

Modelización numérica de túneles y pozos en un entorno manejado por datos

Brinkgreve, R.B.J.; Cammarata, G.; Papavasileiou, S.; Witasse, R.; Bui, T.

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Obras

Citation (APA)

Brinkgreve, R. B. J., Cammarata, G., Papavasileiou, S., Witasse, R., & Bui, T. (2024). Modelización numérica de túneles y pozos en un entorno manejado por datos. *Obras*, 13-23.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

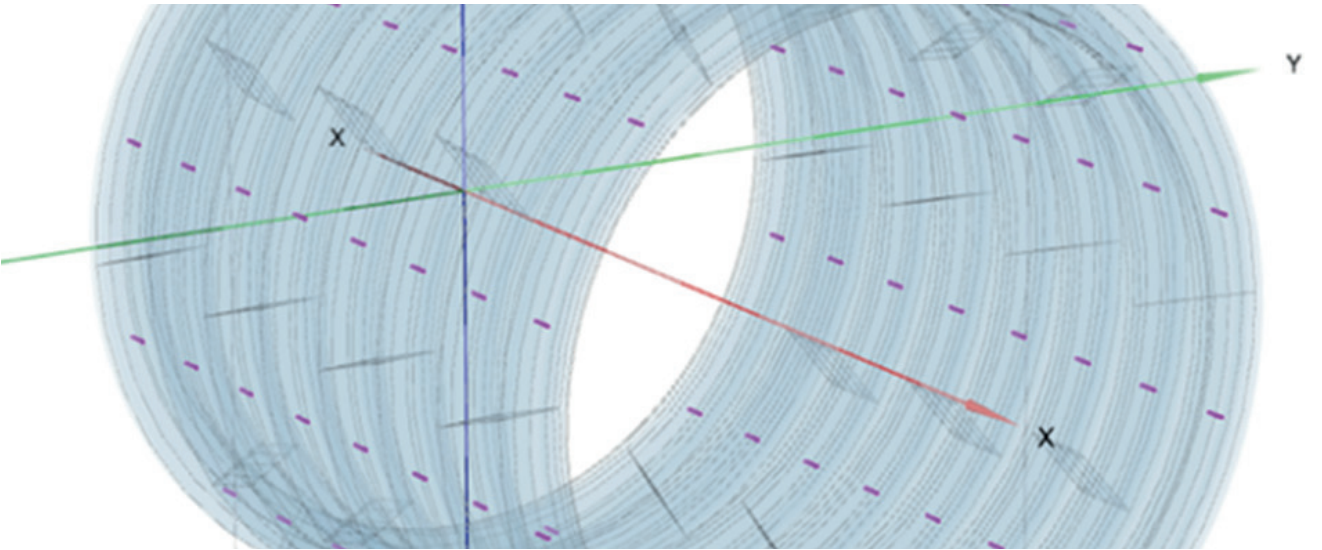
'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.



ARTÍCULO TÉCNICO
7º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE TÚNELES Y LUMBRERAS EN SUELOS Y ROCAS



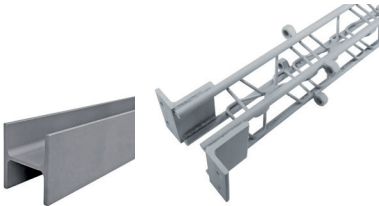
Sistemas de Tubos Paraguas

- Avances en terreno blando o fracturado
- Instalación mecanizada y segura
- Tecnología eficiente de instalación autoperforante



Marcos Metálicos

- Marcos Viga (HEB, HN y TH)
- Marcos Reticulares
- Marcos tipo Pantex



Perno Omega Bolt®

- Rapidez en la instalación obteniendo ciclos de fortificación más cortos y condiciones de trabajo más seguras.
- Se ajusta a perforaciones irregulares.



Resinas Inyectables

- Inyección de Anclajes
- Sellado de Flujos de Agua y Gases
- Consolidación de Terrenos
- Relleno de Cavidades



DSI Underground LATAM +52 33 33665794 informacion.mexico@dsiunderground.com www.dsiunderground.com/es/latam



TEMOCSA CONSTRUCTORA, S.A. de C.V.

SUPERVISIÓN DE PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA CARRETERA,
HIDRÁULICA Y URBANA

PROYECTO LAS VARAS-PUERTO VALLARTA
LONGITUD 90 KMS TIPO A2
7 ENTRONQUES
3 TÚNELES
23 ESTRUCTURAS

PROYECTO PACÍFICO NORTE 2012-2018
LIBRAMIENTO MAZATLÁN 31 KMS
LIBRAMIENTO CULIACÁN 22 KMS
OBRAS DE MODERNIZACIÓN DE LA AUTOPISTA
MAZATLÁN- CULIACÁN

PROYECTO ESCÉNICA ALTERNA ACAPULCO 2013-2017
TÚNEL DE 3,200.00 MTS CONSIDERADO EL TÚNEL
CARRETERO MAS LARGO DE MÉXICO
VIADUCTO ELEVADO DE 3,315.00 MTS



Oficina central
Av. Río Magdalena No. 326 Int. 108, Col. La Otra Banda Delegación Álvaro Obregón
CDMX C.P. 01090 email: temocsa@temocsa.com
TEMOCSA.COM
Teléfono: (55) 55 50 26 39

Modelización numérica de túneles y pozos
en un entorno manejado por datos

BRINKGREVE R.B.J. Universidad Tecnológica de Delft, Delft, Países Bajos.	CAMMARATA G. Seequent – The Bentley Subsurface Company, Italia	PAPAVASILEIOU S. Seequent – The Bentley Subsurface Company, Delft, Países Bajos.
WITASSE R. Seequent – The Bentley Subsurface Company, Delft, Países Bajos.	BUI T. Seequent – The Bentley Subsurface Company, Delft, Países Bajos.	

Resumen

Dada la creciente complejidad del entorno de construcción en zonas urbanas densamente pobladas y condiciones de terreno problemáticas, el diseño de túneles y lumbreras supone todo un reto. Comprender el comportamiento del suelo y de la roca y la interacción con las estructuras es esencial a la hora de realizar análisis numéricos como parte del proceso de diseño. Pero hay más: el diseño de proyectos complejos requiere en la actualidad de un enfoque multidisciplinario basado en una única fuente de verdad para todos los datos implicados. Este artículo destaca algunos de los avances recientes en la modelización numérica de túneles y pozos en suelo y roca. Demuestra cómo el análisis numérico está integrado en un entorno basado en datos y cómo la modelización y la interpretación de datos pueden beneficiarse de la automatización y la visualización en 3D del subsuelo. El resultado es un flujo de trabajo eficaz y menos propenso a errores, que da lugar

a diseños más económicos con menor riesgo de fallas. Por último, se ofrece una perspectiva sobre la manera en la que los datos dominarán el futuro proceso de diseño, mediante el uso de inteligencia artificial (AI) y el aprendizaje automático (ML).

1. Introducción

El diseño de túneles y lumbreras en entornos urbanos es una tarea desafiante. No sólo las condiciones del terreno pueden ser difíciles para excavar el suelo de manera segura y crear el espacio necesario para la construcción de túneles; también los edificios y la infraestructura circundante, y la necesidad de evitar daños e interrupciones de operaciones vitales, complican el proceso de diseño y construcción. El uso de análisis numéricos en los que el suelo, la estructura y la interacción suelo-estructura se modelan de forma realista, se ha convertido en un paso inevitable en el proceso de diseño.

En las dos últimas décadas, la modelización 3D y 4D (es decir, 3D + tiempo como 4ª dimensión) ha permitido un avance significativo en la industria de la ingeniería y la construcción. Al comparar la presentación general de la modelización numérica de Schweiger (2005) durante la Conferencia Internacional sobre Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica con publicaciones recientes sobre análisis numéricos de proyectos de construcción de túneles y excavación (por ejemplo, Parsa-Pajouh et al., 2021; Soccodato & Tropeano, 2021; Hokmabadi et al., 2022), se demuestra el aumento de las capacidades de modelización en los últimos 20 años y su integración en la práctica de la ingeniería y del diseño geotécnico. Ahora es un estándar de facto para proyectos de construcción subterránea en zonas densamente pobladas con condiciones de suelo difíciles, como Londres, Singapur y Ciudad de México. Por otra parte, la introducción y la adopción del Modelado de Información para la Construcción (Building Information Modelling o BIM) y de los Gemelos Digitales, que almacenan, comparten y visualizan todos los datos relacionados con un nuevo proyecto de construcción (y durante su vida útil), no sólo ha dado lugar a un flujo de trabajo más eficiente y a una mejor colaboración de todas las partes involucradas en un proyecto; también proporciona un medio para reducir los diversos riesgos relacionados con el proyecto y con el entorno en el que se encuentra.

2. Avances en la modelización digital

2.1. Capacidades de la modelización por elementos finitos

En las últimas décadas, la modelización numérica se ha convertido en parte integral del proceso de diseño en la ingeniería de túneles para lograr soluciones totalmente optimizadas en términos de diseños seguros y económicos a la vez. Las capacidades de modelización y de análisis numérico para túneles disponibles en programas informáticos comerciales, han avanzado considerablemente. Junto con el aumento de la potencia de las computadoras, esto ha permitido el uso de métodos numéricos no lineales en 3D en la ingeniería y diseño de túneles en entornos complejos y condiciones de suelo desafiantes. Para proyectos de túneles en suelos y rocas blandas (por ejemplo, túneles poco profundos), la modelización basada en la mecánica del medio continuo puede considerarse estándar para los profesionales, mientras que los métodos discontinuos e híbrido continuo/discontinuo pueden resultar más atractivos en presencia de macizos rocosos. Sin embargo, incluso en estos casos, los métodos continuos siguen siendo preferibles en la ingeniería práctica debido a su disponibilidad general y su facilidad de uso, así como a un uso más ágil para la modelización 3D. Si bien hoy en día la mayoría de los cálculos geotécnicos mediante elementos finitos siguen siendo bidi-

mensionales (deformación plana en 2D), la complejidad de un proyecto de túnel exige a menudo una modelización 3D. Entre los métodos continuos, el método de los elementos finitos (MEF) es el más popular en las ciencias de la ingeniería, incluyendo la geotecnia y la ingeniería de rocas. Una modelización por elementos finitos eficaz en ingeniería de túneles debe ser flexible al momento de tratar una falta de homogeneidad de los materiales y condiciones de contorno complejas. Debe ofrecer leyes constitutivas adecuadas junto con herramientas específicas que ayuden eficazmente a construir el modelo, especialmente en aquellas condiciones en las que se requiere de geometrías complejas para la simulación de fases de construcción igualmente complejas. Esto puede lograrse si se cuenta con funciones y herramientas de software específicas. A continuación, se describen algunos avances recientes en la modelización de túneles.

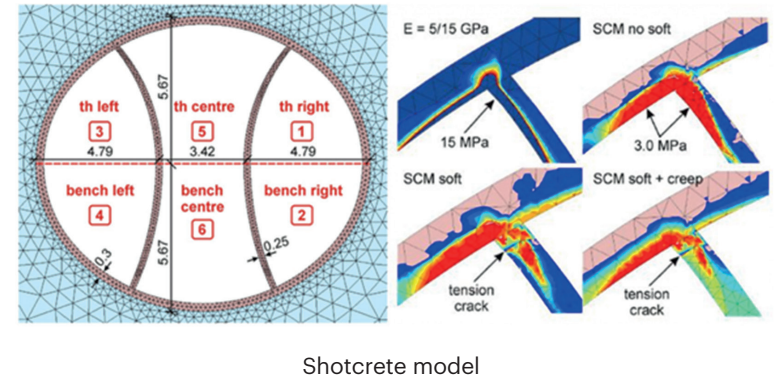
2.1.1. Modelización geométrica y fases de cálculo

Cuando se construyen modelos en 3D de túneles, es una práctica común importar estructuras (túnel) de software CAD y hacerlas aptas para el análisis numérico: esto requiere “limpiar” los objetos importados para que puedan ser mallados correctamente, y convertirlos en vigas, placas y sólidos, de modo que su comportamiento mecánico sea tomado en cuenta adecuadamente. Además, la posibilidad de construir geoméricamente el modelo (secciones transversales reforzadas y con soporte junto con sus trayectorias) directamente dentro del software de análisis es igualmente importante. Adicionalmente, la construcción consta de muchas fases, y dado que las fallas y otros comportamientos no deseados pueden producirse durante cualquiera de las etapas intermedias, es esencial modelizar todas las etapas de construcción de forma realista. Una herramienta de “diseño de túneles” puede estar disponible para modelizar con exactitud las formas del túnel con sus componentes estructurales y sus instalaciones para modelizar el avance del proceso de construcción del túnel a lo largo de las distintas fases de cálculo. En el caso de túneles construidos en macizos rocosos, que son materiales intrínsecamente discontinuos, se puede disponer de herramientas de preprocesado para la generación automática de redes de discontinuidades (por ejemplo, un generador de redes de fracturas discreto) para simular configuraciones de discontinuidades desfavorables mediante características específicas dentro de un enfoque continuo (Jing, 2003).

2.1.2. Modelización constitutiva

El uso de modelos numéricos para la construcción de túneles requiere de leyes constitutivas realistas de las que el análisis pueda beneficiarse ampliamente. La precisión para reproducir el comportamiento no lineales esfuerzo-deformación considerando diversas características del comportamiento del suelo y de la roca, como la anisotropía, la estructura, las discontinuidades (juntas, fracturas) y el comportamiento dependiente del tiempo (fluencia, expansión) ha aumentado junto con los avances en los métodos computacionales. Además de los modelos constitutivos elastoplásticos perfectos, con un criterio de fluencia fijo (por ejemplo, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown), la mayoría de los códigos numéricos actuales proveen una amplia biblioteca de modelos de materiales capaces de reproducir mecanismos peculiares, como la falla frágil por degradación del material, el comportamiento dependiente del tiempo de rocas salinas, el comportamiento de expansión dependiente del estado de esfuerzos y del tiempo, y el comportamiento anisotrópico de capas de roca estratificadas. Como previsto, en determinadas circunstancias las discontinuidades de la roca pueden modelizarse explícitamente en vez de considerar su influencia dentro del contexto de una representación continua equivalente del macizo rocoso. En estos casos, el comportamiento no lineal pico/residual de la discontinuidad resulta crucial para simular adecuadamente los macizos rocosos fracturados. El modelo de Coulomb dentro de un marco de plasticidad perfecta ha sido utilizado ampliamente en el análisis

numérico. Sin embargo, un modelo tan simple sólo puede utilizarse si la caída de resistencia postpico es despreciable (discontinuidades lisas y planas). Para la modelización numérica existen modelos capaces de capturar el comportamiento conceptual tal y como se observa en experimentos de laboratorio y/o en mediciones de campo (por ejemplo, Barton et al. 1985). Adicional a la modelización constitutiva del suelo y de la roca, puede ser necesario modelizar de forma realista componentes estructurales sensibles, utilizando elementos sólidos con modelos constitutivos sofisticados. Un ejemplo es la modelización de revestimientos de túneles de concreto lanzado utilizando el modelo Concrete/Shotcrete de Schädlich y Schweiger (2014). La Figura 1 demuestra que este modelo proporciona esfuerzos menores, si bien más realistas, en la conexión entre el muro de soporte temporal y el revestimiento del túnel, en comparación con el uso del modelo elástico lineal. Este último modelo se usa comúnmente para componentes estructurales en el terreno, pero conllevaría un mayor costo (innecesario) de los refuerzos de concreto lanzado debido a mayores esfuerzos. 2.1.3. Elementos estructurales La modelización de refuerzos y soportes se basa en elementos estructurales versátiles que pueden ser utilizados por separado o combinados, para representar el comportamiento mecánico de sistemas complejos y su interacción con el suelo o la masa rocosa circundante. Los soportes temporales y permanentes, como los revestimientos de concreto o de concreto lanzado y los arcos metálicos (costillas, vigas Warren) se simulan frecuentemente con placas/cascarones y elementos viga curvas, respectivamente. Adicionalmente, puede disponerse de modelos avanzados de concreto para simular la resistencia y rigidez del concreto en función del tiempo (endurecimiento/reblandecimiento por deformación, así como creep y contracción) (ver la sección anterior). Del mismo modo, los refuerzos pueden modelizarse con precisión mediante elementos estructurales especiales capaces de simular varios sistemas, como pernos anclados en dos puntos, anclas de bulbo, anclas inyectadas con mortero, pernos de fricción, y torones. Además, estos elementos disponibles permiten una definición sencilla de los parámetros de refuerzo, así como su calibración con respecto a resultados de ensayos específicos para la evaluación de parámetros mecánicos (es decir, ensayos de extracción), así como la simulación del pretensado para todos los sistemas activos. 2.1.4. Postprocesamiento de los resultados El postprocesamiento de los resultados del análisis numérico implica convertir los intrincados resultados generados por los cálculos de elementos finitos a un formato comprensible para



▲ Figura 1. Ventajas de utilizar un modelo constitutivo más sofisticado, como el Modelo de Concreto Lanzado (Shotcrete, o SCM).

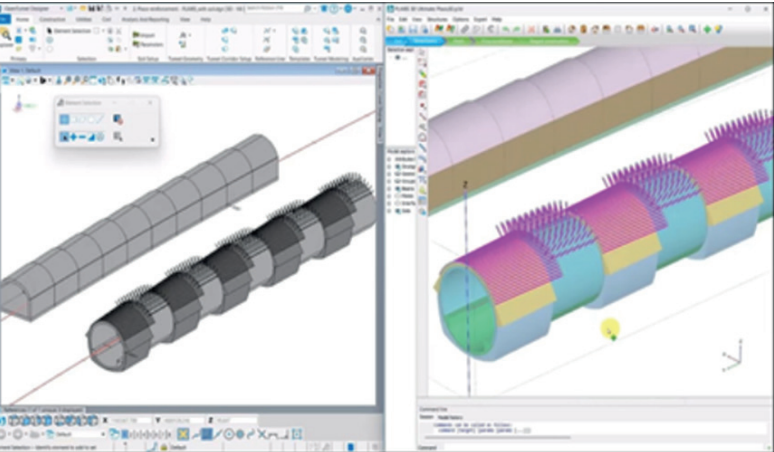
los usuarios. Estos resultados procesados sirven para diversos fines, como ayudar en las evaluaciones y decisiones de ingeniería, validar la precisión del modelo numérico o compilar los resultados para la elaboración de informes. En el postprocesamiento de elementos finitos se suelen emplear diversas técnicas de visualización. Entre las más populares se encuentran el sombreado de color continuo, cortes, gráficos de vectores, gráficos de mallas deformadas, la interrogación de datos y los gráficos x-y. Estas técnicas son ampliamente utilizadas por su eficacia para transmitir información compleja de forma visualmente accesible. La automatización mediante códigos y programación (en Python) desempeña un papel crucial en la mejora de la productividad, la precisión y la reproducibilidad del postprocesamiento de los resultados del análisis de elementos finitos. Al automatizar tareas repetitivas, personalizar los flujos de trabajo e integrar con otras herramientas, los ingenieros pueden agilizar el proceso de análisis y enfocarse más en la interpretación de los resultados y la toma de decisiones de diseño fundamentadas.

2.2. Flujo de trabajo integrado y gemelos digitales

El diseño de proyectos complejos requiere más que la modelización y el análisis en 3D; implica un enfoque multidisciplinario basado en una única fuente de verdad de todos los datos implicados. Mientras que BIM era el camino a seguir en la década anterior, el nuevo paradigma son los gemelos digitales. Estos últimos no solo involucran el proceso de diseño y construcción, también capturan el estado de continua evolución de un proyecto, desde la idea preliminar hasta el final de su vida útil. Las ventajas son múltiples, como citan Brinkgreve y Brasile (2022):

- Integra la participación y facilita la colaboración de diferentes disciplinas y partes interesadas en un proyecto.
- Permite proteger y compartir información relacionada con el proyecto en un entorno digital.
- Permite establecer vínculos cruzados entre datos, modelos y resultados de análisis: si se actualiza un modelo (o la situación en la realidad), pueden actualizarse fácilmente los análisis, los resultados y las consecuencias en el diseño correspondientes.

Un gemelo digital existe mediante la interoperabilidad y el intercambio de datos (normalmente almacenados en la nube) entre diferentes paquetes de software para el análisis, diseño, construcción, operación, inspección, mantenimiento, toma de decisiones y visualización de (los componentes de) un proyecto o activo. El acceso a los datos está restringido y protegido, en función del usuario o de la parte interesada. Con un gemelo digital, los propietarios de activos o de proyectos se benefician de información actualizada disponible al instante sobre el avance de su proyecto, siempre



▲ Figura 2. Interoperabilidad del modelo CAD del túnel (izquierda) y del modelo FE 3D (derecha).

que la información se actualice y mantenga con precisión. Las nuevas condiciones o ampliaciones del proyecto pueden analizarse a través del gemelo digital antes de ser implementadas en la realidad.

Los gemelos digitales tienen un inmenso potencial en el diseño, la construcción y la gestión de túneles. Durante la fase de diseño, los gemelos digitales pueden utilizarse para simular distintos escenarios de construcción, evaluar la integridad estructural, optimizar el trazado de los túneles en términos de seguridad y eficiencia, y realizar cualquier tipo de evaluación de riesgos. A lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto, cualquier dato puede integrarse para actualizar y perfeccionar al gemelo digital, garantizando que continúe siendo una representación exacta del túnel físico.

El software “OpenTunnel Designer” de Bentley introduce un entorno de datos centralizado para que todas las partes involucradas en el proyecto puedan acceder y compartir de forma confiable los archivos más actuales relacionados con el proyecto. Una de las ventajas es la fácil interoperabilidad de la información de diseño con múltiples paquetes de software relevantes utilizados en todo el flujo de trabajo de diseño (modelización geológica, geotécnica y estructural, análisis y procesamiento de datos).

En este contexto, el software puede ayudar a generar modelos paramétricos inteligentes, ricos en información y propiedades del proyecto para diversos componentes del túnel. También puede modelar las formas de la excavación, las vías de excavación, el revestimiento del túnel y los refuerzos, y realizar la detección de interferencias con otras estructuras, objetos e instalaciones para evitar que se produzcan problemas. Por último, puede enviar información sobre la estratigrafía así como sobre la geometría del túnel y de los refuerzos con propiedades analíticas al software de análisis geotécnico PLAXIS para crear de forma automática modelos completos de elementos finitos en 2D y 3D (Figura 2).

2.3. Automatización

El lenguaje de programación Python se ha vuelto muy popular entre estudiantes, desarrolladores de software y otros profesionales, para el desarrollo de diversas aplicaciones de software, desde pequeños proyectos hasta grandes sistemas integrados. La popularidad de Python ha dado lugar (o es el resultado) de la disponibilidad de muchas bibliotecas con funcionalidades específicas (incluyendo la computación científica, el procesamiento de datos, la visualización y el aprendizaje automático, ML), que pueden integrarse fácilmente en aplicaciones de software nuevas y existentes. Además, la presencia de una comunidad activa y que brinde apoyo permite a personas con distintas trayectorias participar en la programación y contribuir a los foros y bases de datos de los módulos de Python. Por todo lo anterior, Python parece ser el lenguaje ideal para la automatización de los procesos de trabajo digitales.

En su artículo, Brinkgreve y Brasile (2022) demuestran cómo la automatización puede facilitar la creación de modelos numéricos 2D y 3D en un entorno de gemelos digitales, mientras que la responsabilidad del diseño sigue recayendo en los ingenieros del proyecto. La automatización hace que todo el flujo de trabajo sea más eficiente y menos propenso a errores, lo que puede contribuir a la confianza en los resultados obtenidos a partir de análisis numéricos avanzados.

Resulta evidente que la ingeniería civil puede beneficiarse de un lenguaje de programación que ofrezca posibilidades más allá de las hojas de ruta seguidas por la mayoría de los programas informáticos de análisis y diseño de ingeniería al abordar proyectos de infraestructura complejos. Hoy en día, un ingeniero puede utilizar Python y lo que ofrece dicho lenguaje de programación para superar limitaciones con respecto a los flujos de trabajo manuales y lograr tareas antes consideradas como imposibles.

El siempre exigente campo de la infraestructura requiere que los ingenieros implementen diversos niveles de automatización para hacer frente al rápido ritmo de desarrollo de proyectos en cada rincón del mundo. Estas automatizaciones permiten crear un gran número de variaciones de modelos enfocándose en la incertidumbre durante el diseño, soluciones que pueden procesar una gran cantidad de datos y transferir información entre diferentes softwares y ofrecer formas efectivas de gestionar el tedioso proceso de postprocesamiento.

Diversos paquetes de software de ingeniería en todos los campos permiten manejar el tratamiento de datos accediendo a los archivos de aplicación y han implementado formas de permitir la interacción entre el usuario y la aplicación. Suelen comenzar con el soporte básico de una línea de comando hasta una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) completa y segura que permite la comunicación entre el servidor y el cliente. El servidor se considera aquí el software de ingeniería, y el cliente es cualquiera de los lenguajes de programación soportados. El flujo de trabajo permite varios niveles de interacción y se pueden crear wrappers (es decir, un código que envuelve a un paquete de software) para apoyar los medios tanto para interactuar como para extraer los datos resultantes tras los cálculos.

2.4. Ejemplo de automatización

Un ejemplo ilustrativo que destaca el valor de la automatización es el diseño de secciones de revestimiento primario de túneles con concreto lanzado. El concreto lanzado, empleado comúnmente en la construcción de túneles y la minería, sirve para sellar superficies recién expuestas y reforzar cavidades. El concreto lanzado se utiliza en distintas fases de la construcción de túneles y encuentra aplicaciones localizadas en explotaciones mineras (ver Figura 3).

Típicamente, el concreto lanzado se refuerza con varillas o mallas de acero. Algunos paquetes de software FEM facilitan la modelización del revestimiento de concreto lanzado reforzado mediante la representación de placas compuestas equivalentes. Esto implica calcular las propiedades de una placa compuesta promediando las contribuciones del concreto lanzado y del acero de refuerzo para crear una sección equivalente. Posteriormente, en la etapa de postprocesado, tras ejecutar el análisis de elementos finitos, es necesario visualizar momentos, fuerzas cortantes y empujes en los diagramas de capacidad del soporte. Este paso garantiza que los esfuerzos inducidos tanto en el acero de refuerzo como en el revestimiento de concreto lanzado se mantengan dentro de límites aceptables. Para lograrlo, es necesario redistribuir los empujes, momentos y fuerzas cortantes calculados en la sección equivalente entre los componentes individuales de los conjuntos de acero y del concreto lanzado. Una vez ejecutada esta redistribución, pueden generarse gráficos de capacidad del soporte y evaluarse la seguridad de forma independiente tanto para el acero de refuerzo como para los componentes de concreto lanzado (Figura 4). Una descripción detallada del proceso anteriormente descrito se ofrece en:

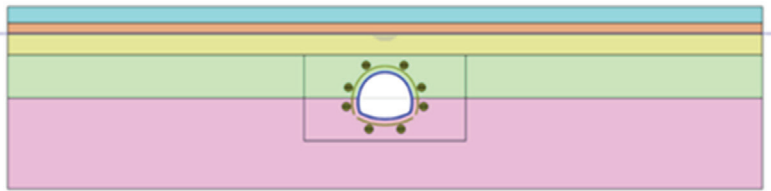
<https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/62987/support-capacity-evaluation-of-a-tunnel-lining-in-plaxis-2d>

En este escenario, tener la capacidad de automatizar completamente la definición de las propiedades del revestimiento compuesto del túnel durante el preprocesamiento, así como evaluar su capacidad durante el mismo para los componentes de acero y de concreto lanzado mediante la visualización de gráficos de capacidad, resulta muy útil para reducir tanto el tiempo de modelado como el de postprocesamiento de resultados, así como para reducir considerablemente los riesgos de errores de cálculo.

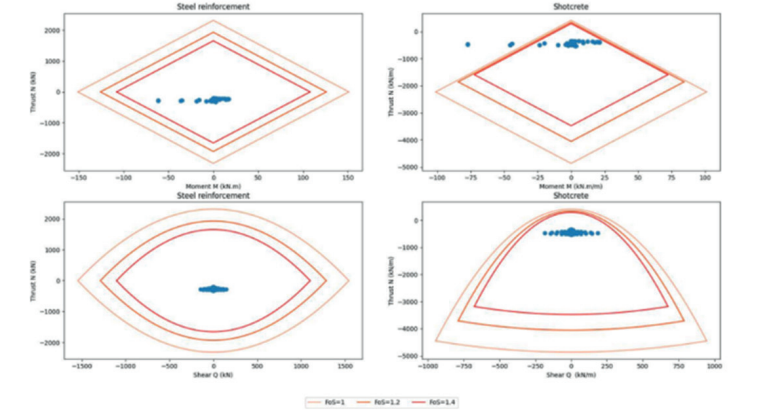
3. Ejemplos de la práctica de la ingeniería

3.1. Retrocálculo de las mediciones *in situ* en la construcción de túneles

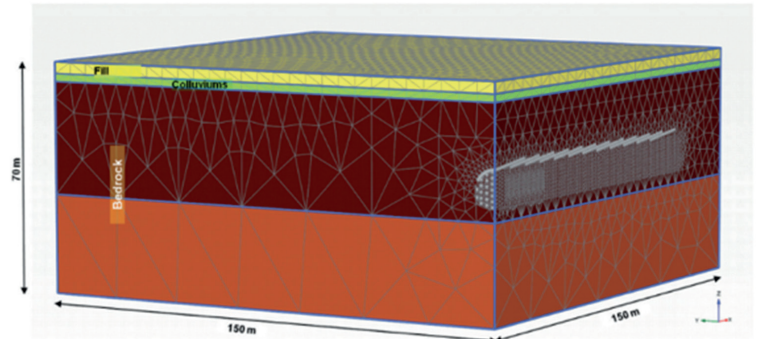
Un buen ejemplo del papel esencial que desempeña el análisis numérico en la optimización de los procesos de diseño y construcción es el que destacan Janin et al. (2013) para el túnel sur de Tolón, en Francia. Este artículo aborda una preocupación habitual que se presenta en proyectos de construcción de túneles: evaluar los efectos de los distintos elementos de construcción y de refuerzo en los movimientos y asentamientos del terreno durante la fase de diseño. Para enfrentar este reto de forma eficaz, se estableció una sección de control específica durante la fase de construcción del túnel, lo que facilitó la recopilación de un amplio conjunto de datos para su posterior análisis numérico.



▲ Figura 3. Modelo de elementos finitos con revestimiento de concreto lanzado.



▲ Figura 4. Definición de los componentes de la sección del elemento placa compuesto.

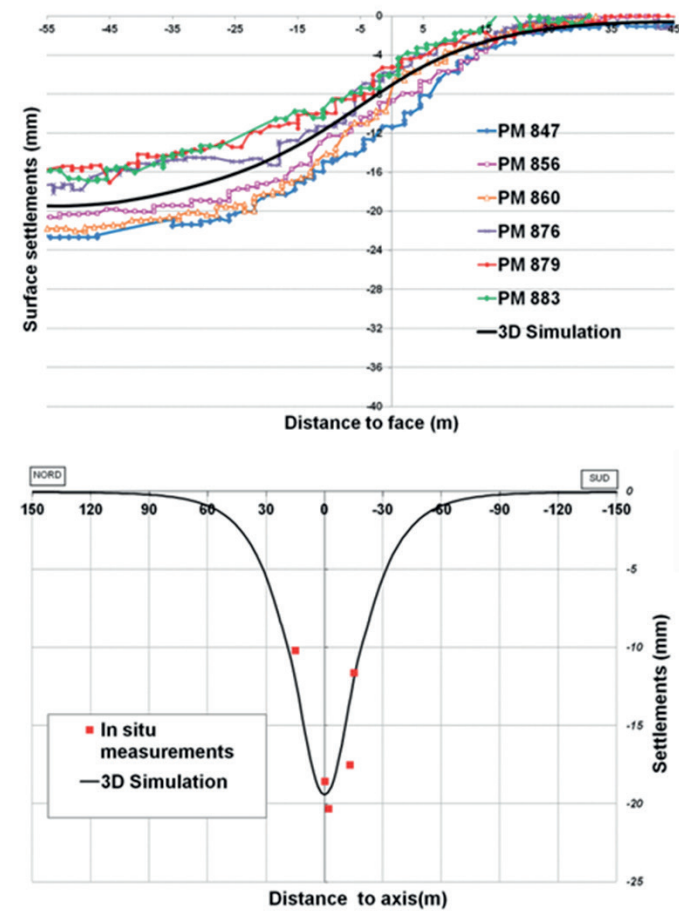


▲ Figura 5. Modelo FEM 3D del túnel de Tolón.

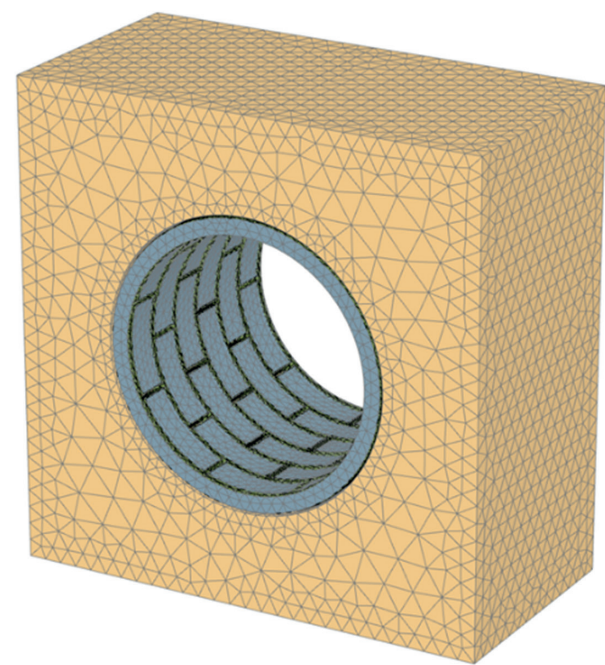
Utilizando las técnicas más avanzadas de simulación por elementos finitos, los ingenieros construyeron un modelo detallado de elementos finitos en 3D (Figura 5) que replicaba fielmente la geometría y la metodología de construcción del túnel. Este modelo permitió a los ingenieros simular el proceso de excavación y examinar de cerca cómo interactuaban y respondían el terreno y los sistemas de soporte en distintas condiciones.

El análisis numérico proporcionó datos valiosos sobre las dinámicas complejas que entran en juego durante la construcción del túnel. Al simular con precisión el proceso de excavación y considerar factores como las propiedades del suelo, los sistemas de sostenimiento y las estrategias de refuerzo, los ingenieros adquirieron un conocimiento más profundo del comportamiento del terreno y de los patrones de asentamiento.

La validación del modelo numérico se consiguió comparando sus predicciones con las mediciones reales obtenidas en la sección de monitoreo (Figura 6).



▲ Figura 6. Comparación entre las mediciones in situ y la simulación 3D.



▲ Figura 7. Modelo de elementos finitos generado por el script.

Este riguroso proceso de validación demostró la fiabilidad y precisión del modelo numérico para predecir los asentamientos del terreno, las deformaciones y el desempeño del sistema de soporte a lo largo del proceso de construcción. La integración del análisis numérico en las fases de diseño y construcción del túnel sur de Tolón resultó decisiva para optimizar las metodologías de construcción y las estrategias de refuerzo. Al proporcionar un marco sólido para analizar y predecir el comportamiento del terreno, el análisis numérico mejoró significativamente la eficiencia, la seguridad y el éxito generales del proyecto. Esto pone en evidencia la importancia de aprovechar las técnicas numéricas avanzadas en proyectos de ingeniería complejos para lograr resultados óptimos y mitigar riesgos potenciales.

3.2. Análisis detallado del túnel dovelado para el diseño PCTL

El análisis numérico en ingeniería de túneles, especialmente cuando se trata de revestimientos de túneles de concreto prefabricado (PCTL), conlleva varios retos. Desde el largo proceso de la definición de la geometría, hasta el difícil proceso de mallado y las interacciones no lineales entre segmentos, los ingenieros se enfrentan a complejidades que afectan a la eficacia del análisis y del diseño. El objetivo de este proyecto ejemplo fue utilizar códigos de Python para automatizar la creación del modelo y proporcionar un análisis de túneles segmentados rápido, flexible, preciso y detallado.

Históricamente, crear la geometría FEM de un túnel dovelado ha sido una tarea tediosa y propensa a errores. El mallado, sobre todo con geometrías irregulares, presenta dificultades para lograr un control óptimo de la densidad de malla, requiriendo tiempo y esfuerzo significativos. Además, la incorporación precisa de interacciones no lineales dovela-dovela añade una mayor complejidad, lo que requiere de técnicas de modelización precisas. Estos retos muestran la necesidad de herramientas y metodologías avanzadas para agilizar los procesos y mejorar la precisión de los análisis numéricos en PCTL. (Figura 7).

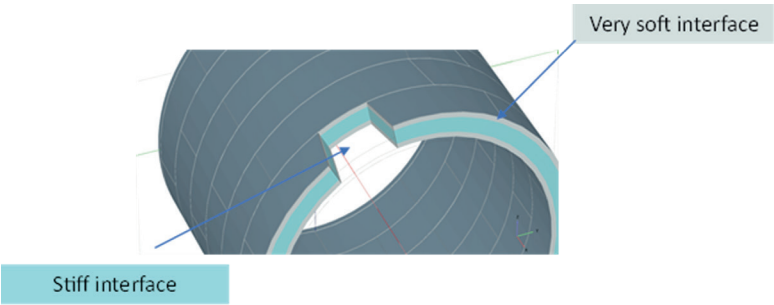
El código de Python desarrollado ofrece un amplio conjunto de parámetros y funciones para aplicaciones de ingeniería de túneles:

- Geometría del túnel: los ingenieros pueden definir el diámetro del túnel, el espesor total y el espesor de contacto de la dovela como principales parámetros geométricos.
- Configuración de dovelas: los usuarios tienen la flexibilidad para especificar configuraciones de dovelas, eligiendo entre formas rectangulares, trapezoidales o romboidales, así como la determinación del número de segmentos por anillo.

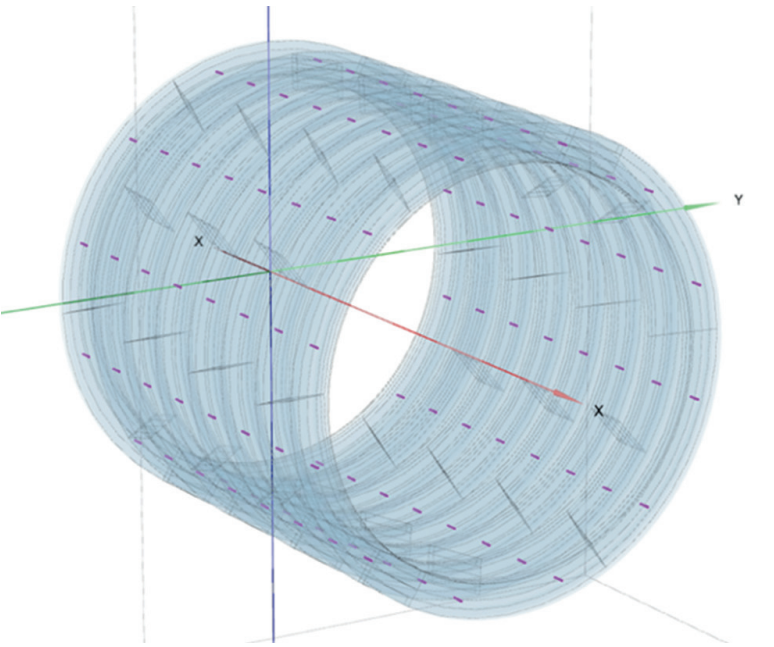
- Secuencia de construcción por etapas: el script permite a los ingenieros establecer una secuencia de construcción por etapas, ya sea en todo el ancho del modelo en modo 2D, o considerando un frente de avance progresivo fase tras fase en modo 3D.
- Generación de cargas: los ingenieros pueden generar simulaciones de carga de trenes y pórticos utilizando el script, mejorando su utilidad en aplicaciones de ingeniería de túneles.
- Estrategia de modelado de conexiones dovela con dovela: el script incorpora interfaces blandas y rígidas para idealizar el contacto dovela con dovela que ocurre en un espesor menor.
- Pernos y conos de cortante: los elementos viga se colocan automáticamente entre cada anillo consecutivo basándose en configuraciones definidas por el usuario, incluyendo posiciones angulares y desfases angulares, para modelar con precisión el comportamiento de pernos y conos de cortante.
- Funciones adicionales: el script se integra perfectamente con geometrías de suelo predefinidas y estructuras existentes. Los túneles pueden generarse en cualquier dirección horizontal, y la creación en grupo de elementos constitutivos facilita un procesamiento más rápido de los resultados de la fase de construcción para una rápida identificación de las juntas y de sus correspondientes aberturas.

La automatización de scripts en Python también ha aportado numerosas ventajas como:

- Generación rápida de modelos: los scripts de Python pueden generar rápidamente modelos FE en 3D para el análisis de PCTL, reduciendo significativamente el tiempo necesario para la definición de la geometría y el mallado.
- Flexibilidad en la configuración de dovelas: los scripts pueden manejar varias configuraciones de dovelas, tales como la romboidal, la trapezoidal o la rectangular, con cualquier número de dovelas, proporcionando flexibilidad en el diseño PCTL.
- Definición optimizada de la geometría: la automatización permite optimizar la definición de la geometría de las dovelas, permitiendo a los ingenieros controlar la densidad y la calidad de la malla de manera eficiente y óptima.
- Gestión automática de conexiones no lineales: los scripts de Python tratan automáticamente las conexiones no lineales dovela/dovela, garantizando resultados de análisis precisos y fiables.



▲ Figura 8. Representación de la dovela llave y estrategia de modelización de la interacción segmento-segmento a través de interfaces.



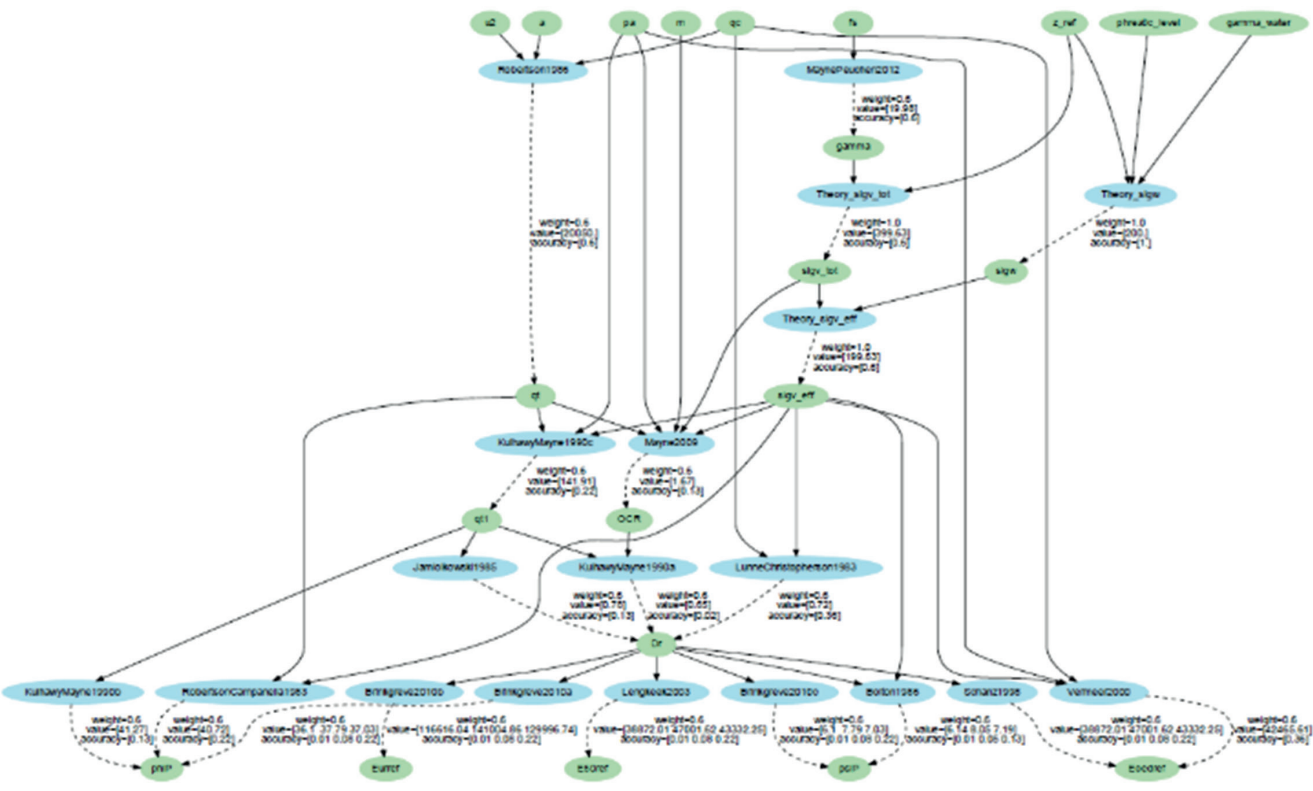
▲ Figura 9. Estrategia de modelización de los pernos de segmento.

En conclusión, la automatización mediante códigos de Python ha revolucionado el análisis numérico de PCTL para este proyecto. Al abordar antiguos retos de modelización y ofrecer un control, una flexibilidad y una velocidad extraordinarios en la creación de modelos de elementos finitos, estos scripts brindan a los ingenieros las herramientas para afrontar proyectos complejos con una eficacia y una precisión sin precedentes.

A medida que avanza la tecnología, la incorporación de herramientas de automatización como los códigos de Python desempeñará un papel significativo en la definición del futuro de la ingeniería de túneles.

4. Modelización de túneles y lumbreras: perspectivas de futuro

Vivimos en una época en la que los datos cobran cada vez más importancia. Los datos se obtienen a partir de mediciones, observaciones y elaboraciones, ya sean del pasado o “en vivo” (en tiempo real). Hoy en día, la mayoría de los datos pueden capturarse, almacenarse y procesarse automáticamente, lo que permite mayor automatización en términos de interpretación, elaboración y enriquecimiento de los datos en diversas etapas de un proceso de diseño y construcción. La Inteligencia Artificial (AI) y el Aprendizaje Automático (ML) pueden ayudar a que el procesamiento



▲ Figura 10. Ejemplo de gráfico con rutas de correlaciones desde los “parámetros de origen” a los “parámetros de destino”.

de los datos sea más útil y valioso. Si se le entrena adecuadamente y se le proporciona datos suficientes, el ML puede completar partes del proceso de ingeniería y diseño.

Hay varios tipos de datos que son relevantes para el diseño y la construcción de un proyecto de túnel, tales como:

- Datos geométricos, niveles, dimensiones, ubicaciones
- Niveles de carga, condiciones internas y externas
- Datos de suelos y rocas, sondeos, datos de pruebas de campo, datos de pruebas de laboratorio, parámetros
- Datos estructurales, acero, concreto, perfiles, propiedades de los materiales
- Datos del proceso de construcción, fases, tiempos, logística, volúmenes
- Deformación, fuerza, esfuerzos, lecturas de presión de poro durante la construcción.
- Datos históricos de proyectos similares

En las siguientes subsecciones se ofrecen algunos ejemplos de cómo el ML puede facilitar el proceso de diseño.

4.1. Determinación de los parámetros

La parte más desafiante en la modelización numérica de aplicaciones geotécnicas es probablemente la caracterización del comportamiento mecánico del subsuelo mediante modelos constitutivos; en particular, la determinación de los parámetros del modelo. Especialmente en una fase inicial de un nuevo proyecto, la disponibilidad de datos (de ensayo) del suelo suele ser limitada, y resulta tentador utilizar un modelo constitutivo

del suelo sencillo, con sólo unos pocos parámetros del modelo a determinar. Sin embargo, un modelo simple incluye sólo unas pocas características del comportamiento del suelo o de la roca (ver también 2.1.2), lo que podría llevar a que se pasen por alto mecanismos de deformación esenciales, resultando en un diseño inseguro o, por el contrario, demasiado conservador.

Para automatizar el flujo de trabajo en la ingeniería geotécnica y estimular el uso de modelos constitutivos más avanzados, el primer autor y sus colaboradores han desarrollado un método para la determinación automatizada de parámetros (APD) basado en ensayos in situ (Van Berkom et al., 2022; Marzouk et al., 2022) y lo han implementado en Python. En este método, la determinación de los parámetros se basa en la teoría de grafos, en la que se establecen “rutas de correlaciones”, desde los parámetros de los ensayos de campo (“parámetros de origen”, por ejemplo, los obtenidos mediante ensayos de penetración de cono, CPT), pasando por las propiedades intermedias del suelo, hasta los parámetros finales del suelo y del modelo (“parámetros de destino”) (Figura 10). El gráfico puede utilizarse para ver cómo se propagan los valores de los parámetros a través del sistema. El sistema permite a los usuarios avanzados añadir sus propias correlaciones y parámetros. De esta forma, el proceso de determinación de parámetros es transparente, verificable y ampliable.

Si bien la teoría de grafos puede considerarse como una forma de inteligencia artificial, el proceso APD descrito anteriormente busca de forma deliberada NO basarse en algoritmos de aprendizaje automático, ya que el mismo suele percibirse como una “caja negra” y, por lo tanto, no es transparente ni verificable. No obstante, al recabar datos de entrada y de salida validados de APD, y al utilizarlos para entrenar y validar un algoritmo regresor de red neuronal ML, se pueden obtener resultados similares. Por lo tanto, eventualmente, el ML podría utilizarse para derivar parámetros de modelos a partir de datos de pruebas de campo.

Otro ejemplo en el que se utilizó ML en la determinación de parámetros fue un proyecto de investigación (Stals, 2023) en el que se utilizó una gran base de datos de ensayos de laboratorio (datos de ensayos triaxiales) y las correspondientes propiedades básicas del suelo para optimizar los parámetros del modelo constitutivo Hardening Soil small-strain, HSsmall (Benz, 2007). De esta forma, la base de datos se amplió con los parámetros del modelo HSsmall que capturaban la respuesta esfuerzo-deformación del suelo en las pruebas de laboratorio.

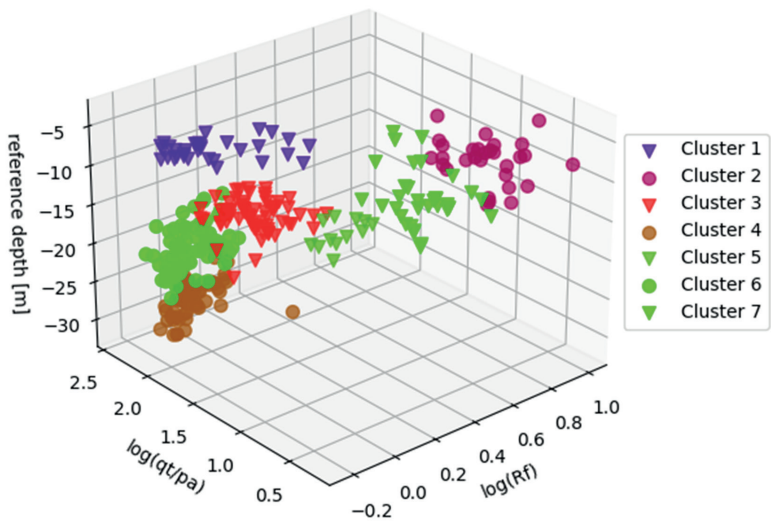
El siguiente paso consistió en entrenar a un modelo de aprendizaje automático para predecir los parámetros del modelo HSsmall, basándose únicamente en el input de las propiedades básicas del suelo, sin considerar los datos de las pruebas de laboratorio. De esta forma, se creó otra herramienta de determinación de parámetros.

Junto con el APD basado en pruebas de campo, esto permite realizar análisis numéricos avanzados en una fase temprana del proyecto, cuando los datos de pruebas del suelo disponibles son limitados. Sin embargo, no sugerimos en absoluto que se omitan las pruebas de laboratorio, ya que siguen siendo necesarias para validar y mejorar los valores de los parámetros en camino hacia la fase de diseño final.

La cuestión es hasta qué punto los ingenieros geotécnicos aceptarán y confiarán en el ML para la determinación de parámetros, manteniendo al mismo tiempo su responsabilidad en el proceso de diseño. Dado que la AI y el ML estarán cada vez más integrados en nuestra vida cotidiana y que la calidad de los resultados se encuentra en un proceso de mejora continua, es sólo cuestión de tiempo para que la determinación de parámetros basada en ML esté disponible y sea aceptada.

4.2. Determinación 3D de la estratigrafía

Los datos de las pruebas de campo se utilizan en primer lugar para identificar y caracterizar los diferentes tipos (comportamiento) de suelo con profundidades, a partir de los cuales se componen los estratos de suelo. Esto se hace generalmente en varias ubicaciones de un proyecto, basándose en datos de pruebas verticales unidimensionales (por ejemplo, sondeos, CPTs). Dado que los estratos pueden estar inclinados o pueden aparecer/desaparecer de un sondeo



▲ Figura 11. Agrupación de secciones de estratos de suelo de 24 CPTs representadas por puntos de datos en un diagrama 3D.

a otro, no siempre es evidente cómo crear un modelo 3D del subsuelo a partir de los datos de múltiples sondeos.

En un proyecto de investigación reciente, se utilizaron algoritmos de agrupación de aprendizaje automático (Machine Learning clustering algorithms) (DBSCAN y K-Means) para encontrar estratos similares en varios CPTs (Brinkgreve et al., 2023). La Figura 11 muestra los resultados de la agrupación de puntos de datos 3D ($\log(qt / pa)$, $\log(Rf)$, profundidad de referencia), que representan las secciones de estratos de 24 CPTs individuales (qt es la resistencia de cono corregida, pa es la presión atmosférica y Rf es la relación de fricción).

Los datos del sondeo, junto con la información de las agrupaciones, fueron enviados a un paquete de modelización geológica en el que se creó un modelo 3D del subsuelo. El modelo 3D del subsuelo fue utilizado posteriormente para extraer una sección transversal 2D o una sección 3D para crear un modelo de elementos finitos para el análisis numérico, mientras que los parámetros del modelo proceden de la APD u otra fuente.

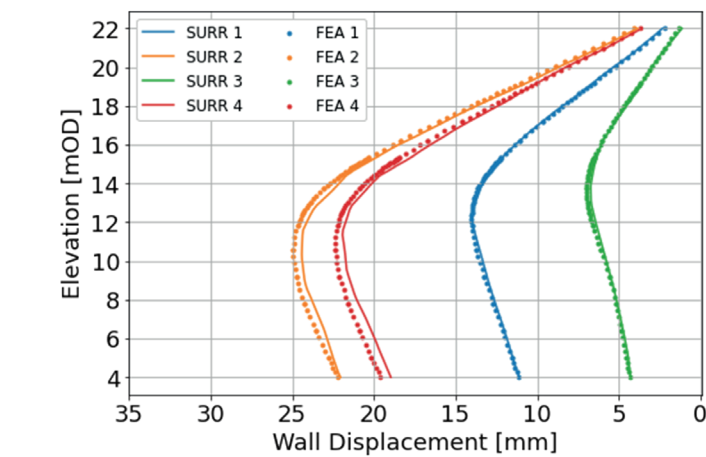
Los procesos descritos anteriormente se implementaron en una herramienta de Python, lo que resultó en un flujo de trabajo geotécnico total y completamente automatizado. Este proceso automatizado no sólo hace que todo el flujo de trabajo sea rápido y eficiente, sino que también evita errores que pueden producirse cuando los datos se transfieren manualmente de un paquete de software a otro, mientras que cada paso del proceso puede ser verificado y validado por el usuario.

4.3. Modelización de sustitutos

La modelización de sustitutos es una forma de brindar una respuesta instantánea para una situación que puede describirse mediante un conjunto de parámetros de entrada.

Un modelo sustituto, o un metamodelo, es un modelo simplificado, típicamente basado en datos y no en la física (Write y Davidson, 2020). Más específicamente, es un modelo matemático del resultado que rápidamente puede generar resultados de simulación sin resolver el problema físico real. La modelización de sustitutos es particularmente útil cuando la modelización numérica del problema físico original es costosa desde el punto de vista computacional.

La modelización de sustitutos puede representar una alternativa interesante para la modelización digital de túneles y lumbreras en entornos basados en datos. Puede combinarse con datos de monitoreo para retroanálisis y modelización predictiva en el contexto de modelos gemelos digitales. Entre las diferentes técnicas de modelización de sustitutos (como



▲ Figura 12. Comprobación de desempeño de las RNA comparando las predicciones de desplazamiento de muros mediante modelos de FE y modelos sustitutos para cuatro conjuntos de datos de entrada diferentes (según Ferrero et al., 2023).

Splines o Kriging), las redes neuronales artificiales (RNA o ANN por sus siglas en inglés) y el ML resultan ser herramientas eficaces para el método observacional con la finalidad de optimizar los parámetros clave de diseño, como los parámetros del modelo constitutivo suelo/roca y las geometrías de refuerzo.

Como es el caso con la mayoría de las aplicaciones de aprendizaje automático, la modelización de sustitutos incluye tres pasos principales: 1) muestreo, 2) construcción de un modelo y 3) comprobación del modelo.

Un plan de muestreo es importante para obtener un diseño óptimo de los experimentos utilizados para construir el sustituto (Forrester et al., 2008). A continuación, el modelo sustituto puede construirse utilizando diferentes enfoques, como la superficie de respuesta polinómica (Polynomial Response Surface), Kriging o redes neuronales artificiales (Viana et al., 2014). Finalmente, la precisión del modelo debe evaluarse cuidadosamente antes de ser utilizado en la práctica. En cualquier caso, una de las ideas clave es que el sustituto puede construirse a partir de datos. Específicamente, los datos pueden proceder de observaciones (mediciones físicas) o experimentos informáticos (por ejemplo, simulaciones de elementos finitos), pero también de otras fuentes, como fórmulas empíricas o modelos analíticos simplificados. Estos datos tienen distinta precisión y distintos costos. El concepto de multifidelidad puede ser utilizado para mejorar la precisión de un sustituto combinando una mayor cantidad de datos baratos con una pequeña cantidad de datos caros.

Como ya se explicó con anterioridad, la modelización de sustitutos, por su naturaleza “basada en datos”, encajaría muy bien en el contexto de un gemelo digital. En este contexto de modelización dinámica, cuando los datos de entrada y de monitoreo se actualizan continuamente, los recursos computacionales necesarios para actualizar y optimizar la simulación supondrán un reto. El uso de un modelo sustituto bien diseñado proporcionaría una herramienta atractiva aprovechando la creciente cantidad de datos disponibles en un proyecto. Esto aplicaría a la ingeniería geotécnica, específicamente a la modelización de túneles y lumbreras, donde los complejos modelos de elementos finitos suelen ser muy exigentes desde el punto de vista computacional.

Entre los distintos usos posibles de los modelos sustitutos, a continuación se discuten dos aplicaciones principales: la optimización del diseño y el análisis de probabilidades. Como se mencionó con anterioridad, la modelización dinámica de proyectos geotécnicos requiere la incorporación de datos de monitoreo en tiempo real para realizar un retroanálisis y optimizar el diseño paramétrico.

Como ejemplo típico, en Ferrero et al. (2023) se combinó el método observacional con la modelización de sustitutos para el retroanálisis y la predicción prospectiva de una excavación profunda en el centro de Lon-

dres. La Figura 12 muestra una comparación de la deflexión del muro de contención, obtenida a partir de un modelo sustitutivo, con los correspondientes cálculos de elementos finitos. El modelo sustitutivo se creó utilizando redes neuronales artificiales para optimizar los parámetros del modelo constitutivo Hardening Soil small-strain.

Tanto la baja fidelidad (modelo de elementos finitos simplificado y barato) como la alta fidelidad (modelo de elementos finitos complejo y más caro) se realizaron utilizando PLAXIS 2D. Este ejemplo puede ampliarse fácilmente a otras aplicaciones, como la construcción de túneles.

Para el análisis probabilístico, la modelización de sustitutos también puede ser una forma interesante de reducir el número de muestras requeridas. El uso del método de los elementos finitos en el análisis probabilístico suele ser limitado debido al elevadísimo número de muestras (es decir, cálculos) requeridas, especialmente cuando se trata de una baja probabilidad de falla y un espacio de diseño de alta dimensión. Se puede construir un modelo sustitutivo con un número limitado de muestras y aplicarse al resto del proceso de muestreo para reducir el tiempo de cálculo.

4.4. Uso de los datos de monitoreo

Especialmente en vista del método observacional, los datos de monitoreo están cada vez más disponibles, y su calidad está mejorando. Durante la ejecución de un proceso de excavación o construcción de un túnel, los datos de monitoreo podrían proporcionar información para reevaluar la clasificación del macizo rocoso (Marcher, et al., 2021) o para realizar un retroanálisis y optimizar los parámetros de diseño utilizando modelos sustitutivos, como se describe en el párrafo anterior. Para garantizar un proceso eficiente y sin errores, los datos deberían poder moverse y conectarse con fluidez dentro de un ecosistema digital que permita ser explotado por diferentes profesionales, incluidos los ingenieros geólogos, geofísicos y geotécnicos.

En varios institutos de investigación, así como en empresas innovadoras, se están llevando a cabo actividades de investigación y desarrollo para interpretar y traducir automáticamente diferentes tipos de datos brutos en datos de entrada valiosos para la modelización y el análisis numérico.

La AI y el ML integrados en un ecosistema de gemelos digitales basado en la nube, ofrecen grandes oportunidades para integrar el flujo continuo de datos de monitoreo con capacidades de modelización instantánea en tableros de mando de monitoreo. Esto también permite la creación de sistemas de alerta temprana y sistemas de apoyo para la toma de decisiones, permitiendo a los operadores tomar medidas inmediatas en caso de que se superen los valores predefinidos o se desarrollen escenarios no deseados. Esto puede ser muy útil en el análisis y la mitigación

de riesgos. Facilitará el control de costos y la minimización de la probabilidad de falla durante la ejecución de proyectos desafiantes.

5. Conclusiones

Los datos desempeñan un papel fundamental en la ingeniería geotécnica para proyectos de infraestructura, varios de los cuales implican la excavación y construcción de túneles y lumbreras. Este artículo destaca algunos aspectos clave de la modelización numérica de túneles y lumbreras en el contexto del Modelado de Información para la Construcción (Building Information Modelling) y de los gemelos digitales. Estos entornos digitales están diseñados para permitir un flujo continuo de varios tipos de datos de proyecto a través de diferentes paquetes de software, que sirven a diferentes partes del proceso de diseño. El entorno digital facilita un flujo de trabajo continuo, eficiente y menos propenso a errores; no sólo durante la fase de diseño y construcción, sino durante toda la vida útil de un proyecto o activo. Un entorno digital basado en la nube proporciona un acceso seguro a la “única fuente de verdad” de los datos del proyecto para todas las partes implicadas en el mismo.

En lo que respecta a la modelización numérica y al análisis de túneles y lumbreras, puede concluirse que existen técnicas avanzadas de modelización que son necesarias para hacer frente a las complejas condiciones que suelen presentarse en este tipo de proyectos, especialmente cuando se ejecutan en entornos urbanos. La eficiencia del proceso de diseño se ve reforzada por la automatización de varias tareas dentro del flujo de trabajo, para lo que las secuencias de comandos y la programación en Python resultan de gran utilidad. Se presentan ejemplos de proyectos de construcción de túneles en los que se ha demostrado la automatización y la modelización numérica avanzada.

Por último, se ofrece un panorama de cómo la Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático pueden desempeñar un papel en la ingeniería y el diseño geotécnicos. Pueden ayudar a determinar los parámetros del suelo y del modelo en una fase temprana de un proyecto cuando los datos de los ensayos de suelo disponibles son limitados. Cuando se aplica como modelo sustitutivo, permite el retrocálculo en tiempo real (en relación con la optimización de parámetros) y el diseño probabilístico cuando, de otro modo, se requerirían numerosos análisis numéricos que consumirían mucho tiempo. En relación con los datos de monitoreo “en vivo”, almacenados en un ecosistema de gemelos digitales basado en la nube, facilita la creación de tableros de mando de monitoreo y sistemas de apoyo para la toma de decisiones que pueden ser de gran ayuda en la gestión de riesgos y el control de costos.

Referencias

Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 22 (3): 121-140.

Benz T. (2007). Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences. PhD thesis. Heft 55, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart.

Brinkgreve R.B.J. and Brasile S. (2022). Automatic Finite Element Modelling and Parameter Determination for Geotechnical Design. In: Grabe (ed.), *Workshop Numerische Methoden in der Geotechnik*. Hamburg: TUHH - Institute of Geotechnical Engineering and Construction Management, Vol. 53, 83-97.

Brinkgreve R. B. J., Tschuchnigg F., Laera A., and Brasile S. (2023). Automated CPT interpretation and modelling in a BIM/Digital Twin environment. In Zdravkovic et al. (eds), *Numerical Modelling in Geotechnical Engineering*, doi: 10.53243/NUMGE2023-111.

Ferrero J.A., Ruiz López A., Tabora D.M.G. and Brasile S. (2023). Surrogate models of deep excavations based on artificial neural networks and their use in the observational method. In: 4th Int. Symp. on Machine Learning and Big Data in Geoscience. Cork: University College.

Forrester, A., Sobester, A., Keane, A., (2008). *Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide*. John Wiley & Sons, doi: 10.1002/9780470770801

Hokmabadi A.S., Leung E.H.Y., Yiu J. and Pappin J.W. (2022). Application of 3D non-linear dynamic soil-structure interaction analysis in practical seismic design. In: Rahman and Jaksa (eds), *20th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney: Australian Geomechanics Society, 1963-1968.

Janin J.P., Guilloux, A., Le Bissonnais H., Kastner R. and Emeriault F. (2013). South Toulon Tube: Numerical Back-analysis of In-situ Measurements, *PLAXIS bulletin*, Spring issue 2013.

Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci.*, 40:283-353

Marcher, T., Erharter, G., Unterlaas, P., (2021). Capabilities and Challenges Using Machine Learning in Tunnelling. In: Tosun, H. (eds), *Theory and Practice of Tunnel Engineering*, doi: 10.5772/intechopen.93583

Marzouk I, Tschuchnigg F., Paduli F., Lengkeek H.J., and Brinkgreve R.B.J. (2022). Determination of fine-grained soil parameters using an automated system. In: Gottardi and Tonni (eds), *Cone Penetration Testing 2022*. Taylor & Francis, 540-545, 10.1201/9781003308829-77.

Parsa-Pajouh A., Azari B., Mirlatifi S., Buys H., and Cullen I. (2021). Numerical Analysis of a Top-Down Constructed Deep Basement with Diaphragm Walls in Barangaroo, Sydney - A Case Study. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, Volume 7, Issue 1, 95-112, doi: 10.4417/IJGCH-07-01-05.

Schädlich B. and Schweiger H.F. (2014). A new constitutive model for shotcrete. In Hicks, Brinkgreve & Rohe (eds), *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. London: Taylor & Francis, 103-108.

Stals M.T. (2023). Advanced constitutive model parameter determination, optimization and selection using a database of triaxial tests and machine learning tools. MSc thesis. Delft: Delft University of Technology.

Soccodato F.M. and Tropeano G. (2021). Numerical Analysis of a Deep Excavation in Front of Marmor Kirken, Copenhagen. In: Barla et al. (eds.), *IACMAG 2021, Challenges and Innovations in Geomechanics*, LNCE 126, 223-230, doi: 10.1007/978-3-030-64518-2_27.

Van Berkorn I.E., Brinkgreve R.B.J., Lengkeek H.J., and De Jong A.K. (2022). An automated system to determine constitutive model parameters from in situ tests. In: Rahman and Jaksa (eds.), *20th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney: Australian Geomechanics Society, 329-334.

Viana, F.A.C., Simpson, T.W., Balabanov, V., Toporov, V. (2014). Metamodeling in Multidisciplinary Design Optimization: How Far Have We Really Come? *AIAA Journal*, 52 (4): 671-690

Wright, L., Davidson, S. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modelling and Simulation in Engineering Sciences* 7 (13)