

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CONCLUSIONES FINALES

De todo lo expuesto a lo largo de esta Tesis Doctoral, se resaltan a continuación las principales conclusiones a que se ha llegado.

Sobre el análisis de equilibrio límite de taludes sometidos a presión en su superficie, y que presentan una zona superficial de terreno más débil

- Con este análisis se ha tratado de conocer el efecto de la malla de refuerzo sobre el talud, sustituyéndola por la acción que principalmente le transmite, que se puede considerar como una presión sobre su paramento.
- Del análisis realizado se concluye la mejora con respecto a la estabilidad, que supone la acción de una presión actuando sobre el paramento del talud, obteniéndose mayores coeficientes de seguridad al aumentar dicha presión.
- Los análisis también permiten concluir que, en general, el considerar el talud como indefinido da lugar a resultados suficientemente precisos, ya que la relación altura de talud con respecto a espesor de zona inestable se puede considerar suficientemente grande al tratarse de inestabilidades superficiales.
- No obstante, para casos en los que dicha condición no sea del todo precisa, se ha planteado un análisis, también de equilibrio límite, considerando una serie de cuñas que deslizan en la superficie del talud. Con ello se ha podido estudiar el caso de taludes de altura finita. Como resultado se presenta la definición de un coeficiente de reducción de altura, como cociente entre la presión máxima necesaria en el caso de talud finito, con respecto a la que se obtiene considerando el talud como indefinido. Se comprueba también que el parámetro s/d (s : separación entre anclajes, d : espesor de la zona superficial inestable), para valores usuales de uno a tres, apenas influye en los resultados. Por otro lado, si se trata de un caso con cohesión, se comprueba que el análisis se puede realizar considerando una altura de talud corregida que depende del peso

específico del terreno, el espesor de la zona inestable, la inclinación del talud, la cohesión, y el ángulo de rozamiento interno.

Sobre la caracterización de la malla de refuerzo

- Como base de partida se establece que la malla de refuerzo sólo es capaz de transmitir presión a la superficie del talud si se deforma adquiriendo cierta curvatura y entrando en tracción. Ello ha llevado a estudiar su comportamiento bajo tracción, desde el punto de vista de su rigidez, pero además en cuanto a la posibilidad de representarla como un material continuo y así poder incluirla en análisis numéricos con elementos finitos.
- Del análisis teórico que se presenta sobre el comportamiento mecánico de la malla se concluye una de sus características más relevantes, su anisotropía, dependiendo el grado de ésta de la relación entre las dimensiones de las diagonales de los rombos que forman la malla. Dicha anisotropía hace que se establezcan como parámetros que definen el comportamiento: los módulos de elasticidad en sus dos direcciones principales, el módulo de rigidez transversal, y uno de los coeficientes de Poisson.
- Dicho desarrollo teórico se ha aplicado al caso concreto de la malla TECCO G-65. Ello ha permitido extrapolar el valor de algunos parámetros de la malla, de los que no se tiene resultado ya que no se pueden obtener de los ensayos de laboratorio de que se dispone. Así, y basándose en las relaciones que se han de cumplir entre los parámetros, fruto del desarrollo teórico, se llega a la conclusión de que este tipo de mallas se pueden modelizar como un material continuo anisótropo. Esta conclusión, que en principio no resulta evidente, ha permitido obtener el valor de los parámetros que se han de considerar para dicho material continuo, para con ellos poder representar el comportamiento de la malla de una forma precisa en análisis con elementos finitos.
- Por otro lado, la forma de colocación de la malla en su puesta en obra define distintas formas de trabajo a las que puede estar sometida. En la investigación realizada se analizan dos de ellas, lo que ha dado lugar al

desarrollo de dos modelos presión-curvatura, uno de los cuales ha sido contrastado con los resultados de ensayos de laboratorio de carga distribuida sobre la malla. Dicho contraste hace concluir el adecuado funcionamiento del modelo teórico.

Sobre los análisis tensión-deformación del conjunto suelo-refuerzo

- Este análisis se ha llevado a cabo mediante el estudio de una serie de celdas elementales, las cuales han permitido extraer las siguientes conclusiones con respecto a aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de estudiar estos sistemas suelo-refuerzo.
- Para representar el correcto comportamiento de la malla de refuerzo es necesario emplear en los análisis numéricos elementos que sólo resistan tracciones, y no compresiones. De no ser así, en algún caso concreto pueden obtenerse resultados erróneos.
- Los análisis en los que interviene la malla de refuerzo han de realizarse bajo la condición de grandes movimientos, y a ser posible grandes deformaciones. Esta condición de adaptación de la geometría tras cada escalón de cálculo es necesaria para que la malla se deforme y entre en tracción.
- Como resultado del análisis de una serie de celdas elementales en las que se encuentran trabajando conjuntamente el suelo y el refuerzo, se llega a la conclusión de que cuanto más deformable sea el suelo, y cuanto menos resistente, mayor es la deformación de la malla, mayor su tensión, y más uniforme su curvatura.
- También se ha evidenciado la necesidad de considerar una discretización de elementos finitos más densa en las cercanías del punto de unión entre la malla y el anclaje. Esto es así debido a que es la zona donde se desarrollan mayores tensiones y deformaciones. De no hacerse así, se pueden producir inestabilidades numéricas en los resultados obtenidos en dicha zona.

- Finalmente, un aspecto de gran importancia se ha puesto de manifiesto con relación al valor considerado del ángulo de dilatación del terreno. Se ha comprobado que según sea dicho valor, los resultados de tensión en la malla pueden multiplicarse hasta por tres. Este hecho se produce debido a la condición de confinamiento a la que se encuentra sometido el suelo por efecto de la malla. Ya en otro tipo de problemas en los que también se daba esta situación de confinamiento se ha observado la influencia de este parámetro (Houlsby, 1991). Por tanto, se ha de prestar especial atención a la hora de elegir su valor, y sobre todo tener cuidado si se emplean programas numéricos en los que el modelo de comportamiento del suelo es de material asociado.

Sobre la degradación del terreno y su aplicación a taludes con y sin refuerzo

- Se ha planteado una formulación de degradación del terreno, que ha sido implementada en el programa de elementos finitos OXFEM. Para verificar su correcto funcionamiento se ha analizado el caso de una cimentación superficial sometida a degradación desde su superficie hacia el interior del terreno. Los resultados de este análisis permiten concluir el correcto funcionamiento de la formulación, siendo totalmente coherentes con el comportamiento esperado.
- Además, los resultados anteriores muestran que en un caso sencillo como es el de carga de hundimiento (sin interacción suelo-estructura, geometría sencilla, etc.), el resultado final, por ejemplo en cuanto a asentamientos bajo la zapata, es el mismo si se considera en primer lugar la aplicación de una carga y a continuación se aplica la degradación, que si se aplica la carga de la zapata directamente sobre el suelo con valor de los parámetros iniciales correspondientes al suelo degradado. Por supuesto que la curva presión-asentamiento no es la misma, pero sí el punto final al que se llega.
- Finalmente, del análisis presentado en relación a taludes sin y con refuerzo sometidos a degradación, se pueden establecer las siguientes consideraciones.

- De la comparación de los resultados del análisis de un talud, sometido a la misma degradación, y con la misma geometría y mismos parámetros de cálculo, en los dos casos sin y con refuerzo, se concluye que el refuerzo realiza una misión de contención del terreno, llegando a evitar deslizamientos superficiales. Así, en el caso de talud sin refuerzo, éste puede resultar inestable al someterle a la degradación impuesta, mientras que al reforzarlo se vuelve más estable, y más cuanto mayor es el número de puntos de anclado de la malla. Así ha se ha comprobado en uno de los casos estudiados.
- En cuanto a la tracción que soporta la malla al degradarse el talud, se ha comprobado que es máxima en las zonas cercanas a los puntos de anclado, como resulta lógico ya que es ahí donde la malla encuentra su reacción. El valor de dicha tracción depende de la rigidez de la malla y del suelo, de forma que cuanto menos rígido sea éste, mayor es la tracción que soporta la malla, para igualdad del resto de parámetros. Ahora bien, valores muy elevados de las tracciones sólo se tendrán si el suelo es muy poco rígido, o bien si se encuentra ya en rotura, todo él plastificado.
- También se concluye la dificultad del análisis numérico del problema, tal es por ejemplo la necesidad de refinar la malla de elementos finitos en las inmediaciones de los puntos singulares (anclajes, contacto malla-terreno, etc.).

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las futuras líneas de investigación que se proponen se refieren principalmente al desarrollo relacionado con la formulación de la degradación del terreno, y su aplicación al caso de taludes reforzados.

- La formulación de degradación presentada incluye la reducción de cualquiera de los parámetros resistentes que definen la superficie de plastificación de un modelo de comportamiento de un suelo. Sin embargo, la implementación que se ha realizado de dicha formulación al programa OXFEM, y en concreto al modelo de comportamiento Matsuoka-Nakai generalizado, contempla únicamente la reducción de cohesión, la cual va disminuyendo en función de la definición de los frentes de avance de degradación definidos en el último Capítulo de la Tesis. En este sentido, se propone incluir en las subrutinas de degradación correspondientes la posibilidad de una reducción también del ángulo de rozamiento, ya que éste es el otro parámetro resistente que define la superficie de plastificación de Matsuoka-Nakai generalizada.
- Además, también sería útil plantear la formulación correspondiente a una degradación de la deformabilidad del terreno, es decir, que su módulo de elasticidad también se vea afectado por la degradación. De esta forma la degradación influiría en el rango de comportamiento elástico.
- Por otro lado, se establece un aspecto numérico de tipo colateral o accesorio a mejorar. Con respecto a la obtención de la intersección de una trayectoria elástica de un punto de Gauss, correspondiente a un cierto escalón de carga, con la superficie de plastificación de Matsuoka-Nakai generalizada, la solución aplicada ha sido numérica. Como se ha comentado en la parte correspondiente a esta investigación, ello puede dar lugar a algunos problemas de precisión si un punto de Gauss se acerca al vértice de la superficie. Por tanto, se plantea como futura línea de investigación el obtener una solución analítica para dicha intersección.
- Con respecto al análisis de taludes reforzados, sería muy interesante el formular dentro del programa OXFEM elementos tipo muelle que permitan

representar el comportamiento de los anclajes. Este tipo de elementos debería presentar una rigidez entre dos puntos dados (que representarían los extremos de los anclajes), de forma que no creasen una frontera tal y como hacen los elementos continuos que impiden el movimiento del suelo a través de ellos.

- Otra alternativa a estos elementos sería formular elementos interfaz en grandes desplazamientos, de forma que combinados con elementos membrana de que dispone el programa, permitiesen un desplazamiento relativo entre anclaje y suelo. Precisamente ha sido la ausencia de este tipo de elementos la que ha llevado a representar los anclajes únicamente como puntos del paramento con desplazamiento horizontal nulo.
- Una vez formulados en grandes desplazamientos cualquiera de los dos elementos descritos, se propone analizar el caso de taludes reforzados empleando dichos elementos para representar los anclajes. Este análisis sería interesante realizarlo para distintas características del refuerzo (separación de anclajes, rigidez de anclajes, etc.).
- Finalmente, se propone como futura línea de investigación el aplicar al formulación de degradación desarrollada a otro tipo de problemas distintos al de estabilidad de taludes en suelos, en los cuales también se pueda presentar, por alguna razón, una disminución de los parámetros resistentes del terreno, por ejemplo, asientos diferidos de terraplenes y su interacción con estructuras, o interacción terreno-revestimiento a largo plazo en túneles, etc.