



BOLETÍN TÉCNICO LanammeUCR

Volumen 1, N.º 5
Agosto, 2024

Aplicación de métodos
numéricos para la solución
de problemas geotécnicos

Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc.

gustavo.badilla@ucr.ac.cr

Ingeniero

Programa de Ingeniería Geotécnica



Introducción

Una de las ramas más desafiantes de la Ingeniería Civil corresponde a la Ingeniería Geotécnica. Esto debido a que los principales materiales que se estudian y analizan corresponden a suelos y rocas, los cuales son materiales creados por la naturaleza, cuyas propiedades y características son altamente complejas.

2 Conceptos fundamentales

Los métodos numéricos constituyen técnicas mediante las cuales es posible la solución de problemas en ingeniería utilizando operaciones o cálculos aritméticos repetitivos para la obtención de una respuesta o resultado. Los métodos numéricos son herramientas poderosas en la resolución de problemas, ya que son capaces de lidiar con una gran cantidad de ecuaciones, no linealidad y geometrías complejas, las cuales sería imposibles resolverlas de forma analítica. Esto permite aumentar la capacidad de resolver problemas.

Cuando se utilizan este tipo de herramientas para abordar una modelación de un problema geotécnico, el ingeniero o investigador debe estar consciente de la cantidad de aspectos que pueden influir directamente en los resultados de la modelación, especialmente, teniendo en consideración que las estructuras geotécnicas presentan en su configuración una cantidad importante de componentes controlados por procesos naturales que la mayoría de las veces se producen al azar y no tienen especificaciones definidas.

2.1 Métodos numéricos empleados en la Ingeniería Civil

En el mercado existen diversos softwares disponibles que involucran métodos numéricos. El uso inteligente de estos programas depende del conocimiento de la teoría básica fundamental de los métodos. Sin este conocimiento, el profesional que utiliza el software comercial tendrá una visión poco crítica de su funcionamiento interno o de la validez de los resultados producidos y, por lo tanto, el software se convertirá en una “caja negra”.

Existen diversos métodos numéricos que pueden ser empleados para resolver problemas en la ingeniería civil, entre los cuales se pueden mencionar:

1. Método de equilibrio límite para análisis de estabilidad de taludes
2. Método de diferencias finitas
3. Método de elementos finitos
4. Método de volúmenes finitos
5. Método de punto material
6. Método de elementos discretos

En el caso de la ingeniería geotécnica los tres primeros son los principales métodos numéricos que se utilizan para resolver o analizar problemas geotécnicos.

2.1.1 Método de equilibrio límite para análisis de estabilidad de taludes

La mayoría de los estudios de estabilidad de taludes se basan en los métodos de equilibrio límite (MEL), en los que se considera la relación entre las fuerzas deslizantes y resistentes a lo largo de una superficie de falla dada. Convencionalmente, los análisis de estabilidad se efectúan considerando perfiles bidimensionales, los cuales son una simplificación significativa de la situación real.

En estas representaciones bidimensionales, el ingeniero diseñador o encargado del análisis, define con su criterio experto, las secciones transversales críticas en las cuales se puede presentar una falla o deslizamiento del talud. Sin embargo, debe tenerse en consideración que los MEL poseen limitaciones que deben ser conocidas por el geotecnista con la finalidad de escoger el método que mejor responda a las solicitudes del problema que se quiere evaluar. Así pues, entre las limitaciones generales que tiene el MEL se pueden mencionar:

- No se incluye un análisis de deformaciones
- La base de cálculo considera un equilibrio estático de fuerzas estáticas. Sin embargo, una vez que se genera la falla, el modelo deja de ser aplicable, puesto que la geometría de análisis cambia, y comienza a darse un movimiento de la masa de suelo, con el cual se deja de tener un equilibrio estático
- Se supone una distribución uniforme de esfuerzos en la base de los elementos o dovelas

Por su parte, dependiendo de los diferentes métodos de equilibrio límite que existen, se pueden encontrar otras limitaciones tales como:

- Se asume que el talud tiene un material isotrópico
- Se puede asumir la existencia, o no, de fuerzas cortantes entre las dovelas
- En algunas metodologías se asume un equilibrio de momentos
- Se asume una superficie de falla

Entre los paquetes computacionales que pueden utilizarse para realizar este tipo de análisis en geotecnia se pueden mencionar: Slide, GeoStudio, Slope, Geo5.

2.1.2 Método de las diferencias finitas

Es un método basado en aproximaciones que permiten reemplazar ecuaciones diferenciales por ecuaciones de diferencia. Estas aproximaciones de diferencia finita son de forma algebraica y relacionan el valor de la variable dependiente, en un punto dentro de la región de solución, con sus valores en algunos puntos vecinos. Con base en esto, la solución por diferencias finitas básicamente involucra tres pasos:

1. Dividir el continuo en un número discreto de elementos
2. Aproximación de la ecuación diferencial que define al problema a resolver
3. Solución de las ecuaciones de diferencia

El método de diferencias finitas, en el caso de la solución de problemas relacionados con problemas geotécnicos se ha aplicado de manera exitosa en los

problemas definido por ecuaciones de difusión, tal y como ocurre en las ecuaciones de flujo de agua en medio porosos de los problemas de permeabilidad. Sin embargo, su aplicación para las resolver ecuaciones de equilibrio de tensiones ha sido menos exitosa que el uso de los métodos de elemento finito.

Entre los paquetes computacionales que pueden utilizarse para realizar este tipo de análisis en geotecnia se pueden mencionar: Flac 2D, Flac 3D, ModFlow, MT3Dflow.

2.1.3 Método de elementos finitos

En el método de elementos finitos (MEF) el medio continuo se divide en un número discreto de partes o elementos conectados entre sí por un número discreto de puntos denominados como nodos. Los movimientos o desplazamientos de estos nodos constituyen las incógnitas fundamentales del problema.

Dentro de cada elemento, el movimiento o desplazamiento de cualquier punto se obtiene a partir de los movimientos de los nodos del elemento. Estableciendo las condiciones de equilibrio, compatibilidad y dadas las relaciones constitutivas de los materiales, puede obtenerse las deformaciones, tensiones y esfuerzos en cualquier punto del elemento asociado al desplazamiento de cada uno de los puntos internos al elemento.

Básicamente el método de elemento finito involucra las siguientes etapas:

1. Dividir el continuo en un número discreto de "elementos finitos". La división del dominio puede ser cualquiera, lo cual le permite analizar casos con geometría compleja. Además, cada elemento puede tener propiedades propias, lo que permite resolver casos heterogéneos
2. Cada uno de los elementos debe conectarse entre sí mediante un número discreto de puntos denominados "nodos"
3. Internamente se definen "funciones de forma" que permiten definir los desplazamientos internos en el elemento en función de los desplazamientos que sufren los nodos. Esto se conoce como "Campo de desplazamientos"

4. Una vez conocidos los desplazamientos y las funciones de forma es posible determinar las deformaciones en cualquier punto. Esto se conoce como “Campo de deformaciones”
5. Conocidas las deformaciones y estableciendo las ecuaciones constitutivas del material pueden determinarse las tensiones. Esto se conoce como “Campo de tensiones”
6. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos que equilibra las tensiones y las cargas que actúan en el elemento
7. El establecimiento de un sistema de ecuaciones de equilibrio global en la que la suma de las fuerzas nodales debe ser igual a la fuerza nodal exterior. Donde, al resolver este sistema y hallar los desplazamientos nodales, es posible determinar las tensiones y deformaciones en cualquier punto del elemento

Hoy en día, el MEF puede ser aplicado a muchos fenómenos, inclusive permite considerar comportamientos no lineales (plasticidad) y dependientes del tiempo (viscosidad y consolidación).

Entre los paquetes computacionales que pueden utilizarse para realizar este tipo de análisis en geotecnia se pueden mencionar: Plaxis 2D, Plaxis 3D, Geo5, Ansys, Civil FEM, RS2, RS3.

2.1.4 Método de elementos de contorno

En el método de elementos de contorno (MEC), las ecuaciones matemáticas del problema se simplifican de manera que sólo intervienen expresiones sobre los contornos del dominio de análisis. El MEC difiere del MEF en que solo la frontera del dominio requiere ser dividida en elementos (por eso el nombre de “elementos de contorno”). Con esto es posible realizar una discretización únicamente sobre dichos contornos. De esta manera, el trabajo de división del dominio y número de ecuaciones es bastante reducido. El MEC es bastante utilizado en problemas lineales y homogéneos.

Si se realiza una comparación del MEC con el MEF, el MEC tiene las siguientes ventajas:

- Discretización únicamente del contorno
- Menor número de incógnitas

- Facilidad en el tratamiento de dominios semi-infinitos o con superficies libres
- Buenos resultados en regiones de concentración de esfuerzos

No obstante, presenta las siguientes desventajas:

- Sistemas de ecuaciones no simétricos
- Utilizado básicamente en problemas lineales y homogéneos
- Dificultad en la determinación de la solución fundamental (o función de ponderación) para fenómenos nuevos

Entre los paquetes computacionales que pueden utilizarse para realizar este tipo de análisis en geotecnia se pueden mencionar: EX3.

Así pues, tal y como se mencionó anteriormente, sabiendo que existen diferentes métodos numéricos para abordar la simulación de los problemas geotécnicos, el investigador debe analizar los diferentes aspectos que pueden influir directamente en los resultados de la modelación. Específicamente, en el caso de los proyectos relacionados con la ingeniería geotécnica en las últimas décadas se han venido utilizando cada vez más los métodos de elementos finitos (MEF) para el análisis y diseño, así como también, como complemento de los estudios de estabilidad de taludes basados en los métodos de equilibrio límite (MEL) para solventar las limitaciones de éstos. No obstante, el usuario debe entender los principios de geotecnia y, en particular, los modelos constitutivos que usa el software, las condiciones de frontera, el tipo de elemento finito y la discretización de la malla. Aspectos que serán abordados a continuación:

2.2 Modelos constitutivos

El comportamiento mecánico de los suelos es extremadamente complejo, por esta razón es extremadamente complicado seleccionar una ley constitutiva que simule todas las condiciones presentes en un problema geotécnico. De esta manera, los modelos constitutivos son desarrollados para simular y cuantificar el comportamiento del suelo observado cualitativamente.

En esencia, los modelos matemáticos nos ayudan a comprender y predecir el comportamiento de sistemas complejos. Aunque rara vez se tienen soluciones exactas para problemas físicos, se pueden calibrar métodos numéricos utilizando validaciones empíricas. Sin embargo, al aplicar modelos, se deben interpretar los resultados con precaución y considerar la experiencia práctica. Por lo que ¡la interpretación es clave!

Por ejemplo, muchos de los modelos constitutivos calculan desplazamientos basados en teoría de pequeñas deformaciones, sin embargo, en problemas geotécnicos como lo son los muros de retención o las excavaciones de túneles, pueden presentarse grandes deformaciones que pueden requerir otro tipo de formulaciones. Por su parte, existen algunos modelos que asumen que las deformaciones pueden descomponerse en una parte de deformación elástica (recuperable) y otra parte de deformación plástica (permanente). No obstante, en los suelos pueden presentarse problemas de linealidad que modifican el comportamiento y la respuesta del suelo al analizar la evolución de las deformaciones.

Por lo tanto, es fundamental estar consciente de las características del modelo, de las condiciones para las cuales fue desarrollado, y de las ventajas y limitaciones que tiene el mismo. El desconocimiento de estos aspectos puede conducir a malas interpretaciones de los resultados. Entre los modelos constitutivos más utilizados en la solución de problemas geotécnicos se pueden mencionar: el modelo Mohr-Coulomb, Duncan-Chan (Modelo hiperbólico), Drucker-Prager y Cam-Clay.

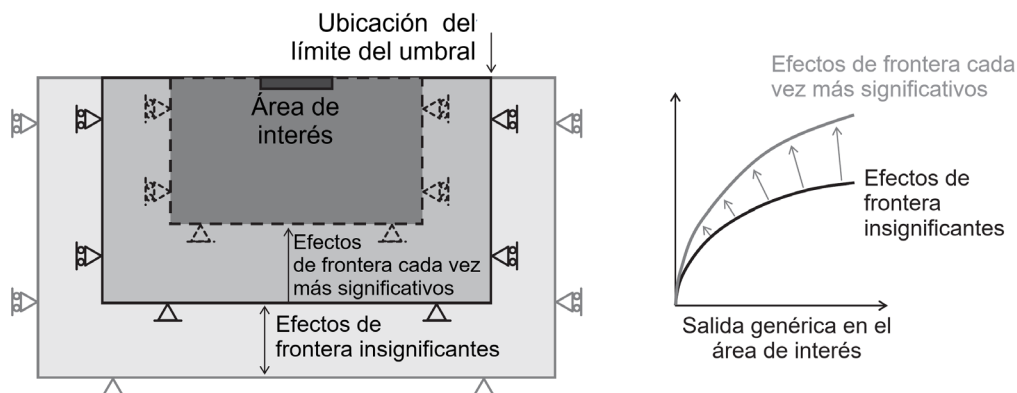
2.3 Condiciones de frontera

Este aspecto es altamente importante en las modelaciones y por lo tanto se requiere un criterio técnico para decidir la ubicación de las condiciones de frontera. En este sentido, las fronteras no deben ubicarse próximas al área de interés, ya que esto sería poco realista e introduciría un efecto significativo en los resultados obtenidos en la simulación.

Por lo que, la ubicación de las fronteras debe ser lo suficientemente lejana del área de interés de tal forma que no se produzcan efectos significativos en el área de interés. ¿Pero a qué distancia debería ubicarse las fronteras? Esto claramente depende de las características particulares de cada modelo, por lo que no existen reglas concretas sobre la ubicación de los límites del modelo. Por lo tanto, es recomendable probar diferentes ubicaciones, a menos que ya se conozcan las ubicaciones más apropiadas por experiencias previas con problemas similares.

Una forma de ubicar los límites del modelo puede hacerse mediante análisis preliminares en los cuales se determinan los resultados clave del problema a ser resuelto clave (esfuerzos, deformaciones, desplazamientos) en puntos específicos e ir aproximando o alejando estos límites del área de interés hasta poder identificar una ubicación del límite del umbral en donde los efectos de frontera sean insignificantes o poco significativos para el problema a resolver, tal y como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación del límite del umbral



Nota: Adaptado de: Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis: A practical guide*. Institution of Civil Engineers. Gran Bretaña.

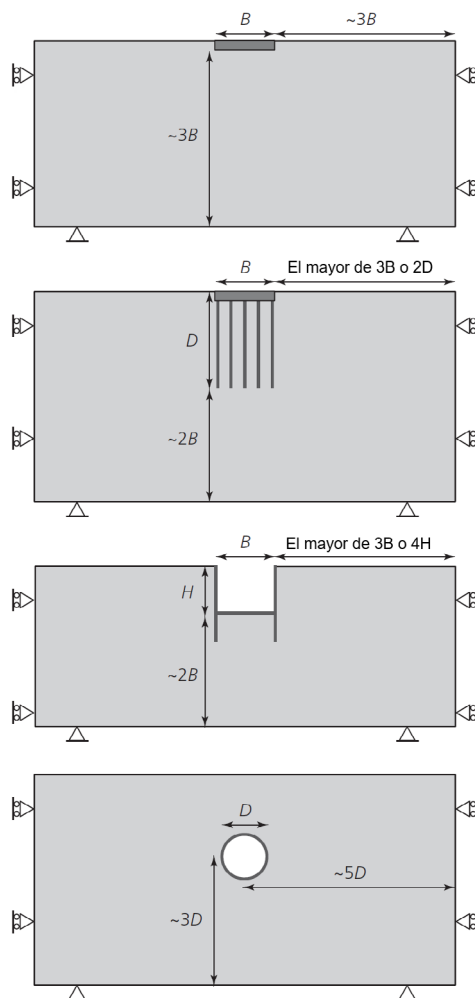
Los límites del modelo dentro del umbral darán como resultado efectos de frontera progresivamente mayores en el área de interés a medida que estén ubicados más cerca del área de interés, pero cualquier lugar más allá del umbral debería resultar en efectos de frontera insignificantes en los productos clave. Por lo tanto, las ubicaciones de los límites del modelo final deben establecerse en cualquier lugar fuera de la ubicación del límite del umbral.

Otro método para probar si los límites del modelo están ubicados lo suficientemente lejos del área de interés es cambiar las fijaciones (por ejemplo, agregar y eliminar fijaciones verticales en los límites verticales) para ver si esto afecta los resultados clave.

Si no se observa ningún efecto significativo, entonces los límites están situados lo suficientemente lejos.

La Figura 2 muestra algunas reglas generales que se pueden utilizar como primera estimación de las ubicaciones de los límites del modelo al comenzar a investigar las ubicaciones más apropiadas para algunos problemas geotécnicos. A menudo es necesario aumentar las distancias mostradas cuando se analizan terrenos inclinados, comportamiento no drenado o flujo de agua subterránea. Otras recomendaciones para localizar las condiciones de frontera pueden ser realizadas por personal calificado y con experiencia en el tema.

Figura 2. Recomendaciones iniciales para la adecuada ubicación de las fronteras en la malla de elementos finitos



Nota: Adaptado de: Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis: A practical guide*. Institution of Civil Engineers. Gran Bretaña.

2.4 Selección del tipo de elemento finito

En general, para los análisis en dos dimensiones, los elementos pueden ser triángulos, cuadriláteros o elementos lineales; por su parte, en los análisis tridimensionales se utilizan generalmente tetraedros o hexaedros. La escogencia del más apropiado es de suma importancia para crear la malla en algunos casos, y depende en gran medida de la geometría de la superficie donde se realiza la obra geotécnica o el problema a ser analizado para la selección de la geometría que mejor se adapta. Por ejemplo, si se analizará una excavación en la cual se colocará un muro de retención, la geometría del problema puede permitir la selección de elementos rectangulares en análisis bidimensionales o en análisis tridimensionales se pueden utilizar hexaedros para obtener la solución.

Por su parte, si se analiza un talud, debido al contorno de la superficie natural del terreno, se podría visualizar que los elementos triangulares (en análisis en dos dimensiones) o tetraedros (en análisis de tres dimensiones) se pueden adaptar mejor a la forma del talud y los materiales presentes. En la mayoría de los casos, la malla de los elementos finales estará compuesta por un solo tipo de elemento, sin embargo, existe la posibilidad de mezclar diferentes tipos dependiendo del software utilizado. La combinación es posible únicamente cuando los elementos tienen un lado en común.

2.5 Discretización del dominio y generación de la malla

La discretización es crucial cuando se establece el tamaño de los elementos finitos, condiciones de contorno, detalles constructivos o bien si se tratan de modelos 2D y 3D.

El tamaño y la disposición de los elementos en una malla pueden tener un efecto crítico en la precisión de un análisis de elemento finito. Una malla mal estructurada es una fuente común de error, por lo que se debe prestar mucha atención a la calidad de la malla y no se puede confiar en que los generadores automáticos de malla produzcan buenas mallas por sí solos.

Esencialmente, las grandes concentraciones de esfuerzos y las zonas de esfuerzo rápidos (incluyendo las poro-presiones) o bien, los cambios de deformación necesitan elementos más pequeños. Estas ubicaciones suelen ocurrir, por ejemplo, en las regiones con grandes cambios de rigidez, discontinuidades, esquinas de cimentaciones y bases de pilotes. Una malla muy fina con elementos pequeños en todas partes sería la más precisa, sin embargo, requiere de tiempos largos de cálculo. Una buena malla de elementos finitos es aquella que tiene elementos pequeños donde son necesarios y elementos más grandes alejados del área de interés y donde los esfuerzos y deformaciones son más uniformes. Por lo tanto, se pueden lograr tiempos de cálculo más rápidos sin una pérdida significativa de precisión.

3 Aplicaciones prácticas en geotecnia

En el caso de las estructuras geotécnicas, los ingenieros deben asegurarse de que la misma es estable, es decir, que la estructura y el soporte sea estable en su conjunto y que a la vez el entorno a ésta, incluyendo cualquier otra obra de infraestructura, también se mantenga estable (no debe haber riesgos de rotación, traslación horizontal o vertical).

Por ejemplo, en zonas urbanas, ninguna excavación debe generar movimientos que comprometan los servicios y edificaciones existentes. En estos casos puede ser necesario predecir o estimar las fuerzas estructurales o movimientos inducidos en estas estructuras o servicios existentes.

En este sentido, antes de comenzar cualquier modelación es necesaria una cantidad considerable de información. En función de la naturaleza del proyecto de ingeniería se deben establecer las condiciones básicas de la geometría y de carga. Adicionalmente se requiere una investigación geotécnica del sitio para establecer las condiciones del terreno que incluya la estratigrafía, las propiedades, los parámetros de resistencia, la deformabilidad, la posición del nivel freático, condiciones de drenaje, entre otras condiciones. Finalmente, además de

tener en consideración el entorno de la estructura se deberá identificar cualquier otra restricción que pueda afectar el desempeño de la estructura o condición futura o probable de la misma como, por ejemplo, la presencia de sismos o variaciones en las condiciones de humedad, con la finalidad de tomar en cuenta las condiciones más críticas a la cual se pueda someter la estructura.

A continuación, se discuten algunas aplicaciones de los métodos numéricos para analizar diferentes obras geotécnicas.

3.1 Estabilidad de taludes y excavaciones

Los análisis de estabilidad de taludes y excavaciones es uno de los principales tipos de análisis que el ingeniero especializado en geotecnia realiza. En estos análisis se determina la relación entre las fuerzas deslizantes y resistivas en un talud o ladera para establecer un factor de seguridad, FS.

A grandes rasgos, los valores para el FS deben cumplir con valores mínimos recomendados y, en el caso específico de Costa Rica, actualmente se cuenta con una serie de recomendaciones establecidas en el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (CGTLCR). Para ello se considera para el sitio de estudio el riesgo de pérdidas humanas y el riesgo de daños económicos y ambientales, considerando tanto condiciones estáticas como la condición de sismo (pseudo-estática), así como la ubicación del sitio y el tipo de suelo.

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los estudios de estabilidad de taludes se basan en los métodos de equilibrio límite (MEL). No obstante, teniendo en consideración las limitaciones que estos métodos tienen, es posible adicionar análisis complementarios o más complejos con el uso del método de elementos finitos (MEF).

De esta manera, sabiendo que el MEL tradicional no incluye el análisis de deformaciones, el uso de los elementos finitos permite realizar este tipo de análisis. Así, por ejemplo, en la Figura 3 se muestran los resultados de un análisis de deformabilidad de un talud, en ambos casos se hace la modelación con las mismas propiedades de resistencia al corte del suelo

dadas por el modelo de Mohr-Coulomb. No obstante, en la Figura 3a se utiliza un suelo con un módulo de elasticidad (o módulo de Young) igual a 25000 kPa, y en la Figura 3b un suelo con un módulo de 50000 kPa. Con estos parámetros, en ambos modelos se obtiene el mismo valor del Factor de Seguridad igual a 1,44 pero, en el caso de la deformación, el modelo que utiliza el módulo de 25000 kPa mostró un desplazamiento total de 0,00575 m (5,75 mm) en la cresta del talud, mientras que para el módulo de 50000 kPa el desplazamiento fue de 0,00287 m (2,87 mm).

Este resultado, desde el punto de vista teórico, es el esperado ya que variaciones en el valor del módulo de elasticidad no debe influir significativamente en la magnitud del FS. Sin embargo, los resultados muestran que existe una relación inversa entre el módulo de elasticidad y la deformación, de tal manera que, un aumento en el valor del módulo de elasticidad se manifiesta en valores de deformación más bajos.

Otra aplicación interesante de la combinación de análisis de MEF y MEL es el análisis en el tiempo de los efectos de infiltración del agua de lluvia y la estabilidad de un talud. En este tipo de análisis utilizar únicamente el MEL no permite analizar el efecto de infiltración del agua de lluvia en la cara del talud. En este caso, el MEL únicamente puede analizar lo que se conoce como un análisis estacionario, en el cual no se simula el fenómeno de infiltración y se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 4. Aquí el valor del factor de seguridad obtenido es igual a 1,281, cuyo valor, al ser superior a 1,0, indica que el talud es estable ante estas condiciones.

Para analizar el efecto del fenómeno de infiltración se puede utilizar la malla de elementos finitos que se muestra en la Figura 5 y las condiciones de frontera mostradas, donde las flechas rojas representan la infiltración producida por una lluvia constante de 14,55 mm/hora por un periodo de 24 horas y los puntos azules representan la presencia de un nivel freático existente en el talud. Para este ejercicio se puede analizar el efecto a lo largo del tiempo (por ejemplo, 7 días) que tiene la infiltración del agua de lluvia en los factores de seguridad del talud.

Figura 3. Ejemplo de análisis de estabilidad y deformabilidad de un talud

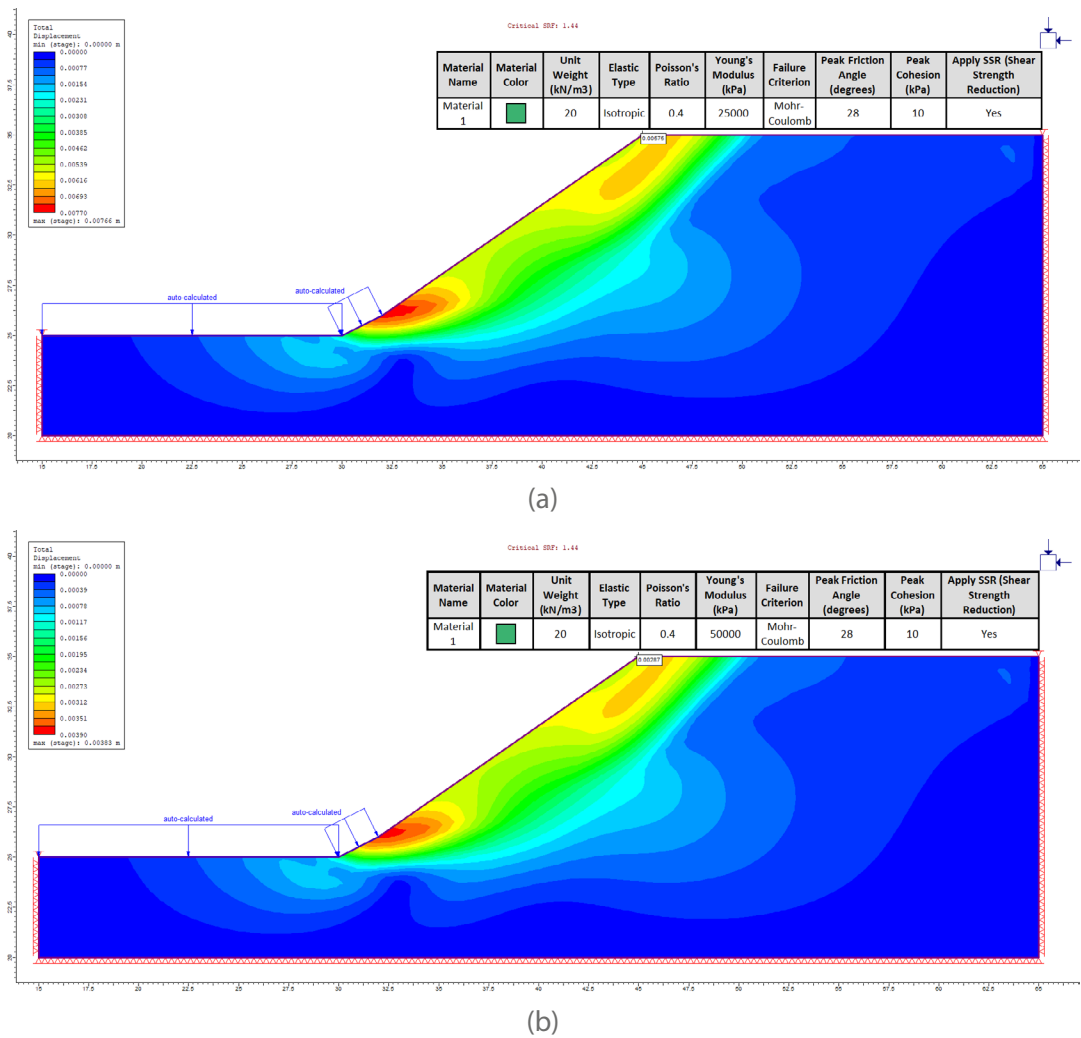


Figura 4. Resultados de un análisis estacionario de un talud

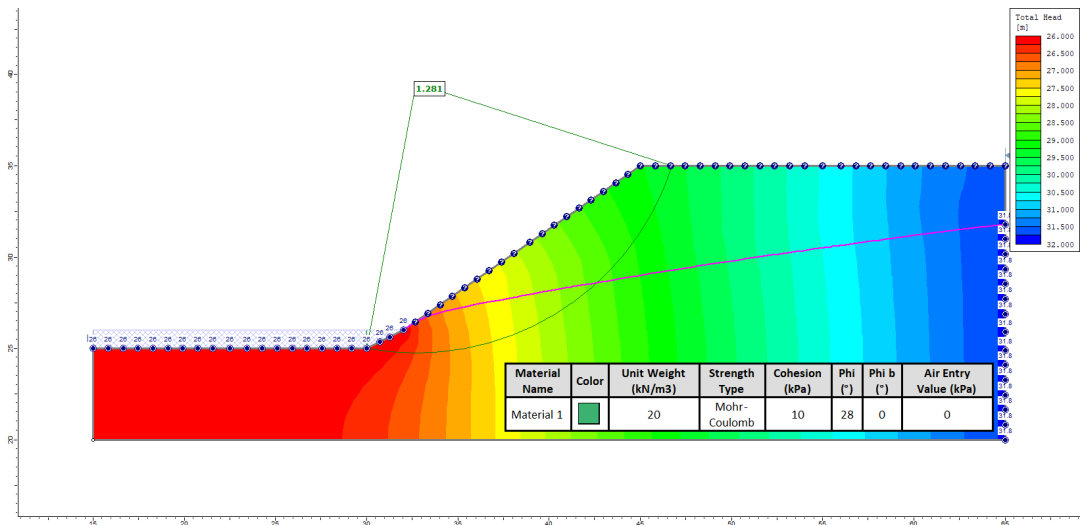
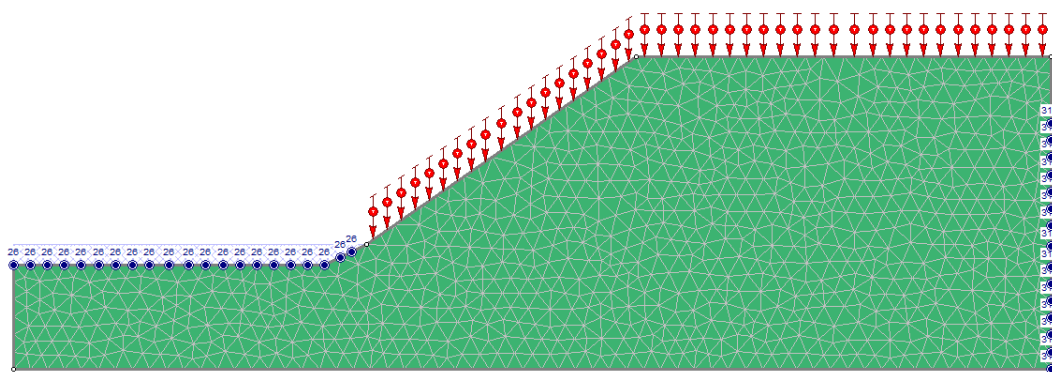


Figura 5. Malla de elementos finitos y condiciones de frontera analizadas



En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de la modelación para diferentes periodos de tiempo. Como se puede observar en la Figura 6a, en la condición inicial en el cual están iniciando las lluvias, el factor de seguridad tiene un valor de 1,281, que coincide con el valor obtenido en el análisis estacionario mostrado anteriormente.

No obstante, en la Figura 6b transcurrido un periodo de 9 horas el valor del factor de seguridad se reduce a 0,995. Si la precipitación continúa los factores de seguridad disminuyen a valores de 0,979; 0,974; 0,970 y 0,969 para periodos de 12, 15, 18 y 24 horas, respectivamente. Estos valores al tratarse de magnitudes inferiores a 1,0 representarían condiciones inestabilidad o falla del talud.

Finalmente, en la Figura 6c se observa que 48 horas después, en las cuales después de terminar la precipitación y darse un periodo de drenaje en las últimas 24 horas, el factor de seguridad vuelve a aumentar a 1,217. Si continúa esta condición de drenaje por 7 días, el valor del factor de seguridad vuelve a coincidir con el valor de 1,281.

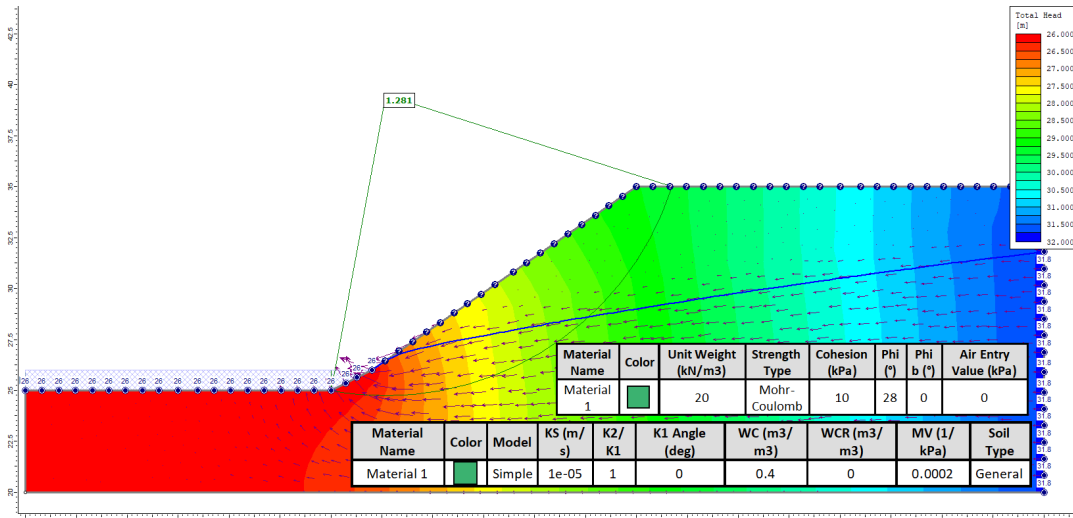
Este ejemplo, desde el punto de vista teórico y práctico, muestra el efecto que tienen las lluvias y la saturación de los suelos en la estabilidad de taludes. En este caso, se observa como la lluvia, al inicio no tienen efectos significativos en la reducción de los

factores de seguridad y la estabilidad del talud. Sin embargo, lluvias constantes, aunque sean de baja intensidad, por largos periodos de tiempo conllevan a procesos de saturación de los suelos y a una reducción paulatina de la estabilidad, que se puede reflejar en deslizamientos de taludes. Una situación muy común que se observa cuando han transcurrido algunas horas o días de los denominados “temporales” o afectaciones por ondas tropicales, es que se presentan una gran cantidad de deslizamientos en muchos taludes después de varios días de lluvias.

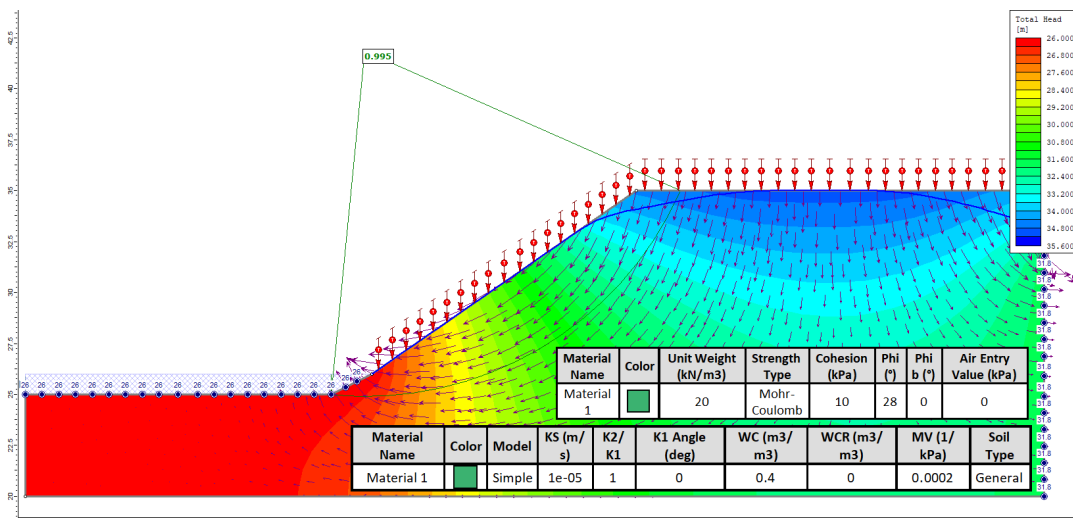
De manera opuesta, lluvias muy intensas, es decir, grandes volúmenes de precipitación en periodos de tiempo muy cortos generalmente presentan pocos problemas por deslizamientos, pero si muchos problemas por inundaciones.

Aunque los ejemplos anteriores se han basado en análisis bidimensionales, durante las últimas décadas, se han investigado e implementado numerosos métodos numéricos que permiten análisis tridimensionales de taludes. El interés en el análisis tridimensional de estabilidad de taludes parece estar impulsado por el hecho de que la mayoría de las fallas de estabilidad de taludes son de carácter inherentemente tridimensional, es decir, la superficie de falla con mucha frecuencia presenta variaciones con la superficie del terreno, que difícilmente pueden ser previstas por el ingeniero.

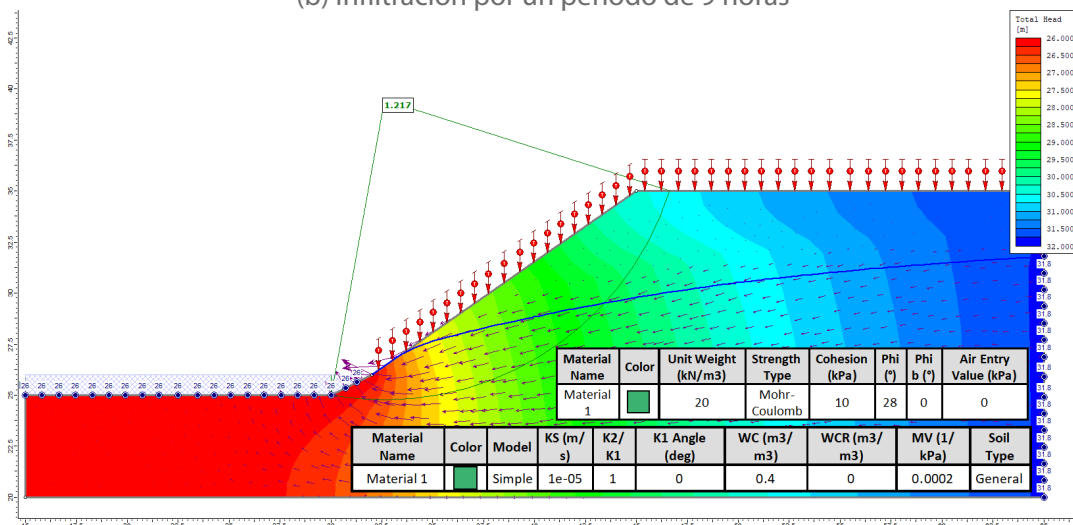
Figura 6. Factores de seguridad para diferentes periodos de tiempo de infiltración



(a) Condición inicial: infiltración a 0 horas



(b) Infiltración por un periodo de 9 horas

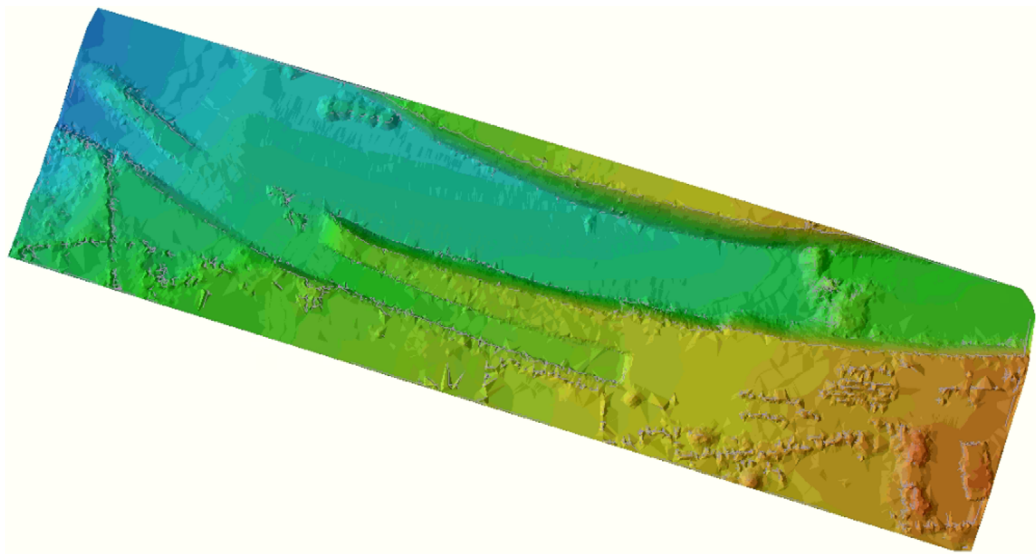


(c) Condición final: infiltración por un periodo de 24 horas + drenaje de 24 horas

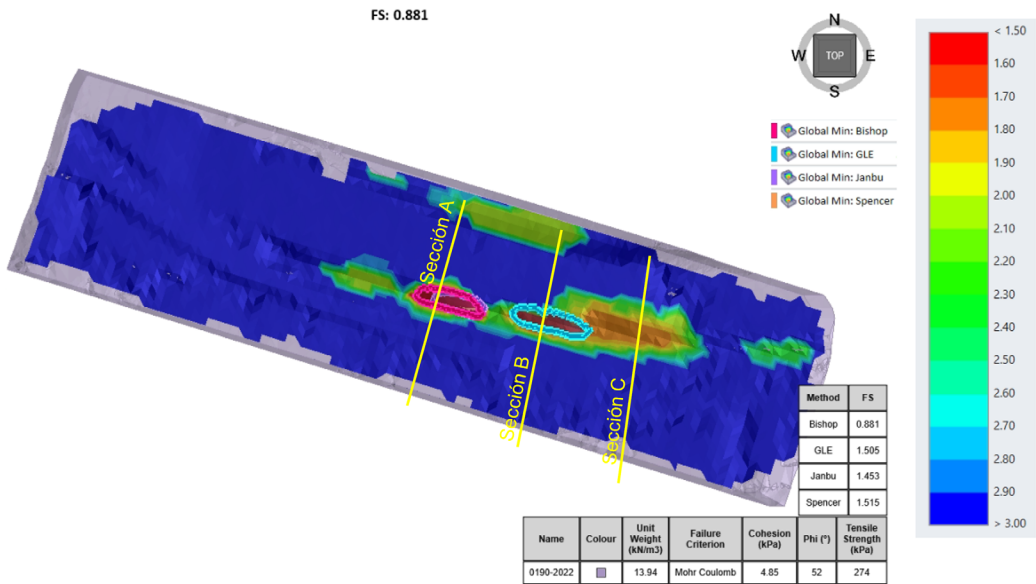
De esta manera, es posible utilizar Modelos de Elevación Digital (MED) obtenidos con la topografía convencional o bien con análisis fotogramétricos de imágenes levantadas con vehículos aéreos no tripulados (VANT), también conocidos como drones, para llevar a cabo análisis de estabilidad de los taludes. Un ejemplo de este tipo de análisis se puede realizar en obras lineales, como lo son carreteras,

en las cuales, muchas veces, es difícil establecer las zonas más susceptibles a deslizamientos. La Figura 7a, muestra un modelo de elevación de un tramo de carretera y la Figura 7b, muestra los resultados de un análisis estático en este mismo tramo. Los resultados obtenidos permiten identificar los sectores que presentan los factores de seguridad más bajos y en los cuales pueden realizarse análisis más específicos.

Figura 7. Ejemplo de aplicación de métodos numéricos tridimensionales



(a) Modelo de elevación de un tramo de carretera en estudio



(b) Factores de seguridad obtenidos en la zona de estudio para una condición estática.

3.2 Cimentaciones y asentamientos

Los métodos numéricos pueden ser empleados en el diseño de cimentaciones profundas para el análisis de la carga axial y lateral de pilotes individuales o de grupos de pilotes, situaciones en las cuales los cálculos manuales o mediante hojas de cálculo requerirían una gran cantidad de horas de trabajo.

En este sentido es posible utilizar los métodos numéricos en problemas relacionados con:

- Cimentaciones de grandes superficies como son las plantas solares, termosolares, eólicas, etc.,
- Cimentaciones de grupos de pilotes sobre suelos blandos o pocos competentes o con cargas elevadas,
- Cimentaciones de viaductos, puentes y otras grandes obras de infraestructura
- Análisis de capacidad de carga de cimentaciones superficiales, pilotes hincados o pilotes pre-excavados.

Por ejemplo, en la Figura 8 se puede observar el análisis de una cimentación formada por un grupo de 9 pilotes de 60 cm de diámetro y 15 m de profundidad. Los pilotes se encuentran separados a cada 1,8 m de distancia en una placa cuadrada de 5 m x 5 m y de un espesor de 1 m. El terreno en el cual se encuentra apoyada esta cimentación presenta espesores variables de diferentes tipos de suelos.

Algunos de los resultados obtenidos que se pueden obtener de esta modelación se muestran en la Figura 9, con los cuales es posible determinar los desplazamientos, asentamientos, la fuerza axial, la fricción, fueras de reacción del suelo, resistencia cortante, rigidez, momentos, etc., esperados en cada uno de los pilotes. Estos resultados pueden ser considerados para los análisis, diseño y verificación de cada uno de los pilotes.

Figura 8. Ejemplo de aplicación de métodos numéricos en el análisis de cimentaciones con un grupo de pilotes

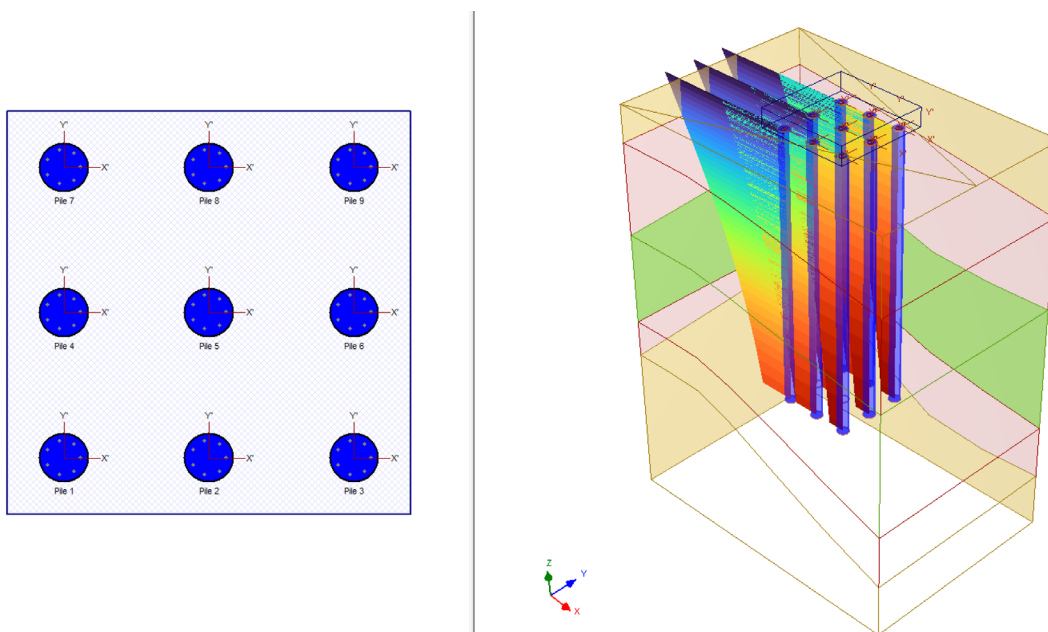
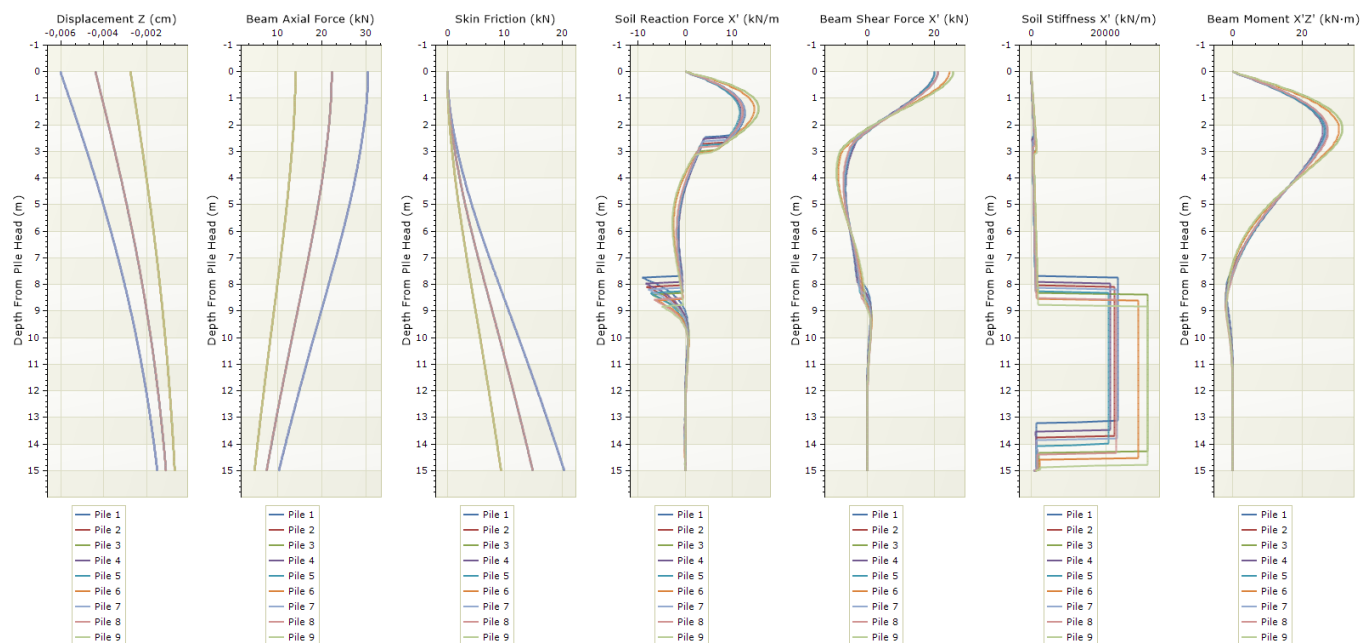


Figura 9. Resultados obtenidos en los pilotes que forman parte del grupo de pilotes



4 Comentarios finales

El análisis numérico es una herramienta poderosa y versátil para investigar la influencia de varios factores y parámetros para un problema geotécnico. Sin embargo, es necesario recordar siempre que la solución a cualquier problema está condicionada por la entrada de datos y no por el conocimiento inherente a la comprensión física del problema.

Independientemente del problema que se resuelva, es importante recordar que el fin último de los métodos numéricos es proporcionar comprensión del problema físico que ya ha sido identificado, no números. De esta manera, la aplicación de los métodos numéricos no debe estar aislada de la realidad, es decir, debe existir una íntima relación

entre la fuente del problema y el uso que se pretende hacer de los resultados numéricos.

Preferiblemente, antes de aplicar cualquier método de análisis numérico, el problema debe ser entendido y haberse estudiado con otros métodos de análisis. En otras palabras, los métodos numéricos son excelentes herramientas para aprender sobre los fenómenos físicos y el comportamiento del terreno/estructura.

El uso de los métodos numéricos se recomienda siempre y cuando el analista o ingeniero evalúe racionalmente los resultados y los contraste con la experiencia práctica y los principios básicos de la ingeniería, calibrando los modelos para resolver el problema geotécnico a resolver.

5 Referencias

- Bustamante, A. (2011). *Modelaje geotécnico por elementos finitos y comprobación instrumental de la exactitud lograda*. Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela.
- Chandrupatla, T., Belegundu, A. (2013). *Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería*. Segunda edición. Pearson Educación. Estados Unidos.
- Lees, A. (2016). *Geotechnical Finite Element Analysis: A practical guide*. Institution of Civil Engineers. Gran Bretaña.
- Potts, D., Zdravkovic, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford. Gran Bretaña.
- Sarmiento, J., Ruge, J., Guzmán, Y., Rincón, S. (2017). *Aspectos que condicionan las modelaciones numéricas en la predicción del comportamiento de estructuras geotécnicas reales*. Revista Brújula – Escuela Militar de Codetes “General José María Córdova”. Colombia
- Suárez, B., Oñate, E., Ribó R. (2002). *Las herramientas numéricas y la práctica profesional en ingeniería civil*. Revista de obras públicas. Febrero 2002, n.º 3418. España.
- Zuloaga, I. (s.f.). *Casos prácticos en la aplicación de elementos finitos para la reducción del riesgo geotécnico*. Ingeosolum. Panamá.

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



Revisor:

- Ing. Ana Lorena Monge Sandí, M.Sc.
Coordinador general
Programa de Ingeniería Geotécnica

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación: MSc. Daniela Martínez Ortiz.

Control de calidad: Óscar Rodríguez Quintana.

Aplicación de métodos numéricos para la solución de problemas geotécnicos

Palabras clave: Métodos numéricos, modelos constitutivos, estabilidad de taludes, estabilidad de excavaciones, cimentaciones, asentamientos.

☎ (506) 2511- 2500

✉ direccion.lanamme@ucr.ac.cr • www.lanamme.ucr.ac.cr