MODELOS MEF 4D, REDES NEURONALES Y FUZZY LOGIC DE LA MAQUINARIA Y EQUIPOS EMPLEADOS EN OBRAS SUBTERRÁNEAS

Torno, S.(P); Diego, I.; Toraño, J.

Abstract

The results of this paper are derived from an Investigation Project financed by Technological and Industrial Development Center of the Ministry of Industry and Energy (University of Oviedo – a private company Carbonar S.A.). Graphical Engineering, Neural network, FEM3D, Fuzzy-Logic and FEM4D have been applied to mining and general underground works in this project.

A deep measurement campaign has been widely developed by model adjustment, data being processed through SPSS, Microstation, SiteWorrk and Surfer. A Neural network has been created permitting us to obtain the loading values over roof support, the distance between roof weighting and overloading frequency. The latter has been obtained by the layer strength, the roof rock stratum and the stratum quality index.

Being carried out the roof support unit FEM3D models (piece by piece and assembling), FEM4D models were used introducing the advance movement variables through Fuzzy-Logic models and the neural network values achieved. These are powered tools that can be used to presuppose knowledge of the stress-deformation variation at any real time, which are operating over machinery and equipment in underground activities.

Keywords: Underground works, Underground mining, FEM, Neural network, Fuzzy Logic, Longwall, Roof support

Resumen

Los resultados de ésta publicación derivan de un proyecto de investigación financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial del Ministerio de Industria y Energía (Universidad de Oviedo)-Empresa (Carbonar S.A.) en el que se aplicaron a la minería y en general a las obras subterráneas el conjunto de las técnicas de Ingeniería Gráfica, Redes Neuronales, Elementos Finitos en 3D, Fuzzy-Logic y Elementos Finitos en 4D.

El ajuste y calado de los modelos se realizó en base a amplias campañas de medidas tratando los datos mediante SPSS, Microstation, SiteWork, Surfer. Hemos construido una Red Neuronal que nos ha permitido obtener los valores de la carga sobre la entibación, la distancia entre golpes de techo y la frecuencia de las sobrecargas, a partir de la potencia de la capa y de los estratos del techo y de su índice geomecánico.

Ejecutados los modelos FEM3D de la unidad de entibación pieza a pieza y su ensamblaje, se pasó a FEM4D introduciendo la variable del movimiento de avance a partir de modelos FuzzyLogic y los valores obtenidos en las redes neuronales. Los resultados obtenidos ponen a nuestra disposición unas herramientas potentes para saber en todo momento y en tiempo real las variaciones tenso deformacionales que actúan sobre la maquinaria y equipos en actividades subterráneas.

Palabras clave: Obras subterráneas, Minería subterránea, elementos finitos, redes neuronales, modelos borrosos.

1. Introducción

La maquinaria seleccionada ha sido una entibación autodesplazable empleada en explotaciones subterráneas de yacimientos sedimentarios (figura 1). En una primera etapa los cálculos mediante elementos finitos se hicieron componente a componente, para posteriormente proceder a los cálculos de las unidades ensambladas en 3D y 4D. En reuniones conjuntas de trabajo en la fábrica y en los laboratorios de ensayos se fueron ajustando y afinando los modelos.

Figura 1. Entibación autodesplazable.

La entibación hidráulica, en su función de mantener el hueco de la explotación abierta se encuentra sometida a muy severas y complejas solicitaciones derivadas de las grandes presiones del terreno. La carga total sobre la entibación se puede considerar la suma de tres solicitaciones. Una primera solicitación se debe al techo inmediato que después de ser arrancado el mineral se deforma plásticamente y desciende ejerciendo una presión sobre la entibación que es máxima en el caso de desprenderse el estrato como un bloque. La segunda solicitación, que se manifiesta periódicamente como un incremento de la carga importante, se debe al desprendimiento de bloques de la parte baja del techo principal. Por último, hay una contribución debida al desprendimiento de bloques de roca del techo principal que puede producirse o no según las características del terreno. Si se produce, lo hace con una frecuencia menor que en el caso anterior pero la magnitud de la carga es mucho mayor que en los otros dos casos, pudiendo llegarse a producir lo que se denomina golpes de techo.

Se comprende entonces el importante problema que es el diseño estructural de una entibación hidráulica y la necesidad de utilizar todas las técnicas a nuestro alcance (junto con intensas campañas de medidas y observaciones en mina) que en la actualidad se materializan en potentes programas de cálculo basados en métodos numéricos para análisis dinámico en 3D y 4D (haciendo intervenir el factor tiempo) ajustados.

Básicamente un escudo de entibación puede dividirse en los siguientes bloques ó conjuntos de elementos: base con zapatas de apoyo, barras de la lemniscata, pared de contención del escombro del hundimiento, bastidor de techo y estemples hidráulicos.

Como fuerzas exteriores tenemos las que actúan sobre el bastidor de techo, sobre la base y el efecto del escombro del hundimiento sobre la pared posterior. Esas fuerzas tienen una componente vertical, la carga del techo y la reacción del muro, y otra horizontal, el rozamiento del escudo contra el material rocoso. Estas fuerzas exteriores se equilibran por la acción de los estemples y del cilindro hidráulico de unión del bastidor de techo y de la pared posterior. A partir de estos valores de las cargas se podrá analizar la condición más crítica de solicitación en cada elemento, comprobando si las tensiones que generan serán superiores a las admisibles por los materiales empleados en el diseño. Teniendo en cuenta la forma y dimensiones de la sección, el espesor de la chapa utilizada y el valor del momento flector máximo se llegaría a un valor máximo de tensión que se compararía con el límite elástico del acero empleado. El análisis de las juntas soldadas se haría a partir del valor del cortante máximo y de las dimensiones del cordón de soldadura.

El estudio clásico del estado tensional de las piezas de la entibación bajo unas hipótesis de carga básicas haciendo uso de la teoría de la elasticidad, presenta claras deficiencias ya que el problema ha de ser simplificado hasta lograr un equilibrio con las posibilidades de resolución por las formulaciones básicas de resistencia de materiales.

Los métodos numéricos, tales como el método de los elementos finitos, han demostrado en los últimos años una enorme versatilidad. La modelización se ha realizado mediante los programas SolidWorks y CosmosM.

2.- Modelizaciones FEM3D

La unión de los elementos formando una pila ó unidad de entibación en 3D se muestra en la figura 2. Expondremos de forma resumida los cálculos efectuados sobre la entibación en MEF3D, tomando como ejemplo para no extendernos demasiado el elemento más complejo, el bastidor de techo.

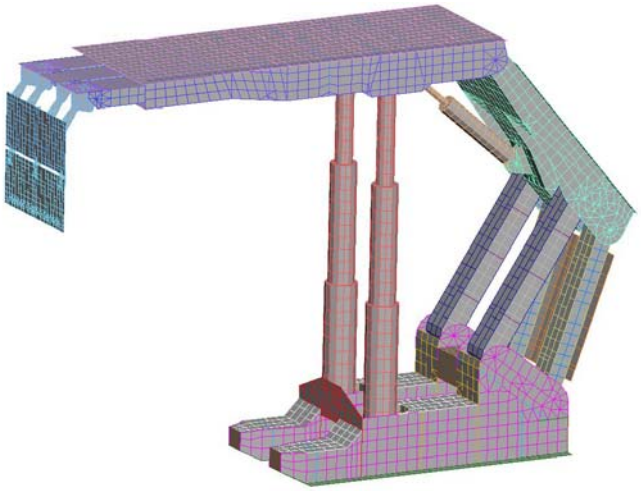


Figura 2. Entivación en 3D.

Sobre este elemento de la entibación actúan un gran número de solicitaciones: cargas de techo, fuerza de los estemples y cilindro de conexión con el escudo, así como las fuerzas transmitidas por el conjunto visera/flipper y las de articulación con el escudo. Las figura 3 y 4 representan las tensiones de Von-Mises en el bastidor de techo bajo unas hipótesis de carga medias. Los resultados muestran una excesiva concentración de tensiones en la zona

inferior de las placas longitudinales que llega a alcanzar los 390 MPa superando por tanto el límite elástico del acero.

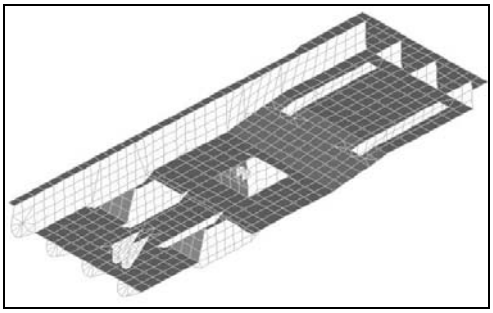


Figura 3. Modelo del bastidor de techo.

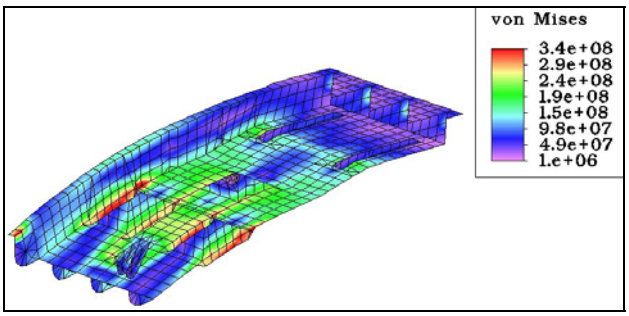


Figura 4. Tensiones en el bastidor de techo.

Los resultados que se muestran en la figura 5 muestran claramente cómo y donde se produce la flecha máxima en la punta del bastidor. El efecto de la flexión queda claramente de manifiesto al analizar las tensiones principales, cuyo valor mínimo indica la compresión que produce el momento flector en la zona inferior del bastidor de techo.

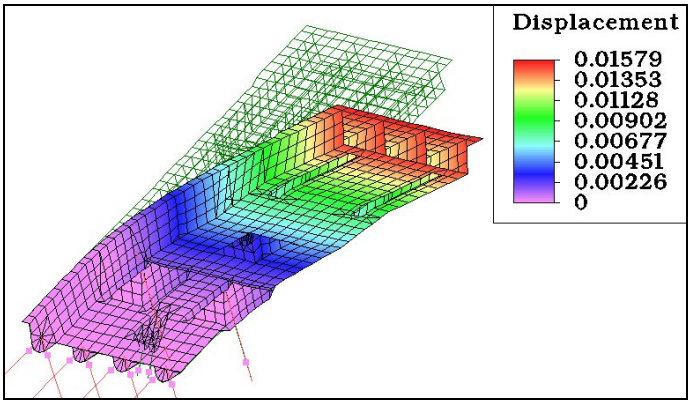


Figura 5. Deformación del bastidor bajo carga uniforme de techo (0,4 MPa).

En la zona de aplicación de la fuerza correspondiente a los estemples aparece una concentración local de tensiones centrada en torno al nodo en que se aplica la carga puntual.

3. Modelizaciones 4D

3.1. Introducción

Tomando como base amplias campañas de medidas para la validación de los modelos, hemos empleado en minería y obras subterráneas técnicas tales como Soft-Computing & Neuro-Fuzzy (cálculo de cargas sobre la entibación a partir de la aplicación de Redes Neuronales y elaboración de Modelos Fuzzy en la predicción de las velocidades de avance), Elementos Finitos (modelización, simulación dinámica y cálculos tensodeformacionales en 4D).

En la figura 6 y 7 se expone un resumen de los resultados de la campaña de medidas con un estudio y modelado en 3D de la capa y del techo y muro de la misma y el análisis de la

capa mediante un estudio estadístico ayudándose de programas como el SPSS, basándose en datos recogidos de la experiencia (en dicha figura se muestra la distribución de potencias en el panel de la capa así como la evolución de la potencia real explotada correspondiente al escudo que ocupa el lugar central en el tajo).

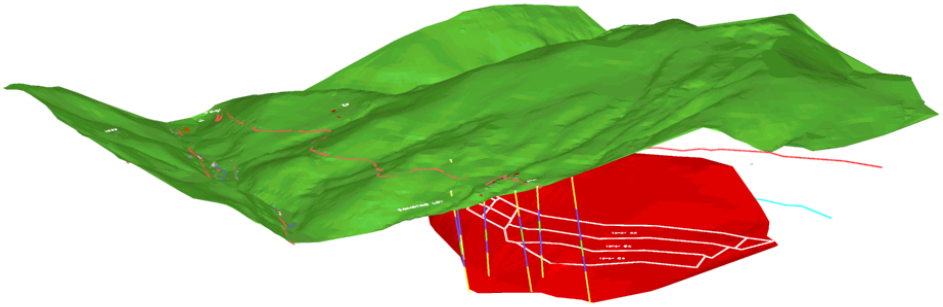


Figura 6. Representación 3D del yacimiento.

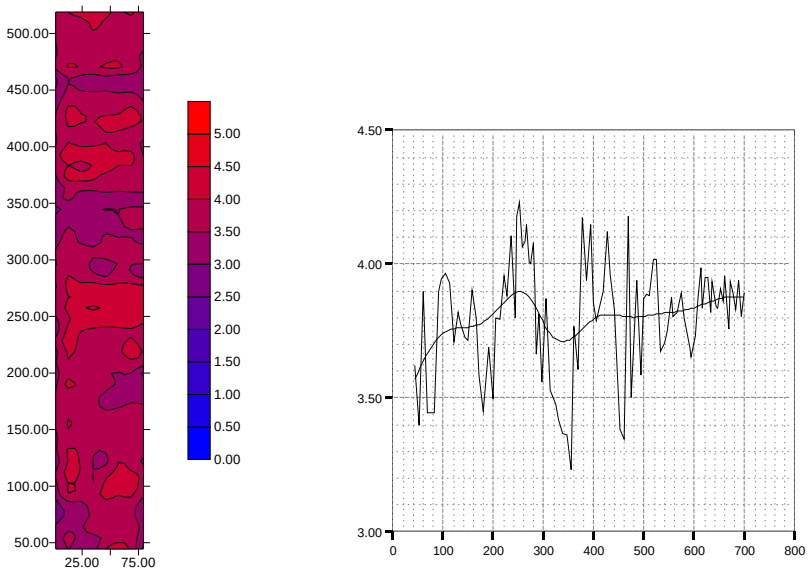


Figura 7: Distribución de potencias reales durante la explotación de un panel.

En la excavación y el sostenimiento de las labores subterráneas intervienen múltiples variables (propiedades geológicas y geomecánicas estáticas y dinámicas del terreno, características estáticas y dinámicas de la maquinaría, etc) que hace imposible la modelización de su comportamiento mediante modelos analítico-matemáticos, debiendo de recurrir en éstas ocasiones a modelos cualitativos basados en la experiencia de los operarios que manejan los equipos. Sin embargo estos modelos pueden formularse con variables y reglas borrosas.

Si la lógica es la ciencia de los principios formales y normativos del razonamiento, la lógica borrosa se refiere a los principios formales del razonamiento aproximado, es decir los sistemas de lógica borrosa tienen la capacidad de modelar modos de razonamiento no preciso que juegan un papel esencial en la notable habilidad humana para tomar decisiones racionales en entornos de incertidumbre e imprecisión. La lógica borrosa permite

representar el conocimiento común en un lenguaje matemático especial con la posibilidad de reinterpretación de los resultados finales a través de procesos de naturaleza matemática.

El trabajo comprende la modelización por Elementos Finitos y la elaboración de un Modelo Borroso que nos permita predecir en tiempo real la velocidad de avance y el comportamiento de la entibación dinámico de la entibación mediante el volcado en tiempo real de los resultados obtenidos en la red neuronal.

En la figura 8 se muestran las relaciones de las diferentes técnicas englobadas en Soft-Computing & Neuro-Fuzzy con los modelos FEM y la experiencia en obra.

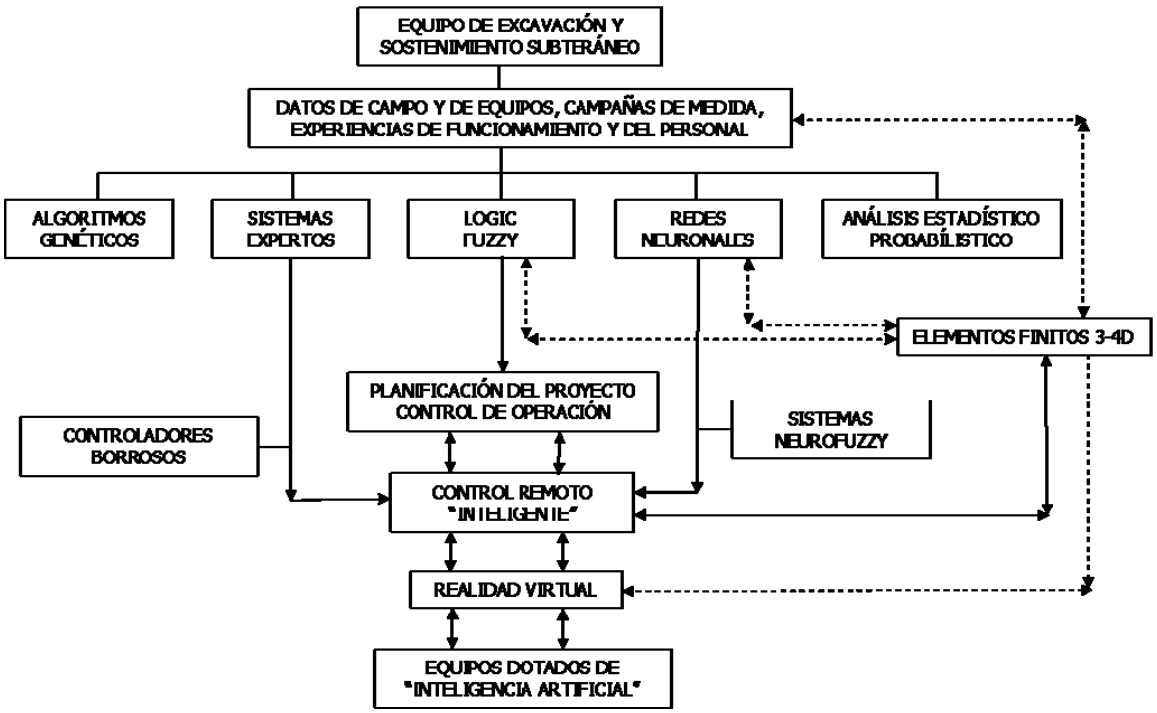


Figura 8. Esquema de (Soft-Computing & Neuro-Fuzzy).

Como hemos comentado, para la validación de los modelos elaborados ha sido precisa la realización de una amplia campaña de medidas en mina que comprendía: fecha, avance, potencia explotada, presencia de carbón a muro, presencia de carbón a techo, buzamiento longitudinal, buzamiento transversal, portancia, esterilidades en el frente excavado y fracturación. En la figura 9 se muestra como ejemplo la evolución en un mismo gráfico de todas las variables medidas en función de la distancia explotada para uno de los paneles.

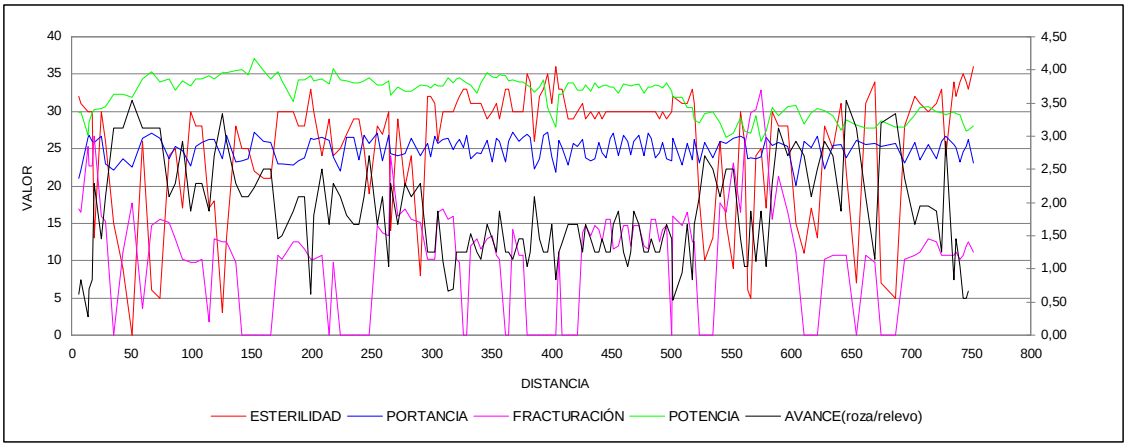


Figura 9. Variación de los parámetros medidos en uno de los paneles.

3.2. Modelización cinemática

En las figuras 10 a) y b) se muestra un resumen de la modelización dinámica en 3D de la entibación autodesplazable. El trabajo por elementos finitos (FEM) ha comprendido el diseño y modelización en 3D de las diferentes piezas. El tajo dispone 58 unidades de entibación habiendo modelizado para cada unidad 89 piezas con 236 tipos de relaciones entre las mismas. Como hemos comentado, diseñadas las piezas se procede sucesivamente a su ensamblaje y a continuación a la generación del movimiento en las mismas.

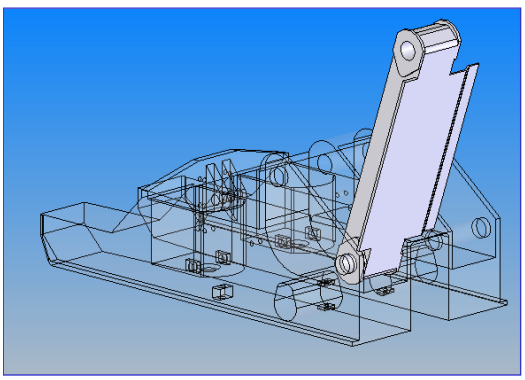
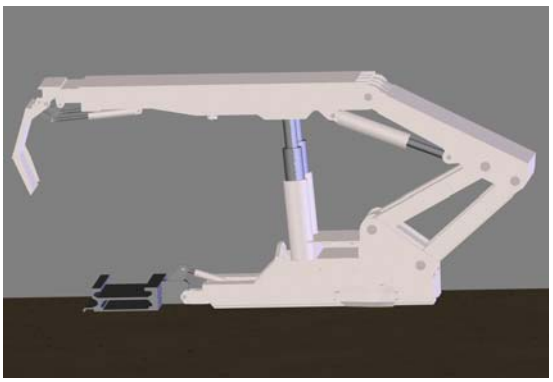

a)

b)

Figura 10. Unidad de entibación en modelización y ensamblada y “dinamizada”.

Dicho movimiento ha sido ejecutado mediante dos tipos de rutinas:

Introduciendo la ecuación del movimiento de todos los componentes mediante una función general denominada “expresión” programada en lenguaje Fortram y que es la combinación de las subfunciones correspondientes a las 89 piezas de que se compone cada pila.

Mediante la elaboración de modelos borrosos (Fuzzy Logic).

3.3. Modelización Fuzzy-Logic

Las relaciones entre el comportamiento estructural del avance de la entibación y las características morfológicas, geológicas y geomecánicas de la capa de carbón representan un sistema de alta complejidad que no tiene soluciones simples mediante la matemática tradicional y sus correspondientes algoritmos computacionales. El avance del tajo es función

de varias variables representada un a priori por una desconocida “hipersuperficie” en 5D que puede ser expresada en su forma general por $S = f(x1, x2, x3, x4, x5)$ siendo S la función avance, x1 la potencia de la capa de carbón, x2 y x3 la pendiente transversal y longitudinal de la misma, *x*4 el grado de fracturación del techo entre la punta del bastidor de la entibación y el frente de carbón y *x*5 la dureza del carbón. La obtención de dicha “hipersuperficie” se ha realizado a través de dos programas Fuzzy Logic, uno comercial y otro elaborado por nosotros.

En la figura 11 se muestran como ejemplo dos “hipersuperficies 3V” de las muchas obtenidas en el estudio y en la figura 12 se muestra en el mismo gráfico y para 800 m de panel explotado el avance real obtenido en la mina y el avance suministrado por el modelo Fuzzy.

Destacaremos como era de esperar el mejor ajuste del modelo con mayor número de reglas de inferencia y la sensibilidad de los modelos frente a las variables “esterilidad” y “fracturación”.

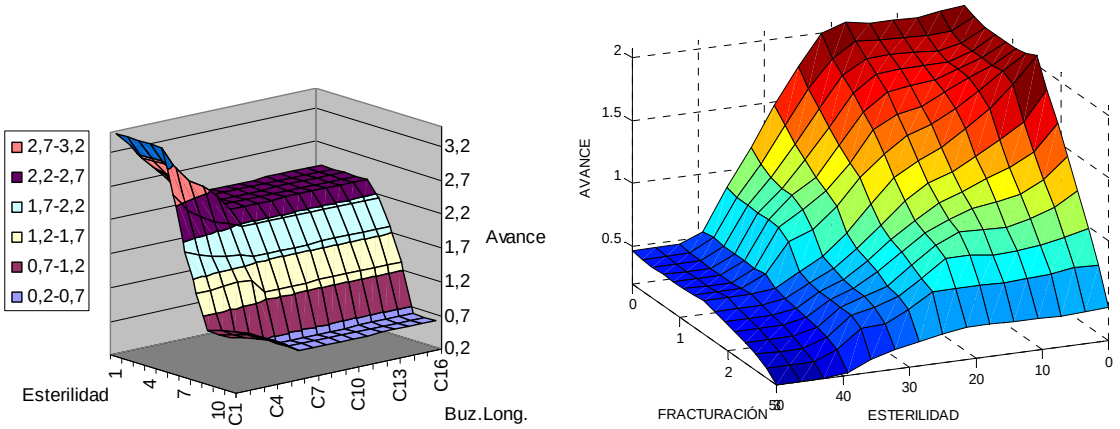


Figura 11. Relaciones entre variables de entrada.

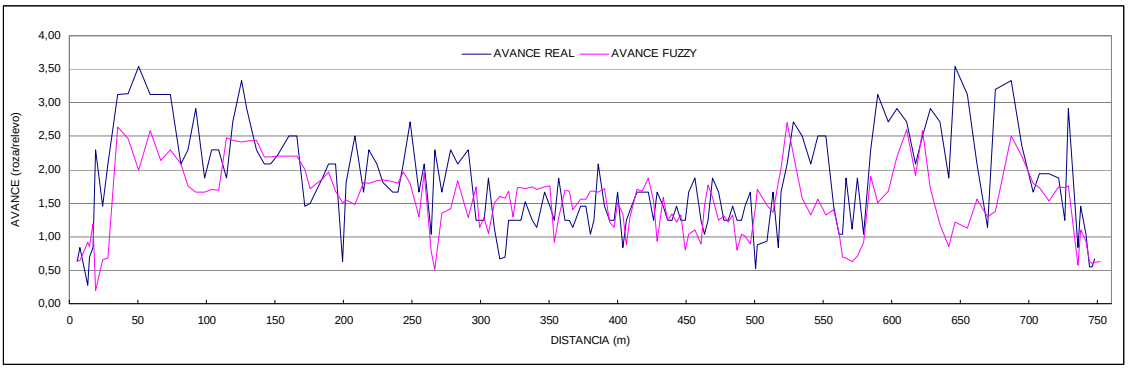


Figura 12. Taller B4. Modelo de 127 Reglas.

3.4. Modelización dinámica.

Las cargas sobre el techo de la entibación, determinadas tal como hemos apuntado mediante redes neuronales que han sido aplicadas sobre la estructura de la pila determinando el comportamiento tenso-deformacional de la misma. Se han diseñado redes neuronales propias de una sola capa oculta sin retroalimentación por nosotros diseñadas y

las basadas en software comercial tales como el Easy NN, en ambos casos reeducadas mediante campañas de medidas, obteniendo de esta forma continuamente y en tiempo real la carga sobre la entibación, la distancia entre las sobre cargas del techo y la frecuencia de dichas sobrecargas. Las variables de salida para la entibación en éste último caso son sd= 90.6 t/m2, L= 19.8m y fy= 44.2% que no difieren del cálculo matricial.

	I: H(m)	I: him(m)	I: hm(m)	I: SQI	O: sd(t/m2)	O: L(m)	O: fy(%)
T: Mina A	2.1300	5.3400	5.2700	4	64.0000	12.0000	14.0000
T: Mina B	2.5900	3.4800	6.9000	4	78.0000	15.0000	26.0000
T: Mina E	2.7500	0.0000	11.0000	5	91.0000	20.0000	45.0000
Q: Carbon+	3.8000	2.0000	13.2000	3	90.6677	19.8377	44.2320

Figura 13. Salida de programa de redes neuronales.

El análisis se ha efectuado sobre distintos instantes críticos de la pila en movimiento (4D). Se ha realizado el estudio de los componentes individuales y de los ensamblajes parciales, añadiendo componentes a la estructura de forma que podamos ir poco a poco validando los resultados obtenidos y viendo la coherencia de los mismos, para finalmente lanzar un modelo de toda la estructura y obtener una solución final a nuestro problema con un grado de confianza mayor al que obtendríamos si realizásemos el análisis de toda la estructura de la entibación en un único paso.

Mostramos como ejemplo el análisis global sobre una pila en su desplazamiento. En las figuras 14 y 15 podemos ver las tensiones y deformaciones. En las figuras 16 y 17 ocultamos el bastidor a objeto de poder ver en más detalle la respuesta de nuestra estructura ante las solicitaciones exteriores.

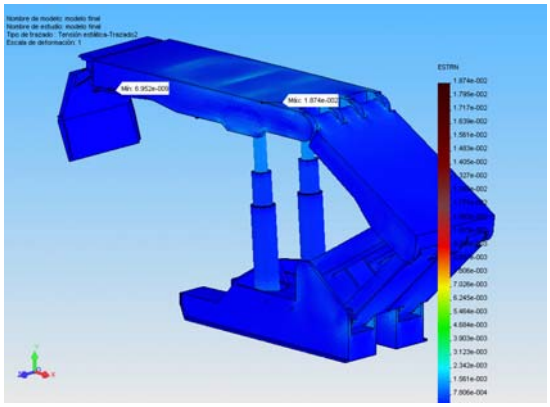


Figura 14. Tensiones

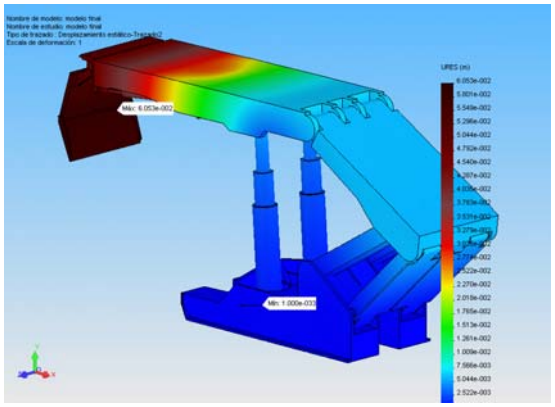


Figura 15. Deformaciones

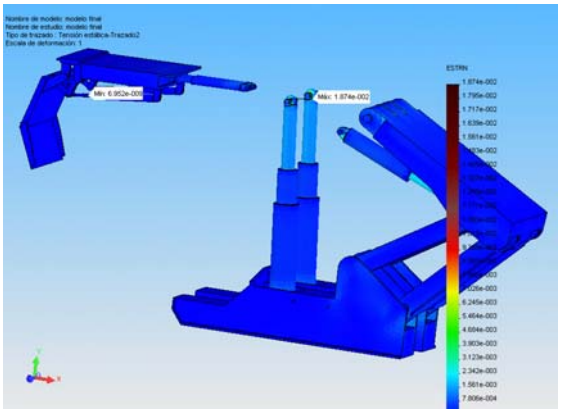


Figura 16. Detalles de tensiones.

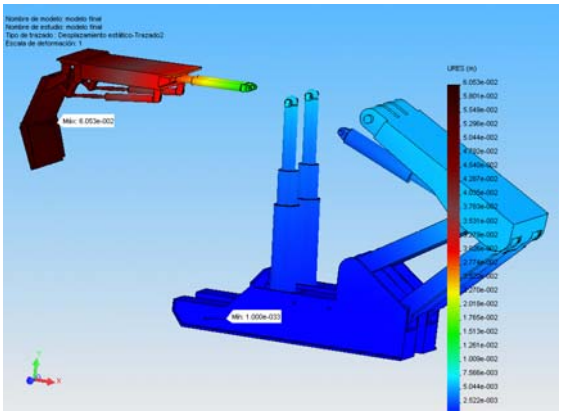


Figura 17. Detalles de deformaciones.

Referencias

1-J. Toraño, J.M. Rivas, R. Rodríguez, M.M. Casal (2003): Economic and Technical results mining a 4 m thick coal seam in Spanish Carbonar colliery. Glückauf. ISSN: 0340-7896. 139, pp 323-328. Alemania.

2-J. Toraño, R. Rodríguez, J.M. Rivas, A. Pelegry (2004): Simulation of machinery movements in underground spaces and analysis of its adaptability and possible modifications. European Congress on Computional Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS). Jyväskylä. Finlandia.

3-J. Toraño, R. Rodríguez, I. Diego, J. M. Rivas, A. Pelegry (2005): Relationship between the geological and working parameters in high productivity longwalls in underground competitive coal mining of very thick seams. Mine Planning and Equipment Selection MPES. Alberta, Canadá.

4-J. Toraño, R. Rodríguez, I. Diego, J. M. Rivas, A. Pelegry (2005): Use of FEM, Fuzzy Logic and Virtual Reality in the underground activities. Application to the longwall mining works. Fifth International Conference on Computer Applications in the Minerals Industries CAMI. Alberta. Canadá.

5-J.M. Rivas, I. Diego, S. Torno, J. Toraño (2007): Experiencias en minería subterránea en la explotación de capas potentes de carbón mediante tajos largos integramente mecanizados. XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales. Oviedo. España.

6-J. Toraño, M. Menéndez, I. Diego, M. Gent (2008): A FEM - SoftComputing - Virtual Reality model approach in a Coalface Longwall Mining Simulation. Automations in Constructions. ISSN: 0926-5805. 18: 1-19. Netherlands.

Correspondencia

Susana Torno Lougedo
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad de Oviedo.
Teléfono de contacto: 985104254 / 616899180
Email de contacto: jta@uniovi.es