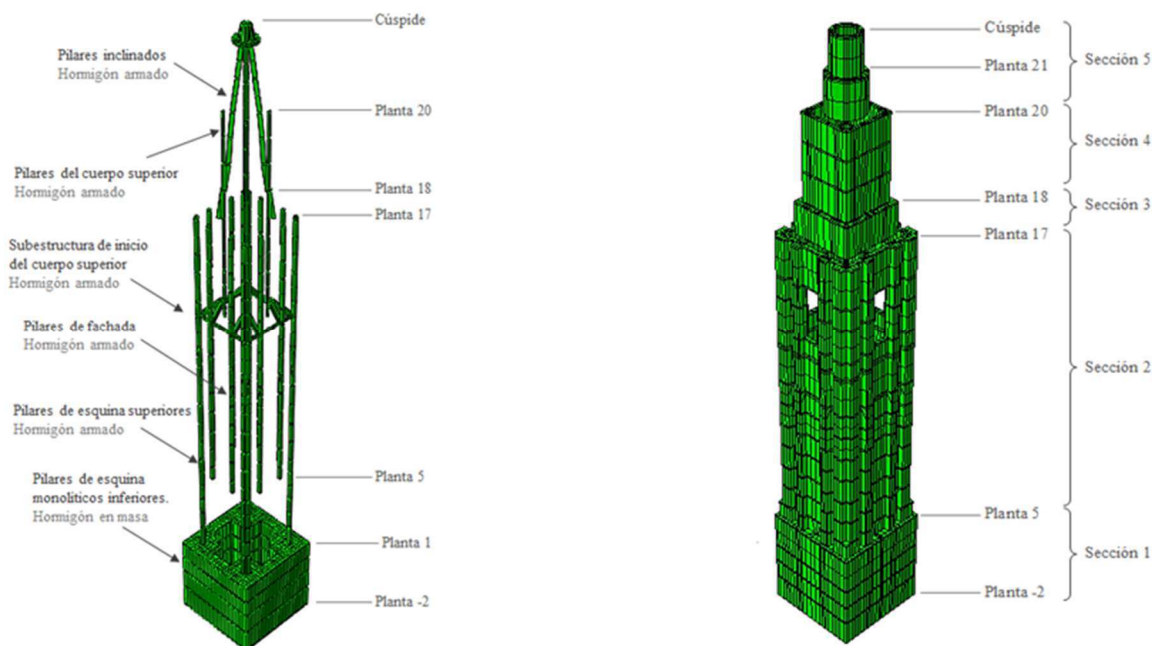


Figura 4. Modelo numérico.

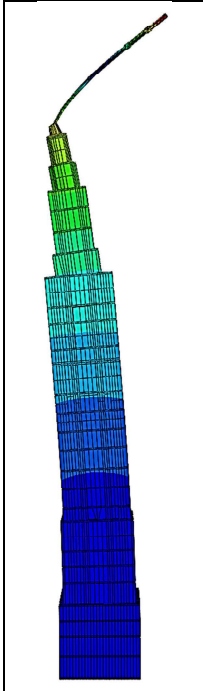
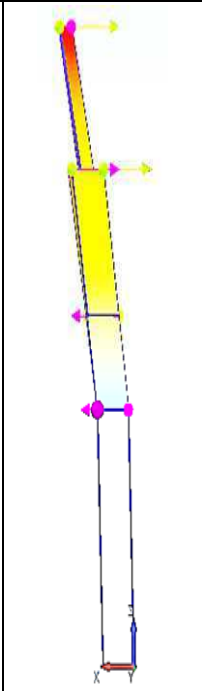
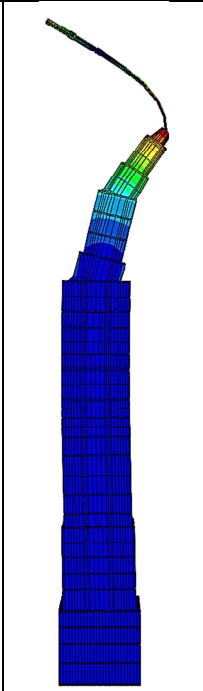
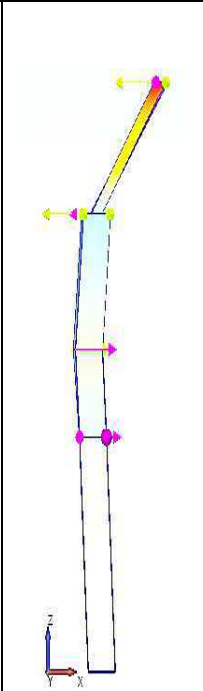
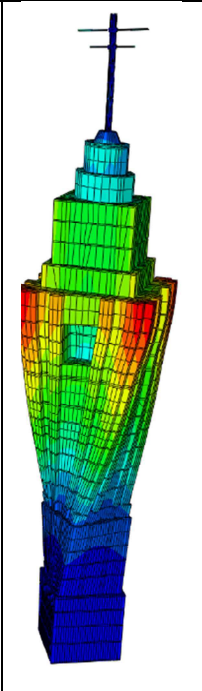
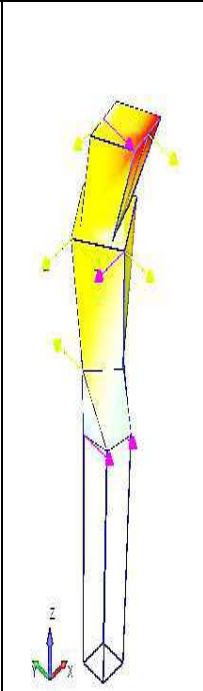
Las frecuencias naturales obtenidas se muestran en la Tabla 1. Se puede observar que hay una gran discrepancia entre los valores numéricos y los experimentales, siendo el error máximo del 75% para los modos considerados en el análisis.

El modelo numérico fue readaptado manualmente utilizando los datos experimentales (frecuencias y modos de vibración experimentales). Las frecuencias naturales obtenidas con el modelo readaptado se muestran en la Tabla 1. Se puede observar que se ha conseguido mejorar el modelo numérico, siendo los errores menores del 23%. Los modos de vibración de los dos primeros modos de flexión y del primer modo a torsión se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Frecuencias naturales experimentales y numéricas.

Modo	Experimental	Numérico Inicial		Numérico readaptado	
	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]	Error [%]	Frecuencia [Hz]	Error [%]
1 1er modo de flexión Y (Cruz)	0.651	0.524	-19.56	0.626	-4.72
2 1er modo de flexión X (Cruz)	0.703	0.539	-23.29	0.608	-13.64
3 1er modo de flexión X	1.302	1.370	+5.18	1.187	-8.83
4 1er modo de flexión Y	1.341	1.371	+2.26	1.122	-16.33
5 2º modo de flexión Y	2.991	4.737	+57.85	2.795	-7.01
6 2º modo de flexión X	3.001	4.810	+51.65	2.857	-5.04
7 2º modo de flexión Y (Cruz)	3.172	5.670	+69.76	2.795	-13.45
8 1er modo de torsión	3.340	8.093	+75.12	3.903	17.07
9 2º modo de flexión X (Cruz)	3.520	8.101	+69.57	2.857	-23.21

Tabla 2: Modos de vibración de flexión y torsión.

					
FEM	Experimental	FEM	Experimental	FEM	Experimental
X – 1.122 Hz	X – 1.302 Hz	X – 2.857 Hz	X – 2.991 Hz	3.903 Hz	3.340 Hz
Y – 1.187 Hz	Y – 1.340 Hz	Y – 2.795 Hz	Y – 3.173 Hz		

4. CONCLUSIONES

En el año 2017 se realizaron ensayos modales operacionales en la torre de la Universidad Laboral de Gijón utilizando sensores de aceleración. Mediante la técnica de descomposición en el dominio de la frecuencia, se identificaron todos los modos (flexión y torsión) en el rango de frecuencia 0-6 Hz.

Además, se realizó un modelo numérico tridimensional de la estructura, a partir del cual se determinaron las frecuencias naturales y los modos de vibración. Debido a las discrepancias entre los modelos numéricos y experimental, se realizó una calibración del modelo numérico utilizando datos experimentales. Las discrepancias entre el modelo numérico calibrado y los datos experimentales son menores al 23%.

REFERENCIAS

- J. Zaton, J.C. Álvarez (1993). Guía Histórico-Artística del C.E.I. de Gijón Antigua Universidad Laboral. Ediciones Júcar.
- Brincker, R., Andersen, P. and Frandsen, J.B. 2000. Modal identification from ambient responses using Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, San Antonio, Texas, p. 625-630.
- Abaqus User's Manual, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA, 2018.

Modelización estadística de cargas verticales sobre pasarelas peatonales

Modelling of pedestrian vertical loads for pedestrian footbridge serviceability

García Diéguez, M.^{1,1}, Zapico Valle, J.L.¹

¹Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Universidad de Oviedo

RESUMEN

Los andares humanos son una de las acciones más importantes para la comprobación de estados límite de vibraciones. En este artículo se pretende modelizar estadísticamente las cargas peatonales verticales sobre suelo rígido de tal forma que se consiga un modelo numérico para realizar simulaciones numéricas sobre las estructuras en fase de diseño y ser capaces de predecir sus rangos de respuesta dinámica en servicio. En base a una campaña experimental se desarrolla un modelo estadístico de las relaciones entre parámetros espaciotemporales de la marcha humana y de su variabilidad. En el modelo se caracterizan las variaciones del período entre pasos y se descomponen en una parte determinística debida a la asimetría y una parte aleatoria descrita por un proceso autorregresivo de segundo orden.

ABSTRACT

Pedestrian loads are one of the most important excitations loads for vibration serviceability issue. Here, a statistical modelling of vertical pedestrian loads under rigid soil is intended. This model could be used for numerical simulations for structural design purpose. Thus, the designer will be able to predict the dynamic response of the structure in service. The statistical model establishes relationships between spatiotemporal parameters of the human gait and its variability based on an experimental data. The intra-pedestrian step interval variability, is modelled through a deterministic part mainly due to the asymmetry and a random part by a second-order autoregressive process.

Palabras clave: Serviciabilidad estructural; dinámica estructural; identificación de cargas peatonales; pasarelas o estructuras peatonales.

Keywords: Structural serviceability; structural dynamics; pedestrian loads identification; pedestrian footbridges or structures.

1. INTRODUCCIÓN

Las acciones peatonales en sentido vertical son una de las cargas más importantes para estructuras como pasarelas peatonales o estructuras ligeras para el paso de peatones como pasillos mecánicos, fingers, etc como se explica en Zivanovic et. al. (2005). Los códigos de diseño actuales dan algunas indicaciones, pero poco concretas sobre cómo proceder con este tipo de estructuras ligeras. Por ejemplo, la Organización de Standardización Internacional (ISO 2007) establece que el cálculo de la respuesta dinámica requiere un modelo que incluya las características de la fuente de vibración y el medio de transmisión. Éste se utilizará posteriormente para obtener la respuesta vibratoria en la localización del receptor. El tipo y complejidad del modelo de cálculo dependen del comportamiento dinámico que deba representar y de la exactitud requerida en la respuesta. Las simplificaciones que se adopten en el modelo y procedimiento de cálculo deben ser comprobadas mediante mediciones en instalaciones en servicio y/o cálculos más refinados. Se afirma que en muchos casos la solución analítica puede no ser aplicable en la práctica. En estos casos, se recomienda el empleo alternativo de métodos empíricos. Estos podrán utilizarse cuando se deriven de un gran número de experimentos o simulaciones numéricas y cuando sus límites de aplicación estén claramente definidos.

En España está vigente la instrucción IAP-11 (2011) de acciones en puentes de carretera. En el capítulo 7 sobre criterios para la comprobación de los estados límites de servicio, se establece que es necesario comprobar mediante estudios dinámicos la adecuada respuesta vibratoria de pasarelas cuando se produzca alguna de las circunstancias siguientes:

- Frecuencias naturales dentro del rango 1,25-4,6 Hz, para vibración vertical
- Luz superior a 50 m.
- Anchura útil superior a 3,0 m.

¹ Marta García Diéguez, email: garciadmarta@uniovi.es

- Tipología estructural singular o nuevos materiales. Ubicación en una zona urbana donde sea previsible un tráfico intenso de peatones o asista riesgo de concentración de personas sobre la propia pasarela.

Con este panorama, se pretende modelizar estadísticamente las cargas peatonales verticales sobre suelo rígido de tal forma que se consiga un modelo numérico para realizar simulaciones numéricas sobre las estructuras en fase de diseño y ser capaces de predecir sus rangos de respuesta.

2. EXPERIMENTACIÓN

Para inferir este modelo, se ha realizado una campaña de ensayos sobre cinta de caminar con 50 voluntarios (25 hombres y 25 mujeres) de diferentes características para obtener una muestra representativa de los peatones adultos.



Figura 1. Imagen del banco de ensayos utilizado en los ensayos.

El banco de ensayos de la Figura 1 consiste en un mecanismo de barras con una célula de carga entre la cinta y el suelo para registrar las cargas producidas al caminar. La cinta tiene un rango de velocidades de hasta 8 km/h con incrementos de 0.1 km/h que abarca el rango de velocidades típico de caminar. Durante los ensayos a cada voluntario se le tomaron registros de caminar a seis velocidades distintas en torno a su velocidad de confort, pero en cada registro camina a velocidad constante un mínimo de 100 m de longitud. Un total de 300 test se tomaron como base de datos para la inferencia del modelo. Tras un tratamiento preliminar de los registros de fuerza, se obtuvieron las secuencias de periodos para cada velocidad y restándole la media, $\bar{T}$ de cada registro se obtuvo la desviación respecto a la media de secuencia de periodos, $\tilde{T}_i$.

3. MODELO DE VARIABILIDAD DEL PERIODO INTRA-PEATÓN

La modelización del periodo pretende en conseguir reproducir las secuencias de periodos conociendo únicamente la velocidad constante de tránsito. Con esa premisa se establecen relaciones paramétricas de la siguiente forma: la media del periodo sigue una ley potencial con la velocidad como la de la Ec. 1 según se dice en varias referencias biomecánicas de prestigio como Bertram and Ruina (2001).

$$\bar{T} = c_1 v^{c_2 - 1}. \quad (1)$$

Por otro lado, las desviaciones respecto a la media, $\tilde{T}_i$, para cada paso i se pueden modelizar por medio de una parte determinística que asociamos a la asimetría que tiene cada persona y otra parte aleatoria que se puede modelizar con un proceso autorregresivo de segundo orden. Esto intuitivamente supone que cualquier perturbación en la cadencia de caminar se recupera en no más de dos pasos. Este modelo se representa matemáticamente como sigue:

$$\begin{aligned} T_i &= \bar{T} + \tilde{T}_i \quad i = 1, 2, \dots, N \\ \tilde{T}_i &= c_3(-1)^i + c_4\tilde{T}_{i-1} + c_5\tilde{T}_{i-2} + z_i \end{aligned} \quad (2)$$

Los parámetros c_1 y c_2 de la Ec. 1 junto con c_3 parámetro de asimetría, y c_4 y c_5 parámetros autorregresivos se deben caracterizar para cada peatón. Asimismo, la parte aleatoria del proceso

autorregresivo z_i , también se modeliza como una distribución normal de media cero y desviación en función de la velocidad en la Ec. 3

$$\sigma_z = c_6(v^2 - 3.30 v + 3.00), \quad (3)$$

El parámetro c_6 es el último de seis para modelizar la variabilidad del periodo para un peatón concreto. La identificación del modelo para cada peatón de la base de datos permite establecer un modelo estadístico que abarque cualquier tipo de peatón.

4. MODELO DE VARIABILIDAD DEL PERIODO INTER-PEATÓN

La caracterización de los seis parámetros del modelo anterior se estableció de la siguiente manera. Los parámetros c_1 y c_2 se considera que siguen una ley binormal $X(c_1, c_2)$ con la siguiente media y matriz de covarianza:

$$\mu = \begin{pmatrix} 0.586 \\ 0.463 \end{pmatrix}, \quad \Sigma = \begin{pmatrix} 0.0022 & -0.0015 \\ -0.0015 & 0.0062 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

El parámetro de asimetría normalizado al periodo medio, $c_{n3} = \frac{2c_3}{T}$, se puede modelizar a través de una distribución Beta con parámetros $a_{n3} = 2.67$ y $b_{n3} = 149.10$. La distribución Beta es apropiada para casos de espacio de parámetros acotado como es este caso. También se utiliza para modelizar los parámetros del autorregresivo tras una transformación lineal como las siguientes: $c_{n4} = \frac{c_4+2}{4}$, $c_{n5} = \frac{c_5+1}{2}$. Estos parámetros tienen una tendencia cuadrática, como se puede ver en la Figura 2, que se puede ajustar junto con una desviación respecto de ese ajuste que se puede caracterizar a través de una distribución Beta.

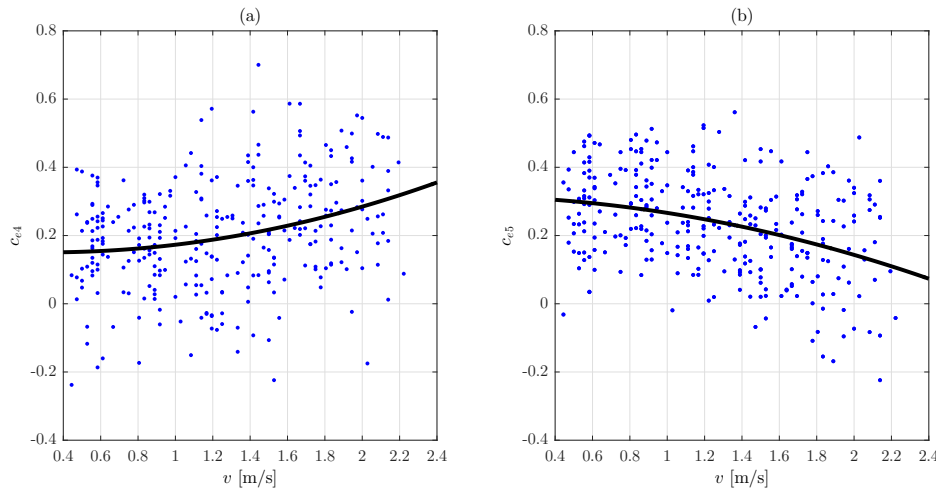


Figura 2. Parámetros autorregresivos en función de la velocidad. Puntos: Resultados experimentales. Líneas: Ajuste cuadrático. (a) c_{n4} (b) c_{n5} .

El modelo estadístico de los parámetros autorregresivos se resume en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} c_4(v) &= 0.0469v^2 - 0.0291 v - 0.3448 + B(6.60, 6.60) \\ c_5(v) &= -0.0370v^2 - 0.0122 v - 0.1545 + B(9.42, 9.42) \end{aligned} \quad (5)$$

El parámetro c_6 que representa las desviaciones aleatorias se modeliza también a través de una distribución Beta con parámetros $a_6 = 14.15$ y $b_6 = 561.19$. La descripción más precisa del modelo que aquí se describe se puede encontrar en García-Diéguez and Zapico-Valle (2017) y García-Diéguez and Zapico-Valle (2018).

De esta forma se modeliza la variabilidad del periodo de paso tanto entre pasos distintos del mismo peatón como entre la forma de caminar de distintos peatones. Aspectos que según la literatura especializada (Racic and Brownjohn, 2011 y Racic et. al., 2009) son muy importantes para la serviciabilidad estructural.

5. CONCLUSIONES

Con esta modelización se consigue reproducir la variabilidad de los periodos de paso de cualquier peatón conociendo simplemente su velocidad media constante de paso. Esta modelización será muy útil para estimar la respuesta dinámica de las estructuras al paso de los viandantes y también para simular situaciones reales donde los peatones caminan en grupos de forma sincronizada.

Otra ventaja del modelo es que como su parámetro raíz es la velocidad se pueden reproducir situaciones con velocidad variable simplemente adaptando en cada paso la velocidad instantánea de paso de tal forma que se pueden simular situaciones de tránsito real donde la velocidad fluctúa alrededor de un valor medio o se aumenta o disminuye por las características del tráfico.

REFERENCIAS

- Zivanovic, S., Pavic, A., Reynolds, P. (2005). Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*; 279: 1-74.
- International Organization for Standardization (2007) ISO 10137: Basis for Design of Structures- Serviceability of Buildings and Pedestrian Structures against Vibration. ISO, Geneva.
- IAP-11 *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. (2011) Ministerio de Fomento.
- Bertram, J. E. A., and Ruina, A. (2001). Multiple walking speed-frequency relations are predicted by constrained optimization. *Journal of Theoretical Biology*, 209(4), 445–453.
- Racic, V., and Brownjohn, J. M. W. (2011). Stochastic model of near periodic vertical loads due to humans walking. *Advanced Engineering Informatics*, 25(2), 259–275.
- Racic, V., Pavic, A., and Brownjohn, J. M. W. (2009). Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. *Journal of Sound and Vibration*, 326(1–2), 1–49.
- García-Diéguez, M. and Zapico-Valle, J.L. (2017). Statistical Modeling of the Relationships between Spatiotemporal Parameters of Human Walking and Their Variability. *Journal of Structural Engineering*; 143 (12).
- García-Diéguez, M. and Zapico-Valle, J.L. (2018). Sensitivity of the Vertical Response of Footbridges to the Frequency Variability of Crossing Pedestrians. *Vibration*; 1, 290-311.

Aplicación del ensayo SPT en la obtención de las propiedades mecánicas de una soldadura CrMoV

Application of the SPT to obtain the mechanical properties of a CrMoV welding

Álvarez, G.¹, López, M.², García, T.E.³, Rodríguez, C.¹

¹SIMUMECAMAT research group, Universidad de Oviedo, EPI C/ Pedro Puig Adam, Módulo 7, 33203 Gijón, Asturias

² Departamento de construcción e ingeniería de fabricación, Universidad de Oviedo, EPM C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias

³ Know-How Innovative Solutions S.L., Calle Juan de la Cierva, Nave 2, 33211 Gijón, Asturias

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es la utilización del ensayo miniatura o Small Punch Test (SPT) para la obtención de los parámetros mecánicos de una soldadura. Este ensayo ha sido desarrollado hace décadas para poder sustituir los ensayos de tracción en caso de no ser posible su ejecución, normalmente debido a su gran necesidad de material para la mecanización de probetas. El material de estudio es una aleación de acero CrMoV normalmente utilizado para la fabricación de depósitos a presión. La unión entre partes se suele realizar mediante soldadura y por tanto se produce la modificación del material identificando tres partes diferentes (material soldado, zona afectada térmicamente y material base). Estas zonas son de gran importancia para la integridad de la estructura y por ello la determinación de las propiedades debe realizarse con el menor tamaño de probeta posible. Los resultados de esta investigación proporcionan la idoneidad del ensayo SPT para la identificación de las zonas al igual que una aproximación de las propiedades mecánicas.

ABSTRACT

The aim of this work is the use of the Small Punch Test (SPT) to obtain the mechanical properties of a weld. This test has been developed for decades to replace the tensile tests in case its execution is not possible (due to its great material needed for the mechanization of specimens). The study material is a CrMoV steel alloy normally used for pressure vessels. The union between parts is usually done by welding and therefore the modification of the material is produced and three different parts (welded material, thermally affected area and base material) could be identify. These areas are a critical point for the integrity of the structure and therefore the determination of the properties must be carried out with the smallest sample size possible. The results of this investigation provide the suitability of the SPT test for the identification of the zones as well as an approximation of the mechanical properties of the materials.

Palabras clave: Small Punch Test, tracción, zona afectada térmicamente, tenacidad a la fractura.

Keywords: Small Punch Test; tensile, Heat Affected Zone; fracture toughness.

1. INTRODUCCIÓN

Un gran número de las infraestructuras metálicas (puentes, aviones, barcos, torres...) tienen como método de unión la soldadura debido a su buena respuesta ante esfuerzos y su fácil y cómoda ejecución. La realización de la misma provoca un cambio en la microestructura del material dando lugar a diferentes propiedades mecánicas pero que son estudiadas antes de su ejecución con el fin de que si la estructura colapsa no sea por esta zona (Rodríguez & Belzunce, 2012). Actualmente uno de los principales problemas es la determinación de la evolución temporal de las propiedades mecánicas de las estructuras en servicio debido a que la extracción de material para la realización de un ensayo convencional de tracción podría ser perjudicial al reducir la sección resistente. Normalmente en el caso de la soldadura como método de unión, la zona afectada térmicamente no tiene unas dimensiones suficientes como para disponer de la cantidad de material necesario para su caracterización.

Por tanto, la utilización del ensayo SPT puede obtener unos buenos resultados con un volumen de material bajo (Figura 1a) y sin afectar a la integridad de la infraestructura. Este ensayo consiste en la utilización de probetas cuadradas con unas dimensiones de 10x10x0.5 mm. Estas son fijadas en un dispositivo (Figura 1b) montado en una máquina Instron equipada con una célula de carga de 5 kN. Se aplica una carga puntual mediante un punzón con una punta de diámetro 2.5 mm y se logra la flexión gracias a un agujero inferior de 4 mm con un chaflán de radio 0.2 mm. La velocidad a la que se aplica la carga es de 0.2 mm/min para evitar por un lado el endurecimiento durante el ensayo y para no alargar en exceso el tiempo de ejecución. A partir de la curva carga-desplazamiento es posible obtener unos

parámetros (Figura 1c) que están relacionados con las propiedades mecánicas dadas por el ensayo de tracción (Calaf Chica, Bravo Díez, & Preciado Calzada, 2018).

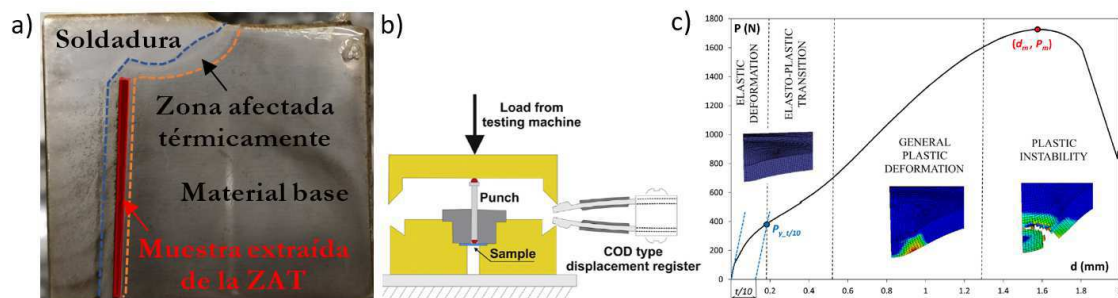


Figura 1. a) Partes del material utilizado; b) Dispositivo SPT; c) Curva típica del ensayo SPT para un acero estructural con los parámetros más relevantes.

2. MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

El material utilizado para esta investigación es un CrMoV en los tres estados que puede presentarse durante una soldadura. En principio se conocen dos de ellos, el base y el de la soldadura, sin embargo, el generado en la zona afectada térmicamente (ZAT) es desconocido. El material base tiene una microestructura de bainita revenida (Figura 2a) mientras que el material de soldadura sería martensita revenida (Figura 2b). La composición química de ambos es la que se muestra en la siguiente Tabla 1.

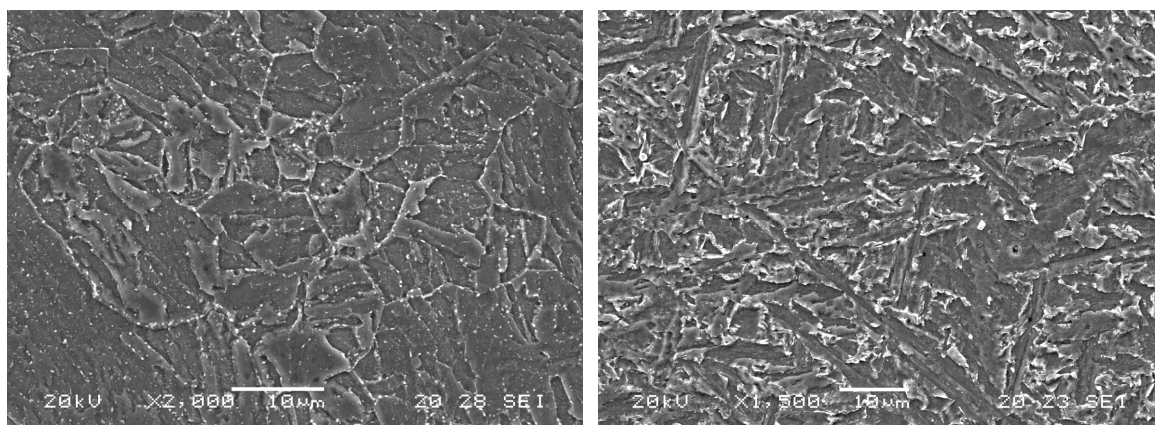


Figura 2. a) Microestructura material base; b) Microestructura material soldado

Tabla 1. Composición química de los materiales.

Material	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%V	%Ni
Material base	0.15	0.09	0.52	2.17	1.06	0.31	0.19
Material soldado	0.08	-	-	2.28	0.93	0.24	0.03

Para obtener la mencionada correlación entre ensayos convencionales y SPT, diferentes grupos de investigación especializados han propuesto las siguientes expresiones donde se relaciona el límite elástico (1), σ_y , y la tensión última (2), σ_u , con unos puntos característicos de la curva carga-desplazamiento. En este trabajo se van a utilizar dos metodologías concretamente, una propuesta por la futura normativa (Afnor, 2019) y otra llevada a cabo por el grupo de investigación SIMUMECAMAT de la Universidad de Oviedo (García, Rodríguez, Belzunce, Peñuelas, & Arroyo, 2015). A la hora de caracterizar un material también es interesante conocer la energía necesaria para que una grieta consiga propagar bajo cierta carga. Para ello se utiliza el ensayo de fractura donde se obtiene el valor de tenacidad del material, JIC. En este caso la correlación entre ensayos (según la norma y el grupo de investigación) se consigue con la aplicación de la expresión (3).

$$\sigma_y = \beta_{R0.2} \cdot \frac{P_y}{t^2} \quad (1)$$

$$\sigma_u = \beta_{Rm} \cdot \frac{P_m}{t \cdot d_m} \quad (2)$$

$$J_{IC} = 1695 \cdot \varepsilon_{qf} - 1320 \quad (3)$$

Donde P_y y P_m son puntos característicos de la curva (Figura 1c), siendo el primero diferente en función del método utilizado (Calaf Chica, Bravo Díez, & Preciado Calzada, 2018). Por otro lado, $\beta_{R0.2}$ es una constante en función del método de cálculo utilizado. En el caso de la normativa este valor es 0.479, mientras que utilizando el método de $t/10$ (valor propuesto por el grupo de investigación SIMUMECAMAT) es de 0.346. La variable, β_{Rm} , sin embargo, la norma sólo da un rango entre 0.19 y 0.32 mientras que el dado por el grupo es de 0.277 por lo que se estaría dentro de la tolerancia y el valor de tensión última sería similar por ambos métodos. Por último, la deformación biaxial, ε_{qf} , hace referencia a la relación existente entre el espesor inicial de la probeta y una vez haya roto después del ensayo en la zona con máxima estricción usando la expresión (4).

$$\varepsilon_{qf} = \ln \left(\frac{h_0}{h_f} \right) \quad (4)$$

3. RESULTADOS

Los resultados (Figura 3) muestran las diferencias claras en resistencia de las diferentes subzonas de la soldadura. Obteniendo el parámetro P_y por los dos métodos y aplicando las expresiones (1) y (2) se puede calcular el valor del límite elástico y tensión última de los diferentes materiales (Tabla 2).

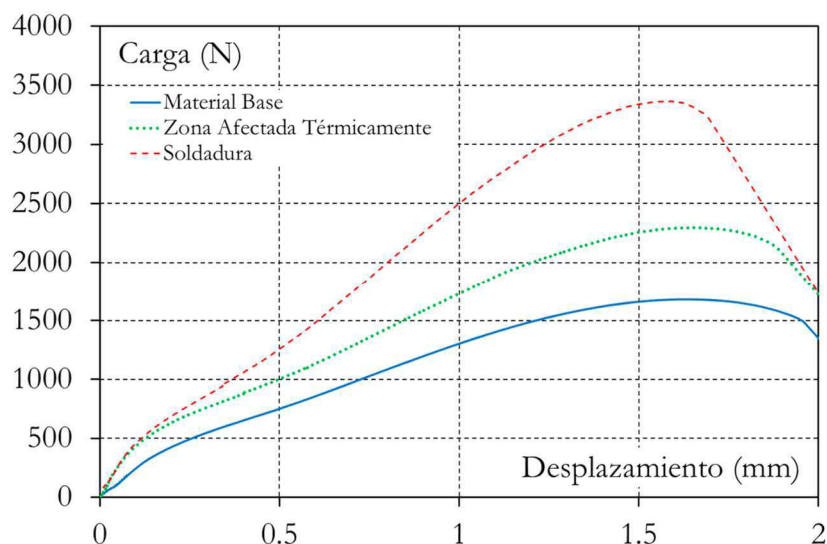


Figura 3. Curvas Carga-Desplazamiento SPT de las tres subzonas.

Tabla 2. Parámetros obtenidos del ensayo de tracción y SPT.

Material	Tracción		Small Punch Test		
	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	σ_y (MPa) ECISS	σ_y (MPa) $t/10$	σ_u (MPa)
Material base	587	700	746.3	538.9	659.5
ZAT	-	-	919.3	708.3	775.2
Soldadura	1019	1120	928.6	926.8	1095.0

Debido a la pequeña cantidad de material en la ZAT sólo es posible utilizar el SPT para su caracterización. Se puede observar un aumento del límite elástico desde el material base hasta la zona soldada. Lo mismo sucede con el parámetro de resistencia última. También se puede apreciar como con el método propuesto por la normativa se obtienen unos valores superiores a los dados por los ensayos convencionales, sin embargo, utilizando el método $t/10$ los valores son menores y por tanto se encuentran del lado de la seguridad. Se puede ver a su vez como las propiedades mecánicas de la ZAT se encuentran en un punto intermedio entre los del material base y el de soldadura, siendo más cercanas al del material base.

Aplicando la expresión (4) se consigue obtener los resultados mostrados en la Tabla 3, correspondientes al parámetro de tenacidad a la fractura del material.

Tabla 3. Resultados obtenidos del ensayo de fractura y SPT.

Material	Fractura	SPT	
	J_{IC} (kJ/m ²)	e_{qf}	J_{IC} (kJ/m ²)
Material Base	555	1.13	550
ZAT	-	0.99	358
Soldadura	28	0.70	< 40

Al igual que en el caso anterior se puede observar como la ZAT se encuentra en un punto intermedio entre el material base y la zona soldada, siendo más próxima a la primera. Se puede ver que en el caso de la soldadura no es posible calcular un valor concreto debido a que esta expresión sólo es válida para materiales con una tenacidad superior a 50 kJ/m² aproximadamente. Por ello se da un rango

4. CONCLUSIONES

A modo de resumen de esta investigación se puede concluir brevemente con los siguientes puntos:

- El SPT se trata de un ensayo capaz de determinar las propiedades mecánicas de los materiales, con una reducida cantidad de material. Esto permite la utilización de este en estructuras que se encuentren en servicio sin comprometer la integridad estructural de las mismas.
- Se ha utilizado para caracterizar una soldadura y obtener sus propiedades mecánicas. El material base y la soldadura pudo verificarse mediante ensayos de tracción, sin embargo, en el caso de la ZAT debido a sus reducidas dimensiones sólo pudo realizarse el ensayo SPT.
- Se han utilizado dos correlaciones entre ensayos y finalmente se ha podido observar que en este caso la dada por el grupo de investigación SIMUMECAMAT proporciona valores más próximos a los reales y en todo caso inferiores lo cual da un mayor coeficiente de seguridad.
- En el caso de la obtención del parámetro de tenacidad a la fractura se ha observado una clara limitación en el caso de un material frágil como es la parte de la soldadura, sin embargo, este es capaz de identificarlo y dar un rango suficientemente identificativo para su caracterización.

REFERENCIAS

- Afnor. (2019). ECISS/TC 101, Small Punch Test Method for Metallic Materials (Vol. 1). AFNOR.
- Calaf Chica, J., Bravo Díez, P. M., & Preciado Calzada, M. (2018). Development of an improved prediction method for the yield strength of steel alloys in the Small Punch Test. *Materials & Design*, 148, 153–166. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2018.03.064>
- García, T. E., Rodríguez, C., Belzunce, F. J., Peñuelas, I., & Arroyo, B. (2015). Development of a methodology to study the hydrogen embrittlement of steels by means of the small punch test. *Materials Science and Engineering: A*, 626, 342–351. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2014.12.083>
- Rodríguez, C., & Belzunce, F. J. (2012). Estudio de la idoneidad del ensayo miniatura de punzonado para la caracterización mecánica de los aceros y de sus uniones soldadas. *Dyna*, 53–60.

Modelización bifásica de inyección de aire en un medio poroso parcialmente saturado: estudio de la velocidad de drenaje de una balsa de lodos mineros

Two-phase modelling of air injection in a partially saturated porous medium: study of the drainage velocity of a mining tailings pond

Rodríguez Pereira, C.^{1,2}, Fernández-Álvarez, J.P.²

¹ Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

² Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

El estudio del drenaje de balsas de lodos mineros es un problema de gran relevancia medioambiental a nivel mundial, debido al gran número de este tipo de estructuras existentes. El objetivo de este artículo es obtener, apoyándose en la modelización numérica, algún método de aceleración del drenaje cuya implantación sea viable. Para ello se plantean varias posibilidades, de las cuales la que es aparentemente más viable es la inyección de aire en la zona no saturada de la balsa de lodos. Esta técnica se simula mediante el uso de COMSOL Multiphysics®, de manera que se comprueba el aumento de los caudales. Finalmente, se establecen los aspectos a investigar para el desarrollo de esta técnica.

ABSTRACT

The study of tailing ponds' drainage is a problem of great environmental relevance worldwide, due to the existing large number of this type of structure. The scope of this article is to obtain, based in numerical modelling, some drainage acceleration method whose implementation is viable. Several possibilities are proposed, of which the most promising one is the injection of air in the non-saturated zone of the tailings. This technique is simulated with COMSOL Multiphysics, in order to check the increase in outflow. Finally, some aspects to be investigated in order to develop this technique are established.

Palabras clave: Modelización; bifásica; medio poroso; COMSOL; balsa de lodos.

Keywords: Modelling; two-phase; porous media; COMSOL; tailings pond.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del drenaje de balsas de lodos tiene una relevancia medioambiental importante, debido a la abundancia de balsas en las distintas explotaciones mineras del mundo, y al contenido habitualmente contaminante de las mismas. Para evitar problemas de contaminación, drenaje ácido u otros similares, las balsas de lodos deben estar adecuadamente impermeabilizadas y se debe controlar la cantidad de agua efluente.

Durante el estudio de un caso real correspondiente a una balsa de lodos clausurada en una mina de oro, se planteó la posibilidad de acelerar el drenaje que ocurre de manera natural en dicha balsa. Esta aceleración supondría un descenso en los tiempos totales de vaciado del agua contenida en la balsa, pudiendo clausurar el drenaje a menor plazo del previsto, con el consiguiente ahorro económico al poder tratar el agua más rápidamente.

Se han planteado varias posibilidades para acelerar el drenaje. La primera opción fue la de realizar un cierre temporal de los drenes, con la idea de que esto podría provocar un repunte de caudal en su reapertura, con la ventaja de ser una técnica de implantación sencilla. Esta idea se evalúa mediante modelos numéricos y, si bien se obtiene un repunte de manera posterior al cierre, este no compensa el caudal no drenado durante la época de cierre (Figura 1).

² César Rodríguez Pereira, email: cesar.rodriguez@hydrogeophysicsndt.com

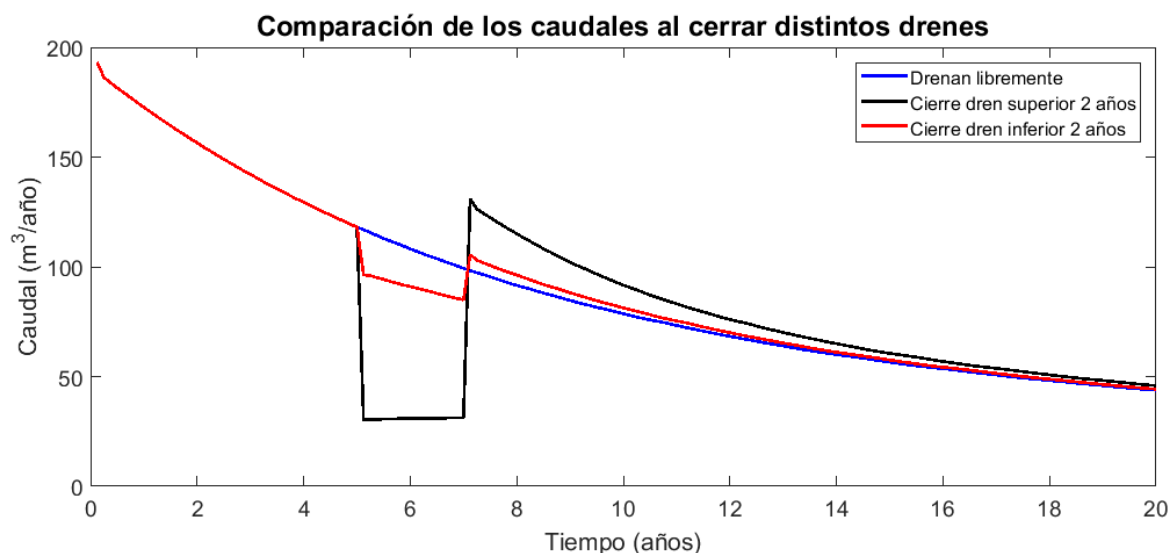


Figura 1. Comparativa de caudales al cerrar temporalmente dos drenes distintos. Se aprecia un repunte posterior al cierre (años 5 a 7).

Otra opción planteada fue la de estimular el drenaje induciendo una consolidación aumentando el peso que tiene que soportar el terreno. Esta técnica, si bien se sabe sin lugar a dudas que aumentaría el caudal de salida, se descarta por una falta de viabilidad práctica, ya que la gran superficie que habría que cargar impide que esta opción sea óptima.

Finalmente, inspirándose en las técnicas de recuperación asistida de petróleo se plantea la posibilidad de inyectar aire con el objetivo de “empujar” el agua y acelerar el drenaje. Esta inyección se realizaría a través de los drenes superiores (actualmente secos). Al inyectar aire por la parte superior de la balsa, se aumenta la presión dentro de la misma, generando gradientes hidráulicos mayores, con lo que el caudal de salida aumenta. Dada la complejidad de esta, derivada de la interacción de dos fluidos distintos en un medio poroso parcialmente saturado, surge la necesidad de realizar modelos numéricos que simulen el proceso, con el objetivo de comprender su funcionamiento y evaluar su viabilidad.

2. MODELOS NUMÉRICOS

En primer lugar, se definen las propiedades del medio, que serán comunes a todos los modelos basados en los datos aportados por Qiu & Sego (2001) y Vermeulen (2001). Se toman estos parámetros en vez de considerar un rango de valores debido al carácter preliminar de esta modelización.

- Porosidad = 0.5
- Conductividad hidráulica horizontal 10^{-7} m/s
- Conductividad hidráulica vertical 10^{-8} m/s
- Parámetros obtenidos a partir de la curva de succión de la matriz porosa

Al trabajar con dos fluidos, estas conductividades hidráulicas obtenidas en la bibliografía se deben convertir en permeabilidades intrínsecas, ya que la conductividad hidráulica dependerá de la viscosidad de cada fluido. De esta manera, se tiene una permeabilidad intrínseca de 10^{-13} m² en el eje horizontal y 10^{-14} m² en el eje vertical.

Una vez definidos estos parámetros, se comienza la modelización, partiendo de modelos simples e incrementando la complejidad de manera gradual, de manera que se representen en la mayor medida posible los procesos que se dan en el caso real.

El primer caso planteado es el de un modelo 1D, con un dominio de 63 m de altura (igual a la potencia de los lodos en la balsa real), que se deja drenar libremente por la parte inferior (se impone presión atmosférica) y por la parte superior se inyecta aire, primero a presión atmosférica y luego a 100 kPa más, de manera que se pueda comparar la situación de drenaje natural con la de la inyección propuesta. Como cabe esperar, los caudales aumentan y el agua sale antes del dominio, si bien hay una parte que queda dentro debido a la capacidad de retención de agua del medio poroso (Figura 2).

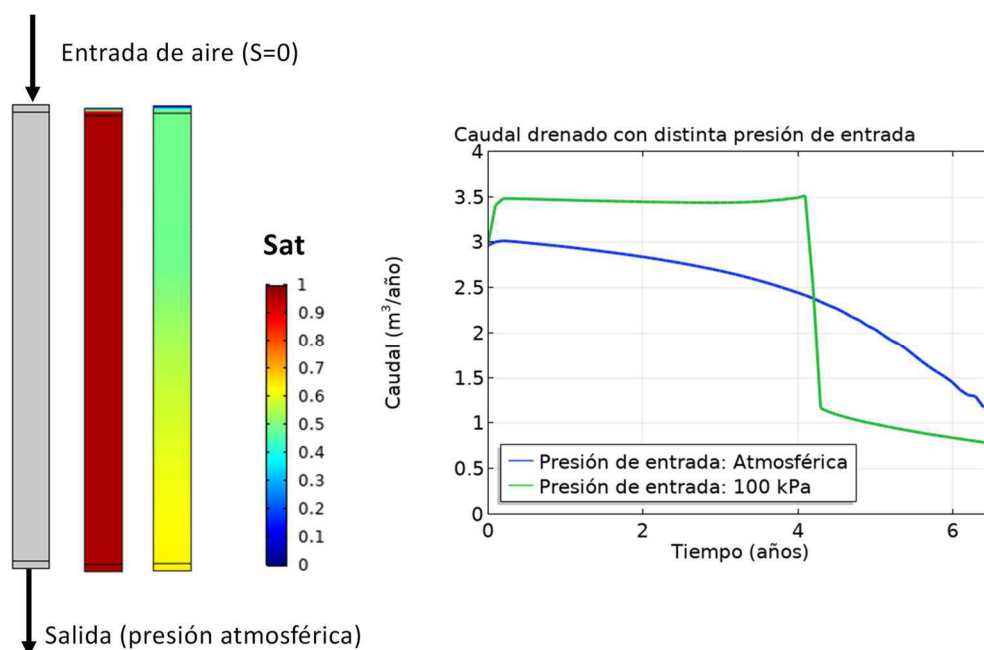


Figura 2. Modelo 1D. De izquierda a derecha: Modelo conceptual, situación inicial, situación final, escala de color, gráfica de caudales. Se puede ver el aumento de caudal a mayor presión (línea verde).

Si bien en base a los resultados del modelo 1D la inyección de aire parece una técnica prometedora, se deben realizar modelos de mayor dimensionalidad, ya que al encontrarse todos los drenes situados en el mismo lateral (dique de la balsa) la inyección de aire se realizaría muy cercana al punto de extracción de agua. Por tanto, es necesario evaluar en un caso 2D si el aire inyectado logra generar una presión relativamente uniforme en toda la balsa, o si por el contrario se forma un flujo preferencial del aire desde el punto de inyección hacia el punto de drenaje, generando una barrera al flujo de agua, y por tanto consiguiendo efectos contraproducentes para el objetivo.

Se plantea un modelo conceptual similar al 1D, en el cual se inyecta aire por un punto en la zona superior de la balsa y se permite que esta drene libremente por un punto en su parte inferior. En este caso, al ser 2D, entra en juego la diferencia entre permeabilidad horizontal y vertical, que facilita el flujo de aire hacia la cola de la balsa. Al igual que en el modelo 1D, se considera que la balsa está completamente saturada en el instante inicial.

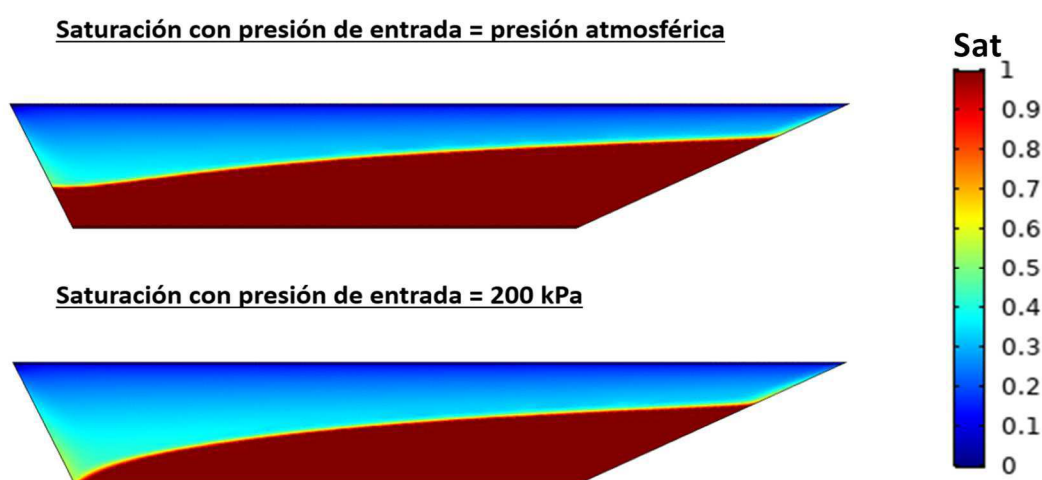


Figura 3. Saturación final inyectando aire a presión atmosférica (situación natural) o inyectando aire a 200 kPa de presión. El punto de inyección y el de drenaje están situados en el contorno izquierdo.

Cómo se puede ver en la Figura 3 con la inyección de aire se logra que tras un cierto periodo de tiempo quede menos agua dentro del dominio respecto a la situación sin inyección. Las gráficas de caudales para distintas presiones en el punto de inyección de aire muestran que se produce una aceleración de drenaje con la inyección de aire (Figura 4).

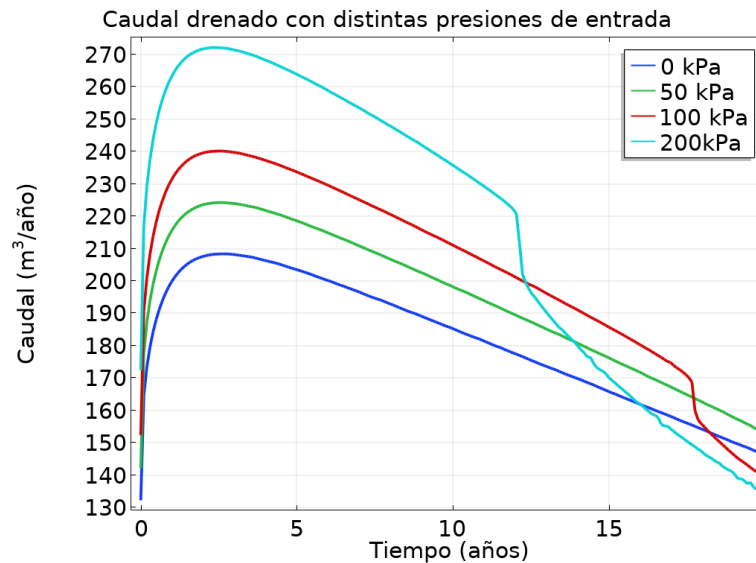


Figura 4. Comparación del caudal al variar la presión de entrada de la inyección de aire. 0 kPa corresponde a presión atmosférica. Al aumentar la presión de entrada aumenta el caudal, y se produce una bajada más rápida, que indica un agotamiento más temprano del drenaje.

3. CONCLUSIONES Y PASOS FUTUROS

En base a los modelos realizados se establecen dos conclusiones principales:

- La inyección de aire parece ser una forma viable de acelerar el drenaje en balsas de lodos.
- Una vez que el aire alcanza el dren de salida, forma una barrera que impide el paso del agua.

Este trabajo es de carácter preliminar, y existen varias líneas en las que seguir investigando, por lo que se plantean unas líneas de trabajo futuro que se deben realizar antes de implementar esta técnica de manera práctica:

- Realizar modelos de mayor complejidad, que incluyan un mayor número de puntos de drenaje o inyección de aire.
- Estudiar la posible deformación del medio y el efecto de esta sobre las propiedades hidrodinámicas del mismo.
- Determinar el comportamiento de la geomembrana de impermeabilización ante esta inyección de aire.

REFERENCIAS

- Qiu, Y., & Sego, D. C. (2001). Laboratory properties of mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1), 183-190.
- Vermeulen, N. J. (2001). The composition and state of gold tailings (Doctoral dissertation, University of Pretoria).

Evaluación del uso del GPR como herramienta de detección de filtraciones en la geomembrana inferior de un vertedero RSU

Evaluation of the use of GPR as a detection tool for leaks in the lower geomembrane of a MSW landfill

Cebada-Relea, A. J.^{1,3}, Rubio Melendi, D.¹ y Fernández-Álvarez, J.P.²

¹Unidad de modelización hidrogeofísica y ensayos no destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

²Departamento de Explotación de minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

La fase de impermeabilización de los vertederos de residuos sólidos urbanos consiste en colocar uno o más niveles de un material impermeable artificial (geomembrana) que generalmente se asienta sobre una capa impermeable natural. Durante la colocación de la geomembrana se pueden producir roturas, cortes o punzonamientos que a la larga desembocan en la contaminación de las masas de agua que se encuentran por debajo del vaso de vertido. En este artículo se analiza, de forma preliminar, la viabilidad para el empleo del GPR como una herramienta no intrusiva que sea capaz de validar la existencia de filtraciones en la zona inferior del vaso de vertido de manera rápida y sencilla, con el fin de evitar la contaminación subyacente a largo plazo. Como aproximación se analizan dos escenarios de impermeabilización y se realizan diferentes simulaciones numéricas de las señales teóricas que se obtendrían con el equipo.

ABSTRACT

The waterproofing phase of urban solid waste dumps consists of placing one or more levels of an artificial impermeable material (geomembrane) that generally sits on a natural impermeable layer. During the placement of the geomembrane, ruptures, cuts or punctures can be produced that eventually lead to contamination of the water masses that are below the pouring vessel. This article analyses, in a preliminary way, the viability for the use of the GPR as a non-intrusive tool that is able to validate the existence of leaks in the lower area of the pouring vessel quickly and easily, in order to avoid long-term underlying contamination. As an approximation, two waterproofing scenarios are analysed and different numerical simulations of the theoretical signals that would be obtained with the equipment are carried out.

Palabras clave: GPR, vertedero, geomembrana, filtración, impermeabilización.

Keywords: GPR, landfill, geomembrane, leak, waterproofing.

1. INTRODUCCIÓN

Los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU en adelante) son construcciones civiles encargadas del almacenamiento a largo plazo de los residuos provenientes de los núcleos urbanos, residuos de actividades industriales catalogadas como no peligrosas y residuos no reactivos o que previamente han sido estabilizados (Ley 22/2011, RDL 1481/2001). Durante la fase de operación del vertedero, el vaso de vertido carece de una cobertura superior que desvíe las aguas pluviales o de escorrentía. Si la zona inferior del vaso de vertido no está ejecutada correctamente, es posible que aparezcan filtraciones (véase Figura 1). Con objeto de evitar posibles desastres ecológicos, se debe evitar que la percolación del agua de lluvia que lixivia los residuos consiga infiltrarse hasta las masas de agua subterráneas. Para ello se utiliza una combinación entre una impermeabilización artificial y una impermeabilización natural.

Si las condiciones geológicas son favorables, esto es, que exista una capa de material natural con baja conductividad hidráulica (e.g. limos y arcillas) y de suficiente potencia, se opta por utilizar la configuración de impermeabilización estándar (ver Figura 2 izquierda), ya que es una solución más económica. En esta configuración se utiliza una lámina de material sintético (generalmente polietileno de alta densidad) llamada geomembrana, de espesor entre 1 – 5 mm, que se coloca sobre el estrato natural. Como complemento, es usual utilizar una lámina de geotextil permeable para proteger a la geomembrana frente al deterioro (Vaquero Díaz, 2004). Por encima de estas se colocan unas tuberías ranuradas que se asientan sobre una capa de material drenante (e.g. gravas y arenas), cuyo objetivo es recoger y evacuar el lixiviado hacia una planta de tratamiento.

³ Alejandro J. Cebada Relea, email: uo225808@uniovi.es

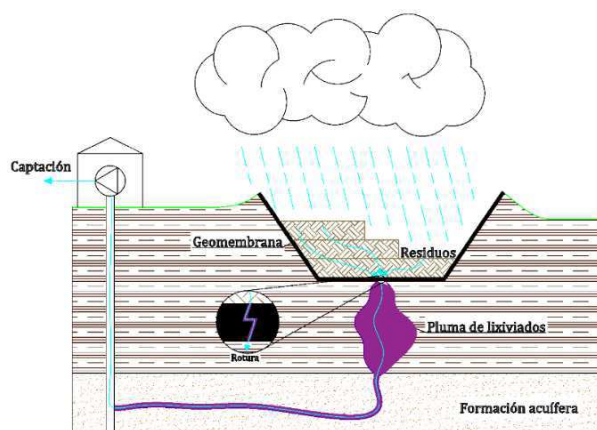


Figura 1. Esquema simplificado del proceso de contaminación por lixiviación de residuos RSU.

En caso de que las condiciones geológicas del emplazamiento no resulten favorables o se prevea que la configuración estándar no es suficientemente segura, se opta por emplear la configuración de seguridad (ver Figura 2 derecha). Esta disposición es similar a la estándar, pero en este caso se incluye un nivel más de impermeabilización artificial.

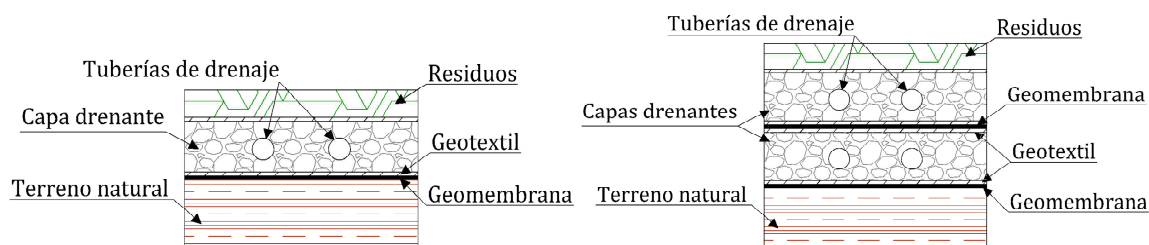


Figura 2. Disposición de las capas impermeabilización para vertederos RSU. A la izquierda se muestra la configuración estándar y a la derecha la configuración de seguridad.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El equipo GPR es una herramienta no intrusiva que permite obtener una imagen electromagnética del subsuelo mediante la emisión y recepción de ondas que se reflejan cuando aparece un material con diferente permitividad dieléctrica (ϵ). Además, de forma simplificada este parámetro controla la velocidad de propagación de la onda en el medio de la forma que se indica en 1 (Pérez Gracia, 2001).

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz (0,3 m/ns) y ϵ_r es la permitividad dieléctrica relativa del material que atraviesa la onda. A medida que la permitividad relativa aumenta la velocidad de propagación de la onda disminuye, lo que a su vez hace aumentar el tiempo de ida y vuelta que tarda la onda en salir y retornar al equipo y, por consiguiente, la profundidad a la que se encuentra el horizonte reflector. El valor de la permitividad dieléctrica relativa de los materiales más comunes se puede ver en la Tabla 1.

De la Tabla 1 se puede extraer que el contenido de agua de un material modifica tanto la permitividad dieléctrica como la conductividad eléctrica respecto al mismo material seco. Este es el motivo por el cual el equipo GPR puede ser una alternativa viable para detectar fugas, ya que es capaz de distinguir entre un material seco y un material húmedo.

Tabla 1. Propiedades electromagnéticas de materiales. Fuente. M. Jol, 2009.

Material	Conductividad estática σ_s (mS/m)	Permitividad relativa ϵ_r
Arcilla (seca)	1-100	2-20
Arcilla (húmeda)	100-1.000	15-40
Agua dulce	0,1-10	78-88
Arena (seca)	0,0001-1	3-6
Arena (húmeda)	0,1-10	10-30

La metodología consiste en un ensayo de filtración (verter agua sobre la geomembrana una vez ha sido colocada) y posteriormente trazar una malla de perfiles sobre la superficie del vaso con el equipo GPR. Ya que los vasos suelen tener gran superficie, es preferible utilizar antenas de baja frecuencia (LF) para reducir el tiempo del ensayo. Las antenas de alta frecuencia (HF) también se pueden utilizar, pero es conveniente que se empleen en zonas más específicas (e.g. juntas de unión).

El inconveniente de utilizar las antenas LF es que, debido a la resolución (λ) que tienen, es necesario interponer una capa adicional para poder detectar la filtración (ver Figura 3), con un espesor dependiente de la frecuencia central utilizada (2).

$$\text{espesor} \approx \lambda = \frac{v_p}{f} \quad (2)$$

Se propone que el material que constituya esta capa sea de arena silícea, cuya conductividad hidráulica es relativamente alta ($\approx 10^{-4}$ m/s), lo que favorece la detección de la filtración y, además, es un material económico que no entraña peligro medioambiental.

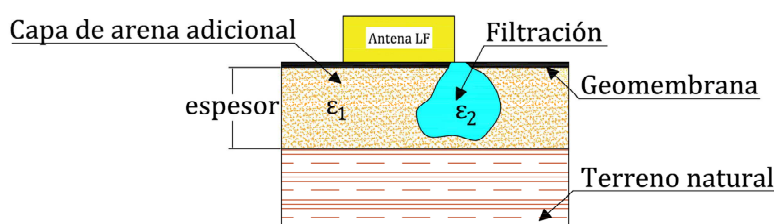


Figura 3. Disposición de las capas para el ensayo de filtración propuesto con antenas de baja frecuencia.

3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN NUMÉRICA

En base al modelo de filtración simplificado mostrado anteriormente, se realiza una simulación numérica con diferencias finitas (FD) para las dos configuraciones de impermeabilización con el software Reflexw® (v 7.2.4). Para llevarla a cabo se ha adoptado un modelo bidimensional de capas, donde se ha utilizado el espesor mínimo teórico (0,4 m) para que la capa de arena pueda ser detectada con una antena de 800 MHz (ver Figura 4). La potencia de la capa drenante de gravas, al depender de la cantidad de lixiviados que vaya a generar el vertedero, se ha supuesto unitaria.

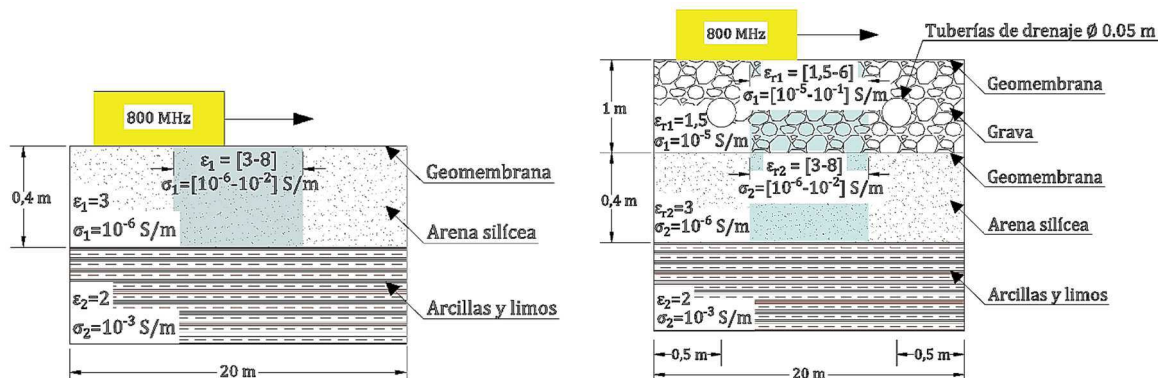


Figura 4. Modelos conceptuales simulados. A la izquierda se muestra el modelo para la configuración de impermeabilización estándar y, a la derecha, para la configuración de impermeabilización de seguridad.

Para simular la filtración se ha implementado una zona central donde se aumenta paulatinamente la permitividad dieléctrica, representando así la presencia de agua. Los parámetros electromagnéticos de la grava se han obtenido aplicando un modelo de mezcla CRIM (Complex Reflexivity Index Model) utilizando arena, aire y cantos calizos como materiales de la mezcla. La geomembrana no se simula debido a que su bajo espesor hace que sea indetectable por el equipo con las antenas LF.

4. RESULTADOS

A partir de los modelos anteriores se han obtenido los radargramas sintéticos que se muestran en Figura 5. En la disposición estándar el equipo es capaz de detectar el contacto entre la capa de arena y la capa natural de arcilla. En la parte central, donde se simula la filtración, aparece un abombamiento o pull down del contacto con mayor profundidad. Esto se debe al aumento de permitividad dieléctrica, lo que

hace que la velocidad de propagación disminuya y, por consiguiente, que el tiempo de ida y vuelta de la onda emitida y recibida con el equipo sea mayor (Endres, Clement, & Rudolph, 2000).

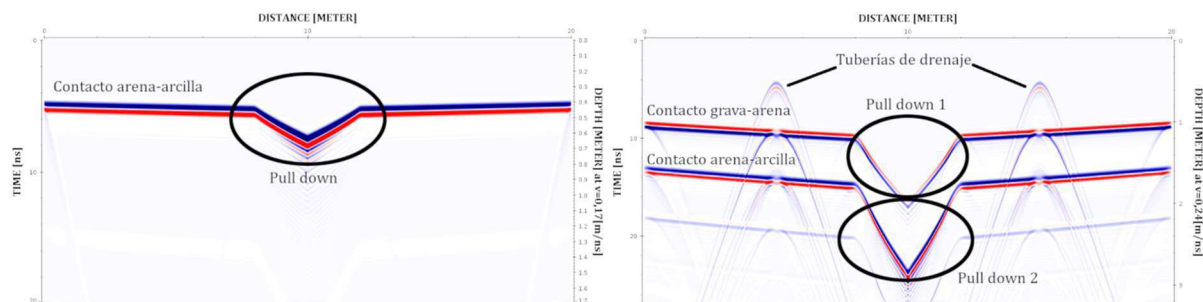


Figura 5. Radargramas sintéticos obtenidos. A la izquierda se muestra el radargrama correspondiente a la configuración estándar y a la derecha el radargrama correspondiente a la configuración de seguridad.

La simulación de la configuración de seguridad aporta resultados similares. El equipo no solo es capaz de determinar el contacto entre la capa drenante de grava y la capa de arena, sino que también es capaz de determinar el contacto entre esta última y la capa de arcilla. En este caso aparecen dos pull downs cada uno con una forma diferente, ya que la profundidad que alcanza el abombamiento depende de la permitividad dieléctrica del medio. Además, es posible detectar las tuberías ranuradas de drenaje, aunque si estas se encuentran demasiado cercanas entre sí es posible que puedan hacer que el contacto entre la capa drenante y la capa de arena no sea fácilmente distinguible.

5. CONCLUSIONES

De este primer estudio se puede afirmar que el equipo GPR es una herramienta viable para realizar estudios de filtración en vertederos. Por motivos de rapidez de ejecución del ensayo, es necesario utilizar las antenas de baja frecuencia (LF) e introducir una capa de material adicional entre la geomembrana y el estrato natural. Para favorecer la detección de la filtración, conviene que el material tenga una conductividad hidráulica alta. También existe la posibilidad de utilizar antenas de alta frecuencia, pero debido a la alta resolución que tienen, se deben emplear en lugares críticos.

REFERENCIAS

- Endres, A. L., Clement, W. P., & Rudolph, D. L. (2000). Ground penetrating radar imaging of an aquifer during a pumping test. *Ground Water*, 38(4), 566–576. <http://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00249.x>
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Jefatura del Estado. Boletín Oficial del Estado núm 181. BOE-A-2011-13046 (2011).
- M. Jol, H. (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and applications*. (H. M. Jol, Ed.).
- Real Decreto 1481/2001, del 27 de diciembre por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos, BOE-3507–3521 (2002).
- Pérez Gracia, V. (2001). *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Vaquero Díaz, I. (2004). *Manual de diseño y construcción de vertederos de residuos sólidos urbanos* (1o ed.). Madrid.

Nuevas herramientas para predecir el daño originado por las voladuras en las estructuras

New tools to predict blasting damages to structures

Álvarez-Fernández, M.I.^{1,4}, González-Nicieza, C.¹ y Prendes-Gero, M.B.²

¹ Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo

²Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo

RESUMEN

Las vibraciones inducidas por las voladuras son un efecto negativo de los explosivos que, históricamente, ha resultado muy difícil de mitigar. Cuando una carga explosiva detona se produce una onda de choque que se propaga alrededor del barreno. A medida que progresa va degenerando y se convierte en una onda sísmica, que viaja por el terreno y afecta a las estructuras cimentadas sobre éste. El análisis avanzado de la onda de vibración confirma la conveniencia de la revisión de las actuales normativas de seguridad (González-Nicieza & Álvarez-Fernández, 2017). Por otra parte, las herramientas predictivas basadas en Inteligencia Artificial, como redes neuronales (Álvarez-Vigil et al., 2012; Mohamed, 2011), así como los modelos numéricos, aportan nuevas técnicas de apoyo a la ingeniería en este campo que deben ser poco a poco incluidas en la praxis habitual. En este artículo se presentan los resultados de un análisis wavelet efectuado sobre las ondas sísmicas medidas en la cimentación de dos estructuras diferentes. En base a este análisis se intenta demostrar que el análisis convencional, recomendado por la norma actual puede ser mejorado considerando criterios energéticos.

ABSTRACT

The vibrations induced by the blasting are a negative effect of the explosives that, historically, has been very difficult to mitigate. When an explosive charge detonates, a shock wave propagates around the blast-hole. As it progresses it degenerates and becomes a seismic wave, which travels through the ground and affects the structures cemented on it.

The advanced analysis of the vibration wave confirms the convenience of reviewing the current security regulations (González-Nicieza & Álvarez-Fernández, 2017). On the other hand, predictive tools based on Artificial Intelligence, such as neural networks (Álvarez-Vigil et al., 2012; Mohamed, 2011), as well as numerical models, contribute new engineering support techniques in this field that must be included little by little in the usual practice. In this paper, the results of a wavelet analysis carried out on the seismic waves measured in the foundations of two different structures are presented. Based on this analysis, it is shown that the conventional analysis recommended by the current standard could be improved with an energetic criterion.

Palabras clave: vibraciones; explosivos; daños a estructuras, normativa.

Keywords: ground vibrations; blasting; damage to structures; standards.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se trata de establecer la seguridad estructural ante los efectos de un evento sísmico como puede ser una voladura o un terremoto, se deberían tener en cuenta criterios que reflejen factores tales como la intensidad, la frecuencia y la duración de la vibración, así como otros factores inherentes a la estructura que sufre la vibración, como pueden ser su frecuencia natural y su coeficiente de amortiguamiento.

La práctica muestra que, en muchos casos, utilizar únicamente como indicador de la intensidad de la vibración el valor de pico de la velocidad de partículas (PPV) y la frecuencia fundamental a la que se produce la vibración, no es suficiente para reflejar los daños reales que se pueden producir tras un evento sísmico (terremoto, voladura, etc.).

La mayoría de los criterios de seguridad existentes en la actualidad, utilizan la PPV y la frecuencia fundamental de la vibración para valorar sus efectos. Así ocurre con la norma española UNE 22-381-93, la norma alemana DIN 4150, la norma australiana AS 2187, la norma inglesa BS 7385-2, la norma americana USBM RI 8507 o la norma china GB6722.

Sin embargo, existen otros factores con menor peso según las distintas normativas, y que deben ser

⁴email: inma@uniovi.es

tenidos en cuenta como son:

- Distancia entre la fuente de vibraciones y las estructuras.
- Duración de las vibraciones y periodicidad de las mismas.
- Tipo de sustrato sobre el que se cimenta la estructura.
- Resistencia de los materiales que constituyen la estructura y geometría de la misma.
- Nivel de mantenimiento y conservación de la estructura.

2. PROCEDIMIENTO

Una onda sísmica puede verse como una suma de señales sinusoidales de la forma:

$$A(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(w_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

donde A_i , w_i y φ_i representan la amplitud, la pulsación y la fase inicial, respectivamente.

Con objeto de simplificar los cálculos, se supone que la estructura que sufre la vibración consta de un solo grado de libertad. La ecuación que rige el comportamiento dinámico de la estructura es:

$$\ddot{x} + 2\xi_0 \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_i}{m} \sin \omega_i t \quad (2)$$

siendo ξ_0 el coeficiente de amortiguamiento y ω_0 la pulsación natural del sistema, definidos por:

$$\xi_0 = \frac{\mu}{2m\omega_0} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

donde m es la masa, k la rigidez y μ el coeficiente de rozamiento.

Dada una fuerza de vibración $F_i \sin \omega_i t$, la teoría de dinámica estructural indica que el factor de magnificación β_i , que se corresponde con el desplazamiento de la estructura, a esa frecuencia, está dado por:

$$\beta_i = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega_i^2 / \omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 (\omega_i^2 / \omega_0^2)^2}} \quad (4)$$

donde $\omega_i = 2\pi f_i$, siendo f_i la frecuencia de la vibración que actúa sobre la estructura.

Esta expresión (4) muestra que el factor de magnificación β_i , es decir, la respuesta a la vibración de una estructura es una magnitud física sin dimensiones y que la respuesta de una estructura a una vibración está claramente relacionada con su frecuencia natural y su coeficiente de amortiguamiento. Cuando la frecuencia de la vibración, que de acuerdo con la ecuación (2) es una aceleración, está muy próxima a la frecuencia natural y, además, el coeficiente de amortiguamiento es muy pequeño, la respuesta de la estructura (su desplazamiento), será máxima. De esta forma, para cada banda de frecuencias de la señal, se puede calcular el coeficiente de respuesta.

Suponiendo que f es la frecuencia de vibración, ξ_0 el coeficiente de amortiguamiento y f_0 la frecuencia natural de la estructura, de acuerdo con la ecuación (4), el coeficiente de respuesta de una estructura, para una determinada banda de frecuencias, obtenida por WPA, en el nodo (i,j) , se puede definir como sigue:

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{2^i}{f_m} \int_{f_{i,j-1}}^{f_i} \frac{1}{\sqrt{(1 - f^2 / f_0^2)^2 + 4\xi_0^2 (f / f_0)^2}} df \quad (5)$$

donde $f_{i,j-1}$ y f_i son las frecuencias inferior y superior de la sub-banda de frecuencias correspondiente al nodo (i,j) de la descomposición wavelet.

La energía de vibración es una consecuencia importante de la vibración superficial que origina el daño causado sobre una estructura por una voladura o un terremoto. Ya que la vibración sísmica es una señal de banda ancha de señales aleatorias no estacionarias, se utiliza el análisis wavelet empaquetado para analizar señales de velocidad sísmica en los dominios del tiempo y de la frecuencia, para calcular el espectro de energía de la WPA. Dado que hay distintas frecuencias de impacto sobre la estructura, la energía WPA se multiplica por los correspondientes coeficientes de respuesta de banda. De esta forma

se obtiene la energía de respuesta de la banda de frecuencias (FBRE).

3. COMPARACIÓN CON LA NORMA UNE 22-381-93

A pesar de todas las variables que participan en la aparición de fisuras, las normas internacionales han establecido unos valores de velocidad límite de las partículas del suelo (asociadas con vibraciones) por encima de los cuales es probable que se generen daños visibles en los elementos de una edificación. Sin embargo, hay que recordar que estos valores son indicativos.

Teniendo en cuenta lo anterior, a modo de ejemplo, la norma UNE 22-381-93 establece los valores máximos de velocidad de vibración (en cm/s) en función de la frecuencia, para que no se observen daños en diferentes tipos o grupos de edificaciones (edificios sensibles, viviendas, edificios industriales). Estos valores se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Limitaciones en velocidad impuestas por la norma UNE 22-381-93.

Grupo	< 15 Hz	15 – 75 Hz	> 75 Hz
III	0,4	0,4 – 2,0	2,0
II	0,9	0,9 – 4,5	4,5
I	2,0	2,0 – 10,0	10,0

Grupo I: Edificios y naves industriales Grupo II: Edificios de viviendas, centros comerciales o recreo; Grupo III: Estructuras de valor arqueológico o histórico.

Como la energía de respuesta de la banda de frecuencias, que se propone como nuevo criterio de seguridad, está expresada en unidades cuadradas de velocidad, se puede comparar con los límites establecidos por la norma UNE 22-381-93, convirtiéndolos a su vez en unidades cuadradas de velocidad.

4. CASO PRÁCTICO

En este apartado se exponen los resultados de aplicar la metodología desarrollada a un caso práctico. Se instalaron dos estaciones sísmicas de control tipo ETNA en otros tantos edificios que se han denominado ED-E y ED-H. Se llevó a cabo una voladura en las inmediaciones consistente en 7 barrenos de entre 5 y 7 m de longitud, en los que se emplearon 227 kg de explosivos. La carga instantánea detonada fue de unos 27 kg equivalentes de goma. El registro de velocidad obtenido en la cimentación de cada edificio, expresado en cm/s puede verse en la Figura 1.

Como puede comprobarse, los valores pico de velocidad son inferiores a 0,1 cm/s en el primer caso y a 0,05 cm/s en el segundo. Las frecuencias dominantes obtenidas mediante la transformada rápida de Fourier de estas señales son de 6,64 y 5,66 Hz respectivamente. En estas condiciones, tal y como se comprueba en la Tabla 1, de acuerdo con la norma UNE 22-381-93, ninguna de las señales registradas causaría daños en las edificaciones, aun siendo consideradas edificios sensibles. En la Figura 2 se presenta la comparación de la FBRE de cada señal con la norma UNE 22-381-93, expresada en unidades de energía (cuadrado de la velocidad de los valores límites de la norma).

La señal registrada en el edificio ED-H no supera en ningún caso los límites de seguridad. En el caso del edificio ED-E la norma se ve superada en la banda de frecuencias 2.5 – 22 Hz para edificios del Grupo III y en un ancho de banda de 5 – 8 Hz para edificios del Grupo II. Recordemos que, con el criterio de seguridad establecido con las normas clásicas, basado en la PPV y la frecuencia dominante, esta voladura no se clasificaría como peligrosa para ninguno de los edificios monitorizados.

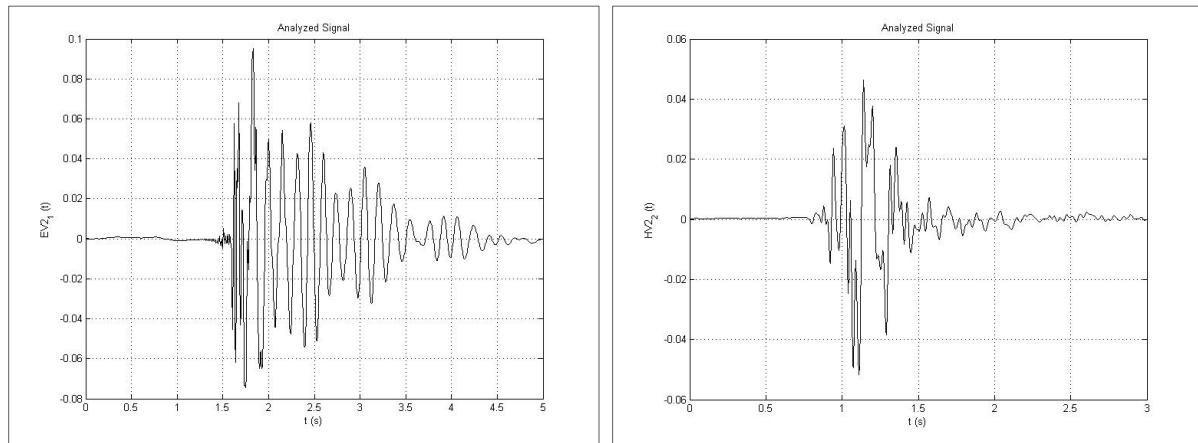


Figura 1. Registros de velocidad (ED-E izquierda; ED-H derecha).

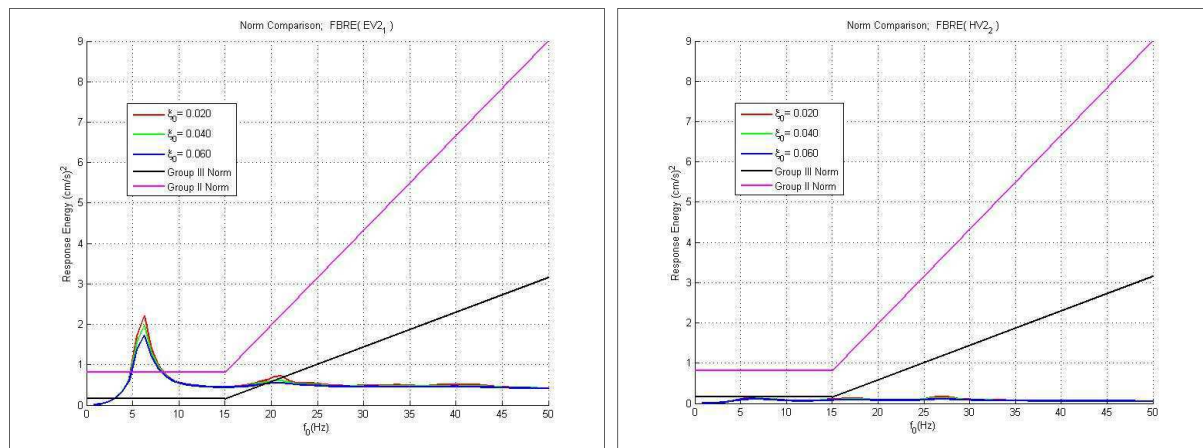


Figura 2. Comparación con la norma UNE 22-381-93 adaptada a energía (ED-E izquierda; ED-H derecha).

AGRADECIMIENTOS

La investigación de la que se derivan los resultados presentados se ha desarrollado gracias al Programa EXPLORA del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, a través del proyecto BIA2015-72928-EXP: Criterios de seguridad para estructuras bajo cargas dinámicas producidas por voladuras (VIBRASEC).

REFERENCIAS

- González-Nicieza, C. & Álvarez-Fernández, M.I. (2017). Chapter XX: Blasting propagation velocity. Rock Mechanics and Engineering, Volume 3: Analysis, Modeling & Design. CRC Press.
- Álvarez-Vigil A.E., González-Nicieza C., López Gayarre F. & Alvarez-Fernández M.I. (2012) Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural network. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 55, 108-116.
- Mohamed, M.T (2011) Performance of fuzzy logic and artificial neural network in prediction of ground and air vibrations. International Journal of Rock Mechanic and Mining Science, 48, 845–851.
- UNE 22-381-93 (1993). Control de vibraciones producidas por voladuras. BOE nº 138, 10 de Junio de 1993.

Evaluación numérica de las condiciones de contorno de flujo de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana

Numerical evaluation of flow boundary conditions of the Asturian Central Coal Basin

Álvarez-Álvarez, L.^{1,5} y Fernández-Álvarez, J.P.²

¹Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos no Destructivos, Universidad de Oviedo

²Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo

RESUMEN

La minería de carbón en la Cuenca Carbonífera Central Asturiana (CCCA) está en proceso de reconversión. El uso de agua de mina como recurso geotérmico y posible abastecimiento industrial, la explotación del gas metano presente en las capas carboníferas, el almacenamiento de CO₂ 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 flujos naturales de agua presentes en la zona de estudio. La caracterización de los mismos y la evaluación de la implicación de estas nuevas actuaciones en estos flujos es una labor fundamental para el buen aprovechamiento de los nuevos recursos de la zona.

En este trabajo se hace una valoración de las condiciones de contorno definidas en el modelo conceptual a escala regional de flujo de la zona de estudio mediante simulación numérica. Se trata de la fase previa a la construcción de un modelo numérico de flujo de la zona, útil para futuras modelizaciones locales, que permita caracterizar en detalle los flujos generales y valorar la consecuencia de los nuevos aprovechamientos de uso (geotermia, abastecimiento, metano, almacenamiento CO₂, ...) en estos flujos.

ABSTRACT

The coal mining industry in the Asturian Central Coal Basin (ACCB) is in process of reconversion. The use of mine water as a geothermal resource and possible industrial water supply, extraction of coalbed methane, in same CO₂ storage and the analysis of environmental impacts groundwater impact caused by mine closure are the main lines of research at the moment. These activities have a direct effect on the natural groundwater flows in the study area. An appropriate hydrogeological characterization and the study of the implication of the new activities in flow dynamics is essential for the adequate exploitation of the new resources.

In this work, it is performed an assessment of the boundary conditions defined in the regional scale flow conceptual model of the study area by means of numerical simulations. This is a preliminary stage in the development of a numerical groundwater model of the ACCB. The numerical model is useful for future local scale modelling, allowing for a detailed characterization of general groundwater flow dynamics and the assessment of the local scale hydrogeological impacts derived from the exploitation of new resources (geothermal, water supply, methane exploit, CO₂ storage, etc.) in the area.

Palabras clave: modelo conceptual de flujo; condiciones de contorno de flujo; modelización numérica; Cuenca Carbonífera Central Asturiana.

Keywords: flow conceptual model; flow boundary conditions; numerical modelling; Asturian Central Coal Basin.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas carboníferas se han estudiado a lo largo de los años por su interés energético en forma de combustibles fósiles. Cuando este valor se agota, aparecen otros nuevos intereses. La Cuenca Carbonífera Central Asturiana (CCCA) está actualmente en este proceso. Las líneas de investigación actuales consistente principalmente en el estudio del aprovechamiento del agua de mina como recurso geotérmico (Banks, 2016; UMHEND, 2013) y como posible abastecimiento (Álvarez, et al., 2018; LNE, 2018) el almacenamiento de CO₂ (Aminu, et al.; 2017; HUNOSA, 2012) y la extracción de gas metano (UMHEND, 2017; WANG, et al.; 2014;), así como el estudio del impacto del cierre de la minería de carbón (MRRP, 2018). Todas estas nuevas aplicaciones tienen implicaciones en los acuíferos, por lo que el conocimiento detallado de los mismos y de los flujos subterráneos son, pues, de gran interés y esencial para el buen uso de los nuevos recursos.

⁵ Lorena Álvarez Álvarez, email: lorena@hydrogeophysicsndt.com

La modelización numérica de flujo es una de las técnicas más empleadas para estos fines. Una cuenca carbonífera relevante, como es el caso de la CCCA, suele tener una gran extensión y los modelos numéricos a esta escala se emplean con distintos objetivos. La modelización numérica a escala regional proporciona un mayor entendimiento de los flujos generales (Heredia, *et al.*; 2001); permite determinar zonas principales de recarga y descarga (Cheo, *et al.*; 2017); cuantificar las reservas (Fernández, *et al.*, 2001); constituye una herramienta básica en la gestión de recursos hídricos (Michael & Voss, 2009); se utiliza para el cálculo de componentes del balance hídrico (Lam, *et al.*, 2011) y se establece como modelo base para modelizaciones numéricas locales (Gedeon, *et al.*; 2007).

El objetivo de este trabajo es la valoración numérica de las condiciones de contorno definidas en el modelo conceptual de flujo de la CCCA, fase previa a la construcción del modelo numérico de flujo de la zona de estudio. Este trabajo comprende la recopilación y tratamiento de los datos, la definición del modelo conceptual y la construcción de un modelo numérico preliminar que permita evaluar las condiciones de contorno propuestas en el modelo conceptual.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La CCCA se sitúa en Asturias, en la zona externa del cinturón Hercínico, dentro de la Zona Cantábrica. Su orografía consiste en grandes valles encajados en el sistema montañoso de la Cordillera Cantábrica, con cotas desde los 150 m.s.n.m. hasta los 2000 m.s.n.m., y con un clima oceánico donde las precipitaciones son abundantes y las temperaturas suaves.

Está constituida por una potencia de unos 5800 m de materiales carboníferos, compuestos por una sucesión repetitiva de lutitas, areniscas y carbón (65-70 capas), que en su parte inferior alterna con calizas y en su parte superior con conglomerados (García-Loygorri, *et al.*; 1971).

En los dos últimos siglos y hasta el presente la explotación de esas capas de carbón ha tenido una gran importancia, estimando que existen un total de 300 minas en la zona (interior y de montaña). Esta actividad minera ha producido una transformación de los materiales existentes, modificando su comportamiento hidrogeológico y también supone la necesidad de realizar bombeos de agua subterránea para el mantenimiento de las instalaciones.

3. RECOPIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La recopilación de información relevante y el tratamiento de la misma tienen por objeto la conceptualización del problema y la obtención de los datos necesarios para alimentar los modelos numéricos.

Esta información consiste principalmente en datos cartográficos (topografía, usos del suelo, etc.), geológicos (mapas geológicos, cortes y columnas estratigráficas, descripciones y análisis geológicos), mineros (localización, elementos estructurales, cartografía minera, sistemas de explotación, conexiones, etc.) e hidrológicos (niveles piezométricos, caudales de bombeo y de manantiales, aforos en ríos, precipitación y temperaturas, etc.).

4. MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual persigue la simplificación del problema real y la organización de todos los datos disponibles. Se definen las hipótesis conceptuales, la geometría, condiciones de contorno (BC) y las unidades hidrogeológicas para el área de estudio (Figura 1 - Dcha.).

Todos los límites de la CCCA presentan bordes asumibles como físicos (base y bordes E y S) o hidráulicos (borde N), salvo el borde O, que pone en contacto la CCCA con la Unidad del Aramo. Con el objetivo final de evaluar numéricamente este borde, se define también el modelo conceptual de la Unidad del Aramo, el cual será implementado en el modelo numérico preliminar (Figura 1 - Izq.).

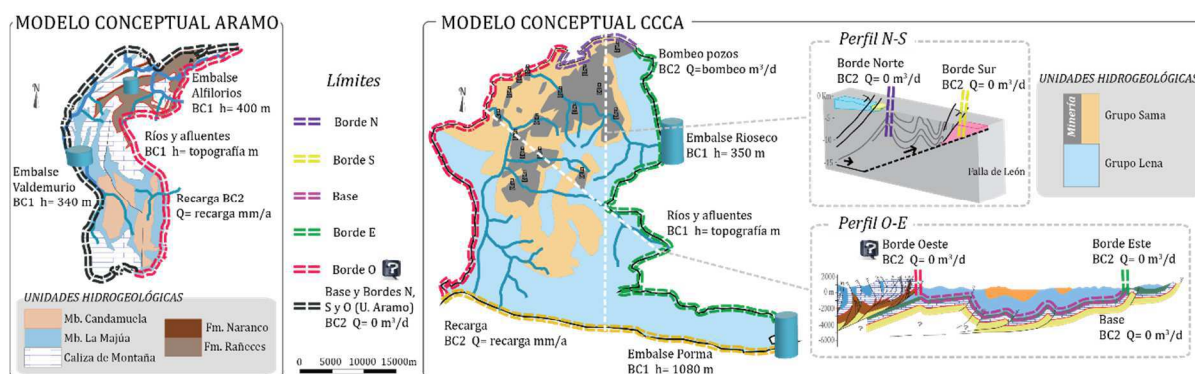


Figura 1. Modelos conceptuales. Izq.) Unidad del Aramo. Dcha.) Cuenca Carbonífera Central Asturiana.

5. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico de flujo preliminar de la CCCA, que pretende evaluar las condiciones de contorno establecidas en el modelo conceptual, se realiza con el código de simulación Comsol Multiphysics®.

El proceso de construcción se muestra en la Figura 2, en el que se incluye las áreas comprendidas por la CCCA y la Unidad del Aramo. Este consiste en implementar los diferentes elementos que se definieron en el modelo conceptual progresivamente, comprobando la estabilidad del modelo.

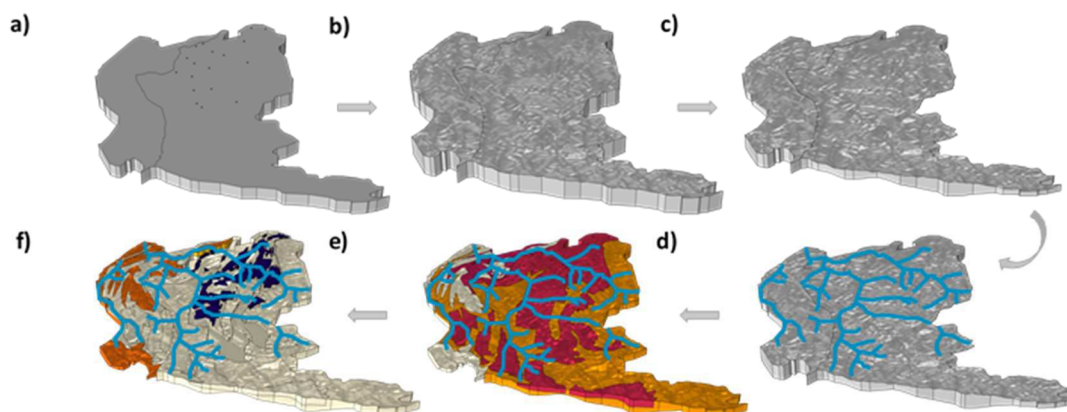


Figura 2. Proceso de construcción del modelo numérico. a) Introducción de los bordes. b) Introducción de la topografía. c) Introducción de la base. d) Introducción de la hidrografía. e) Introducción de las unidades hidrogeológicas y f) Introducción de las zonas modificadas por la minería.

6. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Se realiza la evaluación del borde O de la CCCA con el modelo numérico preliminar construido, el cual presenta una gran incertidumbre a la hora de definirlo. Se utiliza la herramienta “particle tracking”, que consiste en introducir partículas en el borde que separa la CCCA y la U. del Aramo, con el objetivo de observar el movimiento de las mismas a lo largo del tiempo.

En la Figura 3 se muestran los resultados de este modelo, en los que se observa como el movimiento de las partículas situadas en este borde es mínimo. En función de esto y del resultado de caudal de trasvase que ofrece el modelo, el cual supone un 1-3% del caudal total circulante, se concluye que el borde oeste de la CCCA puede asumirse como un borde de caudal nulo.

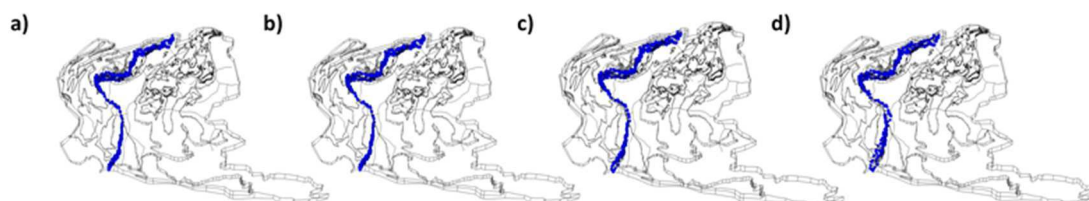


Figura 3. Resultados del modelo numérico preliminar de la CCCA. Movimiento de las partículas situadas en el borde contacto entre la CCCA y la U. del Aramo. a) $t = 1$ año. b) $t = 10$ años. c) $t = 50$ años y d) $t = 100$ años.

REFERENCIAS

- Álvarez, R., Ordóñez, A., García, R., & Loredó, J. (2018). An estimation of water resources in flooded, connected underground mines. *Engineering Geology*, 232, pp.114–122.
- Aminu, M.D., Nabavi, S.A., Rochelle, C.A., & Manovic, V. (2017). A review of developments in carbon dioxide storage. *Applied Energy*, 208 (August), pp.1389–1419.
- Banks, D. (2016). Making the red one green - Renewable heat from abandoned flooded mines. In 36th Annual Groundwater Conference Tullamore, Ireland.
- Cheo, A.E., Voigt, H-J., & Wendland, F. (2017). Modeling groundwater recharge through rainfall in the Far-North region of Cameroon. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, pp.118–130.
- Fernández, A., Bertachini, A.C., Girodo, A.C., & Carvalho, D. (2001). Hidrogeological model of the Itabira iron ore district. In IMWA Symposium 2001.
- García-Loygorri, A., Ortuño, G., Caride, C., Gervilla, M., Greber, C., & Feys, R. (1971). El carbonífero de la Cuenca Central Asturiana. *Trabajos de Geología*, 3, 101-150.
- Gedeon, M., Wemaere, I., & Marivoet, J. (2007). Regional groundwater model of north-east Belgium. *Journal of Hydrology*, 335(1–2), pp.133–139.
- Heredia, J., Martín-Loeches, M., Rosino, J., del Olmo, C., & Lucini, M. (2001). Síntesis hidrogeológica y modelización regional de la cuenca media del Tajo asistida por un SIG. *Estudios Geológicos*, 57, pp.31–46.
- HUNOSA (2012). Proyecto “Carbolab” (2012). Recuperado (04.06.2018) de <http://www.hunosa.es/metaspaces/portal/47635/49871>
- Lam, A., Karssenberg, D., Van den Hurk, B.J.J.M., & Bierkens, M.F.P. (2011). Spatial and temporal connections in groundwater contribution to evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, pp.2621–2630.
- LNE (2018). Noticia “Agua de minas y nuevas presas, las opciones para abastecer a Asturias”. Recuperado (04.06.2018) de <http://www.lne.es/asturias/2018/03/06/convertir-minas-embalses-subterraneos-alternativa/2248693.html>
- Michael, H. A., & Voss, C.I. (2009). Controls on groundwater flow in the Bengal Basin of India and Bangladesh: regional modeling analysis. *Hydrogeology Journal*, 17(7), pp.1561–1577.
- MRRP (2018) – MERIDA RFCS RESEARCH PROJECT. Proyecto “Merida”. Recuperado (04.06.2018) de <http://www.meridaproject.com>
- UMHEND (2013) – Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos. Proyecto “Modelización numérica del aprovechamiento geotérmico del pozo minero de Barredo”. Recuperado (04.06.2018) de <https://www.hydrogeophysicsndt.com/simulacionnumerica-de-los-procesos-de-flujo-y-transferencia-de-calor-en-una-mina-subterranea-de-carbon>
- UMHEND (2017) – Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos. Proyecto “Modelización hidrogeofísica preliminar, orientada a CBM, de la zona Olloniego”. Informe.
- Wang, H., Cheng, Y., Wang, W., & Xu, R. (2014). Research on comprehensive CBM extraction technology and its applications in China’s coal mines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 20, pp.200–207.

Evolución del parque de vehículos ligeros en España y su repercusión

Evolution of the light vehicle fleet in Spain and its impact

Hernández, Z.¹, Álvarez, F.¹, Sañudo, L.¹ y López, M.¹

¹Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

En el año 1999, en Europa entran en vigor las normas armonizadas EN 1317 relativas a los sistemas de contención de vehículos, con el objeto de establecer exigencias concretas en base a prestaciones de seguridad vial. Para ello, estos sistemas tienen que superar con éxito los ensayos de choque a escala real definidos en estas normativas. Sin embargo, algunos de los criterios definidos en estas normas no se encuentran acorde con la realidad de los vehículos que circulan actualmente por las carreteras españolas. Teniendo en cuenta las matriculaciones y parque de vehículos ligeros (turismos) en España, en este trabajo se realiza un análisis estadístico de la evolución que han sufrido ambos parámetros a lo largo de los años, que evidencia el cambio producido en el mercado en relación al tipo de vehículo ligero que circula actualmente.

ABSTRACT

In 1999, the harmonized standards EN 1317 relating to vehicle restraint systems came into force in Europe, in order to establish specific requirements based on safety features. For this reason, these systems have to overcome successfully the full-scale crash tests defined in these standards. However, some defined criteria are not in correspondence with the reality of Spanish roads. Considering the registrations and fleet of light vehicles in Spain, a statistical analysis of the evolution that both parameters have undergone over the years is carried out in this paper. The outcome of this study shows, the change produced in the market in relation to the type of light vehicles that currently circulate.

Palabras clave: ensayos de choque; matriculación de vehículos; parque de vehículos; sistemas de contención de vehículos; severidad del impacto.

Keywords: crash test; registration of vehicles; vehicle fleet; road restraint system; severity of impact.

1. INTRODUCCIÓN

Del total de accidentes con fallecidos en carreteras alrededor del 40% son producidos por salida de la calzada (DGT, 2016), por lo es necesario prestar especial atención a la protección de los laterales de la misma, adoptando medidas en aquellas zonas desprotegidas, asegurando que estas sean las adecuadas en función de los requerimientos de la vía. La salida descontrolada de un vehículo de la calzada puede conllevar, entre otros, al impacto de este contra un obstáculo en el lateral de la vía. Una de las principales medidas para proteger los laterales de la calzada es la instalación de sistemas de contención de vehículos (AEC y Fundación MAPFRE, 2015), sin embargo, estos no dejan de ser un obstáculo en sí mismo, por tal motivo la instalación de estos sistemas tiene que estar en correspondencia con las necesidades de la vía, así como cumplir los requerimientos de seguridad para que la severidad del impacto sea mínima, es decir, que absorban adecuadamente la energía durante el impacto.

Entre los sistemas de contención se encuentran: barreras de seguridad, atenuadores de impacto, terminales de barrera, barreras desmontables y transiciones (EN 1317-1, 2011). Este estudio centra su atención en las barreras de seguridad ya que suponen la mayor parte de los sistemas de contención que se instalan en las carreteras españolas para la protección de sus márgenes y medianas.

2. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA ACTUAL

Actualmente las barreras de seguridad que se instalan en las carreteras europeas tienen que disponer del Marcado CE, el mismo exige necesariamente la evaluación del comportamiento del sistema de contención mediante la superación de ensayos de choque de vehículos a escala real (EN 1317-5, 2007+A2:2012).

La parte 2 de la Norma EN 1317-2, 2011, es la encargada de tratar estos sistemas, especificando los criterios de aceptación y método de ensayo. Entre estos criterios se encuentra la severidad del impacto de la barrera para el cual será necesario superar un ensayo de choque con un vehículo ligero de 900 kg (TB11), definido como “ensayo de control”, verificando así que una barrera no suponga un riesgo grave para los pasajeros del vehículo ligero, aunque su nivel de contención sea alto o muy alto.

Actualmente las características del vehículo empleado en el “ensayo de control” (EN 1317-1, 2011) no se encuentran acorde con la realidad de las carreteras españolas. Esta situación ha sido la motivación para llevar a cabo este estudio sobre los vehículos ligeros que actualmente circulan por nuestras carreteras, así como su repercusión en la severidad de un impacto. Tomando como referencia las normativas de aplicación para los sistemas de contención de vehículos de los Estados Unidos, se puede apreciar que en el último documento emitido (Manual for Assessing Safety Hardware [MASH], 2009) uno de los cambios más significativos introducidos respecto al documento anterior (NCHRP 350, 1993) ha sido el incremento en un 22% de la masa del vehículo ligero, pasando de 900 kg a 1.100 kg. En Europa este cambio aún no se ha producido en la normativa vigente (EN 1317-2, 2011), el peso del vehículo ligero para el ensayo de control continúa siendo 900 kg.

3. ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LA EVOLUCIÓN DE LAS MATRICULACIONES Y PARQUE DE VEHÍCULOS LIGEROS EN ESPAÑA

Conscientes que actualmente en España el parque de vehículos ha sufrido un cambio en ese sentido, en este estudio se ha realizado un análisis estadístico detallado de la evolución de las matriculaciones de los vehículos ligeros y de la evolución del parque de estos vehículos.

3.1. Evolución de las matriculaciones de los vehículos ligeros en los últimos 5 años en España

La evolución de las matriculaciones de vehículos ligeros ha sido analizada para un período de 5 años (2013-2017). Se han identificado aquellos vehículos con un peso comprendido entre 800 kg y 1.200 kg. (Asociación Nacional de Importadores de Automóviles, Camiones, Autobuses y Motocicletas [ANIAM], 2018), estableciendo este último como valor máximo debido a que el peso del vehículo que define el nivel de contención normal (N2) es 1.500 kg (EN 1317-2, 2011), por lo que un peso superior a 1.200 kg se alejaría del objetivo que se persigue con el ensayo de control. Los vehículos seleccionados se han dividido en dos grupos: Grupo 1, Vehículos de peso igual o inferior a 1.000 kg y Grupo 2, Vehículos con peso superior a 1.000 kg e inferior o igual a 1.200 kg. (Tabla 1).

Tabla 1. Datos estadísticos de los vehículos ligeros matriculados en España (2013-2017).

Grupo 1 Vehículos de peso < 1.000 kg			Grupo 2 1.000 kg < Vehículos de peso ≤ 1.200 kg		
Año	Vehículos matriculados	%	Año	Vehículos matriculados	%
2013	20.360	8	2013	255.700	92
2014	27.688	9	2014	309.129	91
2015	43.513	12	2015	356.415	88
2016	40.672	11	2016	379.037	89
2017	39.599	10	2017	391.784	90

Al analizar las cantidades para cada grupo, indicadas en la Tabla 1, se puede apreciar el porcentaje que supone cada grupo respecto del total:

- Los vehículos de peso inferior a 1.000 kg (Grupo 1) representan alrededor del 10% del total.
- Los vehículos de peso superior (Grupo 2) representan alrededor del 90%.

Esto significa que sólo 1 de cada 10 coches matriculados se encuentra en correspondencia con las especificaciones establecidas en la normativa EN1317 con relación al vehículo para el ensayo de control.

3.2. Evolución del parque de vehículos ligeros en los últimos 10 años en España

Por otra parte, se ha realizado un análisis estadístico de la evolución que se ha producido en el parque de vehículos ligeros en España ya que representan alrededor del 70% del total del parque (DGT, 2016), por lo que resulta de gran importancia el análisis de su seguridad y comportamiento ante impacto.

Dado que este estudio se centra en los vehículos ligeros de peso inferior a 1.200 kg, se han seleccionado los vehículos que cumplen esta condición (European Statistical System [EUROSTAT], 2018), aplicando el mismo criterio que para el análisis realizado con las matriculaciones en lo que se refiere a los grupos establecidos. Para el estudio del parque de vehículos se incrementa el período analizado a 10 años ya que en un período inferior no se aprecia el descenso sufrido en la cantidad de vehículos de peso inferior a 1.000 kg. (Tabla 2).

Tabla 2. Datos estadísticos del parque de vehículos en España (2007-2016).

Grupo 1 Vehículos de peso < 1.000 kg			Grupo 2 1.000 kg < Vehículos de peso ≤ 1.249 kg			Diferencia porcentual
Año	Parque de vehículos	%	Año	Parque de vehículos	%	
2007	6.190.000	44	2007	7.735.000	56	11%
2008	5.896.000	43	2008	7.786.000	57	14%
2009	5.478.000	42	2009	7.648.000	58	17%
2010	5.215.000	41	2010	7.631.000	59	19%
2011	5.036.000	40	2011	7.601.000	60	20%
2012	4.890.000	39	2012	7.497.000	61	21%
2013	4.726.000	39	2013	7.337.000	61	22%
2014	4.376.810	37	2014	7.370.780	63	25%
2015	4.285.954	37	2015	7.429.153	63	27%
2016	4.231.900	36	2016	7.556.135	64	28%

Como resultado del análisis realizado sobre la evolución del parque de vehículos ligeros en España, indicado en la Tabla 2, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El parque de vehículos ligeros de peso inferior a 1.000 kg ha experimentado un descenso de 32% en la última década, en el año 2007 existían 6.190.000 vehículos mientras que en el 2016 esa cantidad se redujo a 4.231.900 vehículos.
- Al comparar los dos grupos se puede apreciar la evolución entre las cantidades de ambos a lo largo de la década estudiada, en el año 2007 esta diferencia sólo representaba un 11% mientras que en el año 2016 esta diferencia supone un 28%.
- Dos de cada tres vehículos que circulan por las carreteras españolas excede el peso de 1.000 kg, por lo que actualmente los vehículos de peso inferior a 1.000 kg no representan a los vehículos ligeros que mayoritariamente circulan en España.

Con la evolución obtenida entre ambos grupos a lo largo de una década ha sido posible realizar una estimación de la misma para un período mayor, obteniéndose una diferencia de un 45% en el año 2025, lo que significa que en ese año el parque de vehículos de peso inferior a 1.000 kg supondrá alrededor de un 30% del total de vehículos ligeros mientras que el parque de vehículos de peso entre 1.000 y 1.249 kg supondrá alrededor del 70%. En vista del análisis realizado, resulta deducible que el peso del vehículo considerado en el ensayo de control, especificado en la normativa EN 1317, no se encuentra en correspondencia con la realidad y el futuro próximo de los vehículos ligeros que circulan por las carreteras de España.

4. ANÁLISIS DE LA SEVERIDAD DEL IMPACTO DEBIDA AL PESO DEL VEHÍCULO

El peso del vehículo se encuentra directamente relacionado con la energía cinética que tiene que ser capaz de absorber el sistema de contención durante el impacto, por lo que un incremento de la masa del vehículo supone un incremento proporcional de la energía a absorber. Comparando el vehículo ligero actualmente definido en el ensayo de control (masa 900 kg) y el vehículo de masa 1.100 kg, considerando la misma modificación realizada en los Estados Unidos, supone un incremento en la energía cinética superior al 20%. Si además de lo anterior se incrementara el ángulo de impacto de 20° a 25°, tal y como se realizó en Estados Unidos (MASH, 2009), la energía cinética alcanzaría una diferencia de un 85%.

Este incremento en la energía cinética se traduce en una mayor severidad del impacto para los ocupantes del vehículo ya que, como sabemos, la energía del impacto tiene que ser absorbida por todos los elementos involucrados en el mismo, es decir, a través de (i) Deformación del sistema de contención (en caso de que exista), (ii) Deformación del vehículo y (iii) Transmisión a los ocupantes del vehículo. Cada uno de los factores antes indicados se encuentra involucrado de manera diferente durante el proceso de absorción de energía en el impacto de un vehículo. En el caso de la deformación del sistema de contención, cuanto más deformable sea este menos agresivo resultará ser el impacto del vehículo ligero contra él, si bien existe gran cantidad de situaciones en las que no es posible instalar sistemas con una gran deformación, principalmente cuando se requiere un nivel de contención alto o muy alto para la barrera a instalar. En este caso la rigidez del sistema garantiza la contención y redirección del vehículo

pesado, sin embargo, esta situación resulta desfavorable para el vehículo ligero que impacte contra él. Por lo tanto, ante una barrera de seguridad con reducida deformación para los vehículos ligeros, un incremento en la masa del vehículo supondrá una mayor severidad del impacto para sus ocupantes.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tal y como se ha comentado en el resumen de este trabajo, en el mismo se realiza un estudio estadístico sobre la evolución de las matriculaciones y el parque de vehículos ligeros en España, obteniéndose las siguientes conclusiones:

Con relación a la evolución de los vehículos ligeros matriculados por año en España:

- Aquellos de peso inferior a 1.000 kg sólo representan alrededor del 10% del total.
- Los vehículos de peso comprendido entre 1.000 y 1.200 kg representan alrededor del 90%.

Con relación a la evolución del parque de vehículos ligeros en España:

- El parque de vehículos de peso inferior a 1.000 kg ha sufrido un descenso de un 32% en la última década.
- En la evolución entre las cantidades de vehículos en los dos grupos analizados (vehículos de peso inferior a 1.000 kg y vehículos de peso superior a 1.000 kg), se produce un crecimiento de un 20% en 10 años (2007-2016).
- Dos de cada tres vehículos que circulan por las carreteras españolas excede el peso de 1.000 kg, por lo que actualmente los vehículos de peso inferior a 1.000 kg no representan a los vehículos ligeros que mayoritariamente circulan en España.

En base a lo anterior, la principal conclusión de este trabajo es que existe la necesidad de modificar y actualizar la normativa EN 1317 "Sistemas de contención para carreteras" en cuanto a las características especificadas en la misma con relación al vehículo ligero empleado en el ensayo a escala real: "ensayo de control", donde su peso de 900 kg es aproximadamente un 20% inferior respecto al peso del vehículo medio actual.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials in Cooperation with the Federal Highway Administration (1993). Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features (NCHRP 350).
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2009/2016). Manual for Assessing Safety Hardware (MASH).
- Asociación Nacional de Importadores de Automóviles, Camiones, Autobuses y Motocicletas (ANIACAM) (2018). Vehículos matriculados. Recuperado de <http://www.aniacam.com/datos>.
- Asociación Española de la Carretera (AEC) y Área de Prevención y Seguridad Vial de FUNDACIÓN MAPFRE (2015). Contribución de la carretera a la mejora de la seguridad vial en España.
- Dirección General de Tráfico (DGT) (2016). Anuario estadístico de accidentes. Recuperado de www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/publicaciones/anuario-estadistico-accidentes.
- Dirección General de Tráfico (DGT) (2016). Parque de vehículos. Recuperado de www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas.
- European Committee for Standardization (2011). EN 1317-1 Road restraint systems. Part 1: Terminology and general criteria for test methods.
- European Committee for Standardization (2011). EN 1317-2 Road restraint systems. Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets.
- European Committee for Standardization (2007+A2:2012). EN 1317-5 Road restraint systems. Part 5: Product requirements and evaluation of conformity for vehicle restraint systems.
- European Statistical System EUROSTAT (2018). Parque de vehículos. Recuperado de <http://ec.europa.eu/eurostat/web/transport>.

Implantación de técnicas SUDS para la reducción del consumo de agua en el riego de materiales a granel en el puerto de El Musel, Gijón

Implementation of SUDS techniques for the reduction of water consumption in the irrigation of bulk materials in the port of El Musel, Gijón

Rey-Mahía, C.^{1,6}, Sañudo-Fontaneda, L.A.¹, Muñoz-Calero, R.², y Álvarez-Rabanal, F.P.¹

¹ Equipo de investigación de ingeniería UOStormwater, Instituto de Investigación INDUROT, Equipo de investigación GICONSIM, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, España. Emails: UO236881@uniovi.es; sanudoluis@uniovi.es; alvarezfelipe@uniovi.es

² Infraestructuras y conservación, Autoridad Portuaria de El Musel, 33212 Gijón, España.

RESUMEN

La Infraestructura Verde, así como los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), toman cada vez más importancia en las últimas décadas, debido a la necesidad de realizar una gestión eficiente del agua de lluvia. El presente trabajo pretende implantar Pavimentos Permeables (PP), una de las técnicas SUDS más estudiadas y utilizadas del mundo, para poder captar y almacenar el agua de lluvia de forma que se pueda emplear para el riego de mercancías a granel en el puerto de El Musel, Gijón, siendo este uno de los puertos de referencia en España en la gestión de mercancías a granel. Este trabajo constituye una de las primeras experiencias en Europa en la introducción de PP en entornos portuarios.

ABSTRACT

Green Infrastructure and Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS), have become a key tool for design and construction in the last decades, due to the need to achieve an efficient management of rainwater. The present work aims to implement Permeable Pavement Systems (PPS), one of the most developed SUDS techniques in the world, to capture and store rainwater. Then, this water can be reused to irrigate bulk goods in the port of El Musel, Gijón. This Port is one of the main port infrastructures in Spain regarding the management of bulk freight. This work represents a pioneering experience in Spain in the introduction of PPS in port environments.

Palabras clave: Infraestructura Verde; Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS); Pavimentos Permeables (PP); Gestión Portuaria; Gestión Sostenible del Agua de Lluvia.

Keywords: Green Infrastructure; Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS); Permeable Pavement Systems (PPS); Port Management; Water Sensitive Urban Design (WSUD).

1. INTRODUCCIÓN

La Infraestructura Verde toma cada vez más importancia durante las últimas décadas (Woods et al., 2015), este hecho se respalda con la aparición de normativas europeas y nacionales que respaldan el empleo de estas técnicas para mitigar los efectos adversos de las inundaciones y sequías que se han incrementado debido a la radicalización de los fenómenos climáticos (Sañudo-Fontaneda et al., 2018). Dentro de la Infraestructura Verde existen multitud de técnicas, entre todas ellas destacan los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) (Eisenberg et al., 2015), los cuales se emplean para realizar una Gestión Sostenible del Agua de Lluvia (Water Sensitive Urban Design – WSUD – en literatura anglosajona), creando entornos más cómodos y agradables, al tiempo que se controla la cantidad y calidad del agua de escorrentía superficial (Hunt & Waickowski, 2017).

⁶ Carlos Rey Mahía, email: UO236881@uniovi.es



Figura 1. Localización del puerto de El Musel (fuente: Google Maps).

Una de las primeras ciudades de España en las que se implantó, y se toma como referencia en el estudio y desarrollo de esta tecnología es la ciudad de Gijón, en el norte de España. En esta ciudad se encuentra el puerto de El Musel (Figura 1), el cual está considerado como uno de los puertos de referencia a nivel nacional e internacional en el tráfico de mercancías a granel (Serrano-Hidalgo et al., 2015). En el año 2016 el 87,4% en peso de las mercancías que se movieron en El Musel fueron mercancías a granel, las cuales estuvieron constituidas principalmente por carbón, cenizas siderúrgicas y mineral de hierro (Lourido-Artime et al., 2016).

2. METODOLOGÍA

Derivado de la alta intensidad del tráfico de mercancías a granel, se generan nubes de polvo, las cuales llegan a afectar a los habitantes de la ciudad de Gijón, así como a los alrededores de la misma (Figura 2.). Para controlar el efecto de dichas nubes, y evitar así sus efectos adversos sobre la población, se emplea cañones de agua y atomizadores, principalmente en las operaciones de carga y descarga de los buques.



Figura 2. Nubes de polvo en el puerto de El Musel (fuente: El Comercio).

Actualmente el tráfico de mercancías se encuentra dentro de sus magnitudes principales, mientras que los cruceristas y los contenedores están alcanzando récords absolutos (Lourido-Artime et al., 2016). Esto obliga a dotar al puerto de la infraestructura necesaria para poder hacer frente a esta necesidad, al tiempo que se diversifica las actividades del mismo.

En este contexto, este trabajo propone la construcción de una nueva terminal de contenedores en la zona de la ampliación (Figura 3.), diseñándose una terminal automatizada, lo que permitirá mejorar el rendimiento operacional, incrementar la seguridad en las operaciones y contribuirá a la sostenibilidad ambiental (Martín-Soberón et al., 2015 y Bruinsma, J., et al. 2017).



Figura 3. Zona en la que se ubicará la nueva terminal de contenedores (fuente: elaboración propia).

La nueva terminal de contenedores se equipará con SUDS de tal forma que se pueda recuperar el agua de lluvia, reduciendo así el consumo del agua potable destinada al riego de las mercancías a granel y minimizando así el impacto ambiental. En última instancia se permitirá reducir costes de operación al puerto, haciéndolo así más competitivo. Debido a las características del entorno, así como de las prestaciones necesarias, y a la necesidad que optimizar el espacio disponible, se considera que los Pavimentos Permeables (PP) son la técnica SUDS más adecuada.

Los PP son una de las técnicas SUDS más completas, ya que permiten la captación, transporte y almacenamiento del agua de lluvia (Rodríguez-Hernandez et al., 2011). Existen antecedentes del diseño y construcción de firmes permeables capaces de resistir altas solicitaciones debidas a la circulación de vehículos pesados sobre ellos (Woods Ballard et al., 2015), existiendo varios casos de aplicación de firmes permeables en aeropuertos (Bruinsma et al. 2017), en cambio no existen muchos casos de aplicación a entornos portuarios, aunque si viene recogida la aplicación de los mismos en normativa de referencia tales como los British Standards o la ASCE.

Uno de los pocos casos existentes en el mundo de aplicación de firmes permeables a entornos portuarios, se trata del puerto de Nueva York en EEUU, en el cual se construyó una nueva terminal de contenedores en el año 2004, con una superficie adoquinada total de 5,3 ha, de las cuales 0,1 ha se correspondía a adoquines en disposición permeable (Figura 4.), que permitían el almacenamiento del agua en la sub-base del mismo (Sieglén & Langsdorff 2004). Esta primera experiencia resaltó el hecho de que siempre que se instale una superficie permeable se debe ejecutar un correcto mantenimiento para la conservación del mismo (Rodríguez-Hernandez et al., 2011, Woods Ballard et al., 2015 y Sehgal et al. 2018). Esta experiencia con la introducción de firmes permeables constituidas con adoquines se podría extrapolar a El Musel, así como a cualquier otro puerto español, dado que las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) recoge el empleo de superficies adoquinadas en entornos portuarios, y fija las condiciones que estos deben de cumplir.



Figura 4. Superficie permeable en el puerto de Nueva York (fuente: Sieglén & Langsdorff 2004).

3. RESULTADOS ESPERADOS

La construcción de la nueva terminal de contenedores automatizada, unido a la introducción de las técnicas SUDS, permitirá no solo reducir el consumo de agua que se emplea actualmente para el riego de materiales a granel, sino que posicionará a El Musel como un puerto de referencia tanto en el tráfico de mercancías a granel, como en el de contenedores. Esta experiencia pionera, desarrollará un nuevo paradigma en la gestión portuaria, así como en el aprovechamiento del agua de lluvia para el empleo en entornos portuarios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo y la financiación ofrecida al equipo de investigación UOStormwater de la Universidad de Oviedo a través del proyecto con referencia PAPI-17-PEMERG-22, y al Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA) a través del proyecto IDEa_SuDS con referencia SV-18-GIJÓN-1-23. También agradecer el apoyo financiero proporcionado FICYT a través del proyecto GRUPIN Ref. IDI/2018/000221, cofinanciado con fondos FEDER de la UE.

REFERENCIAS

- Bruinsma, J., et al. (2017). Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports.
- Delfín-Ortega, O.V., Lenin-Navarro, J.C. (2014). Productividad total de los factores en las terminales de contenedores en los puertos de México: una medición a través del índice Malmquist.
- Martín-Soberón, A.M., Monfort, A., Sapiña, R., Monterde, N., Calduch, D. (2014). Automation in port container terminals.
- Sañudo-Fontaneda, LA., Rodríguez-Hernández, J., Castro-Fresno, D. (2012). Diseño y Construcción de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS).
- Serrano-Hidalgo, O., et al. (2015). Guía de Buenas Prácticas en la Manipulación y Almacenamiento de Graneles Sólidos en Instalaciones Portuarias. Puertos del Estado. Ministerio de Fomento.
- Sehgal, K., Drake, J., Van Seters, T., Vander-Linden, W.K. (2018). Improving Restorative Maintenance Practices for Mature Permeable Interlocking Concrete Pavements.
- Sieglen, W.E., Langsdorff, H. (2004). Interlocking Concrete Block Pavements At Howland Hook Marine Terminal.
- Lourido-Artime, L., et al. (2015). Puerto de Gijón Memoria Anual 2016. Autoridad Portuaria de Gijón.
- Woods Ballard, B., Udale-Clark, H., Illman, S., Ashley, R., Kellagher, R. (2015). The SuDS manual. CIRIA 753. CIRIA, London, UK.
- Eisenberg B., Collins-Lindow K., Smith D.R. (2015). Permeable Pavements.
- Hunt, B., Waickowski, S. (2017). Stormwater Design Manual, North Carolina.
- Rodríguez-Hernández, J., Castro-Fresno D., Calzada-Pérez M.A., Vega-Zamanillo A. (2011). Firms permeables.

Aprovechamiento de residuos siderúrgicos como elemento reductor de ruido en obras civiles

Application of slags as noise abatement measure in civil construction

Díaz Piloñeta, M.¹, Ortega Fernández, F.¹ y Morán Palacios, H.¹

¹Grupo de Investigación en Ingeniería de Proyectos, E. P. de Mieres, Universidad de Oviedo.

RESUMEN

El actual modelo de producción y gestión de recursos que busca potenciar un consumo a corto plazo está llevando al planeta a una situación insostenible, por lo que cada vez más, los gobiernos de todo el mundo tienden a adoptar medidas respetuosas y sostenibles con el medio, persiguiendo los principios de la economía circular. Partiendo de esta base, el presente trabajo plantea aplicar estos principios a uno de los residuos mayoritarios generados en la industria: las escorias. Cada año se generan en Europa 45 millones de toneladas de escoria siderúrgica, gran parte de las cuales son almacenadas o enviadas a vertedero, por lo que es necesario el desarrollo de soluciones para su valorización. Aunque tradicionalmente las escorias tenían salida en el campo de la construcción, la caída del sector ha provocado un excedente que es necesario cubrir. Esta situación coincide en el tiempo con la necesidad de dar solución a otro de los problemas medioambientales cada vez más presentes en la sociedad: el ruido. Teniendo en cuenta este hecho y la cantidad de residuos siderúrgicos generados en la provincia, el presente trabajo persigue introducir los principios de economía circular mediante la valorización de las escorias, planteando su aplicación como material base en la construcción de medidas contra el ruido.

ABSTRACT

The current model of production and management of resources that seeks to promote rapid consumption is leading the planet to an unsustainable situation. Because of this, governments around the world tend to adopt measures that are respectful and sustainable with the environment, implementing the principles of the circular economy. Based on this, the present work proposes to apply these keys to one of the majority wastes generated in the industry: slags. Each year, about 45 million tonnes of ferrous slag (iron and steel slag) is generated in Europe and a large part of them is sent to landfill, so it is necessary to develop solutions for its recovery. Although traditionally blast furnace slag was reuse in the field of construction, the crush of the sector has caused an excess that needs to be covered. This situation coincides in time with the need to provide a solution to another increasingly environmental problem: noise. Taking into account this fact and the amount of this waste generated, this paper proposes the use of slags as raw material in the construction of noise abatement measures.

Palabras clave: economía circular; residuos siderúrgicos; ruido; ingeniería civil.

Keywords: circular economy; iron and steelmaking waste; noise; civil engineering.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de producción lineal basado en “tomar-fabricar-consumir-eliminar” es agresivo con el medio y las estimaciones actuales muestran cómo siguiendo con este sistema no tardarán en agotarse las fuentes de suministro, tanto materiales como energéticas. Además, tiene una fuerte dependencia de las materias primas, lo que conlleva un riesgo asociado al suministro, precios elevados y con mucha volatilidad. Es por ello que cada vez más, los países desarrollados están adoptando políticas para promover un cambio hacia la llamada economía circular, que pretende desvincular el crecimiento económico del consumo finito de recursos (Espaliat Canu, M., 2012). Así, se extraen materias primas, se fabrican productos y de los residuos generados se recuperan materiales y sustancias que posteriormente se reincorporan de nuevo al proceso productivo.

La industria siderúrgica pertenece a un sector industrial que produce una elevada cantidad de residuos. Dentro de éstos, los residuos más importantes en cuanto a volúmenes generados son las escorias. En el proceso se generan tres tipos principales (Worldsteel Association, 2018): escoria de horno alto (BF), escoria de convertidor (BOF o LD) y la escoria de horno de arco eléctrico (EAF). Dichos residuos suponen a nivel mundial más de 400 millones de toneladas al año (Euroslag: Statistics, 2016). En el caso de Europa, se estima que la producción anual de escorias ascendió en 2016 a casi 45 millones de toneladas, de las cuales más del 57% fueron escorias de alto horno (Euroslag: Statistics, 2016).

Los únicos hornos altos existentes en España se encuentran en Gijón (Asturias) en los que se producen aproximadamente 590.000 toneladas anualmente (Gobierno del Principado de Asturias, 2008), la

mayoría de ellas enviadas a vertedero. Durante el año 2010 se produjeron 3.992.921 toneladas de arrabio, generando un total de 1.201.518 toneladas de escorias BF, lo que representa un problema de almacenamiento y medioambiental (CEDEX, 2011). El objetivo principal de este trabajo es el diseño de nuevas aplicaciones que permitan valorizar las escorias BF dentro del ciclo de suministro de materias primas de modo que, en consonancia con los criterios de economía circular, el material sea aprovechado en aplicaciones relevantes en otros sectores.

2. PROBLEMÁTICA DEL RUIDO

Los criterios fijados para la búsqueda de posibles aplicaciones se centraron en la no necesidad de tratamiento del material y el aprovechamiento de todas las granulometrías, empleando el mayor volumen posible en entornos cercanos. Cumpliendo con estos requisitos se encuentran las aplicaciones ligadas al campo ambiental y civil, dentro de las cuales destaca cada vez más otra problemática medioambiental: el ruido. La mayoría de las infraestructuras actuales incumplen las normativas vigentes de ruido, tanto a nivel europeo como a nivel nacional.

La contaminación acústica ya es reconocida como un verdadero problema medioambiental y de salud pública, clasificada en segundo lugar después de la contaminación atmosférica (WHO & JRC European Commission, 2011). Europa es el líder mundial en gestión y control del ruido. La Directiva de la Unión Europea sobre el ruido ambiental (2002/49/CE) obliga a todos los países miembros a la realización de Mapas Estratégicos de Ruido para cuantificar el nivel de exposición, a partir de los cuales se deben elaborar Planes de Acción para prevenirlo y reducirlo. A nivel nacional, la Ley de Ruido 37/2003 establece unos umbrales en función de los diferentes usos del suelo y las personas afectadas, aunque son menos restrictivos que los recomendados por la OMS y los fijados por la UE.

Las principales fuentes de este tipo de contaminación son las infraestructuras de transporte, como carreteras, ferrocarriles o aeropuertos, así como las zonas industriales, aunque es, sin duda, el ruido del tráfico rodado el que produce el mayor impacto (EUR-Lex, 2011). Se estima que el 55 % de las personas que viven en zonas urbanas de más de 250.000 habitantes en la UE están expuestos a niveles diarios de ruido de las carreteras superiores a los límites establecidos por la Directiva 2002/49/CE (European Environment Agency (EEA), 2009).

3. MEDIDAS REDUCTORAS DE RUIDO

Las políticas existentes en materia de reducción del ruido, se centran en tres enfoques principales: la reducción del ruido en la fuente, la limitación de la transmisión mediante la colocación de barreras entre la fuente y las personas afectadas y la reducción del ruido en el punto de recepción, por ejemplo, mediante el aislamiento acústico de los edificios (Echazarreta, F., 2007).

En Asturias, las tres rondas de elaboración de Mapas Estratégicos y Planes de Acción llevadas a cabo hasta la fecha proponen la ejecución de barreras acústicas como medida principal de reducción de la propagación del ruido, sin embargo, en muy pocas zonas se han llegado a ejecutar realmente. En la Tabla 1 se resumen los costes de ejecución de las pantallas planteadas a lo largo de los ejes viarios que no cumplen con los requisitos de calidad acústica identificados en la última Ronda de Acción (Berger, L., 2017). En dicho plan, se dividió la prioridad de implantación en alta, media o baja según los niveles de exposición y los costes fueron calculados teniendo en cuenta pantallas tipo (estructurales de metal o vidrio) de 3 metros de altura con un precio unitario de 300 €/m².

Tabla 1. Resumen de ejecución de pantallas propuestas en el Plan de Acción de la Ronda 3 (2017-2022).

Prioridad	Longitud pantallas (m)	Personas beneficiadas	Coste (€)	Coste/ persona
Alta	4.293	3.927	5.313.121	1.352 €/persona
Media	2.134	454	1.170.750	2.578 €/persona
Baja	1.768	92	1.512.750	16.442 €/persona
TOTAL	8.195	3.607	7.996.621 €	2.607 €/persona

Teniendo en cuenta este nicho de mercado y la cantidad de residuos siderúrgicos generados en la provincia de Asturias, se plantea el aprovechamiento de la escoria de horno alto, al representar los mayores volúmenes de producción, como material empleado en las medidas de reducción del ruido,

principalmente para la construcción de pantallas acústicas.

4. PROPUESTA DE BARRERA ACÚSTICA

Dentro de las posibles tipologías de barreras, las pantallas acústicas convencionales, formadas por elementos generalmente verticales de metal o vidrio, son las más empleadas por su facilidad de ejecución y bajo coste. Sin embargo, llevan asociados problemas de mantenimiento (suciedad, corrosión, aparición de grafitis) y no consiguen una correcta integración ambiental. Por ello, cobran mayor relevancia las infraestructuras verdes, que desempeñan un papel fundamental en la adaptación al cambio climático, afectando a la regulación de la temperatura, al aumento de la biodiversidad y a la reducción de la contaminación atmosférica (European Environmental Agency, 2016).

Las construcciones mixtas tienen la mejor optimización de reducción de ruido en relación con el espacio ocupado. Dentro de éstas destacan los muros verdes, formados por una malla de acero rellena de material granular (Dirección General de Carreteras, 1995). Son barreras multifuncionales, cuyo uso no se limita al aislamiento acústico, sino que también pueden ser empleadas como barreras de retención de polvo u otros contaminantes atmosféricos, representando así una solución para diferentes aspectos medioambientales. La barrera acústica planteada es un muro verde, con escoria de alto horno como material de relleno, envuelta en una malla metálica (u otro tipo de estructura soporte, como chapa). De esta forma, se unifica un material de primera línea de producción, el acero, con uno de los principales residuos generados en su fabricación, las escorias.

Para el diseño se ha tenido en cuenta, en primer lugar, el nivel de ruido. Como no hay dos zonas iguales, se ha optado por una barrera modular, con la finalidad de posibilitar su adaptación a diferentes entornos y emplazamientos. Para la determinación de las medidas geométricas, se siguieron las recomendaciones de altura y longitud de la Dirección General de Carreteras (1995). Al tratarse de una solución modular, la barrera cuenta con un metro de longitud, pudiendo acoplar varios módulos para alcanzar longitudes mayores, y 2 metros de altura, con posibilidad de ampliación hasta 4 metros en las zonas donde sea requerido. Gracias al elevado peso específico que proporciona la escoria (3 t/m³) y la reducida altura de la pantalla, no es necesario ningún tipo de cimentación, dando como resultado una pantalla autoportante con facilidad y rapidez de ejecución.

La Figura 1 representa la barrera propuesta. Tiene forma trapezoidal, con la cara frontal inclinada orientada hacia la fuente de ruido, donde la escoria está envuelta en una malla electrosoldada. La estructura dispone de elementos de apariencia textil recubriendo todas las caras (capas geotextiles, fibras de coco, u otras) para proporcionar una apariencia estética agradable. A su vez, en el pie o coronación de la barrera, crece material biológico por la cara frontal, aumentando su capacidad de amortiguación sonora, y favoreciendo la absorción de CO₂ del entorno. Para el dimensionamiento de la malla se ha empleado la teoría de empujes de Coulomb que incluye el efecto de fricción del material con el muro y es aplicable a cualquier inclinación de muro (Vallejo, 2002).

En función de las dimensiones y características de la pantalla, se ha elaborado un presupuesto estimado de su construcción e implantación que asciende aproximadamente a 140€ como coste unitario. La vegetación se ha seleccionado en función del clima de la zona, con la finalidad de asegurar la supervivencia de la planta sin necesidad de ningún tipo de riego o mantenimiento adicional. La ejecución de la barrera propuesta en lugar de las planteadas en el Plan de Acción de la Tercera Ronda, supondría un ahorro de 3.518.513€ y la reutilización de 24.340 toneladas de escoria.

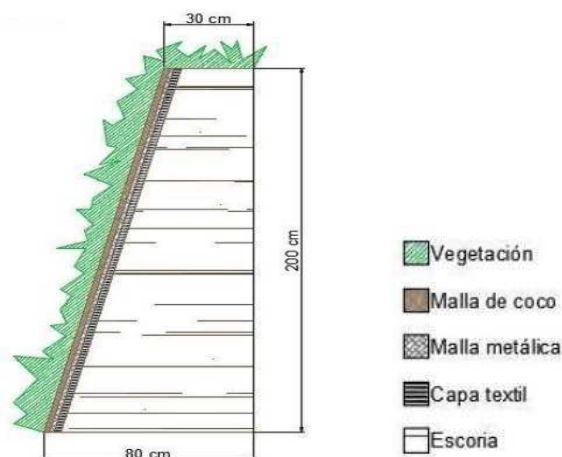


Figura 1. Vista en perfil de la barrera propuesta.

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El uso de la escoria como material base implica, no solo ahorro económico, sino que contribuye a resolver un problema medioambiental asociado a la construcción de las pantallas convencionales, al sustituir las materias primas derivadas de su fabricación por un residuo, disminuyendo la necesidad de extracción y agotamiento de nuevos recursos. Como líneas futuras sería necesario la realización de los ensayos de comportamiento acústico y no acústico para su puesta en mercado.

REFERENCIAS

- Berger, L. (2017). Plan de Acción de los Mapas Estratégicos de ruido de las carreteras de la Red Autonómica del Principado de Asturias con tráfico superior a 3 millones de vehículos al año: Fase III. Gobierno del Principado de Asturias.
- CEDEX. (2011). Escorias de horno alto (Ficha Técnica).
- Dirección General de Carreteras. (1995). Las pantallas acústicas. En Reducción del ruido en el entorno de las carreteras (pp. 125-169). Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Echazarreta, F. (2007). Medidas preventivas y correctoras del ruido de tráfico. EOI, 38.
- EUR-Lex. (2011). Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive 2002/49/EC (COM 321 final). Brussels.
- European Environment Agency (EEA). (2009). Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union (EEA Report). Dinamarca.
- European Environmental Agency (EEA). (2016). Urban adaption to climate change in Europe 2016 (EEA Report No. 12/2016) (p. 140). Luxemburgo.
- Euroslag: Statistics. (2016). Recuperado 8 de mayo de 2018, de <http://www.euroslag.com/products/statistics/2016/>
- Espaliat Canu, M. (2012). Introducción a los principios de la economía circular y de la sostenibilidad. Instituto Técnico Español de Limpieza (ITEL).
- Gobierno del Principado de Asturias (2008): Boletín N° 140 del martes 17 de junio de 2008.
- Vallejo, L. I. G. de. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.
- WHO, & JRC European Commission. (2011). Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe.
- Worldsteel Association. (2018). Fact Sheet. Steel industry by-products.

Importancia de los elementos geométricos de mina en la modelización numérica de flujo de una explotación subterránea de carbón inundada

Importance of geometrical mine elements in the groundwater flow modelling of a flooded coal mine

Calvo Buelga, L.^{1,7}, González Quirós, A.¹ y Fernández-Álvarez, J. P.²

¹Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos, Universidad de Oviedo, C/Gonzalo Gutiérrez Quirós S/N, Mieres.

²Departamento de Explotación de Minas, Universidad de Oviedo, C/Independencia 13, Oviedo.

RESUMEN

En la Cuenca Carbonífera Central Asturiana se pretende llevar a cabo el aprovechamiento energético por medio de la geotermia de distintas minas subterráneas de carbón inundadas. Para conocer su viabilidad se ha propuesto el desarrollo de modelos hidrogeológicos de flujo y transporte de calor, cuya construcción precisa de tareas previas entre las que destacan el análisis de la información existente y la conceptualización del sistema minero con un enfoque hidrológico. La escasez de datos, junto con otros problemas como el desconocimiento del estado actual del interior de la mina, hace que exista una gran incertidumbre a la hora de representar los elementos que forman la mina en el modelo numérico. Con el objetivo de desarrollar una estrategia de modelización hidrogeológica de este tipo de explotaciones, se realiza un estudio acerca de los elementos más relevantes de la geometría minera que se han de tener en cuenta en el modelo numérico de flujo.

ABSTRACT

In the Asturian Central Carboniferous Basin it is intended to carry out the energetic exploitation of different flooded underground coal mines by means of geothermal energy. To evaluate its viability, it has been proposed the development of hydrogeological models of flow and heat transport, whose construction requires previous tasks, like the analysis of existing information and the conceptualization of the mining system with a hydrological approach. The scarcity of data along with other problems, such as the lack of knowledge of the current state of the interior of the mine, entails that there is great uncertainty in representing the elements of the mine in the numerical model. With the objective of developing a hydrogeological modelling strategy for this type of exploitation, it is performed a study of the most relevant elements of mining geometry, which must be considered in the numerical flow model.

Palabras clave: modelización numérica; ingeniería; minería subterránea; modelo conceptual de flujo;

Keywords: numerical modelling; engineering; underground mining; conceptual flow model;

1. INTRODUCCIÓN

En la zona central de Asturias se ubican muchas explotaciones subterráneas de carbón (más de 60 minas de valle) con una profundidad media de 500 m. En el pasado, estas minas requerían un alto coste de mano de obra debido a la complejidad geológica de la Cuenca Carbonífera Central Asturiana. En un contexto europeo de reconversión, se ha procedido a la clausura de las minas no rentables a finales de 2018, (European Commission, 2010). Una vez cerradas, algunas cesan los bombeos y se inundan de manera natural. Distintos estudios (Preene & Younger, 2014; Peralta et al, 2015) muestran la posibilidad de aprovechar el calor del agua de estos embalses subterráneos por medio de la geotermia, convirtiendo las minas de carbón en minas de calor (Díaz Noriega, 2017).

Los modelos numéricos de flujo y calor son herramientas útiles en el análisis y comprensión de la dinámica de flujo en zonas subterráneas alteradas por minería, pues dan una idea de los caminos preferenciales que sigue el agua en distintos escenarios considerados. Esto es útil en diferentes campos de estudio como la geotermia, la explotación de gas metano o el almacenamiento de CO₂.

Para construir un modelo numérico es necesario partir de un modelo conceptual previo en el que se hayan definido las condiciones de contorno, las características del dominio a estudiar y los elementos relevantes en el mismo. Según Voss (2011), se necesita emplear un tiempo de calidad a plantear qué es lo realmente importante en el problema, ya que los modelos son representaciones matemáticas subjetivas del modelizador acerca del comportamiento del sistema. Así, los resultados obtenidos en el modelo numérico están influenciados en gran medida por el modelo conceptual de partida. Por tanto,

⁷ Luis Calvo Buelga, email: luis.calvo@hydrogeophysicsndt.com

el objetivo principal de este trabajo es el de describir, analizar e interpretar los distintos elementos geométricos que deberían considerarse en el modelo conceptual de una mina subterránea de carbón.

2. GEOMETRÍA DE UNA MINA SUBTERRÁNEA DE CARBÓN

Las minas subterráneas están formadas por una serie de galerías de acceso y zonas de explotación de las capas de carbón, que componen su geometría y reciben el nombre de labores mineras. Las distintas galerías van en busca de las capas de carbón a explotar, y por ellas se produce la extracción del mineral y el flujo del personal de trabajo. Una vez abandonada la mina, la geometría y el estado de las labores juegan un papel fundamental durante su inundación y posterior mantenimiento.

En la Cuenca Carbonífera Central, las capas de carbón presentan una importante inclinación debido a su estructura geológica (casi verticales), por lo que son necesarios métodos de explotación adaptados que permitan el trabajo de extracción a distintos niveles (división de la mina en plantas). De entre todos los elementos de una mina subterránea se pueden distinguir los siguientes (Figura 1):

- **Pozo vertical.** Principal entrada y salida de la explotación. Se eleva el carbón hacia la superficie.
- **Transversales.** Conductos que se encuentran unidos a la caña del pozo vertical y atraviesan perpendicularmente las capas de carbón a explotar. Por ellos se produce la salida del material hacia la caña del pozo y la entrada del personal hacia los talleres de explotación.
- **Galerías generales.** Galerías en roca estéril que permiten el acceso a partes de la mina que no se comunican directamente con los transversales principales. Pueden ir paralelas a las guías de explotación en capa para la extracción del mineral (conectadas mediante recortes).
- **Guías en capa.** Se trata de galerías como las anteriores, pero realizadas en las propias capas de carbón. Las guías en capa de dos plantas (superior e inferior) se comunican por medio del taller correspondiente a dicha capa.
- **Talleres.** Comunicación entre las guías en capa de dos plantas (superior e inferior) al extraer el carbón. Posteriormente se rellenan con material estéril o acaban hundiéndose, con lo que el hueco se ve reducido (depende en gran medida del método de explotación).
- **Otros,** como pueden ser planos inclinados (conexiones entre plantas a distinto nivel) o tabiques (en algunas minas se sellan determinadas galerías con muros, lo que influye en su inundación).

3. CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

Para representar de una forma adecuada los anteriores elementos geométricos es necesario definir su relevancia en el modelo y su comportamiento hidráulico. Este último implica plantear el funcionamiento del agua en el interior de la mina. En la conceptualización propuesta, el agua procedente de la precipitación se infiltra por el macizo hasta alcanzar las labores mineras, por las que se dirige hacia el pozo vertical en el que están instaladas una serie de bombas. En función del objetivo perseguido en la modelización, las hipótesis iniciales y las simplificaciones realizadas pueden variar. Un modelo útil y adecuado para un objetivo en concreto no tiene por qué serlo para otro diferente.

En función del propósito del modelo numérico y de la escala de trabajo (tanto espacial como temporal), pueden existir diferentes conceptualizaciones del problema real. Por ejemplo, para estudiar la relación hidráulica entre dos explotaciones mineras subterráneas se puede interpretar la mina como un medio poroso equivalente de alta permeabilidad (como una esponja alterada por la actividad minera), o bien utilizar una aproximación geométrica (volúmenes de material alterado e interconectado) más simple que la original.

Sin embargo, la anterior estrategia no es útil a la hora de estudiar la dinámica de flujo en el interior de una única mina, puesto que la escala de trabajo ha cambiado con el objetivo. Para ello se deben tener en cuenta elementos geométricos internos más complejos, descritos en el anterior apartado. Así, el medio poroso alterado se sustituye por un conjunto de líneas y planos de flujo libre, correspondientes a las principales galerías y talleres explotados respectivamente.

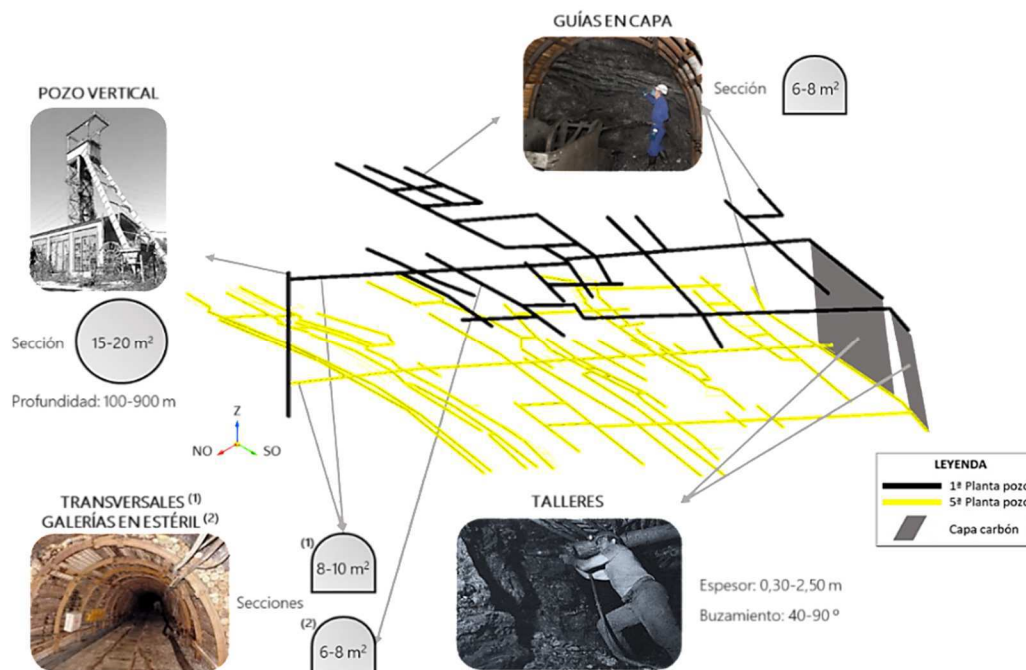


Figura 1. Vista en 3D de las labores simplificadas del Pozo Lláscares (Langreo, Asturias). Se indican los elementos geométricos principales de la mina (modificado de planos de labores HUNOSA).

Las galerías se representan mediante geometrías 1D, a las que se les atribuyen distintas secciones transversales en función del tipo de elemento (véase Figura 1). Así, se consigue simular una red de tuberías por las que a priori se darán los flujos preferenciales de agua. Por otro lado, los talleres se representan mediante geometrías 2D, y se definen distintas características como espesores, porosidades o conductividades hidráulicas. Estas últimas son función de la potencia de la capa de carbón, el método de explotación utilizado, el material de relleno o la proximidad de otras capas. Estos planos constituyen conexiones entre distintas plantas de la mina a través de los talleres.

En la Figura 2 se pueden observar los tipos de geometrías que se han diferenciado en este trabajo y sus posibles simplificaciones, útiles en modelos numéricos por razones de mallado o capacidad computacional. La interpretación en el modelo de los elementos geométricos que lo forman es una parte fundamental del proceso de conceptualización, y pueden entenderse como medios porosos equivalentes (material alterado o talleres), fracturas (planos de falla) o redes de tuberías (galerías mineras). Dependiendo del tipo de geometría considerada se utilizan distintas leyes físicas que describen su comportamiento hidráulico, que depende del tipo de acuífero estudiado (libre o confinado), del tipo de flujo que se dé en cada elemento (laminar o turbulento) y de los parámetros relevantes que los caracterizan (conductividades hidráulicas, espesores, secciones, etc.).

	Medio alterado	Conductos	Talleres
Geometría compleja			
Geometría simplificada			
Interpretación en el modelo	Medio poroso Fracturas	Red de tuberías Conductos	Medio poroso Fracturas Hundimiento
Ley física	Darcy / Richards / Brinkman	Manning / Brinkman / Darcy Weisbach	Darcy (Fracture Flow) / Brinkman
Parámetro relevante	Conductividad hidráulica	Caracterización de los conductos	Espesor / Posición / Conductividad hidráulica

Figura 2. Conceptualización de los elementos geométricos de una mina.

4. RESULTADOS

El modelo numérico de flujo de un sistema hidrogeológico es el resultado último de todo un largo proceso de modelización. La parte más importante de este trabajo tiene relación con la conceptualización del problema y el análisis de la información disponible. Es fundamental realizar una traducción de las condiciones relevantes que se dan en la realidad y así representarlas en el modelo numérico (Figura 3). Dicha relevancia depende esencialmente del objetivo perseguido.

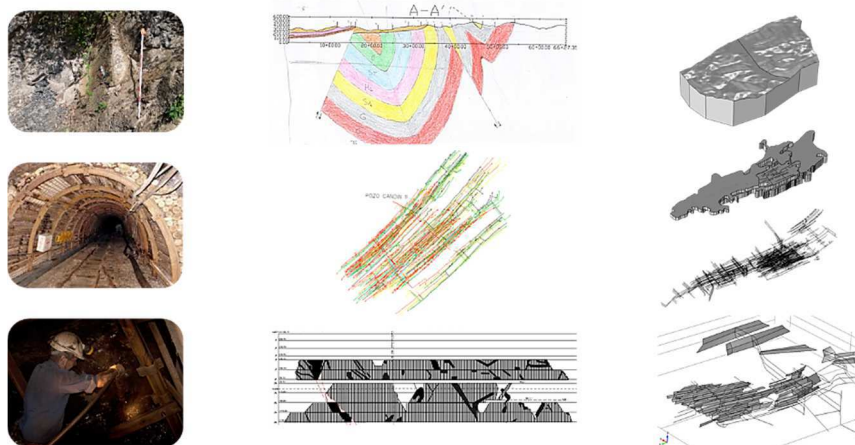


Figura 3. Realidad-Conceptualización-Modelo numérico. Proceso de trabajo en modelización.

En la siguiente imagen se muestran distintos resultados obtenidos mediante el software de simulación *Comsol Multiphysics®*. En la Figura 4-a se puede distinguir la geometría (izda.) y los resultados de piezometrías (dcha.) de un modelo simple. En este tipo de modelos se realizan pruebas de geometrías y físicas en el simulador, con el objetivo de comprender el comportamiento de cada nuevo elemento por separado antes de pasar a modelos más complejos.

En la Figura 4-b se exponen ejemplos de resultados de piezometrías (izda.) y velocidades de flujo (dcha.) de un modelo numérico complejo, aplicado a una mina asturiana inundada.

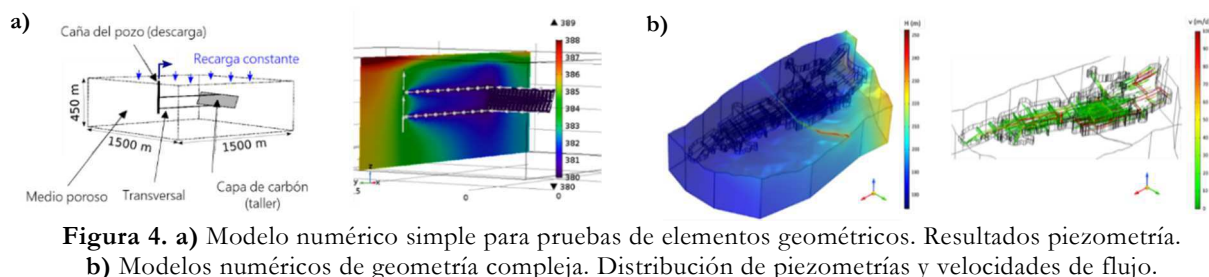


Figura 4. a) Modelo numérico simple para pruebas de elementos geométricos. Resultados piezometría.
b) Modelos numéricos de geometría compleja. Distribución de piezometrías y velocidades de flujo.

Los trabajos de conceptualización expuestos en este trabajo son resultados en sí mismos del transcurso de la modelización, y facilitan enormemente el desarrollo y construcción de modelos numéricos de flujo en minas subterráneas clausuradas con elementos geométricos similares.

REFERENCIAS

- Díaz Noriega, R. (2017). Desarrollo metodológico para la caracterización geotérmica de minas subterráneas, conceptualización y modelización numérica. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo.
- European Commission (2010). Council decision of 10 December 2010 on state aid to facilitate the closure of uncompetitive coal mines (2010/787/EU). Official Journal of the European Union.
- Peralta, E., Breede, K. & Falcone, G. (2015). Geothermal heat recovery from abandoned mines: a systematic review of projects implemented worldwide and a methodology for screening new projects. *Environmental Earth Sciences*, 73(11), 6783–6795.
- Preene, M. & Younger, P. L. (2014). Can you take the heat? Geothermal energy in mining. *Mining Technology*, 123(2), 107–118.
- Voss, C. I. (2011). Groundwater modeling fantasies. Part 1: adrift in the details. Part 2: down to earth. *Hydrogeology Journal*, vol. 19, pp.1281-1284, 1455-1448.

Tomografía eléctrica resistiva sobre láminas mediante elementos finitos y modelos a escala: optimización de la metodología de medición

Electrical Resistivity Tomography on sheets by means of finite elements and scaled models: optimization of the measurement methodology

Rubio Melendi, D.^{1,8}, Cimadevilla Fuente, D.¹ y Fernández-Álvarez, JP.¹

¹Unidad de modelización hidrogeofísica y ensayos no destructivos, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

Los métodos de tomografía eléctrica resistiva (ERT/EIT) son aplicados en la actualidad al subsuelo, estructuras 3D e, incluso, al cuerpo humano. Permiten localizar zonas de resistividad eléctrica anómala. En estructuras de hormigón aparecen problemas: la alta resistividad del hormigón (limita la inyección de corriente); la alta conductividad de las armaduras (dominan la conducción eléctrica); y las fuertes variaciones de resistividad al variar el contenido en humedad (habitual en estructuras en exterior). Los recubrimientos conductivos, en forma de láminas o pinturas, abren la puerta a tomografías 2D centradas, únicamente, en la superficie de la estructura. No aportan información sobre el interior del objeto, pero son capaces de detectar grietas superficiales. En este trabajo se desarrolla una metodología de modelización directa por el método de elementos finitos, comprobadas con modelos reales a escala, y se proponen distribuciones de electrodos sencillas que permitan detectar un tipo de defecto con un número de medidas mínimo.

ABSTRACT

The methods of resistive electrical tomography (ERT / EIT) are currently applied to the subsoil, 3D structures and even to the human body. They allow to locate areas of anomalous electrical resistivity. In concrete structures problems appear: the high resistivity of concrete (limits the injection of current); the high conductivity of the reinforcement bars (they dominate the electrical conduction); and the strong variations of resistivity when varying the moisture content (usual in outdoor structures). Conductive coatings, in the form of sheets or paints, open the door to 2D tomography centered only on the surface of the structure. They do not provide information about the interior of the object, but they are able to detect surface cracks. In this work, a methodology of direct modelling by the finite element method is developed, verified with real scale models, and simple electrode distributions are proposed to detect a type of defect with a minimum number of measurements.

Palabras clave: ERT; EIT; sensor skin; piezorresistividad.

Keywords: ERT; EIT; sensor skin; piezorresistivity.

1. INTRODUCCIÓN

La tomografía eléctrica resistiva (ERT) es un método empleado en la caracterización del subsuelo mediante la capacidad del mismo de conducir la corriente eléctrica (Reynolds, 2011). Esta conductividad depende de los materiales y de su contenido en humedad. Para tener medidas distribuidas, y no sólo puntuales, se colocan una serie de electrodos clavados en el suelo y se inyecta corriente por varios pares de ellos. Durante la inyección de corriente se mide el potencial entre otros pares de electrodos. Existen distintos tipos de secuencias (o dispositivos) más o menos sensibles a distintos tipos de estructuras o profundidades. Las medidas tomadas en campo se utilizan en un proceso de inversión que calcula un modelo de resistividades cuya salida coincida con las medidas.

En el ámbito médico se utiliza una técnica similar, la tomografía de impedancia eléctrica (EIT). La técnica es análoga a la ERT, pero la disposición de los electrodos no es, típicamente, en líneas. En EIT suelen utilizarse dispositivos con los electrodos colocados alrededor del pecho (Holder, 2004). Del mismo modo, se requiere un proceso de inversión para convertir las medidas en una distribución aproximada de resistividades del cuerpo.

La ERT se emplea en estructuras de hormigón, pero presenta ciertos problemas. La resistividad del hormigón es alta, haciendo difícil la inyección de corriente. Las armaduras metálicas conducen la mayor parte de la corriente, enmascarando los efectos producidos por defectos en el hormigón. Además, las variaciones de humedad por la exposición a la intemperie modifican fuertemente la resistividad de las

⁸ David Rubio Melendi, email: david@hydrogeophysicsndt.com

muestras (Karhunen, Seppänen, Lehtikoinen, Monteiro, & Kaipio, 2010).

Los recubrimientos sensóricos (conductivos, piezoeléctricos, piezorresistivos, etc.) abren la puerta a las tomografías 2D sobre la superficie de estructuras, tanto de hormigón como de cualquier otro material. Las tomografías 2D no informan sobre el interior de la muestra, sin embargo, son capaces de detectar grietas en la superficie (Hallaji, Seppänen, & Pour-Ghaz, 2014). El proceso de tomografía requiere una gran cantidad de electrodos en la superficie.

La técnica ha demostrado la capacidad para detectar pequeñas grietas, y localizarlas con bastante precisión. Sin embargo, la necesidad de un elevado número de medidas para una tomografía lleva a la necesidad de utilizar aparatos de muchos canales (electrodos) y tiempos de medida largos. Además, resulta interesante mejorar las capacidades de medida para intentar detectar defectos más leves, previos al agrietamiento o cuando este es muy inicial.

Los métodos de inversión para la tomografía 2D requieren un coste de computación importante, y están, en muchos casos, desarrollados para aplicaciones convencionales. En este trabajo se muestra los primeros pasos (modelos directos) para desarrollar un sistema de inversión flexible en cuanto a dispositivos de medida, geometrías, etc.

2. METODOLOGÍA

Se modeliza en Comsol Multiphysics® (COMSOL, 2012) una lámina de 33 cm x 52 cm con una resistencia de placa de 1 k Ω . Sobre los bordes largos se añaden dos barras de material muy conductivo (metal) que harán de electrodos de inyección de corriente. Se simula una anomalía conductiva por un cuadrado de 5 cm de lado en el interior de la lámina. Esta anomalía se mueve en diferentes direcciones y se estudian las variaciones en el campo de potencial (ver Figura 1). El potencial se calcula en todos los puntos del dominio, pero sólo se estudiará en uno de los bordes cortos libres. Esto pretende simular el uso de electros únicamente en ese borde.

Se imponen condiciones de contorno de flujo nulo en los bordes verticales, mientras que se fuerza el potencial en los bordes largos a tomar valor 0 V (en el superior) y 12V (en el inferior). Se utiliza una diferencia de potencial de 12 V por su extendido uso en muchos equipos. Se suponen perfectos los contactos entre los distintos materiales. El mallado triangular se refina en el entorno de la anomalía. Se utiliza la estimulación por voltajes en lugar de corrientes por su mayor eficiencia y precisión numérica. Al no requerirse medidas precisas de la corriente, pues únicamente se estudiará la forma del perfil de potencial sobre un lado.

Se validan las soluciones obtenidas en base a: inspección visual del campo de potenciales/corrientes, tolerancia del solver y equilibrio en las corrientes entrantes y salientes (calculadas por integración de línea sobre los bordes de inyección).

Una vez calculadas las soluciones para todos los modelos, estas son exportadas a MATLAB® (MathWorks Inc, 2016). En ese entorno se interpolan todas las soluciones (voltaje) sobre una malla cuadrada común. Finalmente, se extraen los datos de potencial correspondientes a la frontera vertical derecha. A los perfiles correspondientes a cada modelo se resta el perfil del modelo homogéneo (sin anomalía) (véase Figura 1).

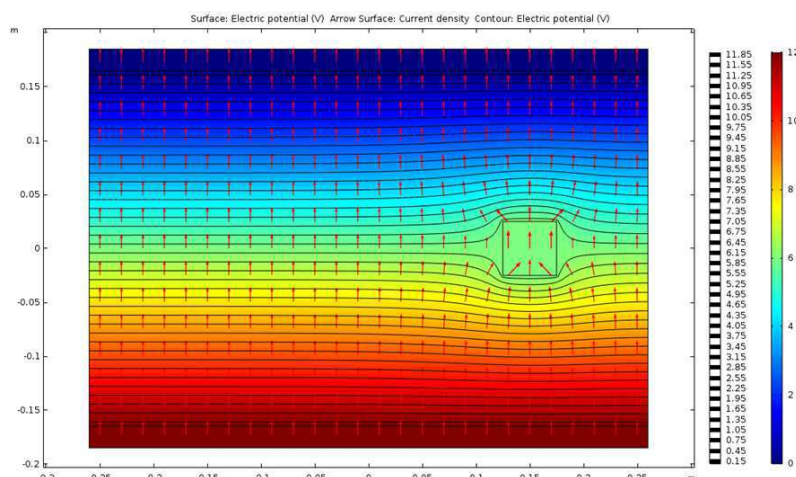


Figura 1. Modelo con la anomalía desplazada en el eje X (central). El mapa de color representa voltajes, las equipotenciales se representan por líneas negras y las flechas indican densidad de corriente.

Nótese que al aumentar el desplazamiento de la anomalía desde el centro hacia la derecha (Figura 2 izquierda) el perfil muestra una mayor anomalía (respecto al modelo homogéneo sin defecto). Las variaciones máximas respecto al modelo homogéneo están en el orden de los 10 mV. Por tanto, puede decirse que con una precisión de medida del orden de mV (habitual en muchos equipos en la escala utilizable a 12 V) pueden distinguirse todos los modelos del homogéneo. Por otro lado, los distintos modelos se distinguen entre sí por amplitudes que van del orden de 100 mV al orden de 10 mV. En todo caso, serían distinguibles entre sí. Las posiciones del máximo y mínimo potencial se van acercando al centro de la posición de la anomalía. Esto significa que se va localizando con mayor precisión la posición en Y de la anomalía.

En los modelos con desplazamiento de la anomalía en Y (Figura 2 derecha) se obtienen diferencias entre modelos del orden de los 10 mV, por lo que se consideran distinguibles. Por otro lado, el punto de inflexión producido por la presencia de la anomalía va siendo menos evidente cuanto más se acerca esta al borde.

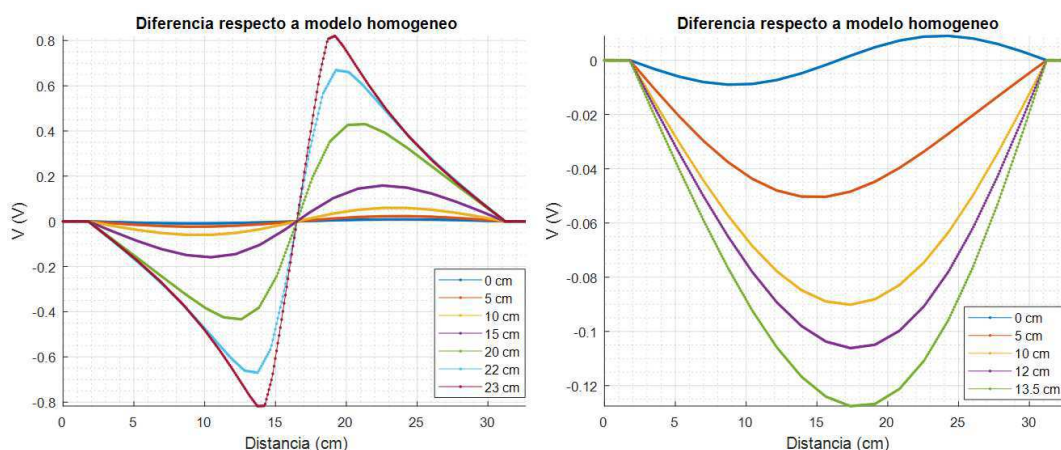


Figura 2. Perfil de voltaje vertical para varias posiciones de la anomalía sobre el eje X (izquierda) y sobre el eje Y (derecha).

Por último, se diseña un modelo real equivalente a los simulados (véase la Figura 3). Para ello se utiliza una lámina de papel conductor de grafito. Se coloca un cuadrado de chapa de acero galvanizado para simular la anomalía conductiva. Podrían simularse anomalías resistivas, como grietas, produciendo cortes en el papel. También se colocan dos bandas de la misma chapa de acero en los bordes largos, como electrodos de inyección. Nótese que el contacto entre las láminas metálicas y el papel de grafito no es perfecto, como se simula en los modelos numéricos. Se añaden unas barras de madera fuertemente atornilladas para aplicar presión y mejorar el contacto.

Las medidas pueden hacerse conectando una batería convencional de automoción con pinzas a los contactos. Existe una alternativa utilizando el principio de superposición. El potencial en un punto al inyectar corriente entre los dos electrodos de inyección es igual al potencial entre un electrodo y el

punto de interés, al inyectar corriente entre ellos; sumado al potencial entre el punto de interés y el otro electrodo, al inyectar corriente entre ambos. De tal forma, puede estimarse el perfil de potenciales haciendo dos medidas en cada punto con el polímetro en posición de medida de resistencias. El tiempo de medida es mayor, pero se evita la necesidad de aplicar una corriente con una segunda batería.

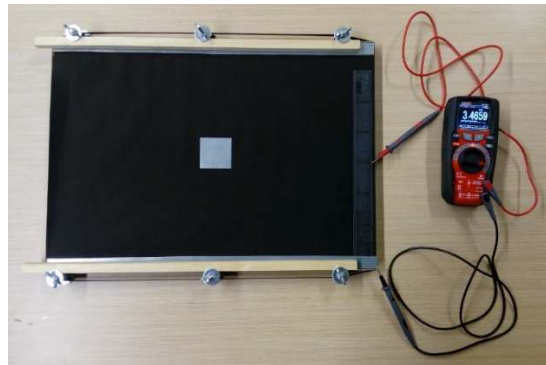


Figura 3. Se simulan las zonas conductivas con láminas de acero galvanizado, aplicando presión con barras de madera atornilladas. La base resistiva se simula por papel conductivo.

3. RESULTADOS Y TRABAJO FUTURO

Los modelos numéricos han mostrado estabilidad y eficiencia numérica suficiente como para predecir el tipo de anomalía, dentro de un rango de precisión de medida dado. Este paso de creación de modelos directos robustos y eficientes es fundamental para una futura aplicación de un método de inversión. El método de inversión calcula, iterativamente, una distribución de resistividades y comprueba, mediante un modelo, si las medidas sobre tal medio se corresponden con las reales.

Se ha comprobado que, si se tiene cierto conocimiento sobre el tipo de anomalía esperable, una tomografía convencional no es necesaria. Con la inyección por, únicamente, dos grandes electrodos, y la medida a lo largo de varios puntos distribuidos en un lado; se localiza la posición de la anomalía. Utilizar menos electrodos supone un menor tiempo de medida y la posibilidad de utilizar equipos más baratos (con menos canales).

En la actualidad se están probando varias configuraciones de los modelos reales a escala para aumentar el parecido entre éstos y los numéricos. Se prueban distintos tipos de contactos, de anomalías (materiales y formas de aplicar presión) y de metodologías rápidas de medida. También se está definiendo una metodología que permita decidir el número mínimo, posición y tamaño de electrodos necesarios para localizar un tipo de anomalía concreto

REFERENCIAS

COMSOL. (2012). COMSOL Multiphysics® User's Guide.

Hallaji, M., Seppänen, A., & Pour-Ghaz, M. (2014). Electrical impedance tomography-based sensing skin for quantitative imaging of damage in concrete. *Smart Materials and Structures*, 23(8).

Holder, D. S. (2004). *Electrical Impedance Tomography. Methods, History and Applications*. London, UK: CRC Press.

Karhunen, K., Seppänen, A., Lehtikainen, A., Monteiro, P. J. M., & Kaipio, J. P. (2010). Electrical Resistance Tomography imaging of concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 137–145.

MathWorks Inc. (2016). *MATLAB® Primer*. Natick, MA: MathWorks Inc.

Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Estudio de problemas de cimentación mediante OMA en aerogeneradores

Analysis of wind turbines foundations problems using OMA

F. Pelayo¹, M. López-Aenlle¹, G. Ismael¹, A. Fernández-Canteli¹ y Reto Cantieni².

¹Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo.

²rci dynamics, Structural Dynamics Consultants, CH-8600 Dübendorf, Switzerland

RESUMEN

Los aerogeneradores son estructuras que están sometidas a procesos de fatiga durante toda su vida en servicio. Las solicitaciones más importantes sobre este tipo de estructuras son las cargas de viento, así como las cargas periódicas debidas al giro de las palas. En este trabajo, se aplicaron técnicas de análisis modal operacional (OMA) para validar el refuerzo aplicado a la cimentación de un aerogenerador, que tuvo que ser puesto fuera de servicio debido a un nivel muy elevado de vibraciones y a la aparición de grietas en la zona de unión de la torre con la cimentación. Tras la reparación de la cimentación se volvió a realizar un OMA sobre el aerogenerador para validar la reparación.

ABSTRACT

Towers and foundations of wind turbines are subject to fatigue damage during their working life. These structures are subject to variable wind loading and also to periodic loadings due to the rotation of the blades. In this work, operational modal analysis (OMA) is applied to identify the dynamic behaviour of a wind turbine showing an anomalous vibration level under normal wind because some cracks were detected in the foundation. In order to avoid these inconveniences, reinforcement of the concrete foundation was decided. OMA was performed on the wind turbine before and after the foundation reinforcement to validate the effectiveness of the repairing procedures.

Palabras clave: aerogeneradores; análisis modal; daño en estructuras.

Keywords: wind turbines; modal analysis; structural damage.

1. INTRODUCCIÓN

Las turbinas eólicas o aerogeneradores son estructuras sometidas a vibraciones durante toda su vida útil. El giro periódico de las palas, así como las cargas de viento sobre la torre y sobre las palas (turbulencias) son las cargas más importantes que actúan sobre la estructura, provocando cargas cíclicas que van produciendo fatiga en la misma.

En el diseño de aerogeneradores se tienen que considerar las frecuencias naturales de la estructura y su relación con la frecuencia fundamental de giro de los álabes (1P), así como con sus armónicos (3P, 6P, etc.) (Van Der Tempel, 2002). Dichas frecuencias de giro deben estar lo suficientemente separadas de las frecuencias naturales del aerogenerador para evitar efectos de resonancia; que pueden amplificar las vibraciones de toda la torre y producir daños en la misma o en su unión con la cimentación.

En este trabajo se presenta el estudio realizado sobre un aerogenerador que presentaba problemas en la cimentación. Los parámetros modales del mismo fueron obtenidos mediante análisis modal operacional (OMA) y comparados con los identificados en un aerogenerador que no presentaba daño.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En primer lugar, para conocer el comportamiento dinámico de los aerogeneradores en estudio, se realizó un modelo simplificado de elementos finitos (EF) en ABAQUS. Para la torre y la cimentación se utilizaron elementos 3D hexaédricos cuadráticos (C3D20R) mientras que las palas del aerogenerador se modelizaron mediante elementos 1D tipo viga (B32). Los primeros 3 modos de vibración del aerogenerador, así como sus frecuencias de vibración se presentan en la Figura 1.

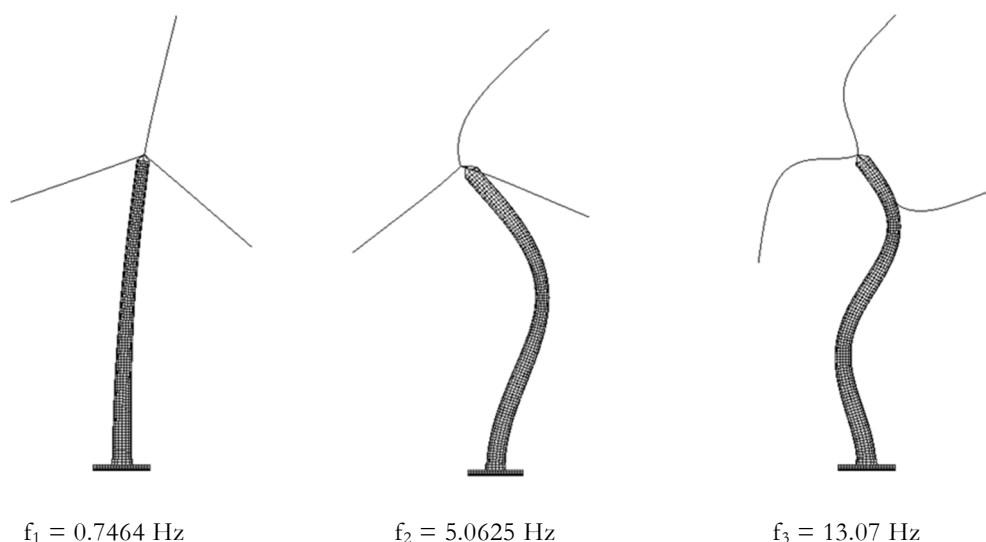


Figura 1. Frecuencias y modos de vibración para el aerogenerador obtenidos mediante EF.

Para la realización del análisis modal operacional, se utilizaron 12 sensores de aceleración con una sensibilidad 10 V/g (PCB 393B31). En los ensayos se realizaron 2 data sets para cubrir un total de 24 puntos. El esquema de los puntos de medida sobre torre y cimentación se pueden ver en la Figura 2.

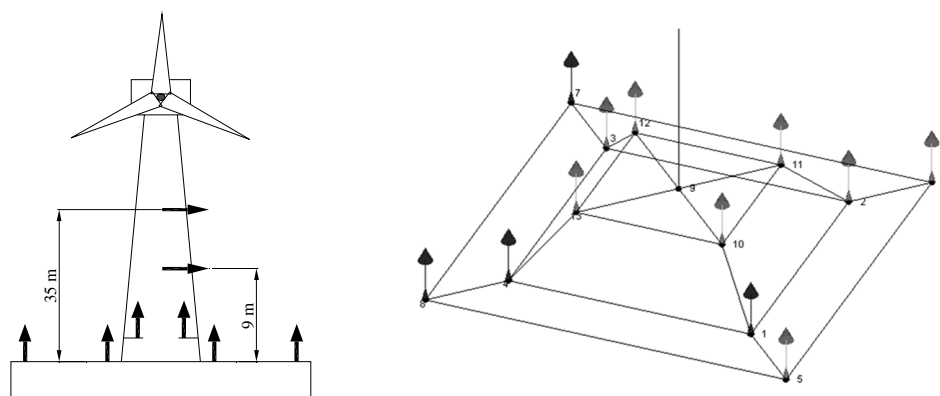


Figura 2. Esquema de los puntos de medida sobre el aerogenerador.

Las aceleraciones se midieron con un sistema de adquisición de datos TEAC-LX 120 utilizando una frecuencia de muestreo de 200 Hz. Las señales se registraron durante unos 45 minutos, aproximadamente, mediante el software LXNAVI. Posteriormente, el procesado y análisis de las aceleraciones registradas se realizaron utilizando el software ARTeMIS Modal.

Cabe destacar que, en los dos aerogeneradores ensayados, uno con daño (A) y otro sin él (B), se utilizó la misma configuración de acelerómetros, tiempos de registro, frecuencia de muestreo, etc.

3. IDENTIFICACIÓN MODAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los parámetros modales de ambos aerogeneradores (dañado (A) y sin dañar (B)) se obtuvieron mediante la técnica de identificación modal EFDD (Brincker et al. 2003). Tras realizar la reparación sobre el aerogenerador dañado (A), se volvió a realizar un OMA sobre el mismo al objeto de validar la reparación realizada. Las frecuencias obtenidas para los distintos casos se presentan en la Tabla 1. En la misma las frecuencias de los modos 1, 6 y 10 se corresponden con los modos de flexión de la torre de la Figura 1.

De un primer análisis sobre los resultados se observó que la primera frecuencia de los aerogeneradores, unos 0.56 Hz está muy próxima a la primera frecuencia de operación del aerogenerador (giro de las palas). Dichos aerogeneradores trabajan alrededor de las 31 rpm, es decir aproximadamente 0.52 Hz, lo que puede amplificar fácilmente las vibraciones sobre la estructura y producir los problemas de vibraciones y daño por fatiga observados. Es importante tener en cuenta que a medida que el

aerogenerador se daña, su primera frecuencia natural disminuye y, por lo tanto, más se aproxima a la frecuencia natural a la de trabajo, lo que conlleva que el problema se agudice cada vez más.

Tabla 1. Frecuencias naturales obtenidas en los aerogeneradores analizados.

Modo No.	Aerogenerador dañado (A)		Aerogenerador sin daño (B)	
	Antes de la reparación		Después de la reparación	
	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]	Frecuencia [Hz]
1	0.551	0.5652	0.5647	
2	1.27	1.294	1.29	
3	1.61	1.627	1.663	
4	2.2	2.199	2.238	
5	3.29	3.296	3.246	
6	3.81	4.051	4.056	
7	5.25	5.313	5.349	
8	6.44	6.497	6.316	
9	9.36	9.434	9.439	
10	11.09	11.38	11.98	

De los resultados obtenidos (ver Tabla 1) se puede ver cómo las frecuencias naturales del generador dañado (A) son más bajas que las del generador sin daño (B). Esto evidencia la existencia de una pérdida de rigidez en el aerogenerador (A) y es un indicativo de la existencia de daño.

Tras el refuerzo y reparación de la unión torre-cimentación en el aerogenerador (A), se realizó un nuevo OMA sobre el mismo. Las frecuencias naturales identificadas en este segundo caso son más elevadas (ver Tabla 1). La modificación dinámica introducida por la reparación (movimiento de los picos de resonancia hacia la derecha) también se puede observar a partir de la comparación del gráfico de descomposición en valores singulares (SVD) de ambos casos: antes y después de la reparación (ver Figura 3).

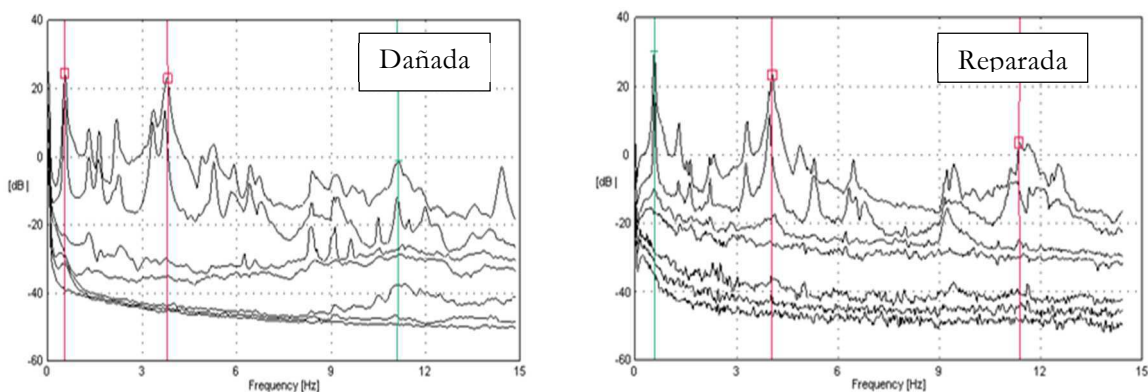


Figura 3. Densidad Espectral (SVD) para el mismo aerogenerador dañado y reparado.

Por último, a partir de los modos de vibración identificados, se observó un desplazamiento relativo entre la cimentación y la torre (ver Figura 4), tanto en el aerogenerador reparado como en el que no presentaba daño. Esto sólo se puede justificar si la unión entre torre y cimentación no es completamente rígida. Esto puede ser un indicio de la que solución constructiva adoptada para este modelo de aerogenerador no es la más adecuada, pudiéndose producir nuevos problemas de fatiga y daño en el resto de los aerogeneradores del mismo parque eólico en el futuro.

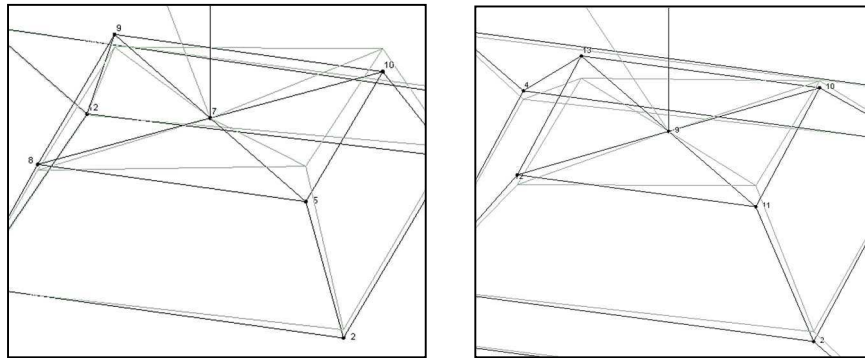


Figura 4. Detalle del desplazamiento relativo observado para el modo 6 en los aerogeneradores dañado (A) (Izquierda) y sin dañar (B) (Derecha).

4. CONCLUSIONES

Se han aplicado satisfactoriamente técnicas de análisis modal para analizar el comportamiento dinámico de aerogeneradores con problemas de vibraciones.

Los aerogeneradores analizados presentan una primera frecuencia natural muy cercana a la primera frecuencia de giro de los álabes. Esto puede generar fenómenos de resonancia que deriven en una amplificación de las vibraciones sobre la estructura y, en consecuencia, un aumento del problema de fatiga de estas estructuras.

La reparación realizada sobre el aerogenerador rigidiza la unión torre-cimentación al menos hasta el mismo estado en el que se encuentra un aerogenerador considerado como no-dañado.

A partir del análisis de los modos de vibración se observó un desplazamiento relativo entre la torre y la cimentación. Este fenómeno se observó tanto en el aerogenerador dañado como en el que no tenía daño. Esto es un indicativo de que la solución constructiva adoptada para la unión no genera una unión totalmente rígida lo que puede conllevar futuros problemas por vibraciones en otros aerogeneradores de similares características.

REFERENCIAS

- Brincker, R., Andersen, P. and Frandsen, J.B. 2000. Modal identification from ambient responses using Frequency Domain Decomposition. Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference (IMAC), San Antonio, Texas, p. 625-630.
- Van Der Tempel, J. and Molenaar, D.P. 2002. Wind turbine structural dynamics- a review of the principles for modern power generation, onshore and offshore. Wind engineering , 26 (4), p. 211-220.

Determinación del espesor óptimo de recubrimiento galvanizado en estructuras de acero

Determination of the optimum thickness of galvanized coating on steel structures

Alonso, G.^{1,9}, García J.¹, Mateo, V.¹, Ortega, F.¹, Díaz, M.¹

¹Grupo de Investigación en Ingeniería de Proyectos, E. P. de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

La construcción de estructuras metálicas en entornos expuestos requiere la aplicación de medidas de protección de estas para retrasar el efecto de la corrosión. La forma más habitual de protección es la aplicación de un recubrimiento externo, mayoritariamente de Zn, conocido como galvanizado. No obstante, el precio de este material es muy elevado, por lo que se debe limitar su cantidad estrictamente al mínimo que proporcione el nivel de protección comprometido.

Existen normas internacionalmente aceptadas que indican las cantidades de recubrimiento necesarias para diferentes tipos de ambientes. Desafortunadamente, los datos necesarios para la definición de esos ambientes son, en la mayoría de las ocasiones, imposibles de recolectar en el tiempo existente para la redacción de un proyecto o de una oferta.

Este trabajo presenta la caracterización, mediante minería de datos, de la corrosión en aceros galvanizados en determinados ambientes, para que, en la fase de redacción, sea posible determinar el recubrimiento de Zn necesario para asegurar la protección del acero durante el ciclo de vida de la estructura, tal y como exigen las garantías de los proyectos actuales.

ABSTRACT

The construction of metal structures in exposed environments requires the application of protective measures to retard the effect of corrosion. The most common form of protection is the application of an external coating, mostly Zn, known as galvanizing. However, the cost of this material is very high, so its quantity should be strictly limited to the minimum that provides the level of protection committed.

There are internationally accepted standards that indicate the quantities of coating required for different types of environments. Unfortunately, the data needed to define these environments are, in most cases, impossible to collect in the existing time for the drafting of a project or an offer.

This work presents the characterization, through data mining, of corrosion in galvanized steels in certain environments, so that, in the drafting phase, it is possible to determine the Zn coating necessary to ensure the protection of the steel during the life cycle of the structure, as required by the guarantees of current projects.

Palabras clave: galvanizado; corrosión; estructuras metálicas; minería de datos.

Keywords: galvanized; corrosion; metal structures; data mining.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión atmosférica es una de las principales causas de fallo estructural, especialmente cuando se trata de estructuras metálicas. Es una de las primeras observaciones que se realizan en cualquier análisis de fallo o comportamiento de las estructuras (Arroyo Martínez et al., 2017), así como el principal elemento de mantenimiento, tanto en coste como tiempo y necesidad de control de las mismas. Además, es necesario tener en cuenta los riesgos ambientales, humanos, y, en general, socioeconómicos, que el compromiso de la estabilidad y durabilidad de las estructuras metálicas debido a la corrosión atmosférica conlleva.

Aproximadamente un cuarto de la producción mundial de acero se pierde a causa del fenómeno de la corrosión (Molina Pérez, 2011), en el que intervienen cantidad de factores. Dada la enorme cantidad de estructuras metálicas existentes, esta pérdida supone una disminución de la sostenibilidad de la construcción, puesto que provoca la necesidad de producción de nuevos materiales que, de otra forma, podrían ser evitados. Su control, por tanto, es un elemento clave para la optimización de la cantidad de material utilizado, elemento esencial para el desarrollo de una sociedad sostenible.

⁹ Guillermo Alonso, email: guillermo.alonso@api.uniovi.es

2. DIMENSIONAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO.

El comportamiento a la corrosión es difícil de calcular mediante modelos físico-matemáticos. Por ello existen diversas fuentes que proporcionan rangos de espesores de recubrimiento en diferentes atmósferas corrosivas basadas en valores de contaminantes atmosféricos, humedad, temperatura, clima, etc. de la ubicación de la estructura. La más extendida es, sin duda, la norma ISO 9223:2012. La norma define 6 niveles de ambientes en función de la agresividad del entorno, desde lugares con ambientes poco exigentes hasta aquellos en los que se producen salpicaduras directas de agua marina (Tabla 1).

Sin embargo, esta normativa si bien caracteriza tanto por velocidades anuales de corrosión testeados en ensayos *in-situ*, como por cualidades de la atmósfera y por valores de los principales contaminantes atmosféricos que tienen relación con la corrosión metálica, otorga unos rangos de necesidad de recubrimiento galvanizado (zinc) del acero demasiado amplios.

Tabla 1. Velocidad de corrosión del primer año para diferentes metales, clasificados por categorías de corrosividad atmosférica (ISO 9223:2012).

Categoría corrosividad	Agresividad	Unidades	Acero	Zinc	Cobre	Aluminio
C1	Muy baja	g/m ² /año μm/año	≤ 10 ≤ 1,3	≤ 0,7 ≤ 0,1	≤ 0,9 ≤ 0,1	Despreciable -
C2	Baja	g/m ² /año μm/año	10-200 1,3-25	0,7-5 0,1-0,7	0,9-5 0,1-0,6	≤ 0,6 -
C3	Media	g/m ² /año μm/año	200-400 25-50	5-15 0,7-2,1	5-12 0,6-1,3	0,6-2 -
C4	Alta	g/m ² /año μm/año	400-650 50-80	15-30 2,1-4,2	12-25 1,3-2,8	2-5 -
C5	Muy alta	g/m ² /año μm/año	650-1500 80-200	30-60 4,2-8,4	25-50 2,8-5,6	5-10 -

Tal como se observa en la tabla anterior, para una atmósfera de corrosividad media cómo puede ser la de una ubicación en el interior de Asturias, el rango varía entre los 0,7 y 2,1, con diferencias del 300%. Esta amplitud de rango conlleva una gran problemática, pues cabe la posibilidad de posicionarse del lado de la seguridad, desperdiciando material y por tanto provocando unos costes muy elevados, u optar por valores mínimos con los consiguientes problemas derivados del riesgo y la seguridad.

De esta forma, cabe de nuevo plantear la necesidad de la elaboración de un modelo a largo plazo más preciso y global.

3. METODOLOGÍA

El modelo se ha desarrollado a partir de la información contenida en casos históricos. Para esta aproximación de minería de datos se utiliza una metodología específica, concretamente el CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), que se separa en varias fases (McCue, 2015). En primer lugar, se identifican las fuentes de datos, tanto variables cómo ecuaciones, para, a continuación, crear un repositorio de datos dónde se analizarán, caracterizarán, reunirán, etc., en una base de datos que permita su posterior uso.

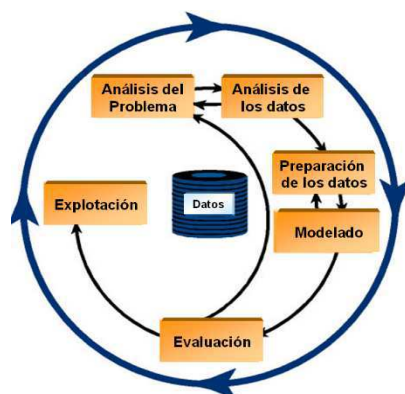


Figura 1. Metodología CRISP-DM.

La siguiente fase es el pre-proceso, en el que se reduce la dimensionalidad del problema, escogiendo aquellas variables más representativas e importantes, realizando análisis univariante, multivariante y agrupamientos. Se rellenan los datos incompletos y se eliminan outliers. A partir de estos datos depurados y de dimensionalidad reducida se realiza el propio modelado utilizando técnicas como MARS (Multiadaptive regression splines) (Friedman, 1991). Finalmente, el modelo es evaluado y, si es necesario, ajustado para, finalmente, ponerlo en servicio.

4. FUENTES DE DATOS Y DEFINICIÓN DE VARIABLES

La cantidad de factores involucrados en el fenómeno de la corrosión impide que esta se pueda calcular directamente mediante modelos físicos. Por ello es preciso buscar estudios e informes en los que se han dispuesto probetas de diferentes metales a corrosión atmosférica, midiéndose tanto las velocidades de corrosión de las probetas como las condiciones ambientales de exposición.

Al margen de estudios restringidos a áreas concretas, el programa más relevante es el conocido como ISOCORRAG (Knotkova, et al., 2010), realizado alrededor del año 1990, que ha sido la base de la elaboración de las normativas ISO actualmente vigentes. Otro programa casi coincidente en el tiempo es el MICAT (Morcillo, 1995), de índole Iberoamericana, con el mismo procedimiento que el anterior.

A partir de la información de estos estudios y de una intensa búsqueda bibliográfica fue posible determinar 1447 casos empíricos de corrosión en los que se realizaron medidas de la pérdida de masa.

Igualmente, a partir de la teoría de corrosión y de los artículos encontrados, es posible determinar las variables más relevantes que actúan sobre el efecto corrosivo. Aunque muchas otras variables influyen, fueron eliminadas aquellas que no serán fácilmente determinable, considerando entonces como variables fundamentales el tiempo de exposición, temperatura, humedad relativa, concentración de SO₂, Salinidad del ambiente (Cloruros, Cl-) y el ToW (Time of Wetness o Tiempo de Humectación, entendido como el número de horas al cabo del año en las que la humedad relativa es superior al 80% y la temperatura es superior a 0 °C) (Chico et al., 2017).

5. MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

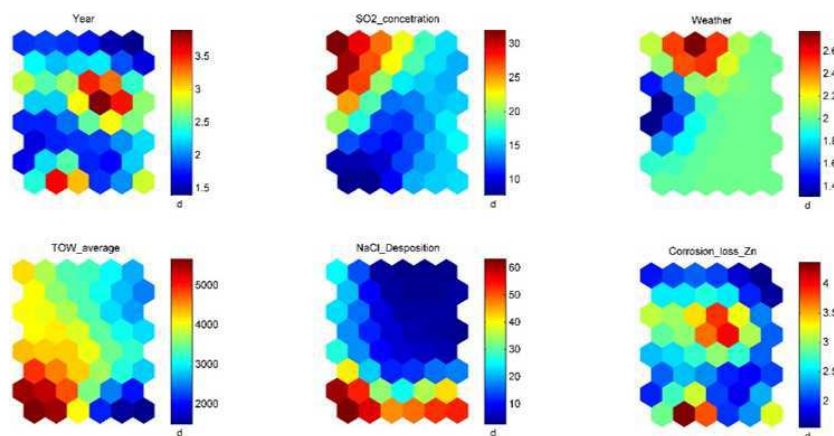


Figura 2. Mapas SOM.

A partir de los datos anteriores se realiza en primer lugar una proyección para comprender la influencia de cada una de las variables mediante una técnica de clustering bidimensional denominada SOM o mapas autoorganizados. En ella se aprecia claramente la existencia de dos grupos de corrosión distintos, aunque siempre fuertemente influenciados por el periodo de exposición. Es igualmente interesante observar como los climas más extremos, previenen de una fuerte corrosión puesto que presentan bajos niveles de humedad, siendo en las zonas intermedias (climas templados y tropicales, donde se concentran ambas zonas de alta corrosividad).

A partir de esta información se puede, por tanto, generar un modelo basado en datos mediante alguna de las técnicas de análisis multivariante. En este caso se han empleado Splines regresivos multiadaptativos (MARS), por su capacidad para separar el espacio en zonas y su comportamiento no lineal que ayuda a representar superficies más complejas.

Los resultados, comparados con un modelo lineal, pueden observarse en la tabla. De ellos se deduce la

posibilidad cierta de generar un modelo que, con una diferencia menor a 0,9, sea capaz de predecir el recubrimiento necesario para una superficie dada (Tabla 2), mejorando sustancialmente los valores que se obtienen aplicando directamente la norma.

Tabla 2. Resultados del modelo.

Relativo	Absoluto	Lineal	Modelo
1	0,09	4,76 %	14,29 %
5	0,45	17,86 %	77,38 %
10	0,90	42,86 %	95,24 %
14	1,26	69,05 %	100,00 %

6. CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que es posible, mediante el uso de técnicas de minería de datos la generación de un modelo que prediga la corrosión de las estructuras galvanizadas en exposición atmosférica a lo largo de su ciclo de vida.

La aplicación del método desarrollado permitirá mejorar la competitividad de la empresa, aumentará la eficacia en el uso de estos materiales, prolongará su vida útil y mejorará la seguridad de las instalaciones, además de poder extrapolar esta metodología a otro tipo de recubrimientos.

REFERENCIAS

- Arroyo Martínez, B., Álvarez Laso, J. A., Lacalle Calderón, R., Cicero González, S., & Gutiérrez-Solana Salcedo, F. (2017). Análisis de fallo de pernos galvanizados de alta resistencia utilizados en torres metálicas. *Anales de Mecánica de la Fractura* 34, 2017.
- Chico, B., de la Fuente, D., Díaz, I., Simancas, J., & Morcillo, M. (2017). Annual Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Worldwide. An Integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases. *Materials* (Basel, Switzerland), 10(6).
- Friedman, J. H. (1991). Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, 19(1), 1-67.
- ISO 9223:2012: Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación.
- ISO 9224:2012: Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Valores de referencia para las categorías de corrosividad.
- Knotkova, D., Dean, S. W., & Kreislova, K. (2010). ISOCORRAG International Atmospheric Exposure Program: Summary of Results. ASTM International.
- McCue, C. (2015). Data mining and predictive analysis: intelligence gathering and crime analysis.
- Molina Pérez, L. (2011). Análisis del estado de corrosión de un edificio modernista de Barcelona y estudio de mecanismos de protección basados en recubrimientos orgánicos.
- Morcillo, M. (1995). Atmospheric Corrosion in Ibero-America: MICAT Project. Atmospheric Corrosion.
- Morcillo, M., Chico, B., de la Fuente, D., & Simancas, J. (2012). Looking Back on Contributions in the Field of Atmospheric Corrosion Offered by the MICAT Ibero-American Testing Network. *International Journal of Corrosion*, 2012, 1-24.
- Natesan, M. et al. (2006). Kinetics of atmospheric corrosion of mild steel, zinc, galvanized iron and aluminium at 10 exposure stations in India. *Corrosion Science*, 48(11).

Rendimiento térmico de cunetas húmedas diseñado como sistemas multifuncionales de infraestructura verde para la gestión del agua y el aprovechamiento energético

Thermal performance of wet swales designed as multifunctional green infrastructure systems for water management and energy saving

Rey-Mahía, C.^{1,10}, Sañudo-Fontaneda, L.A.^{1,2}, Andrés-Valeri, V.C.^{3,4}, Coupe, S.J.² y Álvarez-Rabanal, F.P.¹

¹ Equipo de investigación de ingeniería UOStormwater, Instituto de Investigación INDUROT, Equipo de investigación GICONSIM, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, España. Emails:

UO236881@uniovi.es; sanudoluis@uniovi.es; alvarezfelipe@uniovi.es

² Centre for Agroecology, Water and Resilience (CAWR), Universidad de Coventry, Ryton Gardens, Coventry, CV8 3LG, UK. Email: stephen.coupe@coventry.ac.uk

³ Instituto de Obras Civiles, Universidad Austral de Chile, General Lagos 2085, Campus de Miraflores, Valdivia, Chile. Email: valerio.andres@uach.cl

⁴ GITECO, Universidad de Cantabria, Avenida de los Castros 44, 39005 Santander, España

RESUMEN

La falta de espacio en las ciudades y la necesidad de implantación de infraestructuras verdes multifuncionales, aplicadas a la gestión del agua de lluvia, hace necesario la combinación de las diferentes técnicas SUDS con elementos GSHP. En este contexto, el presente trabajo trata de dar respuesta a la posibilidad de aprovechamiento geotérmico de las cunetas verdes, en condiciones de funcionamiento. Para poder verificar esto, se ha diseñado un experimento, simulando a escala una cuneta verde estándar. Tras realizar un análisis estadístico, de los resultados obtenidos, se han obtenido modelos de transmisión de calor en la cuneta verde. Con este estudio se ha podido verificar, por primera vez, las buenas propiedades de aislamiento dentro de los rangos habituales de funcionamiento de una bomba de calor (20-50°C), mostrando un gran potencial para su aprovechamiento geotérmico, y abriendo así una nueva línea de investigación para la gestión del agua y el ahorro energético.

ABSTRACT

The lack of space in the cities and the need to implement multifunctional green infrastructures, applied to rainwater management, make it necessary to combine the different SUDS techniques with GSHP elements. In this context, the present work tries to respond to the possibility of geothermal use of green ditches, under operating conditions. To verify this, an experiment has been designed, simulating a standard green ditch at scale. After carrying out a statistical analysis, of the obtained results, models of heat transmission in the green ditch have been obtained. With this study it has been possible to verify, for the first time, the good insulation properties within the usual ranges of operation of a heat pump (20-50°C), showing a great potential for its geothermal exploitation, and thus opening a new line of research for water management and energy saving.

Palabras clave: Infraestructura Verde; Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS); Geotermia superficial; Bomba de Calor (GSHP); Diseño Urbano Sensible al Agua.

Keywords: Green Infrastructure; Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS); Surface geothermal; Ground Source Heat Pump (GSHP); Water Sensitive Urban Design (WSUD).

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población que reside en las ciudades durante las últimas décadas, hace que el espacio disponible en las mismas se reduzca. Ligado a este aumento de la población, se hace necesario la creación de espacios mejores donde vivir, por lo que surge la necesidad de implantar técnicas de infraestructura verde (Sañudo-Fontaneda et al., 2018). Dentro de las técnicas de infraestructura verde se encuentran los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales surgieron y se emplean para la gestión del agua de lluvia, desde un punto de vista más respetuoso con la biodiversidad de las zonas en las que se implantan, permitiendo controlar la calidad y cantidad de la escorrentía superficial,

¹⁰ Carlos Rey Mahía, email: UO236881@uniovi.es

convirtiéndose así en una de las técnicas más efectivas dentro de la gestión del agua de lluvia (Woods Ballard et al., 2015).

En este contexto, y en la búsqueda de un mayor aprovechamiento del espacio existente, surge la necesidad de crear infraestructuras multifuncionales (Charlesworth et al., 2017). Este trabajo trata de dar respuesta a estas necesidades, dado que se estudia la implantación de cunetas verdes, junto con dispositivos de geotermia superficial (Ground Source Heat Pump – GSHP – en literatura anglosajona). Existen antecedentes en la implementación de pavimentos permeables (PP), una de las técnicas SUDS más empleadas y estudiadas en el mundo, en combinación con GSHP, demostrando el potencial ahorro energético en edificios (Charlesworth et al., 2017) y entornos urbanos (Tota-Maharaj et al., 2011). También se han realizado ensayos en laboratorio que manifestaron la necesidad de determinar el rendimiento térmico de los materiales que constituyen la sección del PP, para poder realizar un aprovechamiento eficiente del dispositivo de geotermia superficial (del Castillo-García et al., 2013).

Este documento continúa con esta línea de investigación iniciada, combinando la tecnología GSHP con otro de los SUDS más extendidos, las cunetas verdes. Este estudio ha constituido una de las primeras experiencias en el aprovechamiento geotérmico de las cunetas verdes, demostrando que es factible la combinación de ambas técnicas, aunque se requerirán más ensayos y pruebas en campo para poder consolidar y validar esta tecnología.

2. MÉTODO

El montaje experimental estaba compuesto por tres modelos a escala 1:2 de las cunetas verdes, cuya sección estaba constituida por una sub-base de 250 mm de potencia, formada por árido calizo de unos 18-35 mm de diámetro. Sobre esta sub-base se encontraba la base, la cual servía como sustento al césped, que constituía la superficie de la cuenta, esta capa estaba formada por tierra vegetal con una potencia de unos 100 mm. La superficie estaba formada por césped, de unos 50 mm de espesor. El modelo a escala se encontraba dentro de un contenedor de plástico recubierto de geotextil, con una base de unos 50 mm de espesor. Dentro de este montaje experimental se situó el tubo de polipropileno de 5 m de longitud y 20 mm de diámetro que simulaba el elemento GSHP, a una profundidad de 350 mm, es decir dentro de la sub-base. Por otra parte, se situaron sensores de temperatura (RTD1, RTD2, RTD3 y RTD4) a profundidades respectivas de 100, 200, 300 y 400 mm.



Figura 1. Montaje experimental.

El experimento consistió en recircular agua a diferentes temperaturas (20, 30, 40 y 50°C) a través del tubo que simulaba el característico looping de las bombas de calor (GSHP). En ensayo se dividió en dos etapas, la primera con una duración de 8 horas, la cual consistió en recircular el agua caliente, y la segunda etapa en la que no se recirculó agua, pero se siguieron tomando medidas de los sensores (RTD1, RTD2, RTD3, RTD4, temperatura ambiente, entrada y salida al sistema), para poder determinar la capacidad del sistema para restituirse a su estado original. Esta última etapa tenía una duración de 16 horas, por lo que cada ensayo tenía una duración total aproximada de 24 horas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron los resultados obtenidos teniendo por los sensores RTD1, RTD2, RTD3 y RTD4, los cuales fueron tomando medidas de la temperatura cada minuto. Analizando las lecturas de estos sensores se puede determinar la capacidad del sistema para poder aislar, y por lo tanto, para poder ser aprovechado geotérmicamente. Se realizó un análisis estadístico, con el fin de obtener un modelo de comportamiento de la transmisión de calor con el tiempo, para ello se evaluaron varios modelos de comportamiento (lineal, inverso, cuadrático y logarítmico). En la figura 2, se muestra los valores reales y teóricos correspondientes al modelo cuadrático, del ensayo del modelo 1, para la temperatura de 40°C.

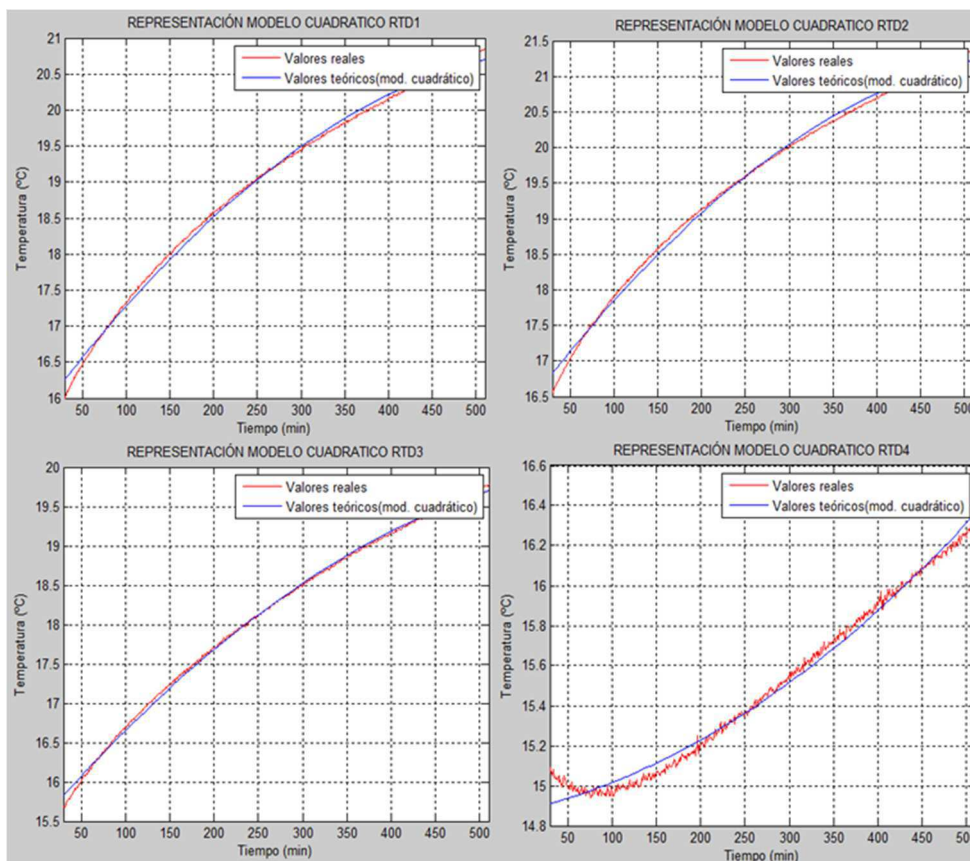


Figura 2. Representación del modelo cuadrático para cada uno de los sensores del modelo 1 a la temperatura de 40°C.

Se comprobó que tanto para el ensayo de la figura 2, como para el resto de ensayos, el modelo cuadrático era el que mejor se ajustaba a los resultados obtenidos, es decir, es el modelo que mejor predecía el comportamiento experimental de las cunetas. Se obtuvieron valores muy buenos de R², siendo para todos los modelos superior a 0.9, como se puede ver en la figura 3.

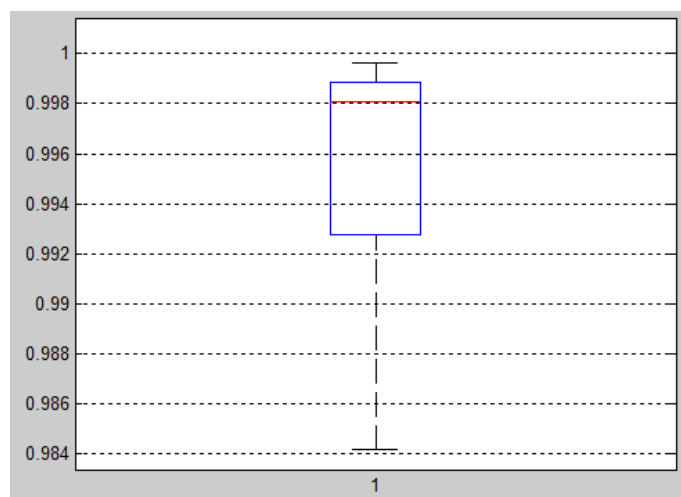


Figura 3. Dispersión de los valores de R2 para los modelos cuadráticos.

Por otra parte, se comprobó la correcta capacidad del sistema para restituir su temperatura de origen, esto nos indica que el elemento GSHP no modifica las propiedades iniciales de la cuneta.

4. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con este trabajo se sientan las bases para el aprovechamiento de las cunetas verdes con elementos GSHP, verificando su correcto comportamiento térmico, lo cual lo hace potencialmente aprovechable térmicamente. Se deberán realizar más ensayos, para poder refinar el comportamiento, así como para poder comprender y definir el comportamiento del flujo de calor que se genera en la sección de la cuneta. También se deberán de realizar ensayos de campo, para poder verificar en condiciones reales de funcionamiento el comportamiento térmico de la cuneta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo y la financiación ofrecida al equipo de investigación UOStormwater de la Universidad de Oviedo a través del proyecto con referencia PAPI-17-PEMERG-22, y al Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA) a través del proyecto IDEa_SuDS con referencia SV-18 -GIJÓN-1-23. También agradecer el apoyo financiero proporcionado FICYT a través del proyecto GRUPIN Ref. IDI/2018/000221, cofinanciado con fondos FEDER de la UE.

REFERENCIAS

- Andrés-Valeri, V.C., Sañudo-Fontaneda, L.A., Rey-Mahía, C., Coupe, S.J., Alvarez-Rabanal, F.P. (2018). Thermal Performance of Wet Swales Designed as Multifunctional Green Infrastructure Systems for Water Management and Energy Saving. *Proceedings*, 2, 1433.
- Charlesworth, S.M., Faraj-Lloyd, A.S., Coupe, S.J. (2017). Renewable energy combined with sustainable drainage: Ground source heat and pervious paving. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 912-919.
- del Castillo-García, G., Borinaga-Treviño, R., Sañudo-Fontaneda, L.A., Pascual-Muñoz, P. (2013). Influence of pervious pavement systems on heat dissipation from a horizontal geothermal system. *European Journal of Environment and Civil Engineering*, 17(10), 956-967.
- Energy Saving Trust (2007). CE82 Domestic ground source heat pumps: design and installation of closed-loop systems (2007 edition). London, Energy Saving Trust.
- Gupta, R. and Irving, R. (2008). Assessing the potential of ground source heat pumps to provide low-carbon heating and cooling in UK dwellings in a changing climate. *Proceedings of Conference: Air Conditioning and the Low Carbon Cooling Challenge*, Cumberland Lodge, Windsor, UK.
- Sañudo-Fontaneda, L.A., Anderson, A., Hunt, W.F., Green Streets: The opportunity to design resilient stormwater management in the cities of the future, Nova Science, New York, 2018.
- Tota-Maharaj, K., Scholz, M., Coupe, S.J. (2011). Modelling temperature and energy balances within geothermal paving systems. *Road Materials and Pavement Design*, 12(2), 315-344.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clark, H., Illman, S., Ashley, R., Kellagher, R. The SuDS manual. CIRIA 753. CIRIA, London, UK, pp. 968, 2015.

Potencial de aprovechamiento de las energías eólica y solar mediante estructuras flotantes en Asturias

Potential of harnessing wind and solar energy by means of floating structures in Asturias

Rodríguez-Fuertes, N.¹ y López, M.^{1,11}

¹Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es sentar las bases para el aprovechamiento de las energías eólica y solar fotovoltaica por medio de sistemas flotantes en la zona marítima de Asturias. Después de una breve revisión de las estructuras flotantes necesarias para el aprovechamiento de ambas energías, sus recursos son evaluados para la zona de interés. Dos tipos de bases de datos ambientales son usadas para caracterizar los recursos energéticos brutos a lo largo del área de estudio: datos de reanálisis numérico y observacionales. Se han usado hojas de datos comerciales de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas para definir su rendimiento y otras características técnicas. La producción de energía eléctrica es estimada para cada tecnología y para ubicaciones y condiciones ambientales diferentes. Finalmente, la producción media anual de los sistemas eólicos y fotovoltaicos flotantes es mapeada, lo que permite una mejor interpretación de los resultados.

ABSTRACT

The main aim of this work is to form the basis for harnessing wind and solar photovoltaic energies by means of floating systems in the maritime zone of Asturias. After a brief revision of the floating structures needed for harnessing both energies, their resources are evaluated for the area of interest. Two types of environmental databases are used to characterize the gross energy resources throughout the area of study: numerical reanalysis and observational data. Commercial datasheets of photovoltaic solar panels and wind turbines are used to define their performance and other technical characteristics. The electrical power output is forecasted for each technology and for different locations and environmental conditions. Finally, the mean annual power production of the floating wind and photovoltaic systems is mapped, allowing for better interpretation of the results.

Palabras clave: estructuras marinas; energía renovable; viento; solar fotovoltaica.

Keywords: marine structures; renewable energy; wind; solar PV.

1. INTRODUCCIÓN

La eólica ha sido una de las energías renovables que más ha visto crecer su aprovechamiento durante los últimos años, principalmente mediante instalaciones en tierra, pero también gracias a los parques marinos. Sin embargo, para satisfacer los consumos mundiales actuales de energía con sistemas terrestres, es necesario cubrir un 2% de la superficie total (Jung et al., 2018). En este contexto, los parques eólicos marinos presentan dos claras ventajas. Por una parte, la mejor calidad del recurso, dado que la velocidad del viento es mayor y más uniforme en zonas costeras. Por otra, la mayor disponibilidad de superficie libre (cabe recordar que las masas de agua representan el 75% de la superficie del planeta), permite instalar parques mayores y reducir su impacto ambiental alejándolos de la costa (Veigas et al., 2014).

AL igual que la eólica, la potencia solar instalada a nivel global también ha crecido notablemente en los últimos años. De hecho, en 2016 la potencia fotovoltaica creció en 75 GW superando los 300 GW. Aunque la mayor parte del incremento se dio en China, Japón y Estados Unidos, en Europa también se experimentó crecimiento (IEA, 2017). Una de las principales razones ha sido la reducción en los costes de fabricación de los paneles fotovoltaicos (Feldman et al., 2015). Los parques marinos fotovoltaicos comparten la ventaja de sus homólogos eólicos en cuanto a disponibilidad de espacio y la reducción de impacto ambiental. Además, presentan una ventaja muy importante frente a las instalaciones solares terrestres: el efecto refrigerante del agua, que al actuar como un sumidero de calor reduce la temperatura de las celdas fotovoltaicas y, en consecuencia, aumenta la eficiencia de los paneles (Cazzaniga et al., 2018). Por contra, las instalaciones marinas son más vulnerables al estar expuestas a

¹¹ Mario López Gallego, email: mario.lopez@uniovi.es

unas acciones ambientales extremas (incluyendo las corrientes, el viento y el oleaje), así como a acelerados procesos de corrosión debidos a la naturaleza del agua salada. No obstante, aunque los sistemas para la explotación de la energía solar fotovoltaica en el mar están por desarrollar y sus costes de inversión serán mayores que en tierra (Sahu et al., 2016), en Trapani et al. (2013) se ha demostrado que en latitudes por debajo de los 45° (Asturias se encuentra a poco más de 43°) estos sistemas serían competitivos con la eólica marina.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, no se debe desdeñar el aprovechamiento de la energía eólica y de la energía solar en el dominio marítimo asturiano. Para ello, resulta primordial trabajar sobre dos aspectos. Primero, determinar los recursos disponibles, así como su variabilidad y otros aspectos que puedan condicionar su aprovechamiento. Por otro lado, identificar las tecnologías facilitadoras y las estructuras necesarias para su explotación y, si fuera necesario, desarrollar o adecuar las existentes para el caso particular de Asturias. El presente trabajo es una primera aproximación a este doble objetivo.

2. REVISIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1. Sistemas eólicos

Las tecnologías para el aprovechamiento de la energía eólica marina no son nuevas, puesto que desde la década de los 90 hay aerogeneradores cimentados directamente al fondo marino en localizaciones del norte de Europa. En 2012 la profundidad media de los parques marinos era 22 m, mientras que la distancia media a la costa de 29 km (EWEA, 2013). Estas profundidades limitan los posibles espacios para la instalación de parques eólicos mediante sistemas fijados al fondo, ya que están limitadas por la profundidad del fondo (ver Figura 1). Por este motivo, el futuro de los parques eólicos marinos está en la utilización de sistemas flotantes en aguas profundas (Pacheco et al., 2017).

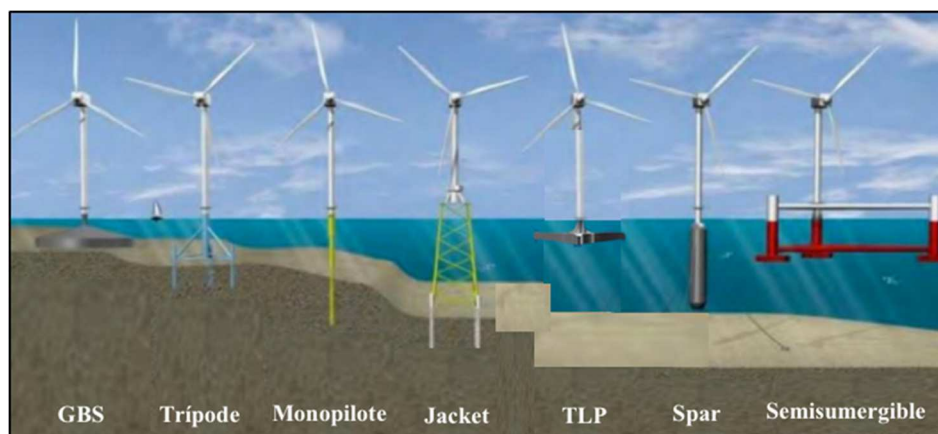


Figura 1. Tipos de subestructuras para aerogeneradores marinos en función de la profundidad (Fuente: Kaldellis & Kapsali, 2013).

Los parques eólicos marinos flotantes están aún en fase de desarrollo. No obstante, en Europa se están llevando a cabo importantes esfuerzos económicos para su avance tecnológico, de forma que la profundidad no constituya una barrera para instalar un parque eólico marino. Esto ha favorecido la posibilidad de instalar a finales de 2017 el primer parque eólico flotante del mundo: Hywind Scotland. En la Tabla 1 se pueden consultar todos los proyectos de parques eólicos marinos flotantes que están en marcha actualmente en Europa y que ya han sido puestos en marcha o se pondrán a lo largo de los próximos años.

Tabla 1. Parques eólicos marinos flotantes en Europa (Fuente: WindEurope).

Parque eólico	País	P _T (MW)	Subestructura	Prof. (m)	Dist. Costa (km)	Turbina
Hywind Scotland	Escocia	30	Boya Spar	95-120	25	SWT-6.0-154
Dounreay Tri	Escocia	2x5	Semisumergible	60-110	6	H 151-5 MW
Kincardine	Escocia	48	Semisumergible	60-80	15	V80-2 MW
Pre-commercial farms	Francia	4x25	Varias	Varias	Varias	Varias
Gaelectic	Irlanda	30	Semisumergible	-	-	Sin decidir
Windfloat Atlantic	Portugal	30	Semisumergible	85-100	20	V164-8.0 MW
Atlantis	R. Unido	100	Semisumergible	-	-	Sin decidir

De acuerdo con la Figura 1, dentro de las tecnologías flotantes se pueden distinguir tres tipos principales de subestructuras: semisumergible, boyas tipo spar y TLP (Tension Leg Platform). Las dos primeras son las que cuentan con un nivel de desarrollo más elevado, siendo su Technology Readiness Level o TRL mayor de 8. Al igual que con los sistemas con cimentaciones directas, cada tipo de subestructura flotante está asociado a un rango de profundidad y, además, cada una de ellas presenta distintas ventajas e inconvenientes que deben ser tenidas en cuenta a la hora de proyectar un parque (Pacheco et al., 2017).

2.2. Sistemas solares

El aprovechamiento fotovoltaico mediante sistemas flotantes es relativamente novedoso, aunque ya hay varias experiencias en aguas continentales. De acuerdo con Parida et al. (2011), las tecnologías fotovoltaicas se dividen en 5 grupos dependiendo de los materiales empleados en las celdas: silicio (amorfo o cristalino), telururo de cadmio o sulfuro de cadmio, materiales orgánicos o poliméricos, híbridos y de lámina delgada. Otro criterio de clasificación es la rigidez del sistema: tipo pontón o flexible (Figura 2). La mayoría de las tecnologías propuestas y probadas en aguas continentales corresponden al primer grupo, en el que una subestructura flotante soporta los paneles solares. En el segundo tipo, los paneles solares cuentan con flotabilidad propia y son flexibles para reducir los esfuerzos en la estructura bajos las acciones extremas del ambiente marino (Trapani, 2013). En los sistemas de tipo pontón se utilizan paneles rígidos de silicio cristalino, mientras que en los flexibles se propone el uso de silicio amorfo.

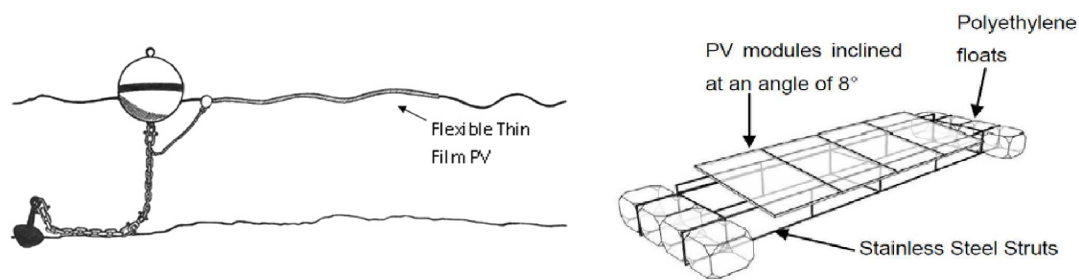
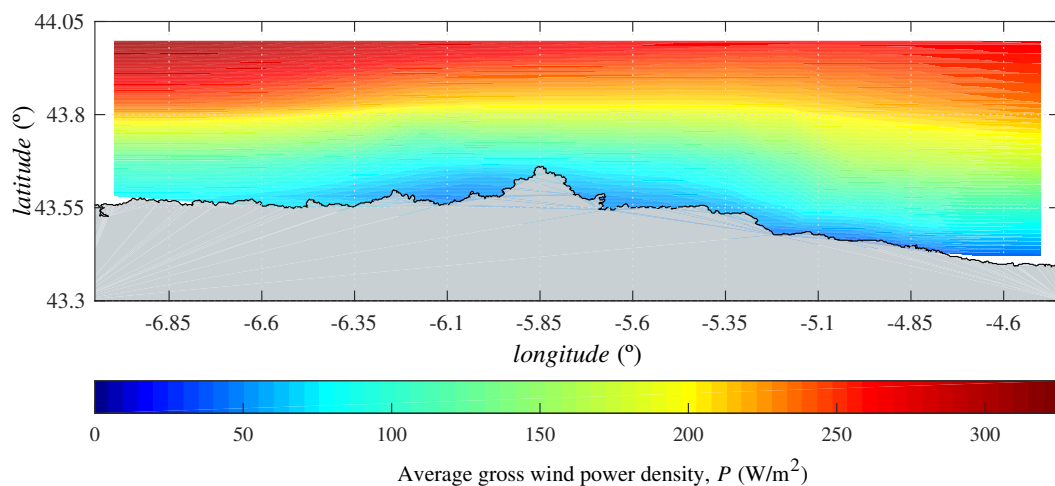


Figura 2. Tipos de tecnologías fotovoltaicas flotantes: flexible y tipo pontón.



REFERENCIAS

- Cazzaniga, R., Cicu, M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G. M., & Ventura, C. (2018). Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1730-1741.
- EWEA, others. Deep Water: The next step for offshore wind energy. European Wind Energy Association (EWEA) Report, Brussels See [Http//Www Ewea Org](http://www.Ewea.Org) 2013.
- Feldman, D., Barbose, G., Margolis, R., Wiser, R., Darghouth, N., & Goodrich, A. (2012). Photovoltaic (PV) pricing trends: historical, recent, and near-term projections (No. LBNL-6019E). Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States).
- IEA (2017). PVPS Annual Report 2016. International Energy Agency (IEA).
- Jung, C., Schindler, D., & Laible, J. (2018). National and global wind resource assessment under six wind turbine installation scenarios. *Energy Conversion and Management*, 156, 403-415.
- Kaldellis, J. K., & Kapsali, M. (2013). Shifting towards offshore wind energy—Recent activity and future development. *Energy Policy*, 53, 136-148.
- López, M., Rodríguez-Fuertes, N., & Carballo, R. (2018). Offshore Wind Energy Resource Atlas of Asturias (N Spain). In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 2, No. 23, p. 1416).
- Pacheco, A., Gorbeña, E., Sequeira, C., & Jerez, S. (2017). An evaluation of offshore wind power production by floatable systems: A case study from SW Portugal. *Energy*, 131, 239-250.
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1625-1636.
- Patil, S. S., Wagh, M. M., & Shinde, N. N. (2017). A Review on Floating Solar Photovoltaic Power Plants. *Int. J. Sci. Eng. Res*, 8, 789-794.
- Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815-824.
- Trapani, K., Millar, D. L., & Smith, H. C. (2013). Novel offshore application of photovoltaics in comparison to conventional marine renewable energy technologies. *Renewable Energy*, 50, 879-888.
- Veigas, M., Carballo, R., & Iglesias, G. (2014). Wave and offshore wind energy on an island. *Energy for Sustainable Development*, 22, 57-65.

Influencia de los materiales de construcción en el confort térmico interior de una casa tradicional asturiana

Influence of building materials on indoor thermal comfort. The case study of a traditional Asturian house

Lage-Cal, S.¹, Folgueras-Díaz, M. B.¹, Luengo-García, J. C.¹

¹Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

¹Departamento de Energy, Polytechnic School of Mieres, University of Oviedo

RESUMEN

En ausencia de un sistema de climatización, el grado de confort térmico en el interior de los edificios se debe al efecto combinado de: (1) Su emplazamiento, orientación y diseño. (2) Los materiales empleados en su construcción. (3) La localización de los puntos donde se hace la evaluación, en el interior de cada inmueble. (4) La percepción subjetiva de los habitantes, forma en la que van vestidos y actividades que realizan. En el presente trabajo, se eligió una Casa Tradicional Asturiana (CTA) existente y, por ende, con un diseño clásico. Buscando definirla lo más exhaustivamente posible se escogieron ocho localizaciones de trabajo en su interior. El factor climatológico se estableció eligiendo un horizonte temporal discontinuo, formado por el primer día de cada estación del año 2017. Y se consideró que la envolvente había sido construida, alternativamente, con piedra caliza, ladrillo hueco y madera de conífera. Finalmente, y partiendo de las premisas aquí descritas, fue posible determinar el grado de cumplimiento del estándar de confort térmico ASHRAE 55-Adaptativo, tanto al 80% como al 90%.

ABSTRACT

In the absence of HVAC systems, indoor indexes of thermal comfort are due to the combined effect of the following four factors: (1) Location, orientation and design of the building. (2) Materials used in the construction of the dwelling. (4) Evaluation sites at the inside of the house. 5) Inhabitants' thermal perception, costumes and physical activity. For this work, an existing, classical-designed Traditional Asturian House (TAH) was chosen and eight evaluation points were set inside. Climate factor was included by establishing a discontinuous time lapse consisting of the first day of every season of 2017. The TAH envelope was considered to be made either out of limestone, hollow brick or conifer wood. Finally, thermal comfort was evaluated by determining the average of compliance with both 80% and 90% ASHRAE 55-Adaptive acceptability limits.

Palabras clave: arquitectura tradicional; confort térmico; TRNSYS 17; ASHRAE 55-Adaptativo.

Keywords: traditional architecture; thermal comfort; TRNSYS 17; ASHRAE 55-Adaptive.

1. INTRODUCCIÓN

La CTA objeto de estudio está sita a 43,5 ° N, -5,9 ° E y 25 m de altitud sobre el nivel del mar, en Avilés (Asturias). Fue construida en dos fases (que se completaron durante los años 1878 y 1887) y se rehabilitó parcialmente en 2010. Por lo tanto, parece lógico pensar que muchas de sus características correspondan a las de las viviendas burguesas decimonónicas de la zona.

De este modo: (1) El inmueble consta de tres pisos: Planta Baja (PB), Planta Primera (PP) y Planta Bajo-Cubierta (PBC) (Figuras 1 y 2), de 150 m² cada una. (2) El tejado incorpora 5 casetones y su cumbrera forma un ángulo de 55 grados sexagesimales con la dirección geográfica N-S. (3) En las fachadas SE y SO de la primera planta, se disponen sendas galerías acristaladas (Figuras 1 y 2) (Lage-Cal, Folgueras-Díaz y Luengo-García, 2018). (4) La única fachada que da a la calle es la principal (NO) (Figura 2). El resto lo hacen a la finca vinculada a la casa, presentando así un carácter mucho más privado.



Figura 1. Orientación Sureste de la CTA.



Figura 2. Orientación Oeste de la CTA.

2. OBJETIVOS

Los materiales de construcción que conforman los muros perimetrales de la CTA son (totalmente en la PB y mayoritariamente en la PP) de piedra caliza con mortero de cal aérea. Por el contrario, en la PBC están formados por dos capas de ladrillo sencillo, separadas por otra intermedia de hormigón. Esta disposición resulta determinante en el comportamiento térmico real de la CTA y, por ende, de las condiciones de confort que se alcanzan en su interior (Lage-Cal et al., 2018).

Con este trabajo se pretende determinar la manera en la que esto sucede y, para ello, se comparan los resultados obtenidos si la envolvente es de piedra caliza ($\varphi=2000 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=5,04 \text{ kJ/hmK}$), ladrillo hueco ($\varphi=1200 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=1,75 \text{ kJ/hmK}$) o madera de conífera ($\varphi=600 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,50 \text{ kJ/hmK}$).

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La primera etapa pasa por simular el comportamiento térmico de la CTA con TRNSYS 17, dándole a ésta tratamiento de *edificio multi-zona* (Genco et al., 2015). La geometría del inmueble, junto con las restricciones debidas a las herramientas de diseño (*Google Sketch-up 8* y *Plug-in Trnsys 3D*), hacen necesario el empleo de 42 zonas térmicas (9 en la PB, 15 en la PP y 18 en la PBC) (Figura 3), 29 de las cuales están parcialmente limitadas por superficies virtuales (representadas como líneas azules discontinuas en la Figura 3).

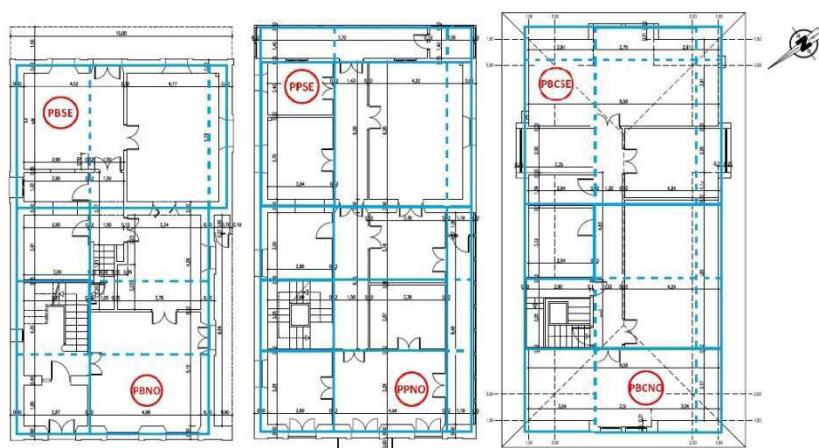


Figura 3. Zonas térmicas y localización de air nodes de trabajo en la PB, PP y PBC de la CTA.

En el interior de cada *zona térmica* existe un punto representativo o *air node*, cuyo comportamiento térmico en régimen transitorio se puede simular con TRNSYS 17. Sin embargo, para caracterizar nuestra CTA no es necesario trabajar con sus 42 *air nodes*, si no que basta con seleccionar, de entre ellos, los más significativos. Más concretamente, se han elegido dos por planta (con orientaciones respectivas SE y NO) y uno en cada extremo de las escaleras (Escalera-PB (ESPB) y Lucernario (LUCE)).

El horizonte temporal de las diferentes simulaciones es discontinuo y engloba los días 21 de marzo, 21 de junio, 21 de septiembre y 21 de diciembre de 2017. En todos los casos, se emplea un paso de tiempo de 1 h y se hace uso de información meteorológica suministrada por la base de datos *Meteonorm 7.1*. La

disposición de la CTA hace innecesario tener en cuenta eventuales factores de sombra y, en lo que respecta a las contraventanas, solo se considera el cierre parcial de las mismas (del 70%, como máximo) si la radiación sobre las fachadas es de más de 140 W/m². De este modo, se obtiene la evolución de la $T_{\text{Aire Interior}}$ en los 8 *air nodes* seleccionados, tanto cuando la envolvente es de piedra caliza, como cuando es de ladrillo hueco o de madera de conífera (Figura 4).

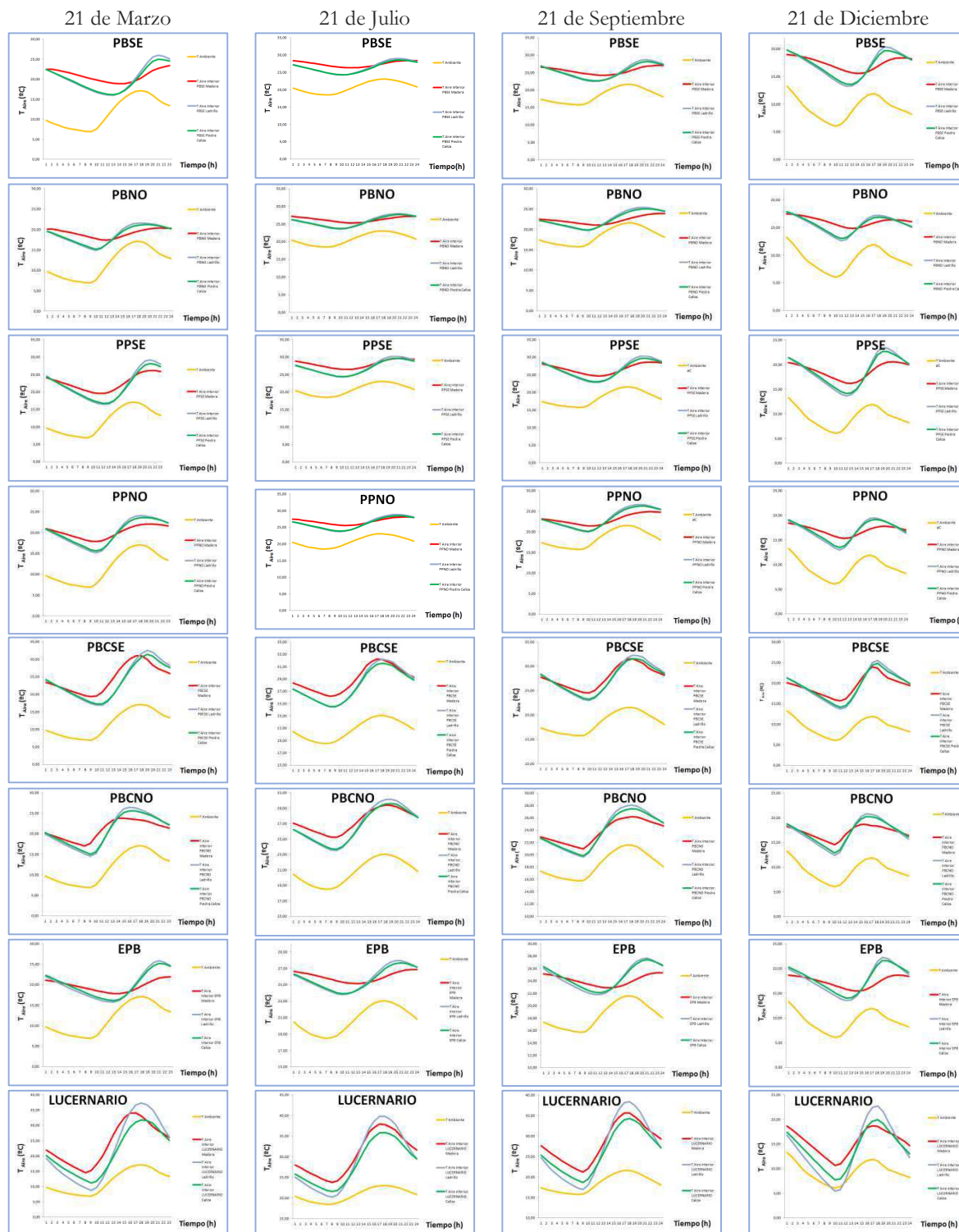


Figura 4. Evolución de $T_{\text{Aire Interior}}$, Piedra Caliza, $T_{\text{Aire Interior}}$, Ladrillo Hueco y $T_{\text{Aire Interior}}$, Madera Conífera frente a T_{Ambiente} .

En la segunda etapa, lo que se hace es evaluar el confort térmico por comparación con el estándar ASHRAE 55-*Adaptive*. Para ello: (1) Se emplea la herramienta ASHRAE *Standar 55-2010 Comfort Model*. (2) La casa está cerrada y, por ende: $v_{\text{Aire Interior}} < 0,3 \text{ m/s}$. Así que $T_{\text{Media Radiante}} = T_{\text{Aire Interior}}$ y, como consecuencia, los únicos inputs necesarios son la T_{Ambiente} y la $T_{\text{Aire Interior}}$. (3)

La T_{Ambiente} se obtiene a partir de la base de datos meteorológicos Meteonorm 7.1. (4) La $T_{\text{Aire Interior}}$ es el resultado de la simulación con TRNSYS 17. Debido a su paso de tiempo, existen intervalos de 1 h durante los cuales no se dispone de datos de entrada y para los que se acepta que las condiciones son las de régimen permanente. (5) Se considera que tanto la actividad como la ropa de los habitantes tienen naturaleza adaptativa.

El cumplimiento con el estándar se determina hora a hora (tanto al 80% como al 90%), para los 8 *air nodes* de trabajo ya descritos. En la Figura 5 se representa el porcentaje de tiempo durante el que se satisface, para los cuatro días analizados.

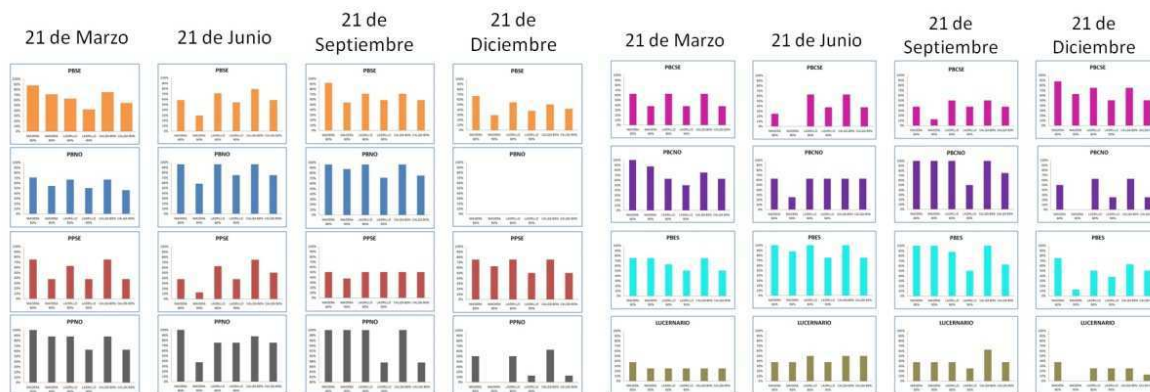


Figura 5. Grado de cumplimiento del estándar ASHRAE 55-Adaptive, tanto al 80% como al 90%.

4. CONCLUSIONES

Para la mayoría los *air nodes* analizados (PBSE, PBNO, PPSE, PPNO, PBCSE, PBCNO, ESPB) la evolución de la $T_{\text{Aire Interior}}$ apenas difiere si los muros exteriores son de ladrillo hueco o de piedra caliza. Por el contrario, en el caso de la madera de conífera, ésta presenta perfiles más suavizados, con valores extremos más retrasados respecto a los de la $T_{\text{Ambiental}}$. El LUCERNARIO, con sus cerramientos de cristal, constituye la única excepción.

En lo que al *confort térmico* se refiere: (1) El ladrillo hueco en los muros perimetrales no es nunca la mejor opción. (2) La madera de conífera, por el contrario, es un buen aislante térmico, lo que la hace idónea para las secciones orientadas al SE durante los periodos fríos, las secciones orientadas al NO durante los intervalos templados y la ESPB en todo momento. (3) En cuanto a la piedra caliza, su alta densidad contribuye a otorgarle una gran inercia térmica. De manera que presenta un desempeño óptimo durante los intervalos más cálidos, tanto en las secciones orientadas al SE como en el LUCERNARIO. Y también a lo largo de los intervalos más extremos (cálidos y fríos) de las secciones con disposición NO.

5. REFERENCIAS

- Genco, A., Viggiano, A., Rospi, G., Cardinale, N. & Magi, V. (2015). Dynamic modelling and simulation of building energy performance based on different climatic conditions. *International Journal of Heat and Technology*, 33(4), 107-116.
- Lage-Cal, S., Folgueras-Díaz, M. B. & Luengo-García, J.C. (2018). Influence of attached sunspaces on indoor thermal comfort. The case study of a traditional Asturian house. *Proceedings*, 2, 1392.
- Lage-Cal, S., Folgueras-Díaz, M. B. & Luengo-García, J.C. (2018). Thermal and hygric inertia and its effects on indoor air condition in a traditional Asturian house: A field study. *Proceedings*, 2, 1386.

Procedimiento para la certificación energética de edificios

Procedure for the energy certification of buildings

Castro García, M.P.^{1,12}

¹Departamento de Energía, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

En este trabajo se presenta el procedimiento a seguir para la obtención de la certificación energética de un edificio existente mediante el empleo del programa CE3X, avalado por el Ministerio para la Transición Ecológica.

ABSTRACT

This paper presents the procedure to follow to obtain the energy certification of an existing building with the CE3X program, endorsed by the Ministry for Ecological Transition.

Palabras clave: energía; certificación, edificios.

Keywords: energy; certification; buildings.

1. INTRODUCCIÓN

El certificado energético de un edificio es un documento oficial redactado por un técnico competente que aporta información relevante acerca de las características energéticas de un inmueble. El Real Decreto 235/2013 obliga a disponer de dicho certificado tanto si la vivienda es comprada o alquilada. La importancia de este documento radica en que permite conocer de ante mano el gasto energético que tiene un edificio, por lo que esta información es un factor decisivo en la decisión de un comprador o arrendatario.

El 1 de junio de 2013 entra en vigor el RD 235/2013, por lo que, a partir de esta fecha, todas las viviendas de nueva construcción son entregadas con su correspondiente certificado y las encargadas de realizarlos, son los técnicos de las empresas constructoras. Sin embargo, las viviendas que se han construido con anterioridad a dicha fecha, requieren igualmente de este documento, y en este caso, las empresas constructoras están exentas de obligación, por lo que se requiere de un técnico competente para realizar y suscribir el certificado. En materia de técnicos, además de los arquitectos, arquitectos técnicos o aparejadores, cabe destacar las figuras de Ingenieros de Minas y los Ingenieros Técnicos de Minas (Ley 38/1999).

2. SELECCIÓN DEL PROGRAMA

Existen varios softwares oficiales para la certificación energética de edificios que han sido reconocidos por el Ministerio para la Transición Ecológica. A continuación, se resumen brevemente cada uno de ellos:

- **Lider-Calener.** Herramienta unificada para la certificación de la eficiencia energética de edificios en fase de proyecto y/o en fase de edificio terminado. Lider sirve para modelizar y calcular la demanda energética de calefacción y refrigeración del edificio. Calener sirve para introducir las instalaciones térmicas, y, por lo tanto, calcular los consumos energéticos.
- **Cerma.** Procedimiento simplificado que se utiliza para edificios de uso residencial exclusivamente (viviendas unifamiliares, edificios de viviendas en bloque y viviendas individuales dentro de un bloque de viviendas).
- **CE3X.** Procedimiento simplificado para edificios existentes (residencial, pequeño terciario, gran terciario) y es el más empleado cuando se trata de certificar edificios y partes de edificios (viviendas y locales).
- **CE3.** Programa alternativo al CE3X, aunque es menos utilizado.

En el caso de requerir realizar una certificación energética en un edificio de nueva construcción se requiere una combinación del uso conjunto de los programas Lider y Calener. Mientras que si lo que

¹² María Castro García, email: castromaria@uniovi.es

se desea, es realizar una certificación energética de un edificio existente, dado su facilidad en el manejo se suele emplear el programa CE3X.

3. PROCEDIMIENTO A SEGUIR EN LA CERTIFICACIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE EL PROGRAMA CE3X

Para obtener el certificado energético mediante el programa CE3X se requieren una serie de pautas a seguir:

1. Seleccionar el tipo de edificio (residencial, pequeño terciario, gran terciario).
2. Indicar los datos administrativos del edificio (localización e identificación del edificio, datos del cliente y datos técnicos del técnico certificador).
3. Cubrir los datos generales del edificio (datos generales, como el año de construcción y la normativa vigente que se le aplica, localidad, así como la superficie útil habitable, altura de las plantas habitadas, número de plantas, ventilación de inmueble, demanda de ACS, y tipo de particiones).

Figura 1. Datos generales del edificio.

4. Definición de la envolvente térmica del edificio (cubierta, uros, suelo, particiones, huecos y lucernarios, puentes térmicos). Se desaconseja definir los parámetros de los cerramientos por defecto puesto que se puede producir grandes desvíos en la obtención de la calificación energética con respecto a la que tendría realmente.

Figura 2. Definición de la envolvente térmica.

- Definir el patrón o patrones de sombras sobre la envolvente térmica.

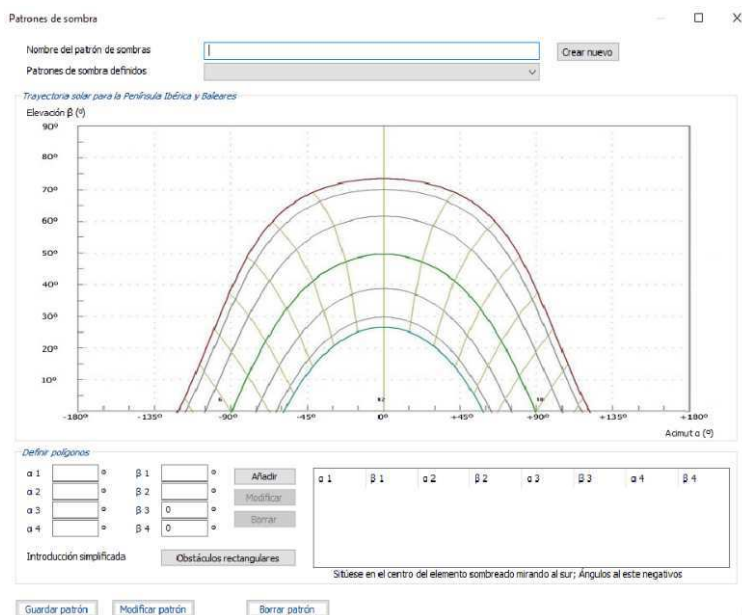


Figura 3. Patrón de sombras.

- Definir las instalaciones del edificio (equipos de ACS, de refrigeración, contribuciones energéticas por medio de energías renovables).

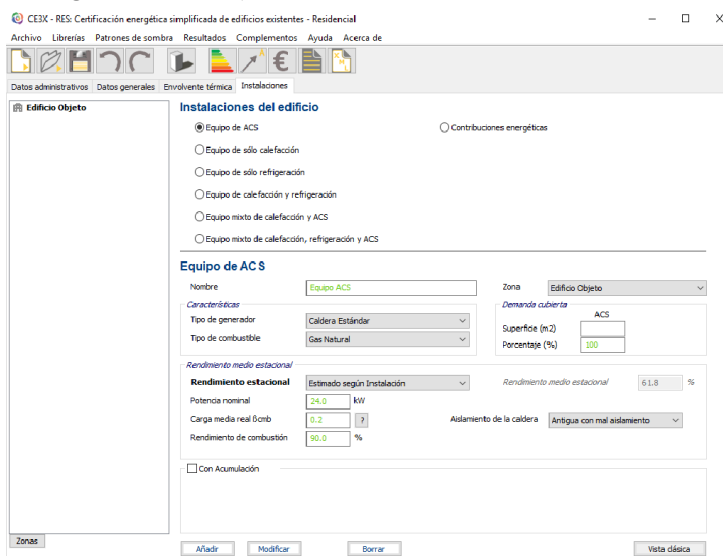


Figura 4. Instalaciones del edificio.

- Obtención de la calificación energética.

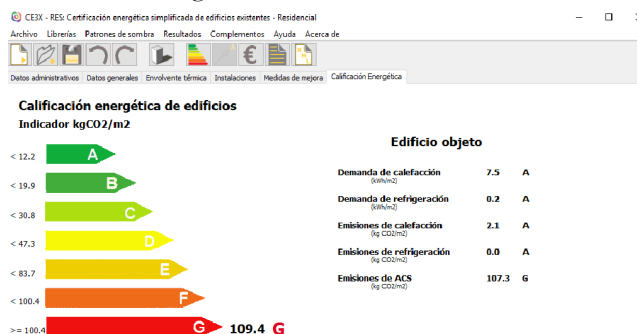


Figura 5. Certificación energética.

8. Realizar medidas de mejora (opcional). Se lleva a cabo siempre y cuando la calificación energética obtenida en el paso previo no es buena, y se esté dispuesto a realizar una inversión económica en mejores instalaciones térmicas del edificio o realizar algún tipo de obra de rehabilitación energética que reduzca las pérdidas térmicas, como, por ejemplo, realizar una fachada ventilada.

CE3X - RES: Certificación energética simplificada de edificios existentes - Residencial

Archivo Librerías Patrones de sombra Resultados Complementos Ayuda Acerca de

Datos administrativos Datos generales Envoltente térmica Instalaciones Medidas de mejora

Conjuntos de medidas definidos

Conjunto de medidas de mejora

Nombre conjunto medidas mejora

Características

Otros datos

Lista de medidas mejora incluidas en el conjunto

Medidas mejora	Tipo de medida

Añadir medida Modificar medida Borrar medida

Guardar conjunto Modificar conjunto Borrar conjunto Cerrar

Figura 6. Medidas de mejora.

9. Recalificar tras realizar implantar las medidas de mejora.



Figura 7. Recalificación energética.

4. CONCLUSIONES

Aquellos edificios que se desee alquilar o vender a día de hoy requieren de un certificado energético. Para realizar dicho certificado se pueden emplear diferentes programas, los cuales están a disposición libre del usuario en la red. El empleo de uno u otro, depende de las necesidades del interesado. No obstante, todos requieren de la definición de una envoltente térmica y la definición de las instalaciones térmicas del edificio.

REFERENCIAS

Real Decreto 235/2013. Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios, tanto de nueva construcción, como existentes.

Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación.

Reconstrucción tridimensional de superficies mediante SEM para la evaluación de la vida a fatiga de componentes estructurales

Three-dimensional reconstruction of surfaces using SEM for the assessment of the structural components fatigue life

Álvarez, G.¹, Vega, V.², Rodríguez, C.¹

¹SIMUMECAMAT research group, Escuela de Ingeniería de Gijón, Universidad de Oviedo

² Unidad de Microscopía Electrónica, Servicios Científico-Técnicos, Universidad de Oviedo, Campus El Cristo s/n, Oviedo, Asturias 33006, Spain

RESUMEN

La vida a fatiga de una estructura es una de las partes clave durante el diseño y dimensionamiento de esta. El acabado superficial de los diferentes elementos y componentes está reconocido como uno de los puntos importantes en la resistencia de estos durante un número determinado de ciclos. El microscopio electrónico de barrido (MEB) ofrece la posibilidad de obtener de manera nítida imágenes tomadas a grandes aumentos (>1000), permitiendo también la observación de superficies irregulares, gracias a su elevada profundidad de foco. Esta técnica, sin embargo, presenta dificultades intrínsecas cuando se necesita realizar una medida en el eje perpendicular al plano de la superficie en observación, es decir, en el que define el espacio tridimensional. Por ello en este trabajo se implementa una metodología de análisis mediante un código programado en Matlab® para el tratamiento de imágenes, de tal manera que con el uso de 4 imágenes tomadas en una misma área en condiciones diferentes de iluminación aparente se consiga de la manera más precisa la reconstrucción tridimensional de la superficie y la medición de la rugosidad de diferentes acabados superficiales.

ABSTRACT

The fatigue life of the structures is one of the key points during their design. The surface roughness of the different elements and components is recognized as one of the important points in the fatigue life of these elements after a certain number of cycles. The scanning electron microscope (SEM) offers the possibility to obtain sharply images taken at high magnifications (>1000), also allowing the observation of irregular surfaces, due to its high focus depth. This technique, however, presents intrinsic difficulties when it is necessary to make a measurement on the axis, which it is perpendicular to the surface plane, in which it defines three-dimensional space. Therefore, in this work an analysis methodology is implemented by means of a code programmed in Matlab® for the treatment of images. Using 4 images taken in the same area in different illumination conditions, it is achieved the three-dimensional reconstruction of the surface and the measurement of the roughness of different surfaces.

Palabras clave: 3D; MEB; rugosidad; fractura.

Keywords: 3D; SEM; roughness; fracture.

1. METODOLOGÍA Y CALIBRACIÓN

Un MEB funciona gracias a un haz de electrones focalizados sobre la muestra en estudio y que recorre ésta en un movimiento de barrido. De la interacción del haz de electrones incidente y la muestra se generan diversas señales analíticas de interés para la obtención de imágenes, entre las que se pueden destacar los electrones secundarios, convencionalmente usados para en la observación topográfica mediante MEB, así como los electrones retrodispersados (BSE), que contienen valiosa información de contraste composicional en la muestra, pero también dan información de la pendiente o inclinación local de la muestra con respecto a la posición del detector. El equipo empleado para la toma de imágenes y posterior reconstrucción de la superficie tridimensional es un MEB JEOL JSM 5600, equipado con un detector BSE de estado sólido Link Tetra (Oxford Instruments). Este detector consta de 4 cuadrantes independientes y permite la suma o resta de pares de cuadrantes opuestos, generando así imágenes con diferente contraste topográfico si la superficie de la muestra presenta inclinación izquierda-derecha o arriba-abajo. De este modo se obtienen 4 imágenes de una misma área de la muestra, que se caracterizan por mostrar sombras semejantes a aquellas generadas al incidir luz con distintas orientaciones sobre una superficie irregular.

En la actualidad existen diferentes metodologías y Softwares comerciales para poder obtener una superficie tridimensional en el MEB (Tafti, Kirkpatrick, Alavi, Owen, & Yu, 2015), sin embargo, no todos los equipos incorporan estas herramientas. Por ello, en este trabajo se utilizan las sombras

generadas en la imagen de BSE y se obtiene la topografía con la expresión (Slowko & Krysztof, 2012):

$$z(x, y) = a_x \int_{x_0}^x \left[\frac{I_A - I_B}{I_A + I_B} \right]_y dx + a_y \int_{x_0}^x \left[\frac{I_C - I_D}{I_C + I_D} \right]_{x=x_0} dy. \quad (1)$$

donde:

- I es la intensidad del pixel en la imagen (0-255)
- a_x y a_y son coeficientes dependientes del microscopio
- Los subíndices A, B, C y D se refieren a las diferentes imágenes obtenidas operando por pares con los cuatro cuadrantes del detector (izquierda, A, derecha, B, superior, C, e inferior, D)

Dado un par de imágenes con sombras enfrentadas, por ejemplo, A y B, la expresión $I_A - I_B / (I_A + I_B)$ es proporcional en cada punto o pixel a la pendiente de la superficie de la muestra en dicho punto a lo largo de la dirección de interés. Por tanto, mediante la integración realizada a lo largo de las direcciones izquierda-derecha (eje x) o arriba-abajo (eje y) de acuerdo con la ecuación (1), es posible determinar la distribución de alturas en la muestra, $z(x, y)$, si se conocen los parámetros instrumentales dependientes del microscopio, a_x y a_y .

Para la obtención de los parámetros de a_x y a_y se han utilizado diferentes patrones de medida. La primera verificación consiste en determinar el error dado por la distinta captación de las partes del detector. Para ello se utilizó una muestra pulida y se tomaron las imágenes correspondientes para hacer el plano inicial con diferentes aumentos (Figura 1a). El siguiente paso es la determinación de la escala en el eje z. En este caso se utilizó un dispositivo para la obtención de dureza Vickers con una punta con forma geométrica mostrada en la Figura 1b y se aplicó una pequeña carga para conseguir realizar una huella en una superficie de acero (Figura 1c).

Mediante cálculos trigonométricos, y suponiendo dicha punta de diamante indeformable es posible obtener la altura de la huella a partir la medida de la diagonal en el plano XY la cual puede ser determinada con gran precisión en el MEB. Con una medida media de la huella de la diagonal de la indentación de 0.0439 mm se tiene una altura real de 0.00627mm. Utilizando este procedimiento para diferentes aumentos se consigue obtener una correlación entre el factor de escala a aplicar tanto en el plano XY como en la tercera dimensión Z.

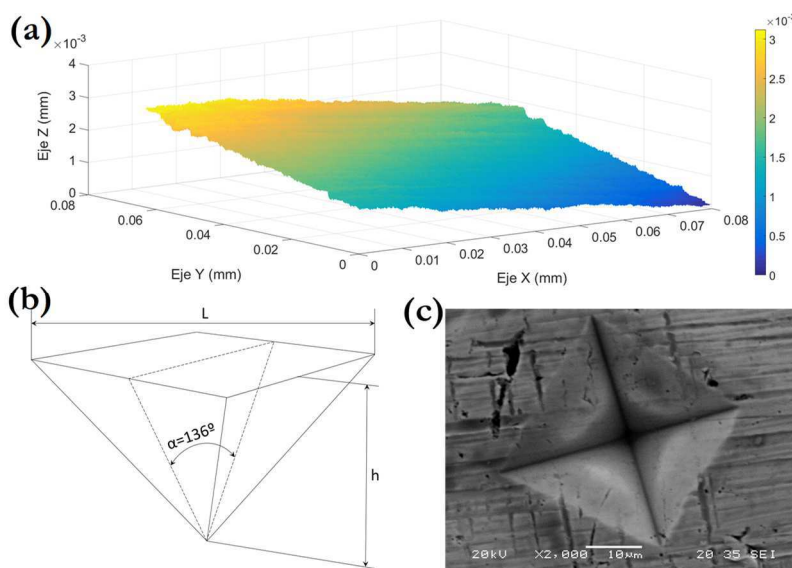


Figura 1. (a) Reconstrucción tridimensional de un plano para la calibración de los detectores BSE. **(b)** Geometría de una punta de diamante empleada para la medida de dureza Vickers. **(c)** Huella o indentación dejada sobre la superficie de un acero mediante un ensayo.

Para conseguir los puntos experimentales se han tomado diferentes medidas (más de 20 puntos) tanto en la superficie (con mayores irregularidades) como en el centro de la indentación donde el muestreo ha sido menor al tener una desviación de valores menor (5 puntos). Se ha observado un incremento de la desviación en la zona superficial cuando los aumentos también aumentaban, sin embargo, el centro punto central de la indentación conserva los mismos valores de desviación. La diferencia entre los

valores de superficie y del punto central van aumentando, dando por ello un factor de escala decreciente siguiendo en ambos casos una ley de proporción inversa, como se muestra en la Figura 2.

Tabla 1. Factores correctores de escala para los planos XY y Z en función de los aumentos.

Aumentos	x200	x500	x750	x1000	x1500	x2000
Factor de escala XY	1.00E-03	3.97E-04	2.63E-04	2.00E-04	1.32E-04	1.00E-04
Factor de escala Z	6.59E-04	3.51E-04	2.01E-04	1.49E-04	1.06E-04	7.25E-05

Haciendo uso de la expresión $\text{Factor} = a/\text{Aumentos}$ se obtiene una constante a de 0.2 y 0.14 y unos coeficientes de determinación, R^2 , de 0.9999 y 0.9705 para el plano XY y Z respectivamente.

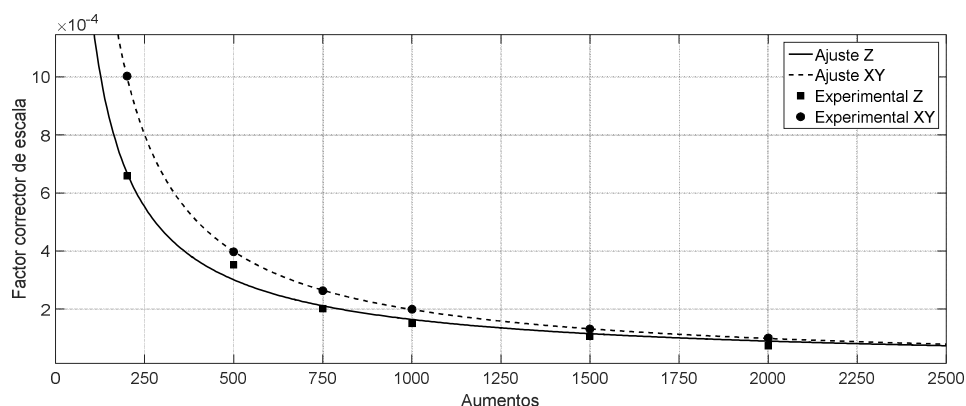


Figura 2. Factores de corrección en el plano de la muestra (XY) y en la vertical (Z) que permiten la calibración de la reconstrucción tridimensional mediante MEB.

2. RESULTADOS

Aplicando los valores de calibración obtenidos se han generado dos superficies tridimensionales, siendo la primera la correspondiente a unas marcas producidas por el mecanizado con una micro-fresadora y la segunda de la superficie de un aluminio estándar. Es posible observar como la superficie dada por el aluminio es más rugosa que la generada por la micro-fresadora, siendo el doble la máxima altura de una respecto de la otra como se observa en la escala de las Figuras a2 y b2.

Es claramente apreciable la mayor agudeza de las subidas y bajadas del aluminio Figura 4, que a nivel estructural provocaría una mayor concentración de tensiones, K_t . Esto lleva relacionado por tanto un crecimiento prematuro en la superficie del aluminio que en la del mecanizado y por tanto la resistencia a fatiga será menor como está siendo investigado por otros autores (Martín-Meizoso, Martínez-Esnaola, Arrazola, & Linaza, 2018). Es también interesante el estudio de la rugosidad en 3D debido a la gran dificultad de interpretar si ciertas caídas o subidas son puntuales o se trata de una zona más general (Zabala et al., 2018), lo que también daría lugar a unos valores más favorables o desfavorables en la resistencia a fatiga por parte de la pieza.

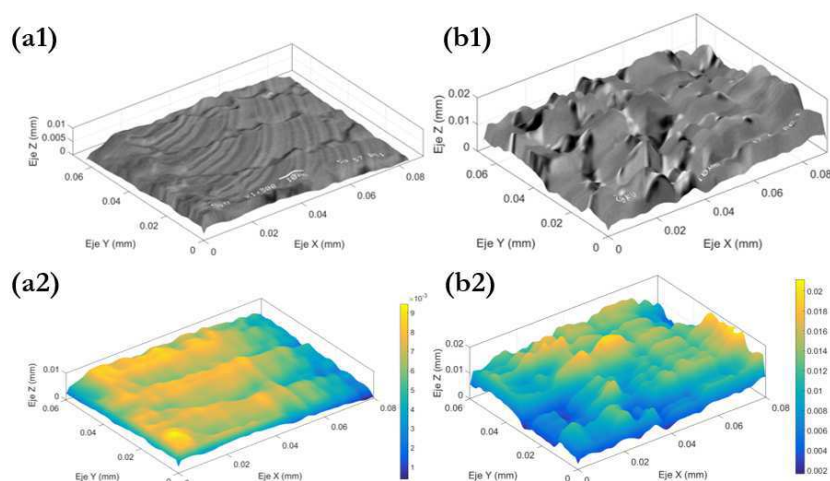


Figura 3. (a1) Marcas de mecanizado tridimensionales con textura. (a2) Marcas de mecanizado

tridimensionales sin textura. (b1) Superficie de aluminio con textura. (b2) Superficie de aluminio sin textura.

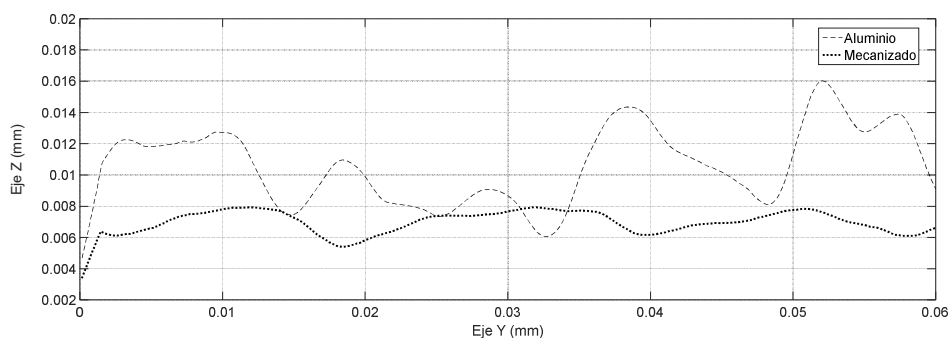


Figura 4. Comparativa entre superficies en 2D.

3. CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para la obtención de una superficie tridimensional con el uso de un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 5600 y utilizando el módulo de tratamiento de imagen del programa Matlab®. También se ha conseguido determinar que las constantes dadas por otros autores para la obtención de la escala Z son función del funcionamiento de los captadores del equipo (para generar un plano inicial) y de una expresión de proporción inversa en función de los aumentos utilizados. La posible obtención de la superficie de un material a estos aumentos genera una gran posibilidad de estudio de la vida a fatiga de diferentes elementos.

4. REFERENCIAS

- Martín-Meizoso, A., Martínez-Esnaola, J. M., Arrazola, P. J., & Linaza, A. (2018). Integridad superficial y vida en fatiga de inconel 718. *Anales de Mecánica de La Fractura* 35.
- Slowko, W., & Krysztuf, M. (2012). Detector System for Three-Dimensional Imaging in the Variable Pressure / Environmental SEM Article in *Acta Physica Polonica Series a* · January 2014. *Acta Physica Polonica Series*, (January). <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.123.877>
- Tafti, A. P., Kirkpatrick, A. B., Alavi, Z., Owen, H. A., & Yu, Z. (2015). Recent advances in 3D SEM surface reconstruction. *Micron*, 78, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2015.07.005>
- Zabala, A., Blunt, L., Tato, W., Gomez, X., Aginagalde, A., & Llavori, I. (2018). Análisis crítico de parámetros de rugosidad 2d en relación a la predicción en fatiga e introducción a la caracterización. In *Anales de Mecánica de la Fractura* (pp. 298–303). Málaga.

Conexiones más eficientes en estructuras metálicas utilizando pernos soldados

More efficient joints in steel structures using welded studs

Lozano M.¹, López-Colina C.¹, Serrano M.A.¹ y López-Gayarre F.¹

¹Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Los perfiles de acero de sección cerrada rectangular (SHS y RHS) presentan buenas propiedades mecánicas frente a esfuerzos axiales y de torsión, lo que hace que su uso a modo de pilares sea cada vez más habitual en construcción. El principal problema que presentan estos perfiles es que no permiten el uso de tornillos convencionales para el montaje de las uniones, debido a la imposibilidad de acceso a la parte interior, siendo necesarios utilizar tornillos especiales (ciegos), que suelen tener elevado precio. Es por esto que la mayoría de las uniones en estructuras en las que intervienen perfiles huecos a modo de columna y perfiles del tipo doble T a modo de viga, suelen ser soldadas.

A pesar de la viabilidad del uso de pernos soldados, varios trabajos realizados a finales del S. XX en los cuales se estudiaban este tipo de uniones no han tenido continuidad.

En este trabajo se retomará esta línea de investigación, tratando de demostrar la ventaja del uso de pernos soldados en uniones viga-columna. Dada la importancia de conocer la rigidez real de una unión para poder realizar un correcto análisis estructural, se estudiarán las rigideces de uniones viga-pilar realizadas con pernos soldados y casquillos de angular a las alas.

La simplicidad en el montaje de este sistema permitirá aborrar costes en mano de obra y materiales, consiguiendo uniones con buen comportamiento mecánico.

ABSTRACT

Rectangular hollow section steel profiles (SHS and RHS) have good mechanical properties as they are very resistant under axial and torsional stresses. For this reason, they are commonly used in construction. The main problem of the hollow section profiles is that the interior cannot be accessed, making it necessary to use blind bolts instead of conventional ones, that are considerably more expensive than conventional ones. For these reasons the joints in structures involving hollow profiles (columns) and double-T profiles (beams) are usually welded.

Although the viability of using welded studs, this line of research was not seen through. In this paper we re-take this direction in the light of new evidence.

In order to carry out an accurate analysis of a structure it is necessary to determine the real stiffness of the joints. The stiffnesses of different beam-to-column joints are studied in this work, demonstrating the advantages of joints with flange cleats and welded studs. The simplicity of the assembly of this type of joints reduces both man-hours and materials, making them more economical.

Palabras clave: estructuras metálicas; uniones; rigidez; pernos soldados; viga-columna.

Keywords: steel structures; joints; stiffness; welded studs; beam-to-column; hollow section.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras con perfiles huecos (p.ej. RHS) tienen la dificultad de que no permiten el acceso a la parte interior del tubo para introducir tuercas o tornillos convencionales. En el mercado existen tornillos especiales denominados genéricamente tornillos ciegos o “blind bolts”, que pueden ser una solución aceptable. Sin embargo, dada la complejidad y el elevado coste de este tipo de tornillos, es habitual que este tipo de uniones se diseñen como uniones soldadas, cuyos costes continúan siendo elevados ya que precisan de operarios cualificados y de un mayor tiempo de ejecución.

Estudios realizados en la década de los 80 por Maquoi et al. (1973) y Maquoi et al. (1984), y en la década de los 90 por Vangedans (1995) y Vangedans (1996) y Vangedans & Janss (1996), trataron de caracterizar, sin profundizar demasiado, uniones atornilladas en las que intervenían unos pernos roscados soldados

Estos pernos tienen una parte roscada, en la que se puede colocar una tuerca, y otra parte lisa y

achaflanada que se suelda a la pared del tubo (Figura 1).

Con el objetivo de comprobar si las uniones viga I-pilar RHS en las que intervienen pernos soldados cumplen con los criterios fijados por el European Committee for Standardization (1993) en el Eurocódigo 3 para ser consideradas como uniones semirrígidas, en este trabajo se tratará de reproducir, se presentarán nuevos ensayos experimentales, que servirán para validar un modelo de elementos finitos que, en trabajos posteriores pueden ser usados para extender la investigación y hacer un estudio paramétrico completo.

2. METODOLOGÍA. ENSAYOS EXPERIMENTALES

Se han preparado cuatro probetas utilizando perfiles de diferentes dimensiones. La unión se realiza con perfiles en L atornillados al tubo mediante pernos soldados y atornilladas al perfil IPE mediante tornillos convencionales (Figura 1).

Las probetas fueron fabricadas íntegramente en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Oviedo. Para su preparación se ha utilizado un taladro magnético, Metallkraft MB202G, provisto de una fresa de Ø18 y una máquina de soldeo, Köco Intop 1704, para la colocación de los pernos.

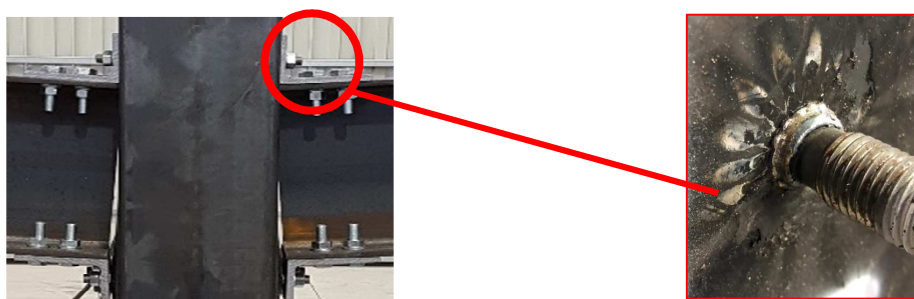


Figura 1. Unión viga-columnas y detalle de perno soldado.

Todas las roscas, tanto las de los pernos como las de los tornillos son de M16. Las dimensiones nominales de los perfiles utilizados pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Perfiles utilizados en la construcción de las probetas.

Unión	Columna	Viga	Angular
1	SHS 200×8	HEB 200	LD 120×80×10
2	SHS 200×6	IPE 300	LD 120×80×10
3	SHS 200×8	IPE 300	LD 120×80×10
4	RHS 200×150×8	IPE 300	LD 120×80×10

Los ensayos de las probetas (Figura 2) se realizan en un marco de reacción, provisto de un actuador de 500 kN de capacidad de carga. Para caracterizar correctamente la unión es necesario conocer la curva momento-rotación durante todo el ensayo, por lo que se optó por un equipo de videocorrelación de imágenes digitales GOM ARAMIS 5M para monitorizar el ensayo y medir la rotación de las vigas. Este equipo permite evaluar desplazamientos y deformaciones sin contacto.



Figura 2. Configuración del ensayo.

3. METODOLOGÍA. MODELOS NUMÉRICOS

Se han realizado cuatro simulaciones numéricas con un modelo parametrizado creado con el programa ANSYS para reproducir numéricamente los nuevos ensayos. Se entiende que los modelos quedarán validados si se consigue simular con suficiente precisión los cuatro ensayos experimentales, centrando la evaluación principalmente en la rigidez rotacional. Se ha optado por utilizar elementos tipo lámina, con mayor densidad de la malla en las zonas próximas a las conexiones.

Para las propiedades del material se ha utilizado la curva elasto-plástica con endurecimiento propuesta por el EN-1993-1-5.

El modelo se ajustó bien en la parte inicial de la curva, por lo que, a priori y antes de la comparación cuantitativa (apartado 4), se considera adecuado para la evaluación de la rigidez.

4. RESULTADOS

Los modelos de elementos finitos fueron validados con las cuatro probetas ensayadas, obteniéndose discrepancias modelo-ensayo que en ningún caso superan el 10% entre la rigidez inicial de los ensayos ($S_{ini,exp}$) y la rigidez de los modelos ($S_{ini,FEM}$), como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de rigidez para modelos y ensayos.

Unión	$S_{ini,exp}$ [kNm/rad]	$S_{ini,FEM}$ [kNm/rad]	S_{rigida} [kNm/rad]	$S_{articulada}$ [kNm/rad]
1	2745	2530	22294	1393
2	1384	1472	21445	1340
3	2595	2643	21445	1340
4	5924	5524	21445	1340

Analizando la rigidez de las uniones ensayadas de acuerdo al Eurocódigo 3, se obtienen los resultados que pueden verse en la Figura 3.

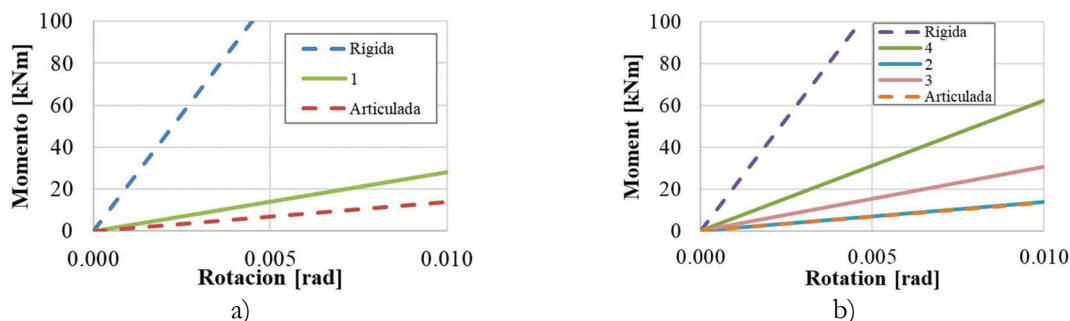


Figura 3. Clasificación de las uniones ensayadas: a) viga HEB200 b) viga IPE300.

Las líneas discontinuas dividen la gráfica en zona rígida, zona semirrígida y zona articulada, de acuerdo al Eurocódigo. Para la clasificación se tomó una luz de las vigas de 5 medros y el cálculo se realizó como si la estructura fuera intraslacional. Los valores frontera de las distintas zonas pueden verse en la Tabla 2.

Los resultados de las cuatro probetas ensayadas indican que este tipo de uniones presenta un comportamiento semirrígido, aunque la unión 2 tiene un comportamiento muy próximo a articulado, como puede verse en la Tabla 2.

Asimismo, los modelos fueron comparados con los ensayos realizados con anterioridad por Maquoi y Vandegans, encontrando importantes discrepancias con el primero y ajustándose mejor a los resultados obtenidos por el segundo. La explicación más plausible de estas discrepancias es que, en el caso de los ensayos realizados por Maquoi et al., en lugar de obtener la curva momento-rotación midiendo giros en la viga y el pilar, simplemente tuvieron en cuenta el desplazamiento del actuador durante el ensayo, por lo que sólo podemos comparar la curva momento-desplazamiento, con los errores que eso puede conllevar por las deformaciones que se pueden producir en el marco, actuador, utillajes y demás componentes.

5. CONCLUSIONES

Las probetas fabricadas en la Universidad de Oviedo son de fabricación sencilla y no necesitan de mano de obra cualificada para su montaje, por lo que se mejorarían los rendimientos respecto a las uniones soldadas.

Los ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad de Oviedo aportan curvas momento-rotación fiables, ya que se ha utilizado un sistema óptico de medida que asegura la calidad de la misma.

Dos de los tres ensayos realizados con anterioridad, por otros autores, no son susceptibles de uso para la validación de los modelos, ya que no se dispone de la curva momento-rotación de los mismos, mientras que los resultados de Vandegans se aproximan al modelo. Además, es necesario tener en cuenta que el sistema de medida utilizado por los demás autores no permitía medir con tanta precisión la rotación.

Los resultados de rigidez de las cuatro probetas ensayadas en este trabajo muestran gran similitud con los obtenidos en el modelo de elementos finitos propuesto, por lo que éste queda validado para el propósito de evaluación de la rigidez rotacional.

Dada la clasificación de todas las uniones como semirrígidas, puede decirse que las uniones mediante pernos soldados tienen buen comportamiento mecánico, aunque una de ellas presenta un comportamiento próximo al articulado.

De cara a ampliar el estudio, sería necesario seguir analizando uniones mediante pernos soldados, utilizando perfiles con otras dimensiones para tratar de extender los resultados a una gama mucho más amplia.

REFERENCIAS

- Maquoi R, Naveau X & Rondal J. (1983). Final Report 5AG 83/5. CIDECT
- Maquoi R, Naveau X & Rondal J. (1984). Beam-Column Welded Stud Connections. Journal of Constructional Steel Research, 4, 3-26
- Vandegans D. (1995). Liaison entre poutres métalliques et colonnes en profils creux remplis de béton, basée sur la technique du goujonnage (goujons filetés). CRIF MT 193
- Vandegans D. (1996). Use of threaded studs in joints between I-beam and RHS column. IABSE Report
- Vandegans D & Janss J. (1996). Connection between steel beams and concrete filled RHS based on the stud technique (threaded stud). Connections in Steel Structures III, Pergamon, 67-76.
- CEN EN-1993-1-3. (2006). European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: Supplementary Rules for Cold-Formed Members and Sheeting.

Evaluación del fraguado del hormigón mediante el análisis de la coda. Modelización numérica

Setting concrete evaluation through coda wave analysis, Numerical modeling

Suárez Lázare, C.J.^{1,13}, Rubio Melendi, D.¹ y Fernández-Álvarez, J.P.²

¹Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos, Universidad de Oviedo,
C/Gonzalo Gutiérrez Quirós S/N, Mieres.

²Departamento de Explotación de Minas, Universidad de Oviedo, C/Independencia 13, Oviedo.

RESUMEN

El hormigón es un elemento muy usado en la construcción, (en el año 2017, en España, se han usado más de 18 millones de m³ de hormigón preparado), la mayoría como hormigón estructural. Por esta razón es muy importante saber que las condiciones de vertido y fraguado del mismo son las correctas.

Una mala ejecución de estas puede provocar daños irreparables en la estructura incluso accidentes graves. Para evitar esto existen técnicas no destructivas para el control del estado del hormigón, entre ellas se encuentra la interferometría de ondas de coda. En este documento se pretende ver su aportación al control de la estructura.

ABSTRACT

Concrete is a widely used element in building elements (in the pass year 2017, more than 18 million m³ of ready-mix concrete were used in Spain), most of them as structural concrete. For that reason, it is very important to know that either pouring and setting concrete conditions are correct.

A bad performance of the procedures above might cause irreparable damages in the structure, and even serious accidents. To prevent this, nondestructive techniques, and among them coda wave interferometry, are utilized to control concrete condition. This document aims to analyse the contribution of coda interferometry in structure control.

Palabras clave: coda; interferometría; sónico; hormigón; curado.

Keywords: coda; interferometry; sonic; concrete; setting.

1.INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los elementos de construcción más utilizados, en el año 2017 se utilizaron en España cerca de 19 millones de metros cúbicos de hormigón preparado. Se utiliza sobre todo en pilares forjados y zonas de sostenimiento en edificios, por lo que poder evaluar la calidad del mismo es un factor clave. Una de las etapas fundamentales para que un hormigón tenga buenas propiedades es el fraguado de este.

Monitorizar esta fase sería de gran ayuda a la hora de determinar si se está realizando correctamente. Una forma de controlar esto es mediante ensayos sónicos, viendo la evolución de la velocidad de propagación de las ondas en el medio. Dentro de los ensayos sónicos en este estudio se va a utilizar la interferometría de ondas de coda, es decir la parte final de una señal cuando se excita la estructura.

2. FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

El hormigón es una mezcla de áridos, un aglomerante (normalmente cemento) y un líquido (agua). La relación entre estos parámetros determina las propiedades del mismo.

Una relación importante, sobre todo en la primeras etapas en el proceso del hormigón, es la relación agua/cemento. Un exceso de agua provoca una disminución de la resistencia del hormigón, un déficit, puede provocar zonas de no reacción.

En el fraguado del hormigón se produce una reacción química de hidratación, se trata de una reacción exotérmica, las propiedades mecánicas aumentan con el tiempo.

3. TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN

Existen bastantes técnicas no destructivas para evaluar la calidad de un hormigón, entre ellas se pueden

¹³Carlos Javier Suárez Lázare, email: carlos@hydrogeophysicsndt.com

enumerar técnicas radiográficas (Rayos x), técnicas radiométricas, GPR, técnicas resistivas, técnicas acústicas.

Dentro de estas técnicas, las radiográficas y las radiométricas son caras y utilizan materiales peligrosos, otras como el GPR y las resistivas no se pueden utilizar en todas las condiciones.

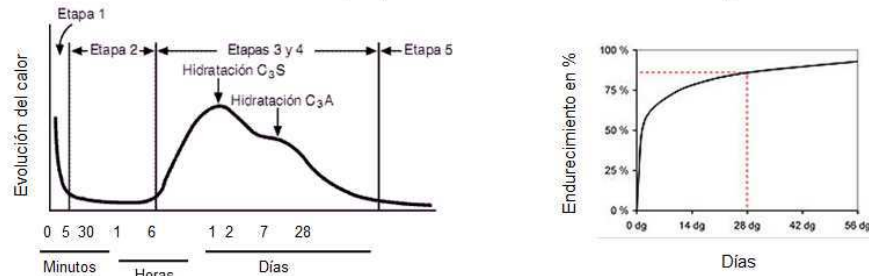


Figura 1. Izquierda: etapas del fraguado del hormigón, derecha: endurecimiento en función del tiempo.

Fuente: civilgeeks.com/2013/12/13/fraguado-y-endurecimiento-del-hormigon-concreto

4. INTERFEROMETRÍA DE ONDAS DE CODA

Las ondas de coda son la última parte de una señal cuando se excita el cuerpo de estudio. Esta parte de la señal es más susceptible de ver los pequeños cambios producidos por variaciones en las condiciones en las que se encuentra el cuerpo sometido al ensayo, esto es debido a que el camino recorrido por la onda desde el excitador hasta la recepción por el sensor, es más largo, con lo que es posible detectar un campo más amplio del mismo.



Figura 2. Izquierda: caminos recorridos por las ondas, derecha: lugar en la señal temporal de la llegada de las ondas.

Entre dos señales producidas en el mismo cuerpo, y situados el emisor y receptor en el mismo lugar, pero en diferentes instantes, cuando se ha producido una pequeña variación en las condiciones del elemento (temperatura, cargas, etc.), se puede realizar una correlación. Esta dará una diferencia que puede verse en las ondas de coda.

$$R(t, \delta t) = \frac{\int_{t-T/2}^{t+T/2} \varphi(t) \varphi'(t + \delta t) dt}{\sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} \varphi(t) dt \int_{t-T/2}^{t+T/2} \varphi'(t + \delta t)^2 dt}} \quad (\text{doublet technique}) \quad (1)$$

$$\delta v = \frac{\delta t_{max}}{t} \quad (2)$$

Donde “ $R(t, \delta t)$ ” es el coeficiente de correlación de las dos señales, “ $\varphi(t)$ ” es la señal de referencia, “ $\varphi(t + \delta t)$ ” es la señal tomada un tiempo “ δt ” más tarde, “ T ” es la longitud de la ventana a comparar, “ δv ” es la variación de la velocidad, “ t ” es tiempo central de la ventana, “ δt ” el obtenido del máximo coeficiente de correlación.

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para ver que se pueden detectar pequeños cambios en una estructura con la técnica de la interferometría de ondas de coda, se realiza una simulación usando el programa Comsol Multiphysics®.

Para ello se realiza una simulación en 2D, en el módulo “*solid mechanic*”, se pretende simular un bloque de hormigón de 20 cm x 10 cm. Se tiene que definir el material (en este caso hormigón) que se pretende utilizar, esto necesita de tres parámetros como son el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la densidad. Con estos parámetros se pueden definir la velocidad de las ondas que viajen por ese material:

$$v_p = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{\rho \times (1 + \nu) \times (1 - 2 \times \nu)}} \quad (3)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{2 \times \rho \times (1 + \nu)}} \quad (4)$$

También se debe definir el mallado del objeto, como de preciso se quiere que sea el resultado, buscando también un buen compromiso con el tiempo de cómputo. Además se debe determinar la duración del mismo.

Se define la señal que excita a la estructura como un ruido blanco, con una duración de 1 ms. Esta señal se introduce en un punto en un lado del rectángulo que define la estructura de hormigón. El punto de control, que simula la lectura de un sensor, se coloca en el extremo contrario al punto de excitación.

Con todos estos parámetros se corre el modelo, obteniéndose unos valores de lectura de la amplitud de la aceleración con respecto al tiempo.

Variando muy ligeramente los parámetros, simulando el efecto del curado del hormigón en unas horas (aumento de la velocidad de las ondas, mayor rigidez de la estructura), se obtiene una segunda lectura, los resultados se comparan usando la correlación definida en el punto anterior.

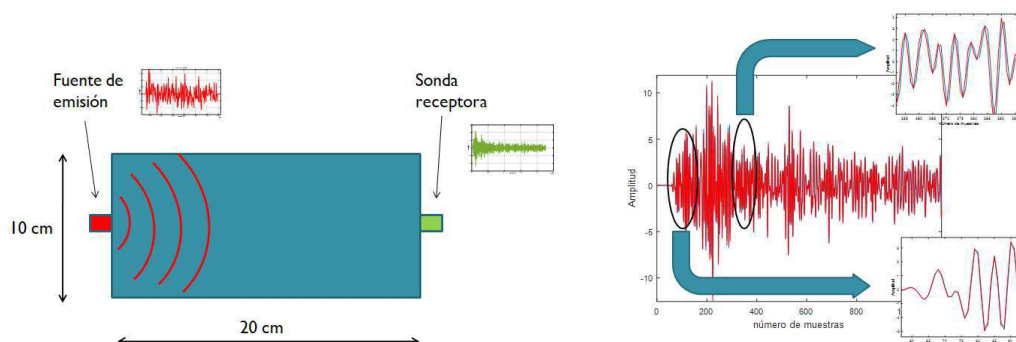


Figura 3. Izquierda: emisor y receptor en modelo 2D. Derecha: vista de la señal obtenida (zona inicial: señal igual, zona de coda: señales diferentes).

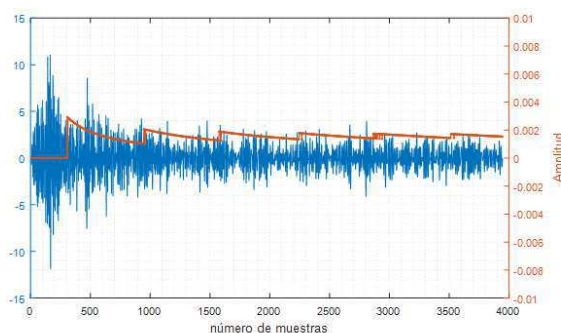


Figura 4. Variación de la velocidad relativa calculada sobre la propia señal de referencia. En todo caso se toma la primera señal como referencia.

6. ENSAYO EN BLOQUE DE HORMIGÓN

Para comprobar el funcionamiento de la interferometría de ondas de coda, se realiza un ensayo. Para ello se fabrica un bloque de hormigón con relación 4 de áridos/1 de cemento/0.5 de agua, las dimensiones del mismo son de 20 cm de largo, 10 cm de ancho y 10 cm de alto.

Se coloca una pastilla piezoeléctrica en un lado del mismo, por ella se introduce la señal: un ruido blanco de duración 10 ms. Por el otro extremo se coloca un sensor por el que se recibe la señal registrada: un acelerómetro IEPE del fabricante MMF MMF.

Se toman medidas cada 24 horas y se compara una, llamada referencia, con la siguiente. Se comparan dos señales consecutivas.

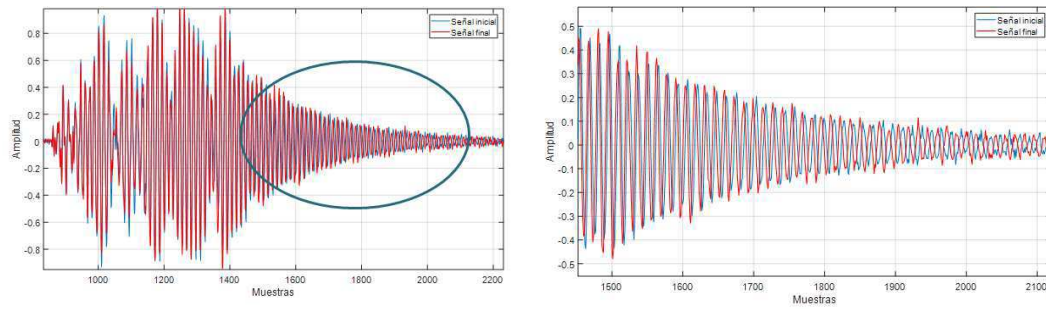


Figura 5. Izda. Señales obtenidas. Dcha. Vista ampliación zona de coda.

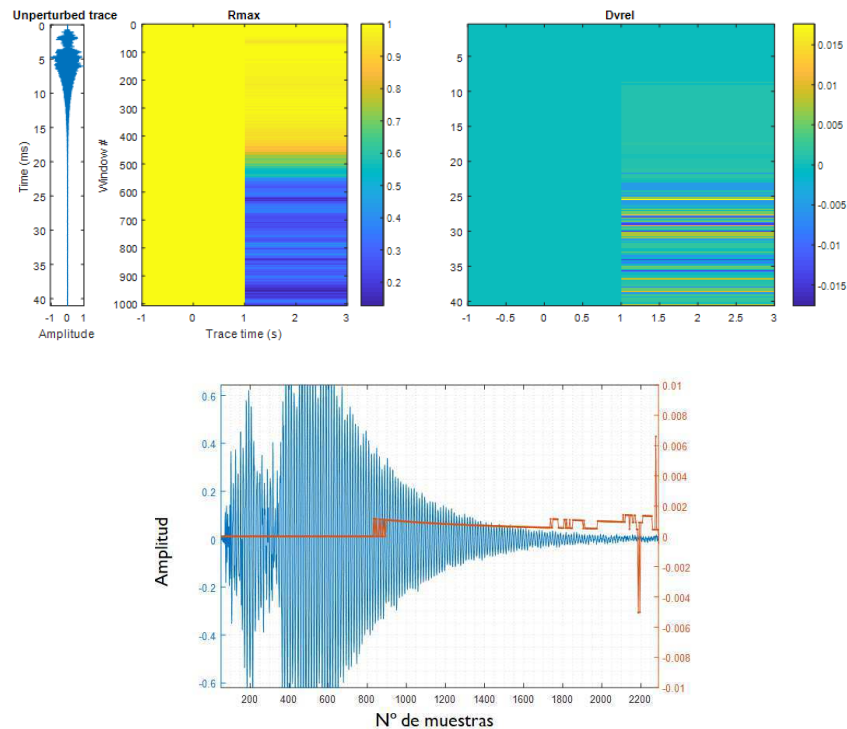


Figura 6. Arriba: resultado de la interferometría. Abajo: superposición de la variación de velocidad calculada, para cada ventana temporal, sobre la propia señal de referencia.

7. CONCLUSIONES

Las ondas de coda parecen ser una buena herramienta en el control de pequeñas variaciones, tanto en el fraguado como en el control de estructuras antiguas sujetas a cargas u otros cambios que pueden provocar daños en las mismas.

REFERENCIAS

- Patrick Frojd (2018). Structural health monitoring of concrete structures using diffuse wave, Doctoral thesis, lund university
- Planes T and Larose E. 2013 A review of ultrasonic Coda Wave Interferometry in concrete. Cement Concrete Res; 53: 248–255.
- Snieder R. The theory of coda wave interferometry. 2006 Pure Appl Geophys; 163: 455–473.
- Niederleithinger, E., Wolf, J., Mielentz, F., Wiggerhauser, H., and Pirskawetz, S. (2015). Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring. Sensors, 15(5):9756–9772. doi: 10.3390/s150509756.

Interpretación geofísica y preliminar de flujo en la microcuenca Agua Blanca, Oaxaca México

Geophysical and preliminary interpretation of flow in the Agua Blanca micro-watershed, Oaxaca (Mexico)

Flores-Martínez, E.^{1,14}, Matadamas-Ibáñez, D.T.¹, Hernández-Sánchez, R.I.¹, Ladrón de Guevara-Torres, M.A.¹, Belmonte-Jiménez, S.I.¹, y Fernández-Álvarez, J.P.²

¹Grupo de Hidrogeología Ambiental, CIIDIR Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional

²Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo

RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo es construir un modelo numérico de flujo del sector del acuífero libre granular ubicado en la microcuenca Agua Blanca, en el municipio de San Pablo Huitzo (Oaxaca, México). La metodología está dividida en dos etapas, la primera es la caracterización hidrogeológica mediante la interpretación de datos de aceleración gravitacional, resistividad del subsuelo e información de niveles piezométricos, y la segunda etapa es el modelado numérico en tridimensional con el código de simulación MODFLOW-2005. Se determina el techo del basamento a profundidades entre los 150 y 600 m.s.n.m. Se genera un modelo conceptual que se utiliza para desarrollar un modelo numérico del acuífero. Los resultados permiten comprender el comportamiento espacio temporal de los niveles de potencial hidráulico en la zona de estudio, detectar posibles zonas de recarga y descarga, así como valorar la incertidumbre del modelo conceptual y proporciona un modelo base para futuras modelizaciones y simulaciones ante distintos escenarios.

ABSTRACT

The main objective of this work is to build a groundwater numerical model of the free-form granular aquifer sector located in the Agua Blanca micro-watershed, in the municipality of San Pablo Huitzo (Oaxaca, Mexico). The methodology is divided into two stages, the first is the hydrogeological characterization through the interpretation of gravitational acceleration data, subsurface resistivity and hydraulic heads information, and the second stage is the numerical modelling in three dimensions with the simulation code MODFLOW- 2005 The roof of the basement is determined at depths between 150 and 600 m.a.s.l. Generating a conceptual model that is used to develop a numerical model of the aquifer. The results allow to understand the temporal space behaviour of the hydraulic heads in the study area, detect possible recharge and discharge zones, as well as assess the uncertainty of the conceptual model and provide a base model for future modelling and simulations in different scenarios.

Palabras clave: Modelización numérica; potencial hidráulico; acuífero granular; MODFLOW-2005.

Keywords: Numerical modelling; hydraulic heads; granular aquifer; MODFLOW-2005.

1. INTRODUCCIÓN

Existe una preocupación creciente a nivel mundial por los recursos hídricos, especialmente por su escasez y su relación con el medio ambiente, el estudio de los recursos hídricos se ha convertido en un tema de importancia. Las Naciones Unidas menciona que la escasez de agua dulce en áreas específicas se clasificó como la segunda preocupación más importante del mundo (después del crecimiento de la población) en áreas donde las personas apenas pueden cubrir sus necesidades básicas. Para satisfacer la creciente demanda de agua, es necesario aprovechar el recurso de las aguas subterráneas consignado en el mundo, proporcionando un uso sostenible y la preservación del medio ambiente

La comunidad de San Pablo Huitzo depende en gran medida del agua subterránea, este recurso se utiliza para consumo humano y para la agricultura, que es la principal actividad económica de la población. Debido al incremento en la demanda del recurso hídrico, en Huitzo se han realizado pozos noria para la extracción de agua, lo que ha traído como consecuencia el descenso del nivel freático del acuífero de la zona, este fenómeno se evidencia cuando los pobladores tienen que cavar cada vez más profundo para poder extraer el agua.

Lo anterior motiva a la realización del presente trabajo de investigación mediante la ejecución de

¹⁴ Emmanuel Flores Martínez, email: efloresm0902@alumno.ipn.mx

campanas geofísicas, campanas hidrológicas y la implementación de toda esta información en el modelo numérico del acuífero de la microcuenca Agua Blanca. La modelización numérica de flujo subterráneo es una de las técnicas más utilizadas para la caracterización de los flujos y la implementación de modelos en la zona podría tener nuevos parámetros para el manejo sostenible del recurso hídrico. 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.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio: San Pablo Huitzo, se localiza en la región de los Valles Centrales del estado de Oaxaca (México), entre las coordenadas 1 920 000-1 910 00 y 720 000-730 000 UTM zona 14 N, a una altura media de 1,700 metros sobre el nivel del mar y a una distancia de 31 kilómetros de la capital del estado (Figura 1).

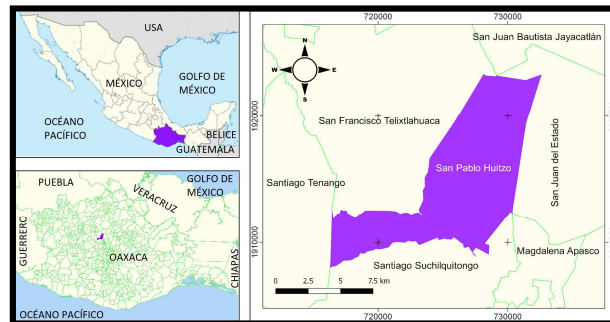


Figura 1. Ubicación del municipio de Huitzo en el estado de Oaxaca, México.

El presente estudio se realizó en la microcuenca Agua Blanca (Figura 2), ubicado a noreste del municipio debido a sus características geológicas, topografía suave en la llanura y su proximidad con la falla de Huitzo. Además de su importancia social, ya que en la cuenca se construyeron dos obras hidráulicas (dos presas) que proveen agua para la irrigación de campos de cultivo, el crecimiento de ganado y para el uso doméstico de 2 600 habitantes.

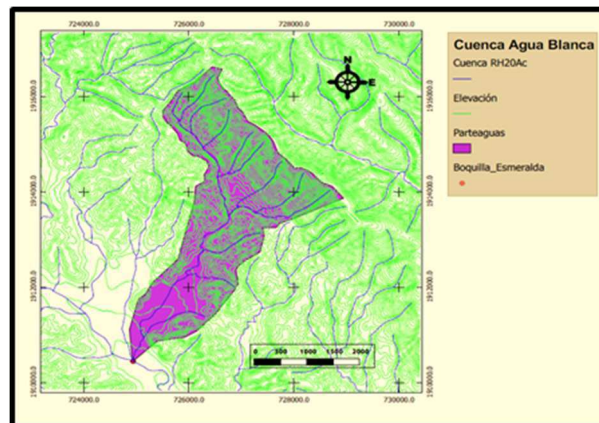


Figura 2. Delimitación de la cuenca Agua Blanca al noreste de Huitzo.

Se realizaron quince Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) con un arreglo tetraelectródico Schlumberger (Kirsch, 2009) con un espaciado de electrodos ($AB/2$) de hasta 300 m. para optimizar la calidad de los datos (resistividad), estos fueron realizados en ubicaciones estratégicamente distribuidos en la zona de estudio para obtener la medida del espesor del acuífero (Figura 3a). Para determinar la geometría del acuífero, se realizaron 94 mediciones gravimétricas terrestres sobre las rutas y accesos disponibles en el área de estudio y en los perímetros a la frontera de la microcuenca, esto con la finalidad de considerar los bordes de la cuenca al momento de modelar la anomalía de Bouguer. Los puntos de medición tienen un espaciamiento medio de 150 metros (Figura 3b).

Una vez realizado el proceso de inversión, se configuraron cuatro perfiles geoelectricos, los cuales

representan las unidades estratigráficas del sistema acuífero de acuerdo con la resistividad real ($\Omega\cdot m$) que tiene cada estrato del acuífero. Esta información se integra con la información generada de las mediciones de aceleración gravitacional.

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. 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.

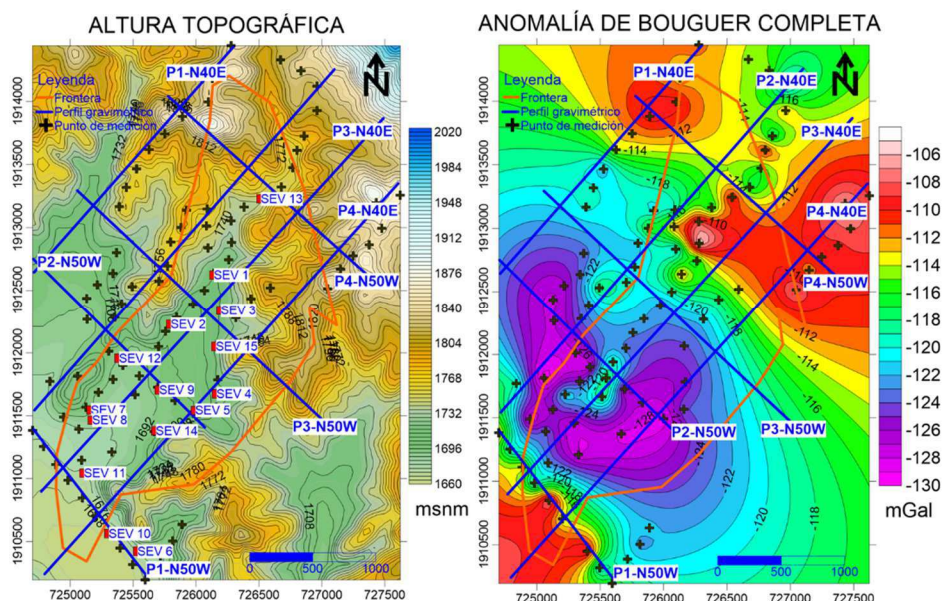


Figura 3. a) Ubicación de los SEVs. b) Puntos de mediciones y perfiles gravimétricos en la micro-cuenca Agua Blanca.

3. RESULTADOS

Los sondeos muestran evidencia de un material de alta resistividad ($350 \Omega\cdot m$), presente en la superficie de la parte norte de la cuenca y entre los 100 y 120 metros en la zona del valle de la cuenca de la parte sur, el acuífero conformado por la formación de Aluvión (Qhoal) y Arenisca fracturada (TmAr), presenta resistividades de $50 \Omega\cdot m$ a $150 \Omega\cdot m$ en su zona saturada. Esta interpretación concuerda con el rango de valores obtenidos en investigaciones previas (E. L. Flores-Márquez et al., 2001).

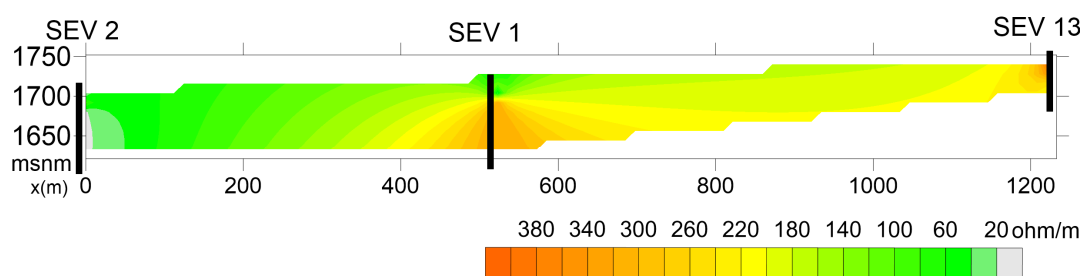


Figura 4. Perfil geoelectrico con la información de los SEVs dos, uno y trece.

En el perfil geoelectrico que muestra la Figura 4, se contrastan las resistividades entre la formación del Complejo Metamórfico (pECM) con resistividad de hasta $380 \Omega\cdot m$ y la formación de Arenisca (TmAr) y Aluvión (Qhoal), que en la zona saturada tiene resistividades entre 20 y $60 \Omega\cdot m$. La interpretación de los SEVs permitió determinar la profundidad del basamento conformado por el Complejo Metamórfico Oaxaqueño (pECM), que da la pauta para el modelado geológico de los datos de anomalía de Bouguer obtenidos de la campaña gravimétrica.

Una vez interpretados los SEVs y los perfiles geoelectricos, se determinó la profundidad del basamento del acuífero en el valle de la microcuenca, la integración de esta información marcó las condiciones para la modelización geológica de los perfiles de anomalía de Bouguer. Los resultados se muestran en las Fig. 5, representando el sistema de fallas normales presente en el valle de la microcuenca, además

de los espesores de cada formación, la formación más joven correspondiente al aluvión (Qhoal) tiene una potencia que varía entre los 20 y 100 metros, a diferencia de la formación de arenisca que tiene potencias de hasta 600 metros, resultados que concuerdan con investigaciones previas (Flores-Márquez et al. 2001; Flores-Márquez et al. 2008).

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 (Figura 5).

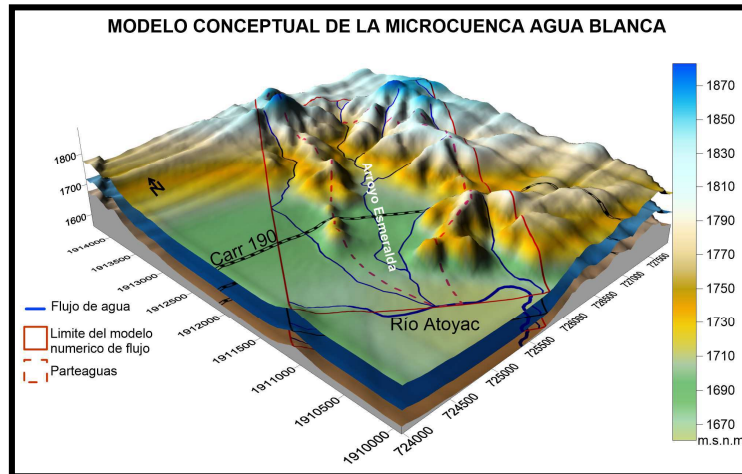


Figura 5. Modelo conceptual de la microcuenca Agua Blanca.

4. CONCLUSIONES ACTUALES

La información generada a partir de la integración geofísica del método eléctrico con el método gravimétrico es consistente con los resultados de investigaciones previas realizadas en la cuenca de los Valles Centrales de Oaxaca (Flores-Márquez et al. 2001), por lo que se afirma que la información es útil para determinar la distribución de formaciones en el subsuelo. Derivado de la interpretación geofísica se establece la geometría de la formación de aluvión y arenisca que forman el sistema acuífero en la microcuenca Agua Blanca. A partir de esta información se construye el modelo conceptual, fase previa al proceso de modelización numérica de flujo.

REFERENCIAS

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport.
- Flores-Márquez, E. L., Chávez, R. E., Martínez-Serrano, R. G., Herrera-Barrientos, J., Tejero-Andrade, A., & Belmonte, S. (2001). Geophysical characterization of the Etla Valley aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, 40(4), 245–257.
- Flores-Márquez, E. L., Martínez-Serrano, R. G., Chávez, R. E., Crusillo, Y., Jiménez, G., & Enriquez, J. O. C. (2008). Numerical modeling of Etla Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios. *E. Geofísica Internacional*, 47(1), 27–40.
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics*. (R. Kirsch, Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7>

Influencia de la topografía 3D en tomografía eléctrica 2D (ERT). Modelización con el código 'open source' BERT

Influence of 3D topography in 2D electrical tomography (ERT). Modeling with the open source code, BERT

Cimadevilla Fuente, D.^{1,15}, Fernández-Álvarez, J.P.²

¹Unidad de Modelización Hidrogeofísica y Ensayos No Destructivos, Universidad de Oviedo,
C/Gonzalo Gutiérrez Quirós S/N, Mieres

²Departamento de Explotación de Minas, Universidad de Oviedo, C/Independencia 13, Oviedo

RESUMEN

La topografía es un factor que se debe de tener en cuenta en el procesado de los datos geofísicos para no dar lugar a equívocos en la interpretación. El código abierto de elementos finitos BERT permite simular e invertir datos de tomografía eléctrica resistiva (ERT) con geometrías complejas y mallas irregulares. Se presenta una modelización aplicada a un dique de arenas sobre el que se realiza un perfil dipolo-dipolo de 56 electrodos. Se utiliza el término de efecto topográfico t a la relación entre la resistividad aparente con y sin topografía. Como resultado se demuestra que la topografía, en este caso, afecta notablemente en las medidas adquiridas con la técnica ERT.

ABSTRACT

The topography is a factor that must be considered in the processing of geophysical data to avoid misunderstandings in the interpretation. The finite element open code BERT allows to simulate and invert resistive electrical tomography (ERT) data with complex geometries and unstructured meshes. A model applied to a sand dam is presented, on which a dipole-dipole profile of 56 electrodes is made. The term of topographic effect t is used to the relation between the apparent resistivity with and without topography. As a result, it is demonstrated that the topography, in this case, affects markedly in the measurements acquired with the ERT technique.

Palabras clave: tomografía eléctrica resistiva; ERT; BERT; topografía 3D.

Keywords: resistivity electrical tomography; ERT; BERT; 3D topography.

1. INTRODUCCIÓN

La tomografía eléctrica resistiva o ERT, de sus siglas en inglés, es una técnica geofísica ampliamente utilizada para la caracterización de acuíferos (Greggio & Giambastiani, 2018), prospección arqueológica (Fernández-Álvarez et al. 2017), reconocimiento de estructuras de tierra (Lemos Camarero & Augusto Moreira, 2017), entre otras aplicaciones.

El método consiste en introducir una corriente continua a través de un par de electrodos, hincados en la superficie, y medir la diferencia de potencial entre otro par de ellos a lo largo de un perfil. A partir de un protocolo de inyección-medición, se registran medidas de voltaje que se asocian, por convenio, a un punto en el subsuelo a una profundidad y en una posición proporcional a la separación entre los pares de electrodos. Estas mediciones no aportan información directa de la resistividad del terreno por lo que es necesario hacer un procesado previo a la interpretación.

Es una técnica muy utilizada y el procesado de los datos no conlleva mucha dificultad con los programas comerciales disponibles actualmente, sin embargo, sobre el terreno se dan varios escenarios que hay que considerar en el procesado de los datos si no se quieren cometer errores de interpretación. Estas malas interpretaciones pueden deberse a efectos topográficos, a estructuras tridimensionales, a cavidades laterales o a altos contrastes de resistividad.

En esta comunicación se evalúa cómo influyen los efectos laterales al perfil 2D o también denominada, topografía 3D. Se parte de un modelo sintético que representa un dique sobre el que se realiza un perfil de 56 electrodos sobre la coronación y se estudia cómo afecta la topografía a la interpretación final.

¹⁵ David Cimadevilla Fuente, email: dcimadevilla@hydrogeophysicsndt.com

2. METODOLOGÍA

Medida de resistividad

El principio fundamental de la técnica ERT es la Ley de Ohm (Ec.1), relaciona la resistencia de un material con el potencial aplicado y la corriente que pasa por dicho material. La resistencia medida depende de la resistividad ρ , propiedad característica de cada material, así como de un factor K , que relaciona las dimensiones del material. Para el caso más sencillo, un cilindro de dimensiones L (longitud) y S (sección), la resistencia R viene definida por la Ec.2.

$$\Delta V = IR \quad (1)$$

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (3)$$

$$\rho_a = RK \quad (4)$$

Si se desarrolla el modelo de Ohm para una superficie semiesférica, homogénea e isotrópica, simplificación de la trayectoria de las líneas de corriente en el terreno, se obtiene una resistividad aparente ρ_a (Ec.4). Viene determinada por la resistencia R medida con el equipo ERT y el factor geométrico K , en metros, que depende de la disposición de los electrodos de corriente y de potencial. El término de resistividad aparente es un término que hace referencia a la resistividad promedio medida entre pares de electrodos o lo que es lo mismo, la resistividad medida para un modelo homogéneo.

En este estudio se cuantifica en términos de resistividad aparente como afecta el factor geométrico como consecuencia de un efecto lateral al perfil, es decir el efecto producido como consecuencia de las paredes del talud en el dique y discriminar entre los efectos que se producen como consecuencia de la topografía y los efectos producidos por la conductividad del terreno.

Modelización

La Figura 1 presenta el modelo sintético generado para evaluar el efecto de la topografía 3D con un dique con las siguientes dimensiones: 100 m de longitud, 5 m de altura, 20 m de anchura en la base, 5 m de anchura de coronación y una pendiente lateral de 45°. Se ha utilizado un dispositivo dipolo-dipolo de 56 electrodos con una separación entre electrodos de 1.5 m, dispuesto longitudinalmente en la parte alta del dique, tal como muestra la fig. 1. El modelo se divide en un primer nivel de 50 $\Omega \cdot m$ de 10 m de potencia desde la parte alta del dique y un nivel inferior de 500 $\Omega \cdot m$.

La Figura 2 presenta el mallado utilizado en los cálculos numéricos con un refinamiento mayor en la zona próxima a los electrodos. Un total de 1823 puntos. En la simulación se utilizó el código BERT (Boundless Electrical Resistivity Tomography) (Günther et al. 2006), un código libre para la modelización e inversión de datos ERT. A partir de la definición de resistividad aparente, a priori, se interpreta que los laterales del dique provocan una compresión de las líneas de corriente lo que va a suponer un aumento en los potenciales medidos y por tanto un aumento en la resistividad aparente.

En primer lugar, los potenciales son calculados para el modelo homogéneo teniendo en cuenta el relieve superficial. De esta forma las resistividades aparentes solamente contienen el efecto de la superficie. El efecto topográfico, t , es la relación entre el modelo sin topografía y el modelo con topografía. Con un valor de $t=1$, las medidas no están afectadas por la topografía, $t>1$ supone una sobrestimación de la resistividad aparente y $t<1$ subestima el valor de resistividad aparente (Carsten et al. 2006).

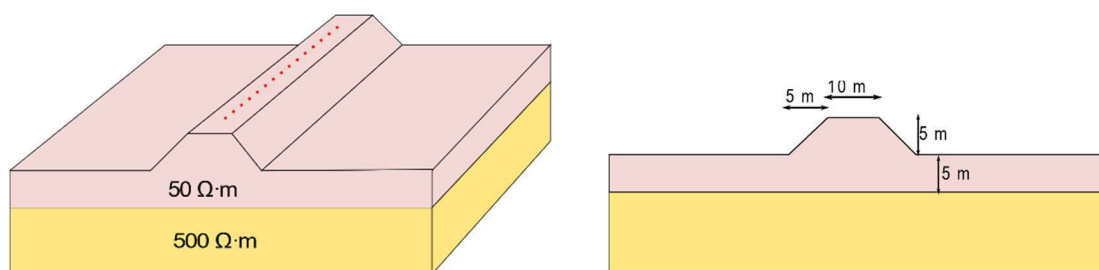


Figura 1. Esquema conceptual del modelo simulado (izq.). Vista frontal con sus dimensiones (dcha.).

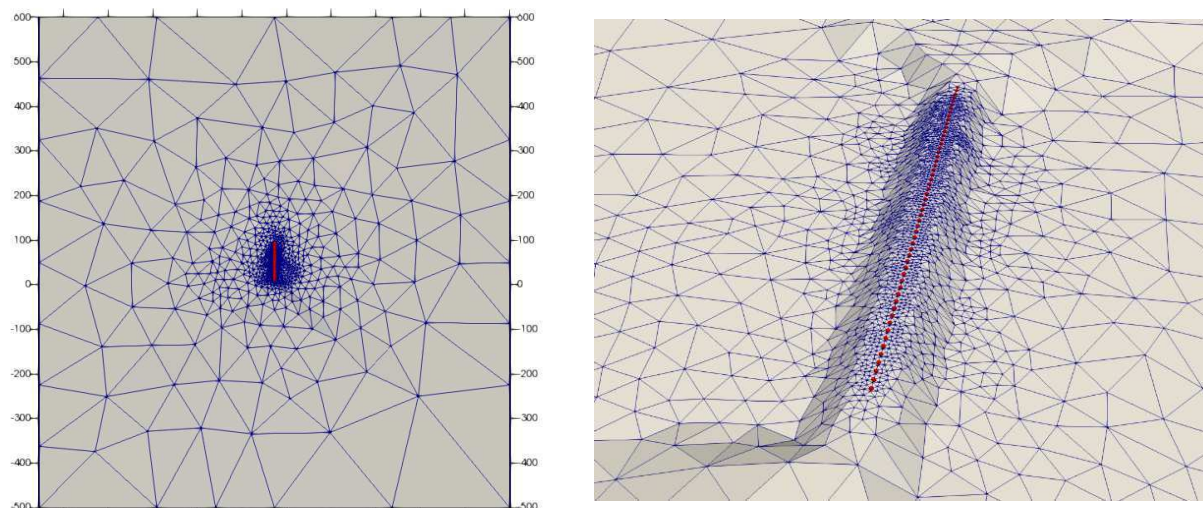


Figura 2. Mallado 2D con mayor refinamiento próximo a los electrodos (izq.). Mallado 3D con topografía (dcha.).

3. RESULTADOS

La Figura 3 izquierda, representa la relación, en términos de resistividad aparente, del efecto topográfico a lo largo del dique. La mayor variación se observa en los dipolos con una separación entre 16,5-31,5 m con un valor de $t=1.5$, lo que supone un 50% de variación del valor de resistividad aparente respecto al modelo sin topografía. Esta zona corresponde a líneas de corriente que se ven obligadas a circular por el interior del dique sin posibilidad de extenderse lateralmente, por lo tanto, el voltaje medido es mayor y la resistividad aparente será mayor.

La zona con menos afección es la zona superficial con $t \approx 1$. Las corrientes no se extienden más allá de paredes del dique y por lo tanto el voltaje será el mismo que para el de un modelo homogéneo.

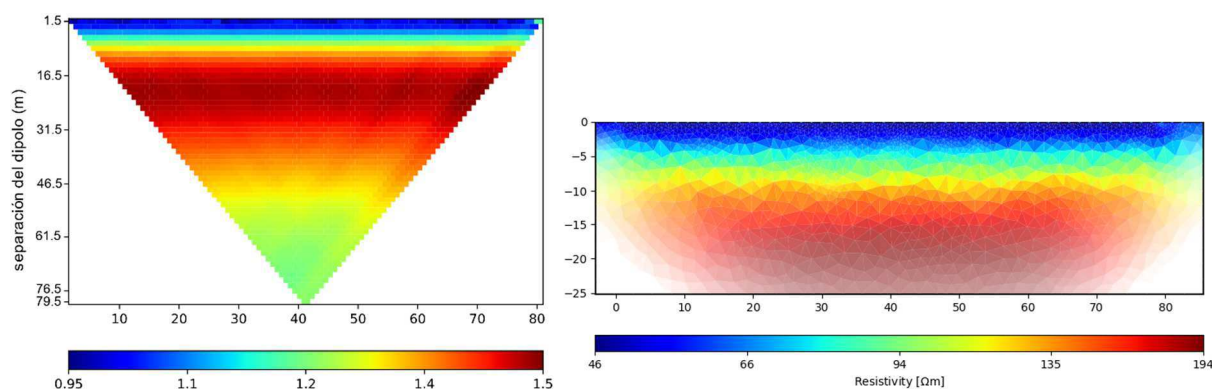


Figura 3. A la izquierda, pseudosección del efecto topográfico del perfil dipolo-dipolo. El eje de ordenadas refleja la separación entre dipolos y el eje de abscisas la longitud del perfil. A la derecha, resultado de la inversión con la corrección topográfica.

El resultado de la inversión, si se tiene en cuenta este efecto topográfico, se presenta en la Figura 3, derecha. Se observa un nivel superior de 5 m de potencia con una resistividad de $50 \Omega \cdot m$ que se ajusta al valor del modelo de entrada. Por debajo de este nivel, se malinterpreta un segundo nivel de 5 m de potencia que se aproxima a los $100 \Omega \cdot m$, valor que se desvía en un 50% respecto al valor de entrada del modelo.

El contacto con el nivel resistivo basal queda definido con buena resolución a 10 m de profundidad con un nivel máximo de resistividad de $194 \Omega \cdot m$.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha evaluado el efecto de la topografía sobre las mediciones adquiridas con la técnica de tomografía eléctrica resistiva ERT. Esta técnica geofísica ha sido ampliamente utilizada en

diferentes áreas de la ingeniería y la ciencia para la obtención de una imagen del subsuelo a partir de sus propiedades eléctricas. La disponibilidad de equipos de medición avanzados y programas de procesado sencillos, hace que la técnica sea muy usada con fines empresariales. Sin embargo, esta sencillez no lo es tanto en escenarios concretos del medio natural, y da lugar a malas interpretaciones si no se tienen en cuenta ciertos factores.

En esta comunicación se ha analizado cómo influye la geometría, en este caso de un dique, sobre el que se realiza un perfil longitudinal de 56 electrodos en la coronación. Se ha demostrado cómo el efecto de borde como consecuencia de las paredes del dique genera que se produzca una sobrestimación de la resistividad en la mitad inferior del dique en un 50% y se malinterprete un nivel resistivo que no corresponde con el modelo de entrada. Las simulaciones se realizaron con el código de elementos finitos BERT. Un Código de simulación que permite generar mallas de geometrías complejas.

REFERENCIAS

- Carsten, R., Thomas, G. & Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – I . Modelling. *Geophys. J. Int.*, 166, pp.495–505.
- Fernández-Álvarez, J.-P. et al., 2017. Combined GPR and ERT exploratory geophysical survey of the Medieval Village of Pancorbo Castle (Burgos, Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 144.
- Greggio, N. & Giambastiani, B.M.S., 2018. High-Resolution Electrical Resistivity Tomography (ERT) to Characterize the Spatial Extension of Freshwater Lenses in a Salinized Coastal Aquifer. *Water*, pp.10–13.
- Günther, T., Rücker, C. & Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of dc resistivity data incorporating topography – II . Inversion. *Geophysical Journal International*, 166, pp.506–517.
- Lemos Camarero, P. & Augusto Moreira, C., 2017. Geophysical investigation of earth dam using the electrical tomography resistivity technique. *Geosciences*, 70(1), pp.47–52.



Entidades organizadoras



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo

EPM
ESCUELA
POLITECNICA DE
MIERES



Grupos de investigación participantes



Hydro-Geophysics
and NDT Modelling Unit

