

CASOS PRÁCTICOS DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN LA REDUCCIÓN DEL RIESGO GEOTÉCNICO

Ignacio Zuloaga Fábrega, *INGEOSOLUM, s.l., Madrid, España, ignacio@ingeosolum.es*

RESUMEN

Se estudian tres casos prácticos en los que la aplicación del Método de los Elementos Finitos (MEF) ha permitido a la empresa INGEOSOLUM, reducir el riesgo geotécnico así como ejecutar obras con seguridad y economía. Aplicando el MEF hemos podido investigar mecanismos de falla y relaciones terreno-estructura que no son evidentes cuando se utilizan otros métodos de Análisis Geotécnico (AG). El trabajo que aquí se presenta, se desarrolla en dos partes. En primer lugar, y de una forma sucinta, se presenta el proceso general que se ha seguido para realizar el AG mediante el MEF. Desde la elección del modelo constitutivo, pasando por la determinación de parámetros geotécnicos, inclusive de los análisis de sensibilidad. En un segundo lugar, se ilustran varios casos prácticos en los que se pormenorizan las principales conclusiones sobre el cómo se ha reducido el riesgo geotécnico y la manera en que el MEF ha contribuido a que se proyecten obras con seguridad y economía.

1. INTRODUCCION

El MEF es una técnica numérica que ha sido utilizada, con relativo éxito, desde hace más de tres décadas (Naylor, 1981), en la resolución de problemas de Ingeniería Geotécnica. Los programas de ordenador para el AG con el MEF han sido desarrollados específicamente para estudiar problemas que involucran: la interacción entre el terreno y las estructuras, la construcción de obras geotécnicas y sus diferentes etapas, problemas de filtración y estudios sobre las acciones dinámicas en el terreno.

Bien es sabido que los métodos tradicionales de análisis están basados, habitualmente, en hipótesis de cálculo que simplifican enormemente el problema a ser analizado. Adicionalmente, estos métodos no tienen la capacidad de tomar en cuenta todos los factores y variables que el ingeniero proyectista necesita emplear, pudiendo limitar severamente la exactitud de la solución a un problema particular. La alternativa a estas limitaciones es el MEF, que correctamente aplicado, es capaz de superar estos impedimentos, ofreciendo numerosas ventajas sobre los métodos de cálculo convencionales.

Correctamente aplicado, el MEF es capaz de tomar en cuenta: las geometrías complejas, cualquier caso y condiciones de aplicación de cargas, compor-

tamiento no lineal de los materiales, distribución no homogénea de los geomateriales, y el complejo problema de la interacción terreno-estructura.

Es importante destacar que uno de los elementos fundamentales para realizar un AG acertado, empleando el MEF, es la elección de un modelo constitutivo apropiado al terreno en estudio. Tal y como señala Potts (2003), al no existir un modelo constitutivo completo que reproduzca todos los aspectos del comportamiento real del terreno, la forma de superar esta limitación es distinguir, para cada análisis que se realice, qué aspectos del problema son los de mayor interés y elegir un modelo adecuado para reproducir el comportamiento que deseamos estudiar.

No obstante, para valerse de un modelo geotécnico particular hacen falta realizar ensayos, de campo y de laboratorio, para determinar los parámetros necesarios que reproduzcan el comportamiento del terreno.

Seguidamente describiremos, muy brevemente, el proceso para la obtención de parámetros necesarios para el AG mediante el MEF empleando ensayos de laboratorio tradicionales y modernos.

Como no existe todavía un modelo constitutivo que pueda reproducir todos los aspectos del comportamiento real del terreno, es necesario decidir cuáles son las propiedades que gobiernan el comporta-

miento de un problema geotécnico particular (rigidez, deformación, resistencia, dilatación, anisotropía, etc.) y elegir un modelo constitutivo que pueda capturar estos aspectos. Otro factor que subordina la selección de un modelo del terreno en particular, es la disponibilidad de datos del terreno adecuados para determinar los parámetros necesarios. Esto limita, en la práctica, el uso de modelos sofisticados, ya que generalmente los parámetros que se requieren no se pueden determinar de la información de campo y de laboratorio disponibles.

Si bien la primera parte de este artículo trata sobre los ensayos de laboratorio necesarios para determinar los parámetros necesarios para aplicar correctamente el MEF en el AG, se debe aclarar que un buen Estudio Geotécnico debe combinar las fortalezas de los ensayos de campo y de laboratorio, y estos deben complementarse mutuamente con el objeto de resolver los problemas planteados.

2. PARAMETROS GEOTECNICOS

Nos referimos en esta sección a los parámetros físicos de los materiales, que constituyen en todo o en parte los parámetros necesarios para capturar el comportamiento geotécnico de un terreno. Estos parámetros reflejan las propiedades del terreno y tienen, para cada material particular, un valor constante. Ejemplos de estos parámetros son: el Ratio de Poisson μ , el Angulo de Rozamiento en Estado Crítico ϕ_{cs} (o M), la inclinación de la Línea de Consolidación Virgen (VCL), λ , y las Líneas de Hinchamiento, κ . Estos parámetros no deben ser modificados durante el cálculo y sus valores no deben depender del tipo problema que se está resolviendo, ya que deben caracterizar al terreno, y por ende, son constantes de cualquier ecuación matemática.

Los parámetros de los materiales son de dos tipos principales; parámetros que caracterizan la rigidez (deformabilidad) del terreno y parámetros que caracterizan su resistencia. De los parámetros mencionados en el párrafo anterior, λ y κ pertenecen al primer grupo que también incluye, por ejemplo, parámetros que se obtienen de los Ensayos de Consolidación Unidimensional C_c y C_s . Al grupo de los parámetros que caracterizan la resistencia del suelo pertenecen, por ejemplo, el Ángulo de Rozamiento Interno Φ' y la cohesión aparente c' .

Las variables de estado (esfuerzos, porosidad, orientación de los contactos intergranulares, grado de saturación, temperatura, velocidad de deformación, etc.) describen el estado actual de un material y por lo tanto pueden cambiar durante el AG en un amplio rango (siempre que sea físicamente aceptable). Las variables de estado, deberían de ser posibles de medir-

se (al menos teóricamente) en cualquier instante de tiempo.

Es importante mencionar que el tensor de la deformación unitaria, para los geomateriales, no es una variable de estado, ya que no puede medirse. Sólo nos es posible determinar las deformaciones incrementales en relación a un estado inicial conocido. Un ejemplo de esto es que el tensor de deformación puede ser elegido arbitrariamente en cualquier ensayo de laboratorio.

En algunos modelos constitutivos avanzados no sólo los parámetros del material, sino los parámetros de estado dependientes se emplean en el modelo. Un ejemplo de esto son los modelos del tipo Cam-Clay.

Un tercer tipo de parámetros, para los modelos constitutivos, son los denominados parámetros ocultos (o internos). Estos son dependientes del estado del material, pero no pueden ser medidos directamente. (Potts, 2002a). Un ejemplo de un parámetro oculto es el tensor que define la traslación de la superficie de fluencia cuando se emplea un modelo en el que existe una regla cinemática de endurecimiento (“kinematic hardening rule”). Una forma de determinar estos parámetros, para un terreno determinado, es realizar un proceso de optimización de parámetros, comparando datos de experimentos con mediciones de campo, simulando casos ampliamente documentados con el modelo que estamos aplicando para el AG.

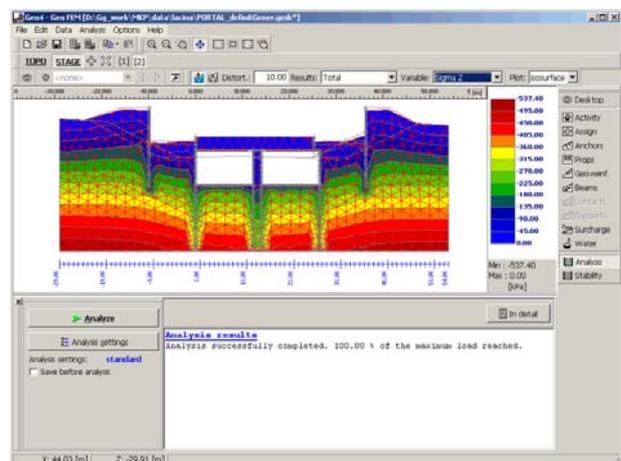


Figura 1. Estructura geotécnica compleja estudiada con la ayuda del MEF. Cajón vial construido mediante la técnica “Cut and Cover”.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO

La investigación de laboratorio es un elemento clave en la mayoría de los proyectos geotécnicos (Potts 2002b). Las actividades en el laboratorio se pueden dividir en varias fases:

- Determinación del perfil del terreno, acciones que involucran estudios de la caracterización del terreno, ensayos índice (por ejemplo: contenido de humedad, granulometría, Límites de Atterberg), contenido químico y orgánico, mineralogía, etc.;
- Ensayos de laboratorio sobre muestras del terreno, con el objeto de caracterizar su comportamiento mecánico (propiedades de esfuerzo-deformación, fluencia, resistencia, plastificación, permeabilidad, etc.);
- Determinación de parámetros que serán empleados en métodos de cálculo empíricos (por ejemplo: CBR para pavimentos);
- Modelización física (ensayos en la centrífuga, cámaras de calibración, mesas vibrantes).

Para la determinación de los parámetros, que serán empleados en los modelos constitutivos con los que realizaremos el AG, los ensayos de laboratorio, sobre las muestras del terreno, son los más apropiados. Sin embargo, también hace falta hacer un uso de los resultados de los ensayos que se han practicado para la determinación del perfil del terreno y así complementar la información disponible, generándose un “modelo” del terreno.

El objetivo principal de los ensayos de laboratorio, sobre testigos que se han extraído del terreno, es el medir, con la mayor exactitud posible y en un ambiente controlado, la respuesta de las muestras del terreno a los cambios impuestos de esfuerzos, deformaciones y/o cambios en la presión de poros.

Destacamos que la mayor ventaja de los ensayos de laboratorio sobre los de campo, es naturalmente la posibilidad de controlar y medir la respuesta de las muestras del terreno con una gran exactitud.

Por otro lado, la mayor desventaja de los ensayos de laboratorio es la dificultad que existe en la obtención de muestras inalteradas. No obstante esto puede ser superado, en principio, con el empleo de técnicas de toma de muestras avanzadas tales como el muestreador Laval. Sin embargo, todavía existen dificultades para la toma de muestras en arena y suelos poco cementados. La estimación de las propiedades de estos geomateriales necesariamente debe ser determinadas con la ayuda de ensayos de campo.

El requisito indispensable, para un buen AG con el MEF, es que las muestras de terreno que ensayemos en el campo y el laboratorio simulen las condiciones de campo lo más precisamente posible. Esto nos obliga a reproducir:

- El estado de tensiones iniciales (ejemplo: grado de consolidación);
- Los cambios de esfuerzos que se le impondrán al terreno;

- La secuencia y velocidad de los cambios;
- Las condiciones de drenaje de campo.

Si un material natural es ensayado, los experimentos se realizan normalmente sobre una serie de muestras obtenidas a diferentes profundidades a lo largo y ancho del sitio de la obra, de tal forma que se puedan recoger, de una manera amplia, los parámetros con los que el terreno responde a nuestros experimentos. De igual manera, si se emplean muestras de terreno reconstituidas, se prepara un grupo de probetas con un procedimiento idéntico, y se ensayan bajo esfuerzos iniciales distintos, de tal forma que se pueda determinar una respuesta completa y esto nos permita obtener los parámetros para el AG.

4. HERRAMIENTA INFORMÁTICA

Para realizar al AG se empleó el software GEO-FEM del paquete informático GEO4. GEO-FEM es una herramienta informática específicamente diseñada para el análisis bidimensional de problemas geotécnicos de deformación y estabilidad. El programa es una herramienta poderosa para el análisis práctico de problemas de geotecnia, con una sólida base teórica y una interfaz muy fácil de utilizar. Permite resolver un gran número de problemas geotécnicos 2D: asientos, excavaciones, túneles, muros, pantallas, etc. Sus características básicas incluyen:

- Introducción simple de datos de geometría y etapas de construcción;
- Generación automática de la malla y condiciones de frontera;
- Modelización de elementos en contacto con el terreno mediante elementos “barra y viga” (anclajes y estructuras);
- Varios modelos constitutivos (Elástico, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, tipo Cam-Clay (elastoplástico e hiperbólico);
- Corrector automático de topología;
- Base de datos para los parámetros de suelos y rocas;
- Número arbitrario de cargas puntuales y distribuidas (rectangulares, trapezoidales) en cualquier combinación;
- Número arbitrario de anclajes, vigas, arriostramientos, refuerzos con geotextiles e interfaces;
- Modelización de la presencia de agua mediante isolíneas de presiones de poros o niveles freáticos;
- Posibilidad de estudiar las diversas etapas de construcción en un solo análisis;

- Algoritmo de reducción de c y ϕ para determinar factores de seguridad.

5. EJEMPLOS PRACTICOS

5.1 Recalce, refuerzo de cimentación y mejora del terreno para viga de apoyo de grúa en muelle, cimentada directamente sobre el dique y cuyas cargas de trabajo serán incrementadas

El recalce de cimentaciones consiste en la redistribución de las cargas en superficie a una profundidad mayor. El objetivo de esta técnica es el de crear una nueva cimentación en la que las cargas puedan ser redistribuidas total o parcialmente sin deformaciones negativas. Para lograr esto, se construye una cimentación más profunda debajo de la existente.

A objeto de permitir el incremento de cargas sobre la viga de apoyo y evitar la pérdida de capacidad portante del terreno debida a los subsecuentes incrementos de carga, se eligió reconstruir la cimentación, reforzando y mejorando el terreno con la técnica del SuperJet-Grouting (Zuloaga, 2004).

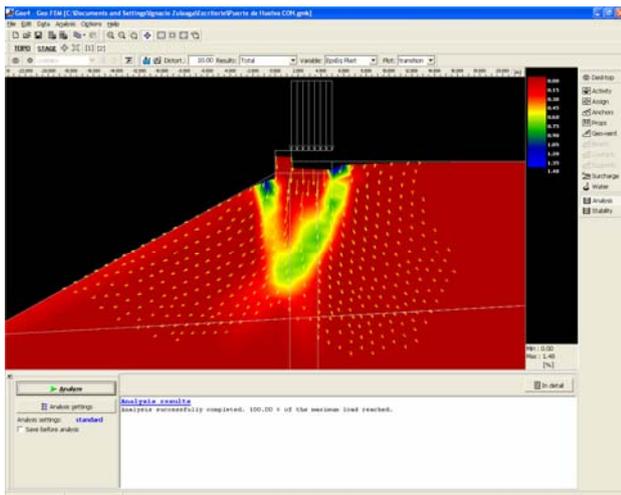


Figura 2. Recalce de muelle para aumentar su capacidad de carga mediante inclusiones rígidas de SuperJet-Grouting

El AG con el MEF nos permitió estudiar en detalle los mecanismos de falla que se podrían presentar, ajustándose la sección del recalce y su profundidad no solo a las restricciones geométricas, sino en función de las diversas resistencias de la mezcla del terreno y la lechada. Comprobándose que a partir de un ratio de resistencia entre la inclusión y el terreno de 10, no se producen beneficios detectables en el factor de seguridad al fallo. Lo que nos permitió optimizar la geometría y las propiedades geomecánicas para proyectar una obra con seguridad y economía.

5.2 Mejora del factor de seguridad al deslizamiento en talud previamente deslizado

El problema de la estabilidad de taludes es quizás una de las cuestiones más extensamente estudiadas en Geotecnia. Los métodos que se emplean comúnmente están basados en el concepto del equilibrio límite. Métodos, que al no considerar la compatibilidad, no satisfacen los requisitos para encontrar una solución teórica. Son soluciones aproximadas que no proporcionan deformaciones.

Este caso trata de un talud que ha sido deteriorado por asentamientos y desplazamientos horizontales, en una arteria vial principal en funcionamiento, cuyo factor de seguridad debe ser mejorado, permitiendo así su recrecimiento para modificar la geometría del vial, sin interrumpir el paso de vehículos en ningún momento.

La solución mixta que se estudió fue la de introducir inclusiones rígidas ejecutadas con SuperJet-Grouting en el plano de deslizamiento y transferir las cargas del vial a capas más competentes mediante columnas de Jet-Grouting.

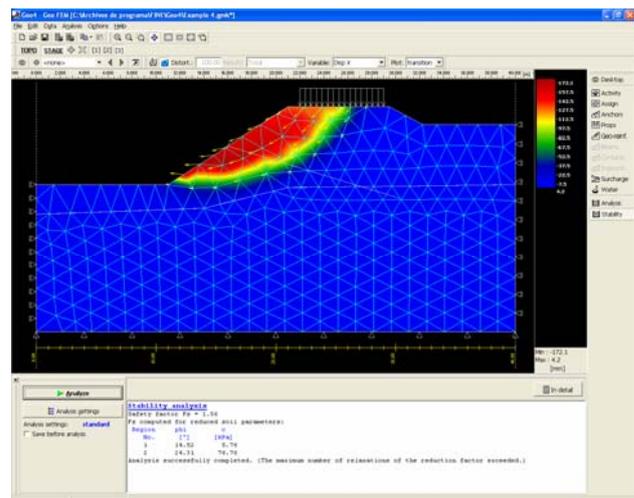


Figura 3. Aumento del Factor de Seguridad al deslizamiento mediante la construcción de columnas de SuperJet-Grouting en el plano de falla

Las solicitaciones debidas a la estructura vial fueron transferidas a capas inferiores, de capacidad portante más elevada, actuando el vial como una capa de distribución de las cargas por encima de las cabezas de las columnas de Jet-Grouting. En ese mismo proceso, la zona de falla fue tratada para mejorar sus propiedades geomecánicas con columnas de SuperJet-Grouting. El modelo geotécnico resultante es de tal complejidad que no es posible realizar un análisis integral del problema con métodos de equilibrio límite. En especial porque estos no nos permiten estudiar los

efectos de las trayectorias de esfuerzos sobre la deformación del talud y los efectos de la inclusión de elementos mucho más rígidos que el terreno sobre la estabilidad; así como simular con la mayor exactitud posible las condiciones de campo encontradas al inicio de los trabajos.

En el estudio de este problema fuimos muy rigurosos a la hora de obtener los parámetros de deformación del terreno en el laboratorio, y se estudiaron dos modelos constitutivos para seleccionar el que mejor reproducía los efectos medidos en el campo.

Al hacer el estudio paramétrico correspondiente nos dimos cuenta que el factor de seguridad del modelo elegido era muy sensible a la forma como modelamos (se construyen) las inclusiones rígidas en la zona de falla. Deducimos que esto se debe a la necesidad de hacer promedios de las propiedades de los materiales introducidos y convertir ratios de columna/terreno en un nuevo material con propiedades homogéneas. Razón por la que se exigió instrumentar e implementar técnicas de comprobación, que incluyeron controles de ejecución y de los resultados obtenidos, a fin de comprobar las hipótesis de cálculo y los resultados esperados.

5.3 “Tienda de Campaña” de Micropilotes para controlar deformaciones producidas por la construcción de un túnel urbano superficial

La construcción de túneles urbanos cerca de la superficie, sin ningún tipo de medidas de seguridad, encara el riesgo de producir daños a las estructuras adyacentes. Daños potenciales que son causados por los asientos en la dirección de la excavación.

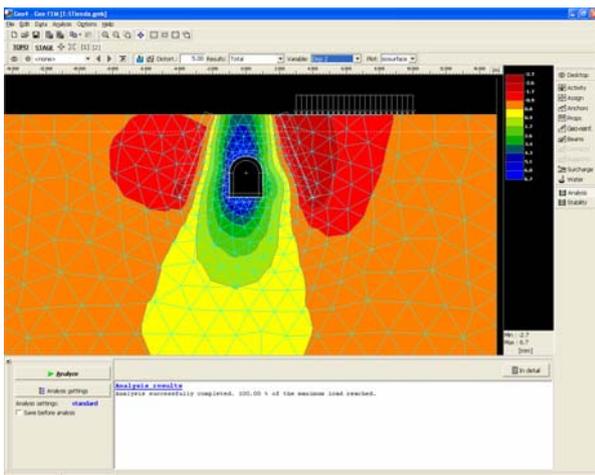


Figura 4. Control de los asientos inducidos por la construcción de túnel urbano mediante la construcción de una “tienda de campaña” con micropilotes

En la mayoría de los casos, el tipo de protección, la secuencia de la construcción y la elección de los elementos estructurales de soporte, dependen de las condiciones geotécnicas y de las circunstancias de ejecución.

La respuesta del terreno inducida por la construcción de túneles superficiales, se estudia, generalmente, mediante herramientas de AG convencionales que están desacopladas. Es decir las cargas se determinan por una técnica (usualmente una solución elástica), y los desplazamientos por otra (usualmente empírica). Igualmente, la información obtenida por métodos convencionales es con frecuencia limitada, ya que estos métodos no admiten condiciones que vayan más allá de las del terreno

La introducción de micropilotes o inclusiones del tipo jet-grouting, para controlar deformaciones originadas en el terreno por las construcciones subterráneas, es una práctica común en la ingeniería española desde hace décadas.

Con el objetivo, en primer lugar, de comprender la interacción entre el terreno y los refuerzos que proyectan colocar, calculándose el efecto que tienen estas inclusiones sobre las deformaciones en superficie y finalmente plantease un esquema que sea óptimo en términos de la tipología de la inclusión, su geometría, propiedades mecánicas y deformaciones máximas tolerables en superficie; se realizó un estudio paramétrico con el MEF.

Para este estudio, en deformación plana, al igual que los otros casos aquí presentados, hubo que realizar algunas aproximaciones. Siendo para este caso, la más importante, la necesidad de estimar los promedios de las rigideces axiales (EA) y flectoras (EI) por metro lineal. En el caso de que el software utilizado emplee elementos viga para modelar las inclusiones, se pueden introducir estos parámetros directamente. No obstante, si se emplean elementos sólidos como lo hacen muchos programas, hace falta convertir la rigideces axiales y flectoras promedio en un espesor equivalente (t) y un módulo de Young equivalente (E_{eq}). Esto se realiza resolviendo un sistema de dos ecuaciones simultáneas:

$$\text{Rigidez Axial: } tE_{eq} = EA$$

$$\text{Rigidez Flectora: } \frac{E_{eq}t^3}{12} = EI$$

Donde E es el módulo de Young de la pantalla equivalente y A e I son la sección y el momento de inercia por metro de longitud, respectivamente. Puede ser posible que también haga falta estimar un promedio de resistencia. Esto depende del modelo constitutivo empleado para representar al muro. Dejamos cla-

ro que el procedimiento anterior sólo trata nuestro problema de una forma aproximada y que no será posible estimar con precisión la distribución de los esfuerzos en los diferentes componentes que hemos introducido para el control de deformaciones.

6. CONCLUSIONES

A efectos de reducir el riesgo geotécnico de problemas complejos, el MEF es superior a otras técnicas de AG. Principalmente, porque no necesita que se postule un mecanismo de falla o un comportamiento prescrito. El mecanismo de falla es determinado por el mismo análisis, permitiendo un estudio completo del problema de condiciones de frontera, de forma tal que con un sólo análisis se obtiene información necesaria para hacer un diseño seguro y económico.

La habilidad para reflejar las condiciones de campo, y reducir el riesgo geotécnico, empleando el MEF, depende esencialmente de la capacidad del modelo constitutivo en representar el comportamiento real del terreno y las estructuras, la correcta determinación de los parámetros del modelo, y las condiciones de frontera.

Aplicando el MEF hemos podido reducir el riesgo geotécnico al asegurarnos que:

- Las estructuras diseñadas son estables y tienen un margen de seguridad adecuado frente al colapso;
- Es posible estimar las solicitaciones estructurales (momento flector, cortante y fuerzas axiales) bajo cargas de uso y cargas últimas;
- Se pueden determinar, con un grado de exactitud aceptable, los movimientos del terreno y las estructuras.

REFERENCIAS

- Naylor, D.J. y Pande, G. N., (1981), *Finite Elements in Geotechnical Engineering*, Pinereidge Press, Swansea, 245 págs.
- Potts, D.M et al (2002a), *Guidelines for the use of advanced numerical analysis*, Thomas Telford, London, 477 págs.
- Potts, D.M. y Zdravkovic, L. (2002b), *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering*, Thomas Telford, London, 427 págs.
- Potts, D.M (2003), *Numerical Analysis: a virtual dream or a practical reality*, *Geotechnique*, 53, 6, London, págs. 535-573.
- Pruska, J. (2004), *Comparasion of Geotechnical Software – GEO-FEM, Plaxis, Z-Soil*, *Proceedings XIII ECSMGE*, Prague, Vol. 2, págs. 819-824.
- Zuloaga, I. (2004), *SuperJet-Grouting: Nueva Tecnología para la Mejora Insitu del Terreno*, *Jornadas*

Técnicas SEMSIG-AETESS, 4ta. Sesión, Mejora del Terreno Mediante Inyecciones y Jet-Grouting, Madrid, págs. 193-210.