

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL**



#### 4.1. INTRODUCCIÓN. PROGRAMAS EMPLEADOS

Los métodos de elementos finitos son actualmente la herramienta más obvia para resolver problemas tenso-deformacionales, en particular en casos de interacción suelo-estructura. Por ello, es lógico que su empleo en el caso presente sea de consideración obligada.

Sin embargo, las peculiares características del problema, comentadas en los Capítulos precedentes, hacen que el análisis no sea directo, sino que es preciso poner especial cuidado en la reproducción de algunos detalles. Por ello, este Capítulo se dedica a identificar estos problemas y cuantificar su incidencia en los resultados.

El cálculo se ha hecho empleando programas disponibles comercialmente. En particular, se han utilizado:

- Programa CRISP, versión CRISP90, desarrollado en la Universidad de Cambridge (Britto y Gunn, 1990)
- Programa PLAXIS, versión V7.1 (Brinkgreve y Vermeer, 1998)

En el Capítulo 5, donde se introduce la acción de la degradación del terreno, se emplea otro programa diferente, el OXFEM, desarrollado en la Universidad de Oxford (Burd, 1986). Los apartados siguientes se centran únicamente en aspectos relacionados con los programas CRISP90 y PLAXIS, dejando la presentación del programa OXFEM para el Capítulo 5 donde se describe y se justifica su empleo.

## 4.2. MODELIZACIÓN DE ELEMENTOS

En los tres apartados siguientes se presenta el tipo de elemento elegido en cada programa para representar el terreno, la malla y los anclajes, estando dicha elección basada en el comportamiento que se desea reproducir para cada uno de ellos. Además, para cada tipo de elemento se establecen las propiedades que definen su comportamiento, y se dan valores genéricos para alguna de ellas. Con ello se pretende que esta definición de tipos de elementos quede establecida para todos los análisis que se realizan en este Capítulo, de forma que será la empleada en todos los casos salvo que en alguno concreto se indique lo contrario.

### 4.2.1. Suelo

Para representar el comportamiento del suelo con el programa CRISP90 se emplean elementos tipo 'LSQ' (Linear Strain Quadrilateral). Se trata de un elemento cuadrilátero con ocho nodos, cuatro en los vértices y otros cuatro situados en los puntos medios de cada uno de los lados. El empleo de este tipo de elementos da lugar a una ley de desplazamientos cuadrática, y por tanto, una ley lineal de deformaciones. El número de puntos de Gauss en cada elemento es nueve. El criterio de signos empleado por el programa con respecto a las tensiones es de compresiones positivas.

En el caso del programa PLAXIS, el tipo de elemento empleado para representar el suelo es el denominado '6-node triangle'. Se trata de elementos triangulares con seis nodos y tres puntos de Gauss. Los nodos están dispuestos de forma que tres ocupan los vértices y los otros tres se sitúan en los puntos medios de los lados. En este caso, el criterio de signos con respecto a las tensiones es de compresiones negativas.

El modelo de comportamiento considerado para el suelo, tanto en el análisis con CRISP90 como con PLAXIS, es el correspondiente a material elástico perfectamente plástico con criterio de rotura de Mohr Coulomb.

En ambos programas los parámetros que definen dicho modelo de comportamiento son, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, el peso específico del suelo, la cohesión y el ángulo de rozamiento interno. Además, en el caso del programa PLAXIS, se da la opción de introducir un valor del ángulo de

dilatancia distinto del valor del ángulo de rozamiento interno, mientras que el programa CRISP90 considera como dilatancia el valor del ángulo de rozamiento (la influencia de este parámetro se estudia con detalle más adelante).

Los valores adoptados para cada uno de los parámetros anteriores son:

- Módulo de elasticidad (E): constante con la profundidad, y de valor diferente según los casos estudiados.
- Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ): 0.3 en todos por casos
- Peso específico del suelo ( $\gamma$ ): 18 kN / m<sup>3</sup>
- Cohesión (c): constante con la profundidad, y de valor diferente según los casos estudiados.
- Ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ): diferente según los casos estudiados.
- Dilatancia ( $\psi$ ): diferente según los casos estudiados (en el programa CRISP90 su valor coincide con el del ángulo de rozamiento interno del terreno).

#### 4.2.2. Malla de refuerzo

El tipo de elemento que mejor representa el comportamiento de la malla de refuerzo difiere ligeramente, en lo que a comportamiento y parámetros de definición se refiere, entre el programa CRISP90 y el PLAXIS, por lo que se presentan por separado las consideraciones correspondientes a cada uno de ellos.

Los valores que se adoptan para los parámetros tratan de representar el comportamiento de la malla TECCO G-65, descrito en el Capítulo 3, y que es la que se va a considerar como refuerzo a lo largo de todo el estudio.

#### **Análisis con el programa de elementos finitos CRISP90**

De los tipos de elementos de que dispone el programa CRISP90, el más adecuado para representar el comportamiento de la malla de refuerzo es el 'Linear Strain Bar'. Se trata de elementos de tres nodos, con ley de desplazamientos

cuadrática, y ley lineal para las deformaciones. La disposición de los nodos es de dos situados en los extremos del elemento y el tercero en el centro.

En cuanto a su comportamiento, los elementos 'Linear Strain Bar' sólo resisten esfuerzo axil, pero lo hacen tanto a compresión como a tracción. El hecho de que resistan compresiones puede dar lugar a que en alguna situación donde la malla no debería estar trabajando, ésta se encuentre sometida a un estado de compresión, lo que no representaría la realidad de su comportamiento. Es necesario, por tanto, asegurarse de que en los análisis que se realicen con este elemento, la malla siempre esté sometida a un estado de tracción. El criterio de signos empleado por el programa es de esfuerzos de tracción en el elemento negativos.

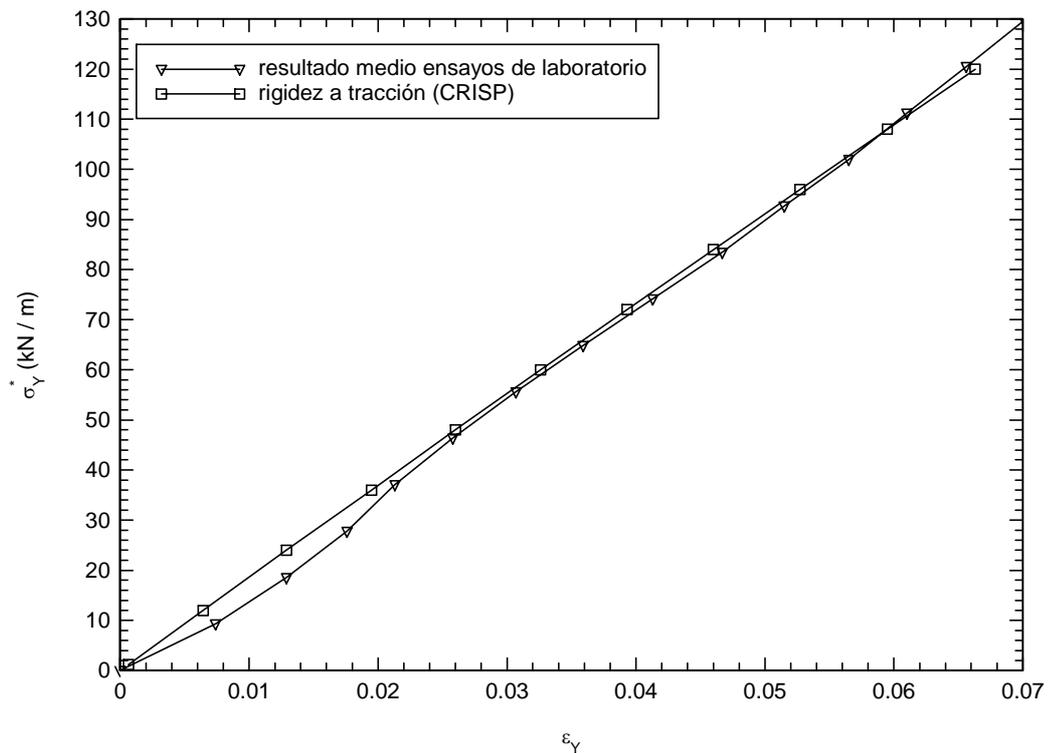
Los parámetros necesarios para definir este tipo de elementos son, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, y el área transversal (o espesor ya que el cálculo se hace en deformación plana y por unidad de ancho).

Para establecer el valor de estos parámetros se han tenido en cuenta los resultados obtenidos sobre la rigidez de la malla en el Capítulo 3. En dicho Capítulo se establece la relación que existe, para la malla TECCO G-65, entre la fuerza aplicada por unidad de ancho de malla, en su dirección de trabajo, y el valor de la deformación resultante en dicha dirección, todo ello bajo situación de confinamiento lateral. Dicha situación de confinamiento lateral se corresponde con el análisis en deformación plana que se realiza con los programas de cálculo.

El valor de dicha relación es de 1800 kN/m, por lo que se ha de cumplir que la rigidez a axil ( $E \cdot A$ ) del elemento 'bar' sea igual a dicho valor (ver Capítulo 3).

Según lo anterior, para definir los elementos tipo 'Linear Strain Bar' que representan la malla, se han tomado los siguientes valores de los parámetros, que como se comprueba, cumplen la relación  $E \cdot A = 1800$  kN/m.

- Módulo de elasticidad:  $2 \cdot 10^8$  kN/m<sup>2</sup>
- Área transversal por unidad de ancho (espesor):  $9 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/m.
- Coeficiente de Poisson: 0.3.



**Figura 4.1. Rigidez de la malla TECCO G-65 según análisis con elementos finitos y según resultados de ensayos de laboratorio**

Para comprobar la validez de los valores adoptados, se ha analizado el caso de una serie de elementos 'bar' unidos por sus extremos de forma que configuran una geometría recta, y sometidos a una fuerza axial creciente en los dos extremos. En la Figura 4.1 se presenta la curva fuerza-deformación obtenida, y se comparan con la correspondiente a los ensayos de laboratorio de tracción directa sobre la malla presentada en el Capítulo 3.

### **Análisis con el programa de elementos finitos PLAXIS**

El tipo de elemento más adecuado para representar el comportamiento de la malla de refuerzo en el programa PLAXIS es el denominado 'geotextile', para el cual caben dos posibilidades, con tres o cinco nodos, empleándose uno u otro dependiendo del tipo de elemento considerado para representar el suelo. Como para representar el suelo se ha elegido el elemento '6-node', el elemento 'geotextile' a emplear para la malla es el correspondiente a tres nodos, de forma que éstos coinciden con los tres que tiene el elemento de suelo en cada uno de sus lados. Las fuerzas axiales en

elementos 'geotextile' son evaluadas en los puntos de Newton-Cotes, puntos que se corresponden con sus nodos.

Los elementos 'geotextile' presentan un comportamiento elástico, y sólo son capaces de soportar esfuerzos de tracción, presentando una rigidez nula a compresión. El criterio de signos del programa se corresponde con estados de tracción en el elemento positivos.

El parámetro que define su comportamiento es la rigidez a axil, dada en la forma del producto  $E \cdot A$  por unidad de anchura. Precisamente, el valor de este parámetro es el que se tiene directamente de los resultados de los ensayos de laboratorio de tracción directa sobre la malla TECCO G-65 presentados en el Capítulo 3. Por tanto, para definir el elemento 'geotextil' que representa a la malla se toma el siguiente valor:

- Rigidez a axil por unidad de ancho ( $E \cdot A$ ): 1800 kN/m.

#### **4.2.3. Anclajes**

El comportamiento de los anclajes puede partir de un estado sin pretensado (refuerzo pasivo) o bien de un estado de pretensado inicial el cual se les aplica durante la puesta en obra (refuerzo activo). En este último caso, para representar el comportamiento de los anclajes en programas de elementos finitos es necesario emplear un tipo de elemento que pueda ser sometido a dicha acción de pretensado inicial.

En el programa CRISP90 no existe ningún elemento que permita representar dicho comportamiento de pretensado, por lo que en los análisis donde tome parte el anclaje considerado como refuerzo activo, habrá que establecer la forma más conveniente de simular dicho efecto.

Por contra, en el programa PLAXIS, el comportamiento de un anclaje pretensado se puede representar de forma adecuada mediante la combinación de dos tipos de elementos. Por un lado, los elementos denominados 'node to node anchor' que se emplean para modelizar el cuerpo del anclaje, y por otro, los elementos tipo 'geotextile' que representan el comportamiento del bulbo de anclaje. A los primeros es posible imponerles en el análisis una fuerza de pretensado.

Los elementos tipo 'geotextile' han sido descritos en el apartado anterior correspondiente a la malla de refuerzo, estableciéndose tanto su forma de comportamiento como los parámetros que lo definen. En cuanto a los elementos tipo 'node to node anchor', representan un comportamiento semejante al de un muelle entre dos puntos.

Los parámetros necesarios para definir un elemento 'node to node anchor' son, la rigidez a axil del elemento, la separación entre anclajes en la dirección perpendicular al plano de deformación plana, en caso de material elasto-plástico el valor de la máxima fuerza que resiste el anclaje, y en caso de anclajes activos el valor de la fuerza de pretensado.

Los valores de los parámetros, tanto para el elemento 'geotextile' como para el 'node to node anchor', dependerán del tipo de anclaje y se presentarán en cada caso concreto que se analice. No obstante, hay que tener en cuenta que los análisis a realizar dentro de esta Tesis suponen que los anclajes están perfectamente diseñados, de forma que no se produce un arrancamiento de los mismos, ni tampoco su rotura, aspectos a tener en cuenta a la hora de establecer el valor de los citados parámetros.

#### **4.2.4. Grandes desplazamientos**

Como ya se ha comentado en el Capítulo 3 sobre el comportamiento de las mallas, la misión de éstas es transmitir cierta presión a la superficie del talud, para lo cual es necesario que la malla se deforme adquiriendo cierta curvatura, y quedando sometida a un esfuerzo de tracción.

En este sentido, se hace obligatorio un análisis que considere la modificación de la geometría durante el cálculo. De no ser así, el análisis de la malla sometida a presiones en su superficie, con sus extremos fijados, donde la malla se deforma adquiriendo curvatura y por tanto debería entrar en tracción, daría lugar a deformaciones nulas por el hecho de que los movimientos son perpendiculares a su geometría inicial.

Tanto el programa CRISP90 como el PLAXIS presentan la opción de realizar el cálculo considerando la geometría deformada, de manera que el análisis se realiza teniendo en cuenta la geometría actual de los elementos. Es por tanto obligado el

empleo de esta opción para todos los análisis en los que se considere la malla de refuerzo.

Finalmente, hay que tener en cuenta, como ya se ha comentado anteriormente, que aquellos casos donde se prevea la posibilidad de que la malla sufra un acortamiento no deben ser analizados con el programa CRISP90, ya que los elementos empleados para representar la malla presentan rigidez a compresión no nula.

### 4.3. ANÁLISIS DE CELDAS ELEMENTALES

Como ya se ha comentado, la malla empleada como refuerzo sólo es capaz de transmitir presiones a la superficie del terreno si se encuentra sometida a un estado de tracción, y como consecuencia de dicho estado se deforma adquiriendo cierta curvatura. Esto hace del análisis del talud reforzado un caso difícil de interacción suelo-estructura debido al comportamiento no lineal y a las grandes deformaciones que es necesario que se produzcan para que el sistema trabaje correctamente.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que se trata de dos elementos (suelo y malla) con características resistentes y deformacionales muy diferentes, y que se encontrarán trabajando de forma solidaria.

A estas consideraciones hay que añadir el gran número de parámetros que influyen en el análisis: características del suelo, de la malla y de los anclajes; altura e inclinación del talud; separación entre anclajes; espesor de la capa de suelo inestable; etc.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, antes de afrontar el estudio completo del talud reforzado mediante el empleo de programas de elementos finitos, se analizan en este Capítulo, también por el citado método, algunas celdas elementales como la sombreada en la Figura 4.2, para así obtener algunas conclusiones previas que luego deberán ser tenidas en cuenta en el análisis del talud reforzado.

Para el análisis se establece la definición de las celdas elementales objeto de estudio, y bajo qué acciones se van a analizar. Ello da lugar a una serie de celdas

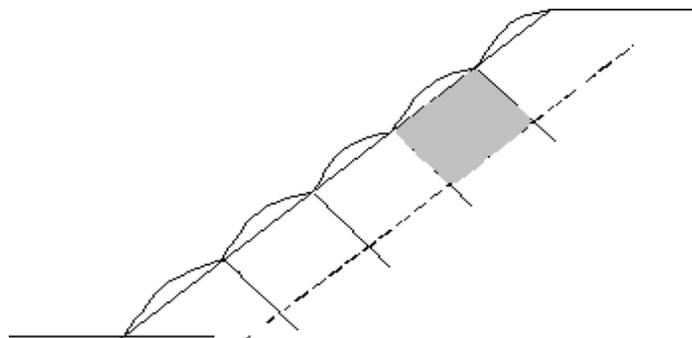


Figura 4.2. Celdas elementales

elementales, cada una de las cuales trata de representar alguno de los efectos que se producen en el talud. En los apartados siguientes se presenta dicha definición, y los resultados del análisis de cada una de las celdas.

#### 4.3.1. Definición de las celdas utilizadas

Los principales efectos que se van a tratar de analizar mediante el empleo de celdas elementales son:

- i) efecto del pretensado de anclajes
- ii) efecto de la inestabilidad superficial del talud
- iii) efecto conjunto de pretensado de anclajes e inestabilidad superficial
- iv) malla de refuerzo sometida a presiones en su superficie
- v) efecto de la dilatación del suelo
- vi) reproducción del ensayo de laboratorio de carga distribuida sobre la malla

Para el análisis por elementos finitos del efecto del pretensado de los anclajes se considera la celda que se muestra en la Figura 4.3. La forma de simular el efecto del pretensado consiste en introducir una fuerza de pretensado a los elementos que vayan a representar a dichos anclajes en el programa empleado. Con este análisis se trata de conocer la influencia de las fuerzas de pretensado en las deformaciones y tensiones a las que dan lugar, analizando la evolución del sistema a medida que va

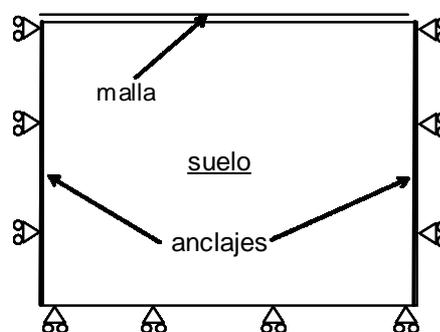
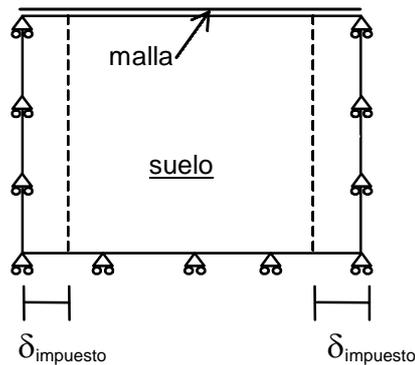


Figura 4.3. Celda elemental para análisis del efecto del pretensado de los anclajes



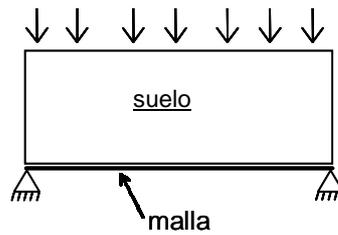
**Figura 4.4. Celda elemental para simulación de la inestabilidad superficial**

aumentando dicha fuerza.

Sobre las inestabilidades superficiales en el talud, son consecuencia de una pérdida de las propiedades resistentes del suelo debido a la acción de agentes como la erosión, filtración, etc. Dicha pérdida de estabilidad suele traducirse en el talud en una tendencia del suelo a descender empujando al suelo que se encuentra debajo. Para analizar de forma sencilla la interacción entre el suelo y el refuerzo en dicha situación, se analiza el efecto que producen unos desplazamientos impuestos a la celda elemental, tal y como se indica en la Figura 4.4.

Además de analizar por separado cada uno de los efectos debidos al pretensado y a la inestabilidad superficial, se analiza también el efecto conjunto de ambos. Dicho análisis consiste primero en pretensar los anclajes, y a continuación simular la inestabilidad superficial. Para ello, se establece un cierto valor de la fuerza de pretensado de los anclajes, y a partir de ahí, se analiza el efecto que produce el ir aumentando el desplazamiento lateral impuesto.

A continuación, se estudia el caso de una malla apoyada a lo largo de dos de sus bordes paralelos, con una capa de suelo sobre ella, y con una fuerza repartida actuando sobre la superficie (ver Figura 4.5). Esta configuración es semejante a los ensayos de laboratorio de carga distribuida descritos en el Capítulo 3. Sin embargo, en este caso, no se trata de reproducir el ensayo, donde la mayoría de las variables están establecidas, sino de analizar distintos casos, con distintos valores de los parámetros, y ver como influyen cada uno de ellos.



**Figura 4.5. Celda elemental para análisis de la malla de refuerzo con suelo en su superficie**

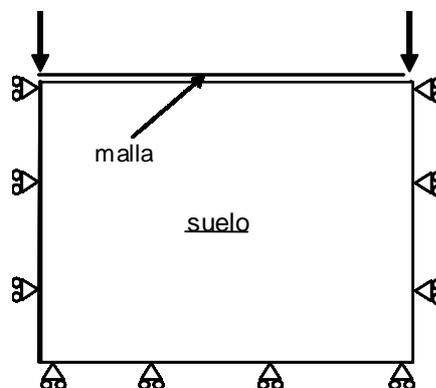
Finalmente, se presenta un análisis sobre el efecto de la dilatación del suelo; y la reproducción del ensayo de carga distribuida sobre la malla de refuerzo.

En el estudio que se realiza a continuación de cada una de las celdas elementales descritas se considera como malla de refuerzo la TECCO G-65, de la cual se conocen sus propiedades geométricas, tenso-deformacionales y resistentes. Así, cada vez que se cite la malla de refuerzo, se referirá a dicha malla.

#### 4.3.2. Efecto del pretensado de los anclajes

##### Análisis con el programa de elementos finitos CRISP90

El análisis que se presenta pretende analizar la influencia de los distintos parámetros que influyen en el cálculo, en la deformada que se produce de la malla y en el valor de la fuerza axial a la que ésta se ve sometida.



**Figura 4.6. Celda elemental para análisis del pretensado de los anclajes (CRISP90)**

Como ya se ha comentado, el programa CRISP90 no dispone de elementos adecuados para representar los anclajes, o al menos, que permitan representar el pretensado de ellos, que es de lo que se trata. Por ello, el análisis se realiza sustituyendo los anclajes por sendas fuerzas actuando en las esquinas de la celda elemental, tal y como se indica en la Figura 4.6.

El análisis se realiza para distintos valores de módulo de elasticidad del suelo, cohesión, y espesor de suelo considerado en la celda. En concreto, los casos que se estudian se corresponden con los siguientes valores de los parámetros:

1.  $E, c, \phi, e$
2.  $3E/4, c, \phi, e$
3.  $E/2, c, \phi, e$
4.  $E, 3c/4, \phi, e$
5.  $E, c/2, \phi, e$
6.  $E, c, \phi, e/2$

siendo:

$$E \text{ (módulo de elasticidad del suelo)} = 10^4 \text{ kN/m}^2$$

$$c \text{ (cohesión del suelo)} = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi \text{ (ángulo de rozamiento interno del suelo)} = 28^\circ$$

$$e \text{ (espesor del suelo)} = 1 \text{ m}$$

Los casos anteriores se han ejecutado para un único valor de la fuerza que actúa en los extremos de la celda, siendo dicho valor de 75 kN/m.

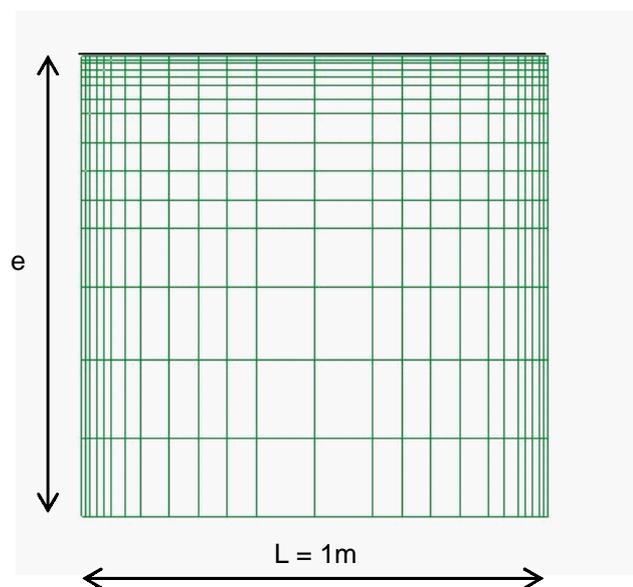
En los cálculos se ha considerado un único valor de ángulo de rozamiento. Ello es debido a que el análisis propuesto sobre la influencia del valor de los parámetros no se puede realizar para el ángulo de rozamiento, ya que el programa CRISP90 considera un valor del ángulo de dilatancia igual al valor del rozamiento

interno, por lo que un análisis variando este parámetro, enmascara también el efecto de la dilatancia del suelo.

En la Figura 4.7 se muestra la discretización de elementos finitos considerada para el análisis. Las condiciones de contorno establecidas son, de movimiento impedido en horizontal en los dos bordes laterales de la celda, y movimiento impedido en vertical en la base. En la zona superior de la celda se puede ver la disposición de la malla de refuerzo. Las acciones impuestas son sendas fuerzas actuando en los extremos superiores de la celda (ver Figura 4.6).

Los resultados que se obtienen sobre la influencia de cada uno de los parámetros considerados ( $E$ ,  $c$ ,  $e$ ) se presentan en el Apéndice C. Se trata de curvas correspondientes a la deformada de la malla y al valor de la fuerza axial que está soportando en cada caso. No obstante, en la Figura 4.8 se presenta, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en el análisis de la influencia del módulo de elasticidad del terreno. En dicha figura el parámetro  $\delta_{cl}$  representa el valor de la máxima flecha de la malla deformada.

En la Figura 4.9 se muestra el valor de la fuerza axial que adquiere la malla en cada uno de los casos estudiados. Se observa que el valor de dicha fuerza axial no es



**Figura 4.7. Discretización de elementos finitos para análisis de efecto del pretensado de anclajes (CRISP90)**

constante a lo largo de la longitud de la malla, lo que se debe a la acción de tensiones tangenciales en el contacto malla-terreno.

Los resultados sobre la deformada de la malla y la fuerza axil a la que está sometida ponen de manifiesto como ésta es mayor en los extremos de la malla, que es donde su deformada presenta mayor curvatura. Hay que tener en cuenta que los valores de dichas fuerzas axiles en la malla están siempre limitados por el valor de la resistencia a tracción de la malla, que es de 151 kN/m como se ha visto en el Capítulo 3.

Los resultados obtenidos muestran también, como al disminuir la resistencia del suelo, la deformada de la malla se hace más pronunciada, y por tanto, resulta estar sometida a una mayor fuerza axil. Esta misma tendencia ocurre tanto al disminuir el valor del módulo de elasticidad, o lo que es lo mismo al aumentar la deformabilidad del suelo, como al disminuir el espesor de suelo considerado en la celda, lo que supone una menor rigidez del sistema (ver gráficas en el Apéndice C).

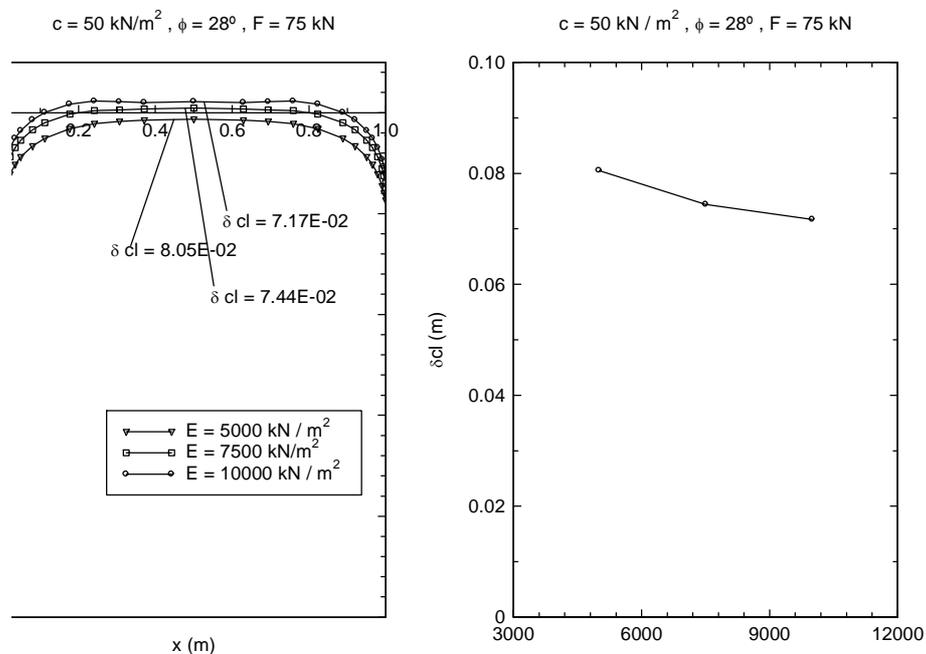


Figura 4.8. Deformada de la malla en función del módulo de elasticidad del suelo (CRISP90)

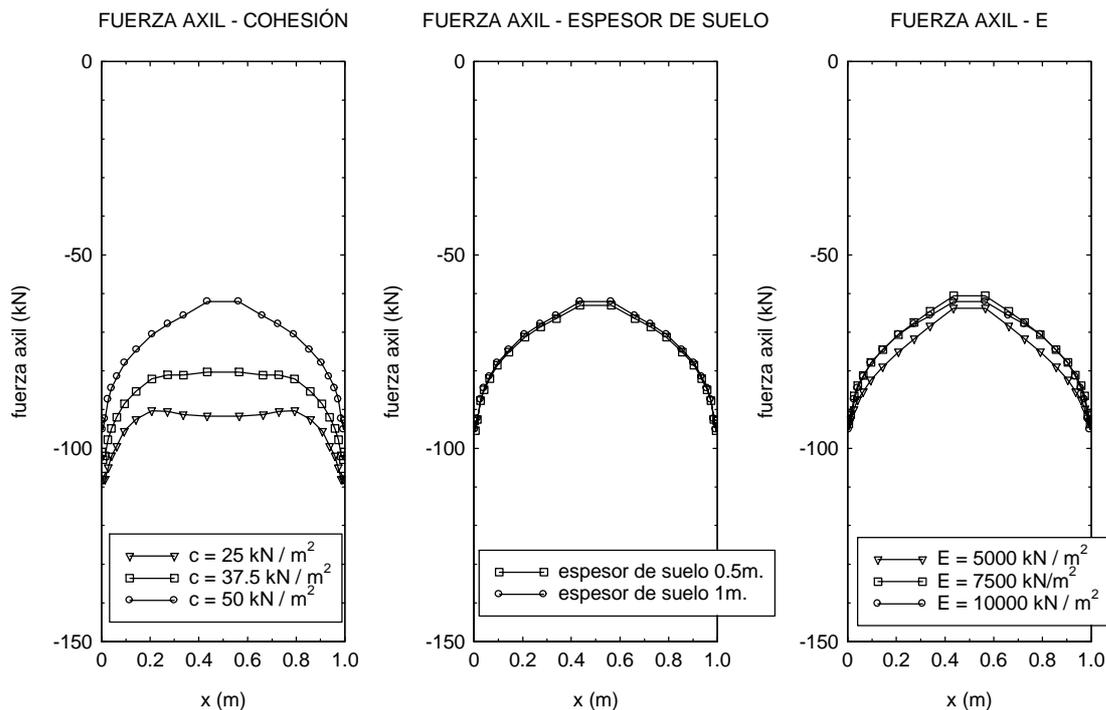


Figura 4.9. Fuerza axil en la malla (CRISP90)

Por tanto, se puede concluir, que cuando la deformada de la malla presenta más curvatura, aumenta la fuerza axil en ella, y mayor es la presión que transmite la malla al suelo debido a esa curvatura bajo deformación. Este último aspecto es de gran interés ya que ese es el objetivo de la malla, transmitir presión a la superficie del terreno para aumentar el coeficiente de seguridad frente a un posible deslizamiento superficial. Por supuesto que el beneficio de anclar la malla más al terreno no es indefinido, sino que una vez alcanzado un cierto valor del pretensado, su aumento puede dar lugar a una plastificación del suelo en la zona cercana a los anclajes.

### Análisis con el programa de elementos finitos PLAXIS

Al igual que en el apartado anterior con el programa CRISP90, en este apartado se estudia la influencia en la deformada que se produce de la malla y en el valor de la fuerza axil a la que ésta se ve sometida, de los distintos parámetros de forma que forman parte del análisis de la celda elemental de la Figura 4.3.

A diferencia del programa CRISP90, el programa PLAXIS dispone de elementos adecuados para representar los anclajes y su pretensado, por lo tanto no es

necesario introducir las fuerzas exteriores que se consideran en el apartado anterior, sino que basta con definir la fuerza de pretensado que se le da a los citados elementos.

El análisis se realiza para distintos valores de módulo de elasticidad del suelo, de cohesión, y en este caso también para distintos valores del ángulo de rozamiento interno, ya que el programa PLAXIS permite establecer un valor diferente para el ángulo de dilatación por lo que se puede estudiar la influencia de aquel parámetro.

En concreto, los casos que se estudian se corresponden con los siguientes valores de los parámetros:

1.  $E, c, \phi, e$
2.  $3E/4, c, \phi, e$
3.  $E/2, c, \phi, e$
4.  $E, 3c/4, \phi, e$
5.  $E, c/2, \phi, e$
6.  $E, c, 3\phi/4, e$
7.  $E, c, \phi/2, e$

siendo:

$$E \text{ (módulo de elasticidad del suelo)} = 10^4 \text{ kN/m}^2$$

$$c \text{ (cohesión del suelo)} = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi \text{ (ángulo de rozamiento interno del suelo)} = 28^\circ$$

$$e \text{ (espesor del suelo)} = 1 \text{ m}$$

$$\psi \text{ (ángulo de dilatación)} = 0^\circ$$

Con respecto a los anclajes, como se ha indicado en el apartado 4.2.3 se modelizan por medio de dos tipos de elementos allí descritos, el elemento tipo 'node to

node anchor', y el elemento tipo 'geotextile'. Los valores de las propiedades de cada uno de estos elementos, consideradas en el análisis que se presenta son:

$$E \cdot A \text{ node to node anchor} = 1 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

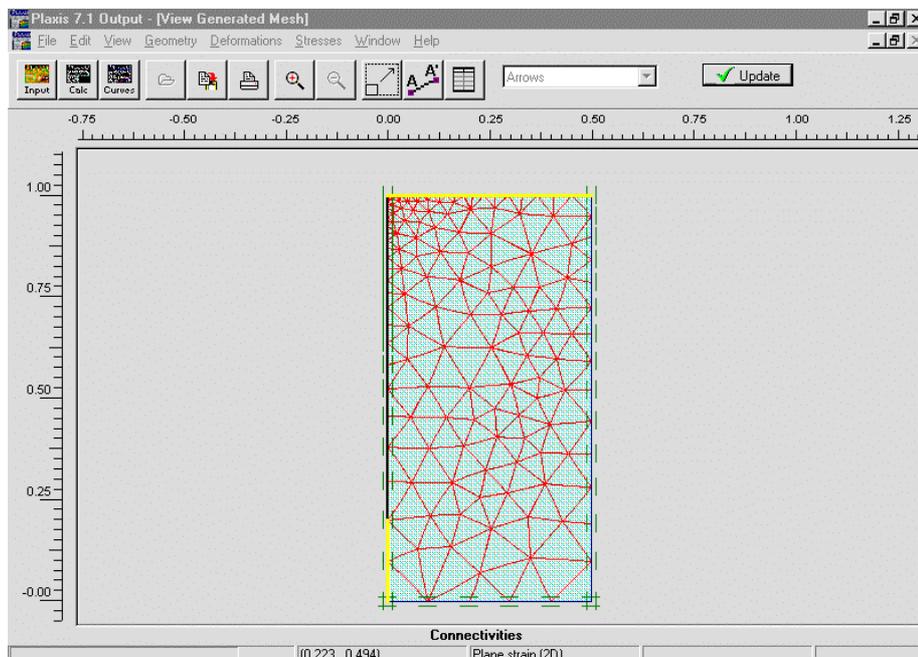
$$L_{\text{spacing}} \text{ (separación entre anclajes)} = 1 \text{ m}$$

$$E \cdot A \text{ geotextile} = 5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}$$

$$F_p \text{ (fuerza de pretensado en los anclajes)} = 75 \text{ kN/m}$$

Los casos anteriores se han ejecutado para un único valor de fuerza de pretensado de los anclajes, siendo dicho valor de 75 kN/m.

En la Figura 4.10 se presenta la discretización de elementos finitos empleada en el análisis. La geometría que se presenta corresponde únicamente a la mitad de la celda elemental debido a la simetría existente. En la zona superior de la celda se puede ver representada la malla de refuerzo, y en el lateral izquierdo el anclaje. Las condiciones de contorno establecidas son, para la base de la celda desplazamiento vertical impedido, y para el borde derecho desplazamiento horizontal impedido (eje de

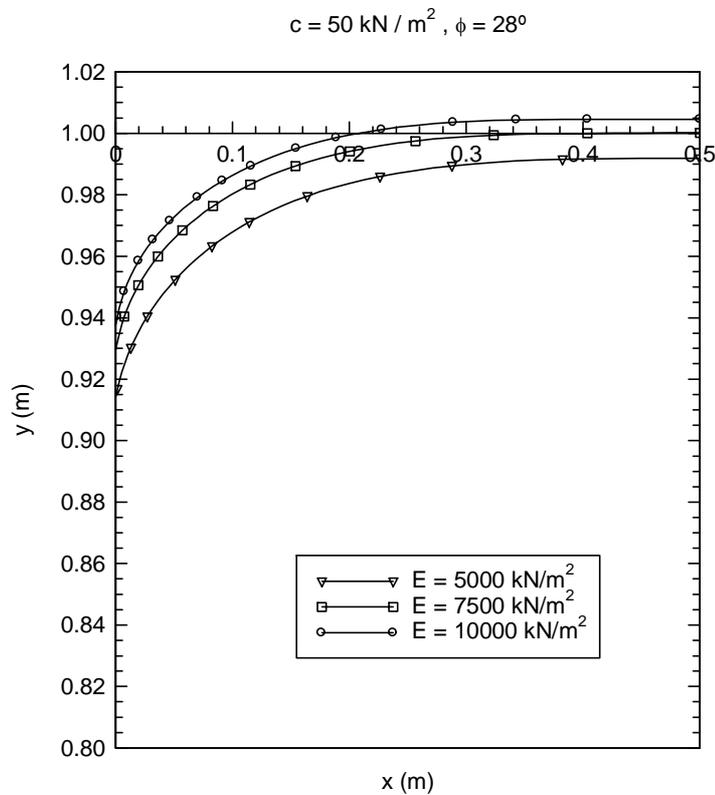


**Figura 4.10. Discretización de elementos finitos para el análisis del efecto de pretensado de los anclajes (PLAXIS)**

simetría). La única acción a la que se ve sometida la celda durante el análisis es la correspondiente a la fuerza de pretensado del anclaje.

Los resultados que se obtienen sobre la influencia de cada uno de los parámetros considerados ( $E$ ,  $c$ ,  $\phi$ ) se presentan en el Apéndice C. Se trata de las curvas correspondientes a la deformada de la malla, al valor de la fuerza axial que está soportando en cada caso, al valor de las tensiones normales y tangenciales que soporta el suelo en una sección bajo la malla en uno de los casos analizados, y a las zonas plásticas que se forman en el suelo. No obstante, en la Figura 4.11 se presenta, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos sobre la influencia del módulo de elasticidad del terreno.

En la Figura 4.12 se muestra el valor de la fuerza axial que adquiere la malla para cada uno de los casos analizados. Se observa también aquí que el valor de dicha fuerza axial no es constante a lo largo de la longitud de la malla, por la acción de



**Figura 4.11. Deformada de la malla en función del módulo de elasticidad del suelo (PLAXIS)**

esfuerzos tangenciales en la interfaz con el terreno.

Al igual que en el análisis con el programa CRISP90, las zonas extremas de la malla, donde el valor de la fuerza axil es mayor, se corresponden con las zonas donde la malla presenta un mayor curvatura en su deformada.

Si se comparan los valores obtenidos de la fuerza axil en la malla, con los obtenidos en el apartado anterior usando el programa CRISP90, se observa que los valores correspondientes al cálculo con PLAXIS son menores que los correspondientes al análisis con el programa CRISP90. Esto se debe a la influencia del valor del ángulo de dilatación, que en el análisis con el programa CRISP90 es igual al valor del ángulo de rozamiento interno, mientras que en el análisis con el programa PLAXIS se ha tomado de valor cero. Ello da una primera idea de la influencia que tiene, en el análisis de la celda que se está estudiando, el valor que se considere para el ángulo de dilatación del terreno. Este aspecto se analiza mucho más detalladamente en otro apartado de este Capítulo.

Al igual que en el caso anterior, los valores de la fuerza axil alcanzada en la

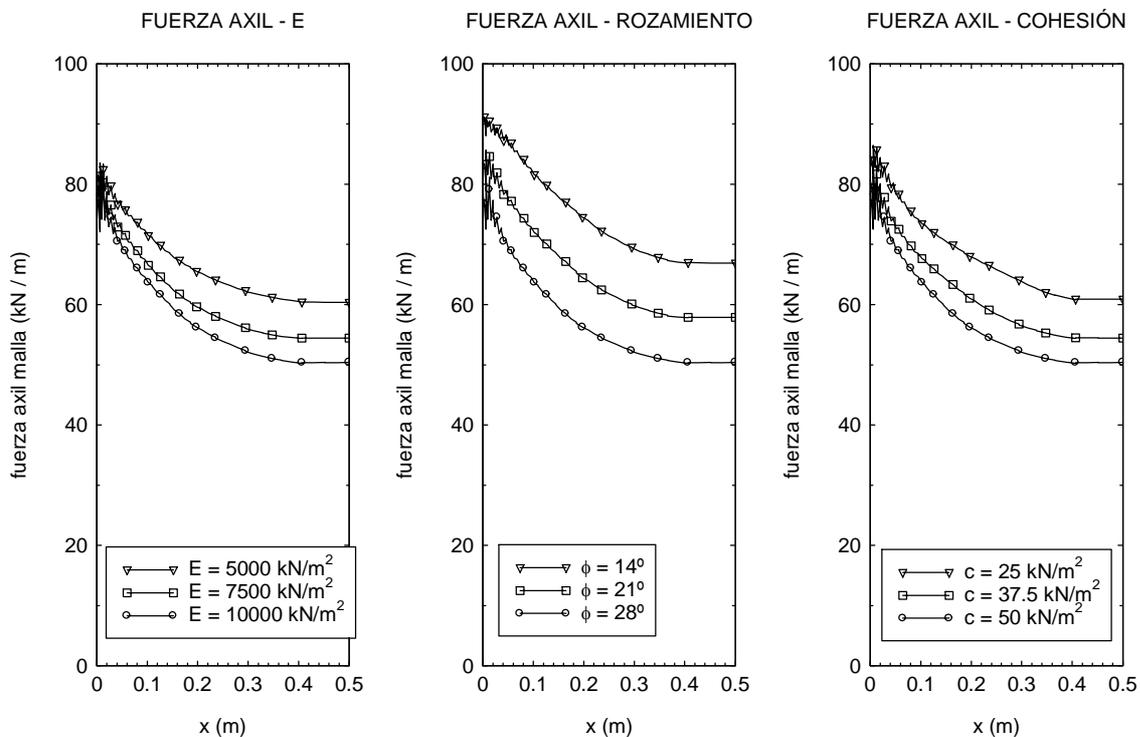
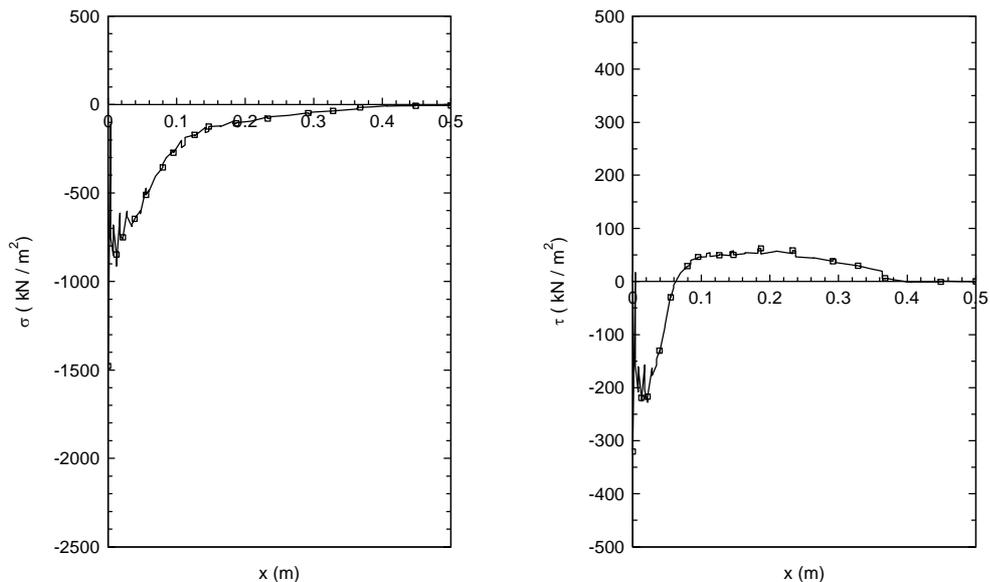


Figura 4.12. Fuerza axil en la malla (PLAXIS)

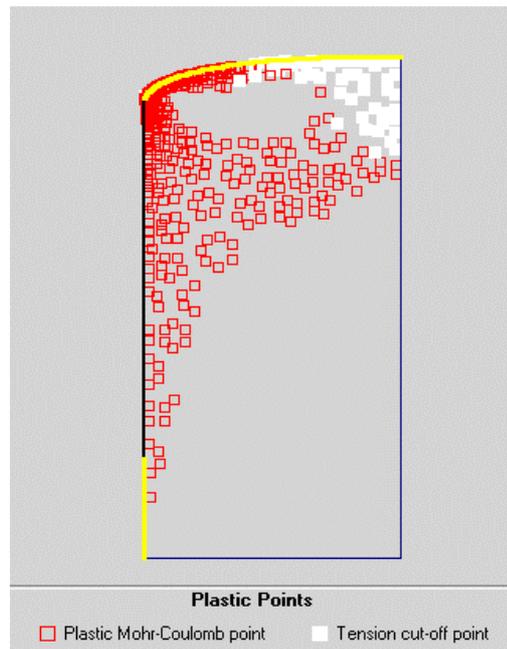
La malla está limitada por el valor de 151 kN/m correspondiente a la resistencia a tracción de la malla, como se ha expuesto en el Capítulo 3.

En la Figura 4.13 se muestran los resultados correspondientes a las tensiones normales y tangenciales que se producen en una sección del suelo justo bajo la malla, en uno de los casos analizados. En la figura se observa como la malla ejerce un efecto de confinamiento sobre el suelo, transmitiéndole unas tensiones de compresión, sobre todo en la zona hacia el anclaje, es decir, en la de mayor curvatura. También se observa que dichas tensiones presentan un pico en las zonas próximas a los extremos, lo que se puede atribuir a que en esa zona se concentra la aplicación de la fuerza de pretensado de los anclajes.

En la Figura 4.14 se presentan las zonas que se encuentran plastificadas al final del cálculo. Como se puede observar aparecen, por un lado, zonas plastificadas según el criterio de Mohr Coulomb considerado en el cálculo, que se encuentran en la parte de arriba situada próxima al anclaje y en el borde también cercano al anclaje, y por otro lado, en la zona de la superficie correspondiente al centro de la celda, se presentan puntos con tendencia a entrar en tracción debido a la presencia de la malla de refuerzo.



**Figura 4.13. Tensiones tangenciales y normales en una sección del suelo bajo la malla (PLAXIS)**



**Figura 4.14. Puntos plastificados en la celda elemental (PLAXIS)**

En resumen se puede decir que las tendencias son las mismas que las obtenidas en el apartado anterior, pero con distintos valores debido al hecho de que ahora la dilatación no es igual al ángulo de rozamiento interno del terreno, sino que se ha considerado nula. Otro factor a tener en cuenta es que no es lo mismo dar unas fuerzas exteriores en los extremos, como se hace en el análisis con el programa CRISP90, que dar una fuerza de pretensado a unos anclajes, caso del análisis con el programa PLAXIS.

Finalmente, se presenta el efecto que tiene la discretización de elementos finitos empleada en los resultados obtenidos. Para ello se ha considerado la discretización de la Figura 4.15, menos densa que la anterior sobre todo en la zona superior cercana al anclaje, y con ella se han analizado los mismos casos que los presentados anteriormente. Como ejemplo de resultados obtenidos, se muestra en la Figura 4.16 la fuerza axial en la malla para los mismos casos que los presentados en el análisis anterior. La influencia de la discretización de elementos empleada queda claramente expuesta, al observarse como en la zona cercana al anclaje se producen inestabilidades en el valor de la fuerza axial en la malla. Con ello se trata de poner de manifiesto, como en análisis con elementos finitos, según los resultados que se deseen analizar, la discretización empleada es de gran relevancia.

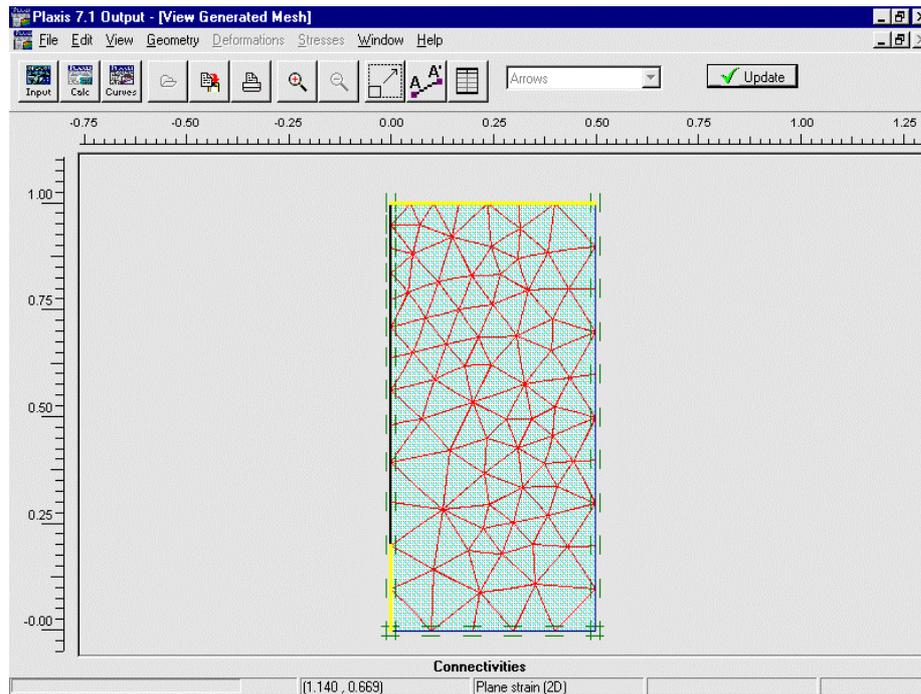


Figura 4.15. Discretización menos densa de elementos finitos para el análisis del efecto de pretensado de los anclajes (PLAXIS)

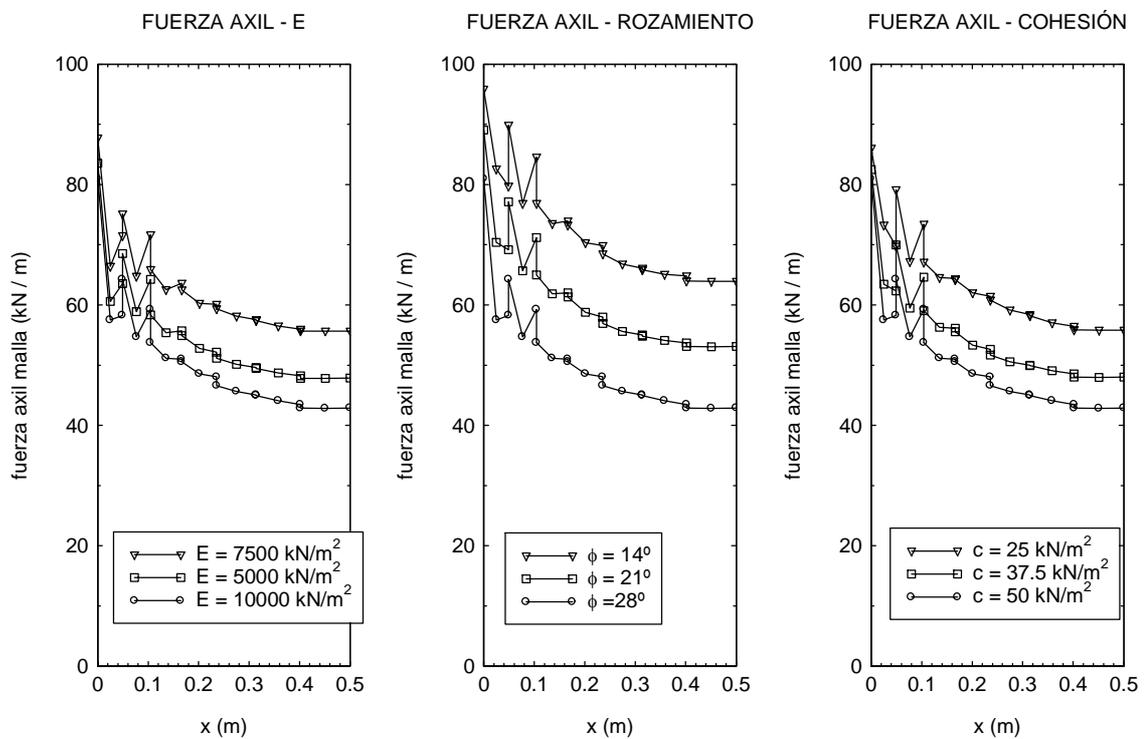


Figura 4.16. Influencia de la discretización de elementos finitos en los resultados de la fuerza axil en la malla (PLAXIS)

### 4.3.3. Efecto de la pérdida de estabilidad superficial. Desplazamientos laterales impuestos

#### Análisis con el programa de elementos finitos CRISP90

El análisis que se presenta consiste en ir aumentando el valor del desplazamiento lateral  $\delta$  impuesto a la celda (Figura 4.4), y ver como esto influye en los resultados que se obtienen en cuanto a la deformada de la malla y la fuerza axial en ella.

El análisis se realiza para distintos valores de módulo de elasticidad del suelo, de cohesión y de espesor de suelo considerado en la celda. En concreto, los casos que se estudian se corresponden con los siguientes valores de los parámetros:

1.  $E, c, \phi, e$
2.  $3E/4, c, \phi, e$
3.  $E/2, c, \phi, e$
4.  $E/10, c, \phi, e$
5.  $E, 3c/4, \phi, e$
6.  $E, c/2, \phi, e$

siendo:

$$E \text{ (módulo de elasticidad del suelo)} = 10^4 \text{ kN/m}^2$$

$$c \text{ (cohesión del suelo)} = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi \text{ (ángulo de rozamiento interno del suelo)} = 28^\circ$$

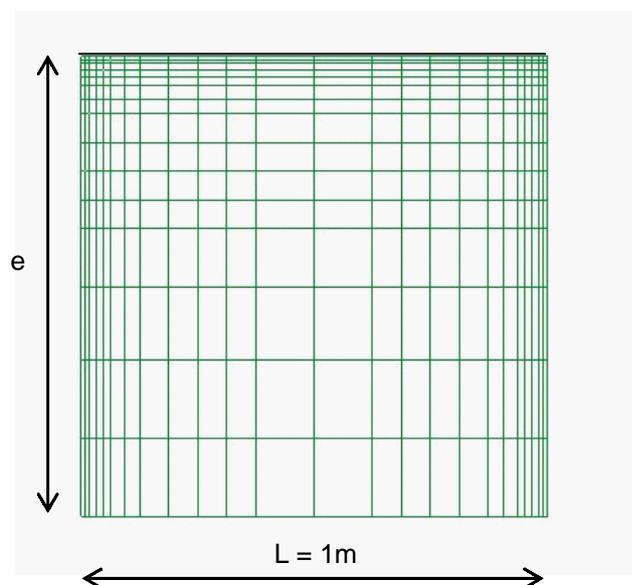
$$e \text{ (espesor del suelo)} = 1 \text{ m.}$$

Al igual que en el análisis del efecto del pretensado de los anclajes, en este caso los cálculos también se realizan para un único valor de ángulo de rozamiento. Ello es debido a que el programa CRISP90 considera un valor del ángulo de dilatación

igual al valor del rozamiento interno, por lo que un análisis variando este parámetro enmascara también el efecto de la dilatación del suelo.

En la Figura 4.17 se presenta la discretización de elementos finitos empleada en el análisis. En la parte superior de dicha figura se puede apreciar la malla de refuerzo. Las condiciones de contorno establecidas en el análisis son de desplazamiento vertical impedido en la base de la celda, y desplazamiento horizontal impuesto en los dos laterales.

Los resultados obtenidos del análisis de los casos citados anteriormente muestran que a medida que el desplazamiento lateral  $\delta$  va aumentando, la malla pasa inicialmente por un estado de compresión, y a continuación entra en tracción. Esto es debido a que al comenzar el desplazamiento lateral el suelo se va comprimiendo y la malla con él, sin salirse de su plano, por lo que ésta se acorta y permanece en estado de compresión. Cuando se alcanza un cierto valor de desplazamiento lateral, la malla se sale de su plano, y comienza a funcionar a tracción alargándose. Hay que tener en cuenta que la malla que se está estudiando no es capaz de soportar compresiones, sólo tiene rigidez a tracción, por lo que en la realidad la malla inicialmente estaría sin tensión, para posteriormente comenzar a alargarse y entrar en tracción. Por tanto, para representar el verdadero comportamiento de la malla de refuerzo es necesario un



**Figura 4.17. Discretización de elementos finitos para análisis de la inestabilidad superficial (CRISP90)**

elemento que no aguante compresiones, pero el programa CRISP90 no ofrece ningún elemento de tales características.

El valor del desplazamiento lateral para el cual la malla pasa de estar en compresión a estarlo a tracción, está muy influenciado por el valor del coeficiente de Poisson del suelo considerado, al menos en el tramo de comportamiento elástico hasta que el suelo plastifica. Esto ha de ser así ya que en el tramo elástico las deformaciones verticales que se produzcan son proporcionales a dicho valor y al desplazamiento horizontal, y en definitiva, el aumento o disminución de longitud del paramento (dimensión L en la Figura 4.17) viene dado por la composición del desplazamiento lateral en cada momento y los movimientos verticales a que da lugar.

En este sentido se ha estudiado la celda elemental sometida a desplazamientos laterales impuestos, pero sin malla en su superficie. Este estudio se ha realizado considerando un comportamiento elástico del suelo y para distintos valores del coeficiente de Poisson. El cálculo se ha realizado en la geometría

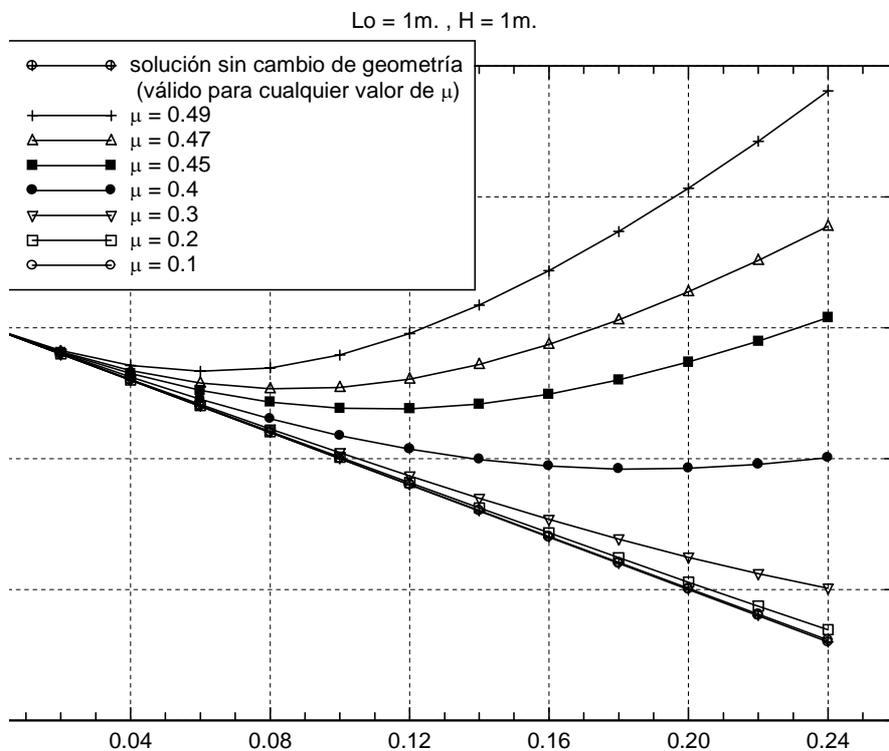


Figura 4.18. Evolución de la longitud de la superficie libre de la celda

deformada, en caso contrario el aumento o disminución de la longitud  $L$  del paramento sólo vendría controlado por el desplazamiento horizontal, ya que movimientos perpendiculares a la geometría inicial no darían lugar a deformaciones.

En la Figura 4.18 se presenta el resultado de este análisis. Se establece la relación entre el desplazamiento total lateral impuesto en cada momento ( $2 \cdot \delta_i$ ), referido a la longitud inicial del paramento ( $L_0$ ) (eje de abscisas), y la longitud del paramento en cada momento ( $L_i$ ), referida a la longitud inicial ( $L_0$ ) (eje de ordenadas). Los resultados muestran como, a partir de un cierto valor del coeficiente de Poisson, y de un cierto valor del desplazamiento lateral impuesto, se comienza a producir un aumento de la longitud de la superficie libre, la cuál hasta este momento había ido disminuyendo. Dicha situación ocurre cuando los levantamientos comienzan a ser significativos con respecto al valor del desplazamiento horizontal impuesto hasta el momento. Estos resultados hacen comprender los casos en los que la malla inicialmente entra en compresión, antes de comenzar a soportar tracciones.

Como conclusión se puede establecer la importancia de emplear elementos que sólo tengan rigidez a tracción, y no a compresión. De no ser así, habría que tomar las precauciones adecuadas en los casos en que esté previsto un acortamiento de la malla de refuerzo.

Como consecuencia de todo lo expuesto, no se puede establecer las conclusiones que inicialmente se pretendían con respecto a la influencia de los distintos parámetros en la deformación de la malla y la fuerza axial que soporta, pero sí se ha puesto de manifiesto una cuestión que es de gran importancia en el análisis mediante elementos finitos de los sistemas que se estudian en esta Tesis.

### **Análisis con el programa de elementos finitos PLAXIS**

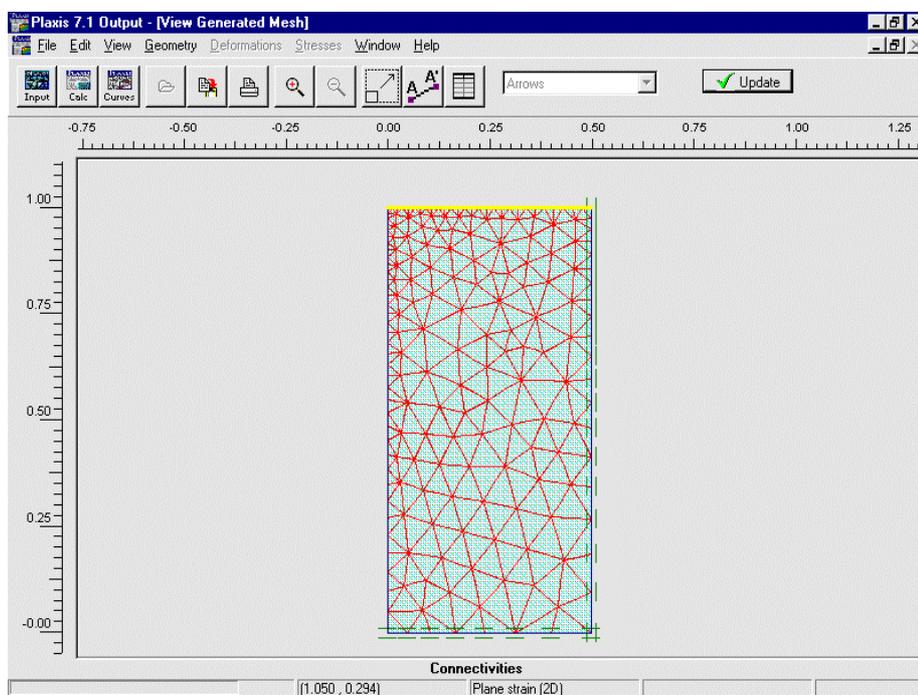
En el análisis con el programa PLAXIS de la celda representada en la Figura 4.4 sometida a desplazamiento lateral impuesto, no surge el problema presentado en el apartado anterior sobre la compresión inicial de la malla, ya que el elemento que se emplea para representar la malla en este programa es un elemento con rigidez sólo a tracción y no a compresión.

En la Figura 4.19 se muestra la discretización de elementos finitos considerada en el análisis. Al igual que en el análisis del efecto de pretensado de los anclajes, únicamente se estudia la mitad de la celda debido a la simetría existente. En la parte superior se encuentra representada la malla de refuerzo. Las condiciones de contorno impuestas son, de desplazamiento vertical impedido en la base de la celda, desplazamiento horizontal impedido en el lateral derecho (eje de simetría) y desplazamiento lateral impuesto en el lateral izquierdo.

Se han analizado los siguientes casos correspondientes a los siguientes valores de ángulo de rozamiento interno, cohesión, y ángulo de dilatancia:

- Cohesión: 10, 30,50 y 100 kN/m<sup>2</sup>
- Ángulo de rozamiento interno: 10°, 15°, 20° y 25°
- Ángulo de dilatancia: 5°, 10°, 15° y 20°

En la Figura 4.20 se muestra el resultado obtenido con respecto a la deformada de la malla, para distintos valores de ángulo de rozamiento interno. El resto



**Figura 4.19. Discretización de elementos finitos para el análisis de desplazamiento lateral impuesto (PLAXIS)**

de gráficas correspondientes a la deformada de la malla para diferentes valores de cohesión y ángulo de dilatancia se presentan junto con la anterior en el Apéndice C.

Del análisis de dichas gráficas se observa, al igual que en el análisis del pretensado de los anclajes, que al disminuir la resistencia del terreno aumenta la deformada de la malla, tal y como debe de ser debido a la formación de zonas plásticas mayores.

Con respecto a la fuerza axil que soporta la malla, se ha comprobado que al comenzar a aumentar el desplazamiento lateral impuesto, inicialmente la malla no soporta ninguna fuerza axil, y es a partir de un cierto valor de dicho desplazamiento, cuando la malla comienza a entrar en tracción. Este hecho viene a confirma lo que se puso de manifiesto en el análisis con el programa CRISP90, donde inicialmente la malla soportaba compresión hasta llegar a un cierto valor del desplazamiento lateral,

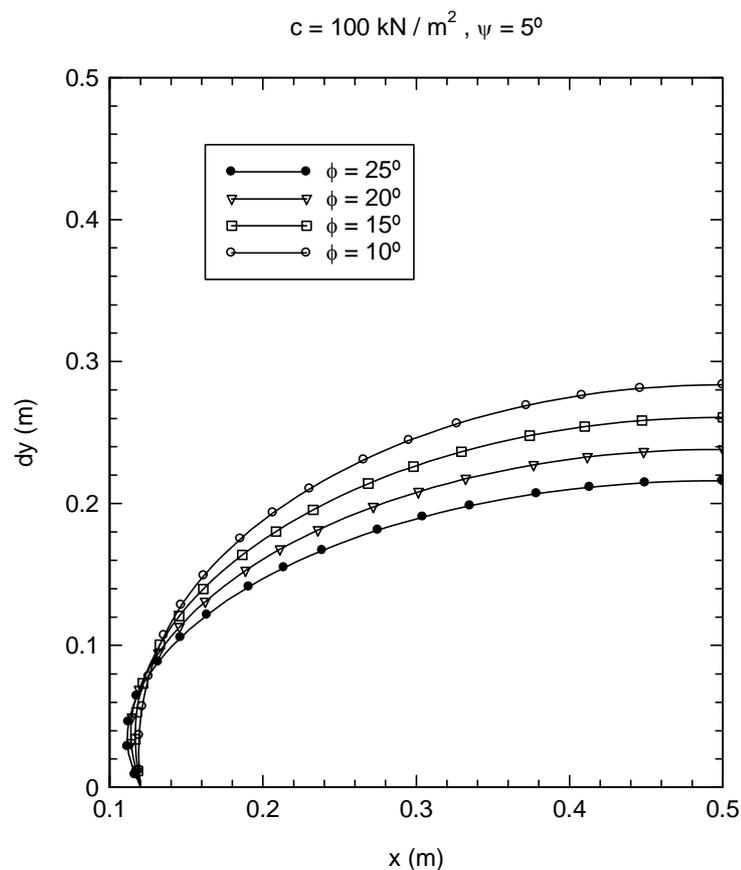


Figura 4.20. Influencia del ángulo de rozamiento interno en la deformada de la malla (PLAXIS)

momento en que pasaba a estar sometida a esfuerzos crecientes de tracción.

En la Figura 4.21 se presentan las fuerzas axiles en la malla, para cada uno de los casos analizados. Al igual que en los casos anteriores, los valores de la fuerza axil alcanzada están limitados por el valor de 151 kN/m correspondiente a la resistencia a tracción de la malla, como se ha expuesto en el Capítulo 3. Con ello, se observa que alguno de los casos representados darían lugar a la rotura de la malla por sobrepasarse dicho valor.

En el caso de la influencia del ángulo de dilatancia, se observa como para valores mayores, la fuerza axil que se produce en la malla es mayor, factor importante si se tiene en cuenta que este valor limita la rotura de la malla, y por tanto el funcionamiento del sistema.

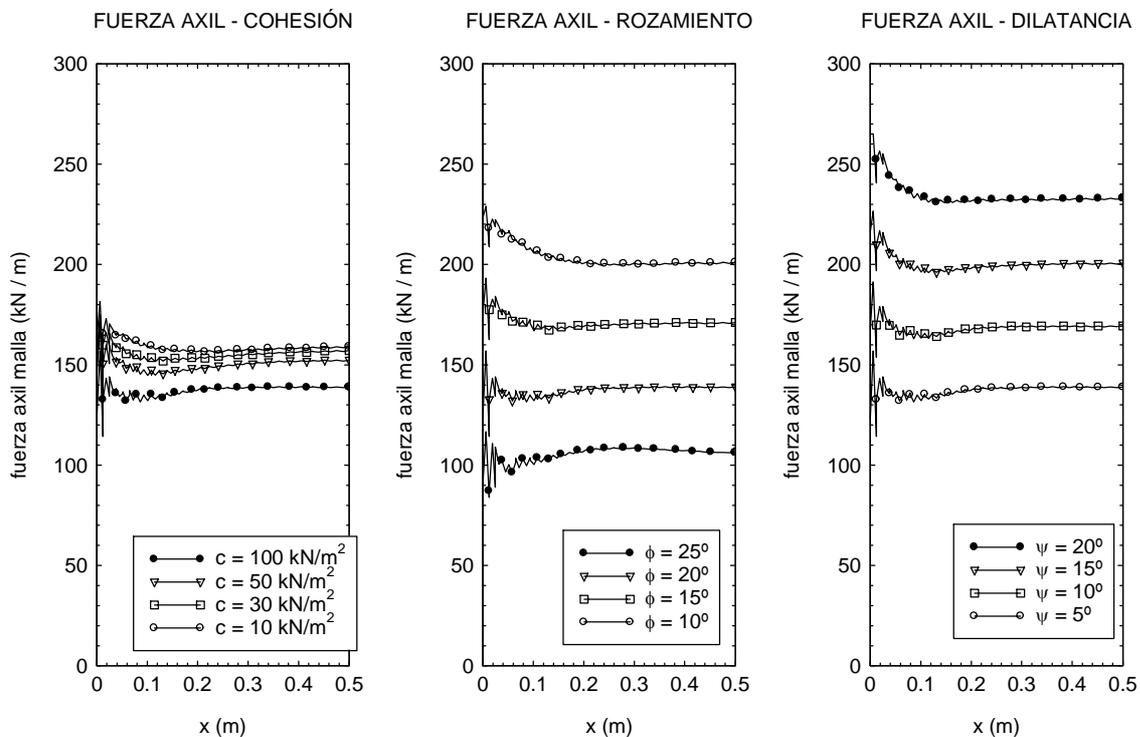


Figura 4.21. Fuerza axil en la malla (PLAXIS)

#### 4.3.4. Efecto conjunto del pretensado de anclajes e inestabilidad superficial

Una vez analizadas por separado la celda elemental sometida al efecto de pretensado de los anclajes, y la celda correspondiente al efecto de la inestabilidad superficial, se analiza el efecto conjunto de ambas acciones. Para ello se estudia el caso de una celda elemental sometida, en primer lugar, a la acción del pretensado de los anclajes hasta un cierto nivel, y a continuación, a unos desplazamientos laterales impuestos, con dichas fuerzas de pretensado actuando.

El cálculo se realiza con el programa de elementos finitos PLAXIS, y se divide en dos fases. En la primera se aplica una fuerza de pretensado a los anclajes de hasta 150 kN/m, y en la segunda se impone un desplazamiento lateral creciente, hasta alcanzar un valor de 0.08 m. Para el resto de parámetros que intervienen en el análisis se han considerado los siguientes valores:

$$E \text{ (módulo de elasticidad del suelo)} = 10^4 \text{ kN/m}^2$$

$$c \text{ (cohesión del suelo)} = 50 \text{ kN/m}^2$$

$$\phi \text{ (ángulo de rozamiento interno del suelo)} = 28^\circ$$

$$\psi \text{ (ángulo de dilatación del suelo)} = 0^\circ$$

$$e \text{ (espesor de suelo)} = 1 \text{ m.}$$

$$E \cdot A \text{ node to node anchor} = 1 \cdot 10^5 \text{ kN}$$

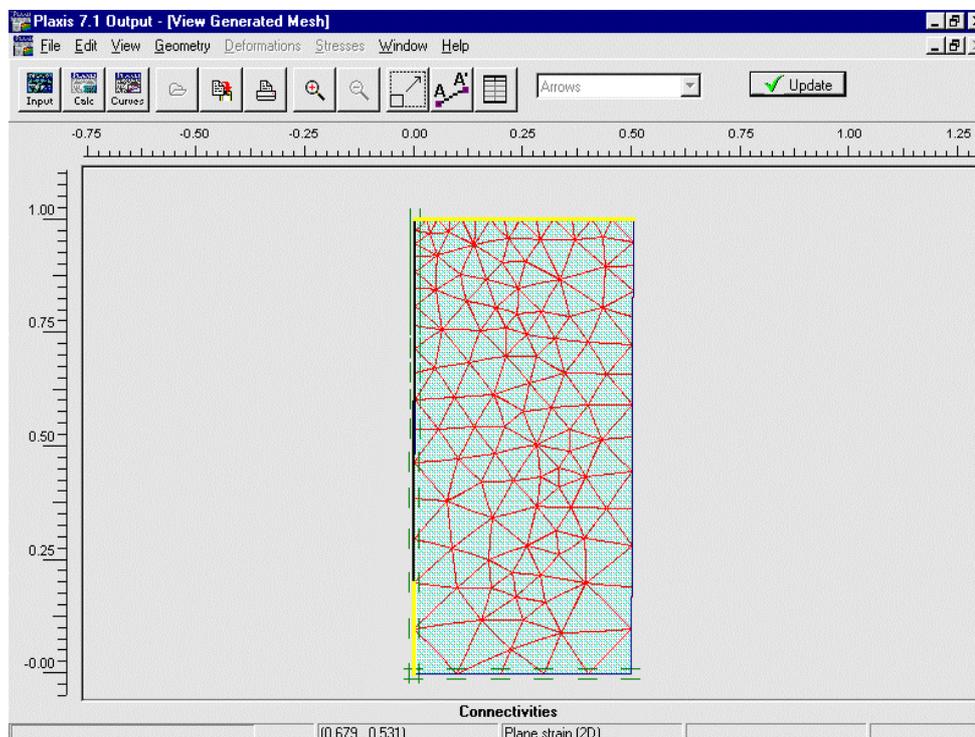
$$L_{\text{spacing}} \text{ (separación entre anclajes)} = 1 \text{ m}$$

$$E \cdot A \text{ geotextile} = 5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}$$

En la Figura 4.22 se muestra la discretización de elementos finitos empleada en el cálculo. En la parte superior se puede ver la malla de refuerzo, y en el lado izquierdo el anclaje. Al igual que en casos anteriores sólo se estudia la mitad de la celda debido a la simetría existente. Las condiciones de contorno son, de desplazamiento vertical impedido en la base, desplazamiento horizontal impuesto en el lateral derecho, y desplazamiento horizontal impedido en el borde izquierdo correspondiente a la ubicación del anclaje.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.23. Como se puede apreciar en la gráfica correspondiente a la deformada de la malla, el desplazamiento lateral impuesto se ha dado en la parte izquierda, en vez de en el extremo derecho, debido a que aquí está situado el anclaje lo que dificulta establecer dicho desplazamiento impuesto.

Los resultados muestran como al aplicar la fuerza de pretensado la malla se deforma y soporta una tracción de media de 110 kN/m. A continuación al aplicar un desplazamiento impuesto de 0.02 m., la fuerza axil en la malla se reduce, y a partir de esa situación, al aumentar el valor del desplazamiento impuesto, la malla se ve sometida a un fuerza axil cada vez mayor. Sobre los valores de la fuerza axil alcanzada en la malla, hay que tener en cuenta al igual que en los casos anteriores, que dichos valores están limitados por el valor de 151 kN/m correspondiente a su resistencia a tracción, como se ha expuesto en el Capítulo 3. Por tanto en este caso el valor de la fuerza de pretensado aplicada resulta ser un valor cercano al máximo permisible, ya que da lugar a un valor cercano a 150 kN/m en la zona del extremo de la malla.



**Figura 4.22. Discretización de elementos finitos para el estudio del efecto conjunto de pretensado e inestabilidad superficial (PLAXIS)**

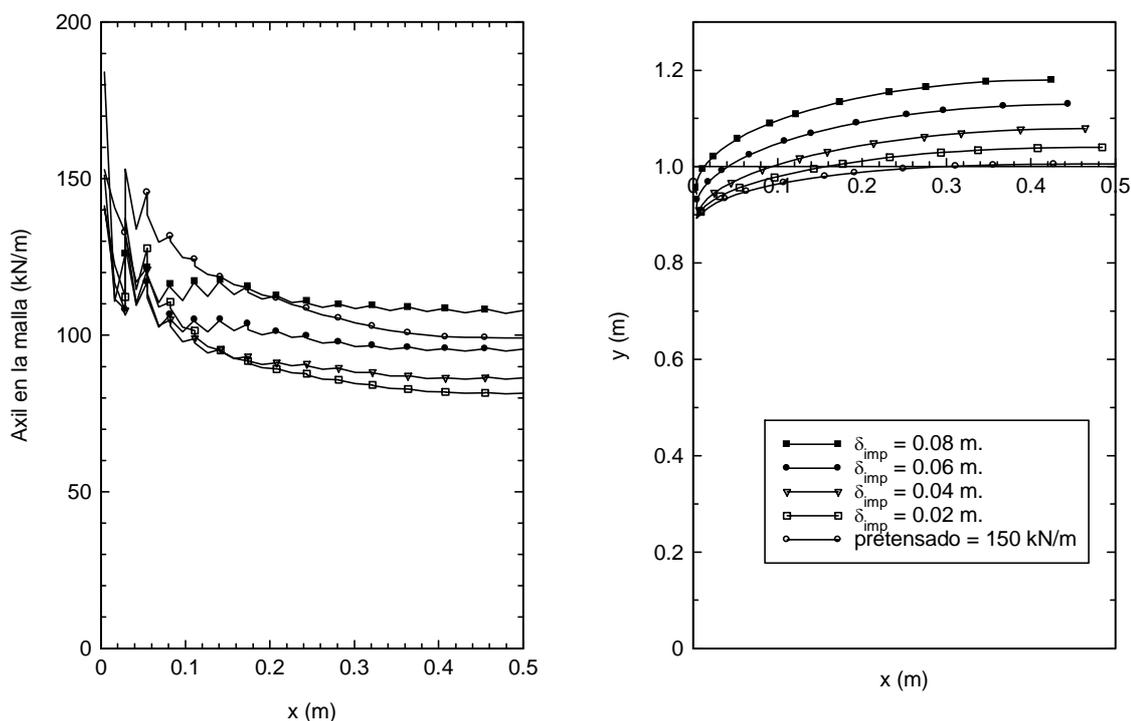


Figura 4.23. Resultados del análisis conjunto pretensado e inestabilidad superficial

#### 4.3.5. Malla de refuerzo sometida a presiones en superficie

En este apartado se estudia el caso correspondiente a la malla de refuerzo biapoyada en sus extremos, con una capa de suelo dispuesta sobre ella, y sometida a una presión actuando sobre la superficie del suelo (ver Figura 4.5). El objetivo del análisis es conocer la deformada que la malla adopta bajo dichas condiciones, y ver si se puede ajustar a alguna curva de ecuación matemática sencilla. Se estudian también varios casos con distintos valores de espesor de la capa de suelo, para ver como influye dicho espesor de suelo en los resultados que se obtienen.

El cálculo se realiza sin considerar el peso propio del suelo, por lo que el espesor de éste influirá únicamente en la rigidez del conjunto. El análisis se ha realizado empleando el programa de elementos finitos CRISP90.

Los valores adoptados en el análisis para los distintos parámetros que intervienen son:

$$E \text{ (módulo de elasticidad del suelo)} = 10^4 \text{ kN/m}^2$$

$c$  (cohesión del suelo) = 50 kN/m<sup>2</sup>

$\phi$  (ángulo de rozamiento interno del suelo) = 28°

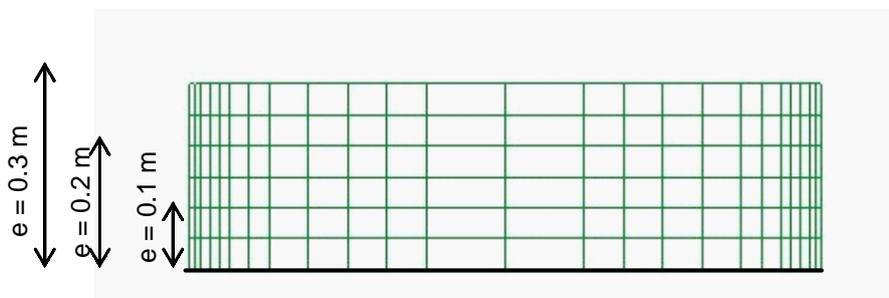
$p$  (presión actuando sobre la superficie del suelo) = 50 kN/m<sup>2</sup>

$e$  (espesor de suelo considerado) = 0.1, 0.2 y 0.3 m

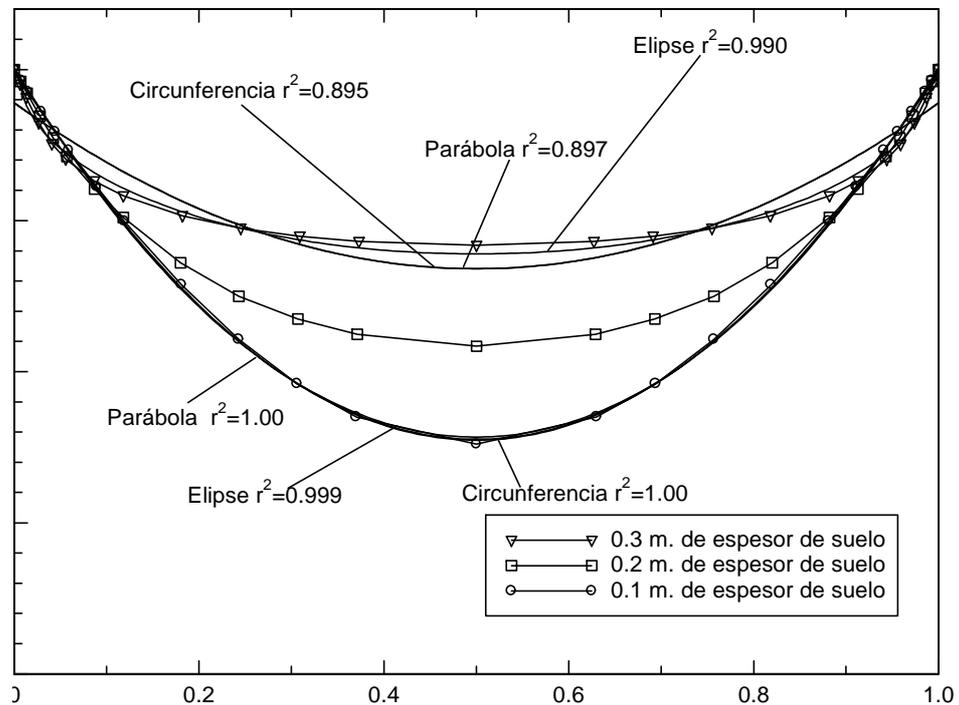
En la Figura 4.24 se presenta la discretización de elementos finitos empleada para el cálculo, siendo la discretización considerada para cada uno de los espesores de suelo citados la que se indica en la figura para cada valor de  $e$ . En la parte inferior aparece representada la malla de refuerzo. Las condiciones de contorno impuestas corresponden a los extremos de la malla de refuerzo biapoyados, es decir con desplazamiento impedido tanto en horizontal como en vertical. El análisis realizado consiste en ejercer para cada caso una presión sobre la superficie el suelo de valor 50 kN/m<sup>2</sup>.

La deformada de la malla obtenida en cada uno de los casos analizados se presenta en la Figura 4.25, en la que se observa como al aumentar el espesor de suelo, la flecha final en el centro luz de la malla disminuye. Este comportamiento es lógico ya que un aumento del espesor de suelo considerado se traduce en un aumento de la rigidez del sistema.

También se observa que para espesores mayores de suelo la deformada se ajusta mejor a una elipse que a un arco de circunferencia o de parábola, mientras que para espesores menores de suelo el ajuste es ligeramente mejor para el caso de parábola o circunferencia, que para elipse. En la Figura se dan los coeficientes de



**Figura 4.24. Discretización de elementos finitos para estudio de la malla sometida a presiones en superficie (CRISP90)**



**Figura 4.25. Deformada de la malla de refuerzo sometida a presión en su superficie**  
 correlación obtenidos para cada uno de los ajustes.

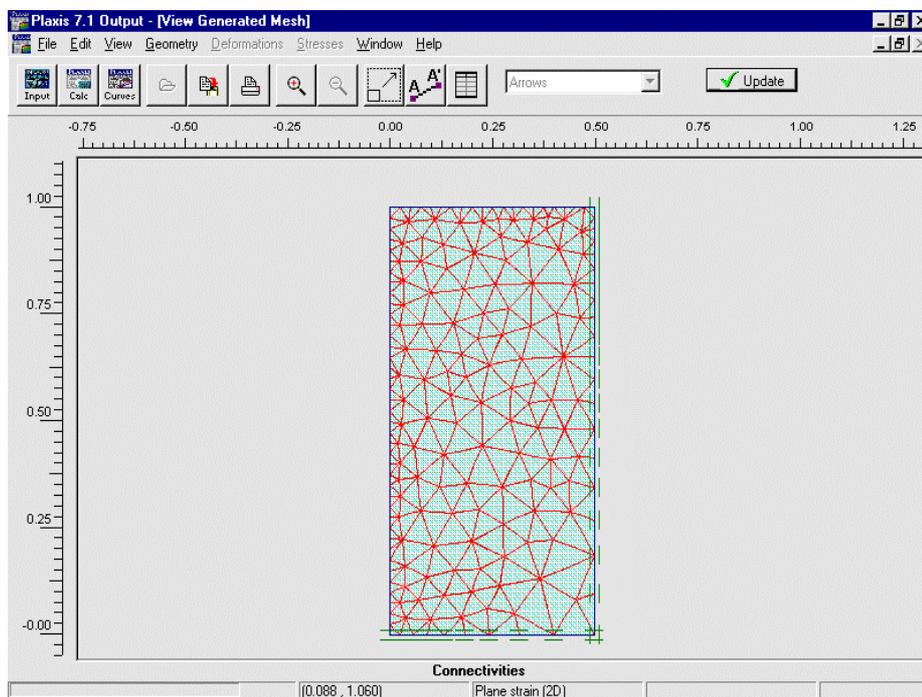
**4.3.6. Efecto de la dilatación del suelo**

Ya en la comparación establecida entre el análisis del efecto del pretensado de los anclajes con el programa CRISP90 y con el programa PLAXIS, se puso de manifiesto la influencia del valor del ángulo de dilatación del suelo en los resultados obtenidos. En este apartado se trata el tema de dicha influencia de una forma mucho más detallada. Para ello, se analizan distintos casos, basados todos ellos en el estudio de la celda elemental sometida a desplazamiento lateral impuesto (Figura 4.4).

El estudio se realiza para dos casos distintos, con y sin malla en la superficie del suelo. Para ambos casos se consideran un único valor del ángulo de rozamiento interno del suelo ( $\phi = 20^\circ$ ), y dos valores del ángulo de dilatación, uno igual a cero ( $\psi = 0^\circ$ ) y otro igual al ángulo de rozamiento del suelo ( $\psi = 20^\circ$ ). El módulo de elasticidad del suelo considerado es de  $10^4 \text{ kN/m}^2$ , y la cohesión de  $100 \text{ kN/m}^2$ .

En la Figura 4.26 se presenta la discretización de elementos finitos considerada en el análisis sin malla de refuerzo, y en la Figura 4.27 la considerada en el análisis con malla de refuerzo. Las condiciones de contorno impuestas en ambos casos son de desplazamiento vertical impedido en la base de la celda, desplazamiento horizontal impedido en el lateral derecho (eje de simetría), y desplazamiento horizontal impuesto en el lateral izquierdo. En el caso correspondiente al análisis con malla de refuerzo, ésta se puede apreciar situada en la parte superior de la celda. Como se aprecia en ambas figuras, el análisis se realiza sólo para la mitad de la celda, dada la simetría existente.

En la Figura 4.28 se presenta la deformada de la malla que se obtiene en cada uno de los casos estudiados. En dicha figura se observa como tanto en el caso sin malla, como en el caso con malla, los movimientos en superficie son mayores en los análisis correspondientes a mayor dilatancia del suelo ( $\psi=\phi$ ), tal y como debe ocurrir.



**Figura 4.26. Discretización de elementos finitos para el análisis del efecto de la dilatancia en el caso de no existir refuerzo en la superficie**

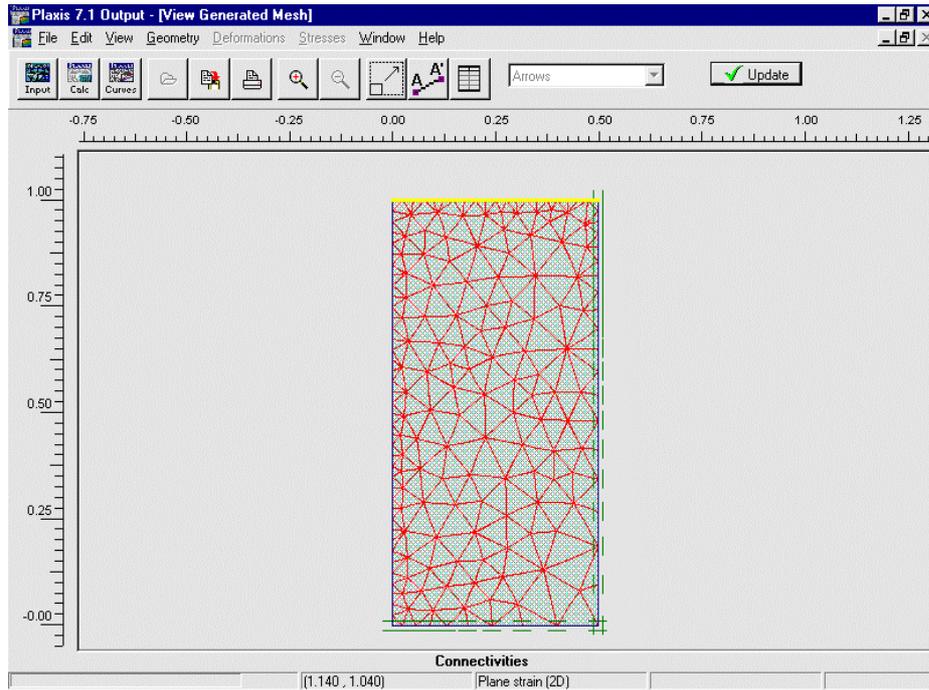


Figura 4.27. Discretización de elementos finitos para el análisis del efecto de la dilatación. Refuerzo en la superficie

En el caso sin malla y con dilatación igual al ángulo de rozamiento del terreno, se produce, cerca de los extremos, un levantamiento de valor muy elevado. Esto se puede atribuir a que en esa zona es donde se presentan unos esfuerzos de corte mayores. En cambio, en el mismo caso de ángulo de dilatación igual a ángulo de

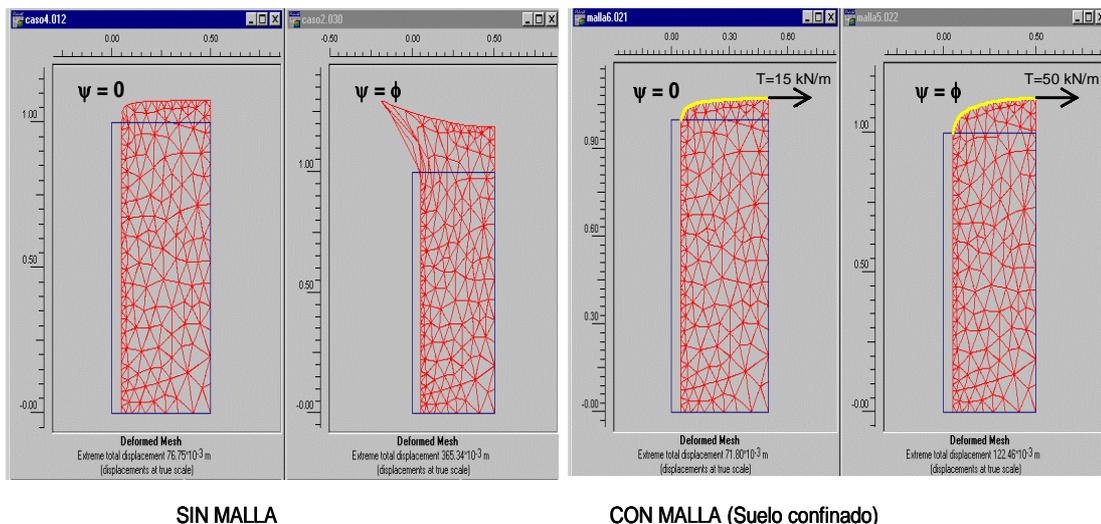
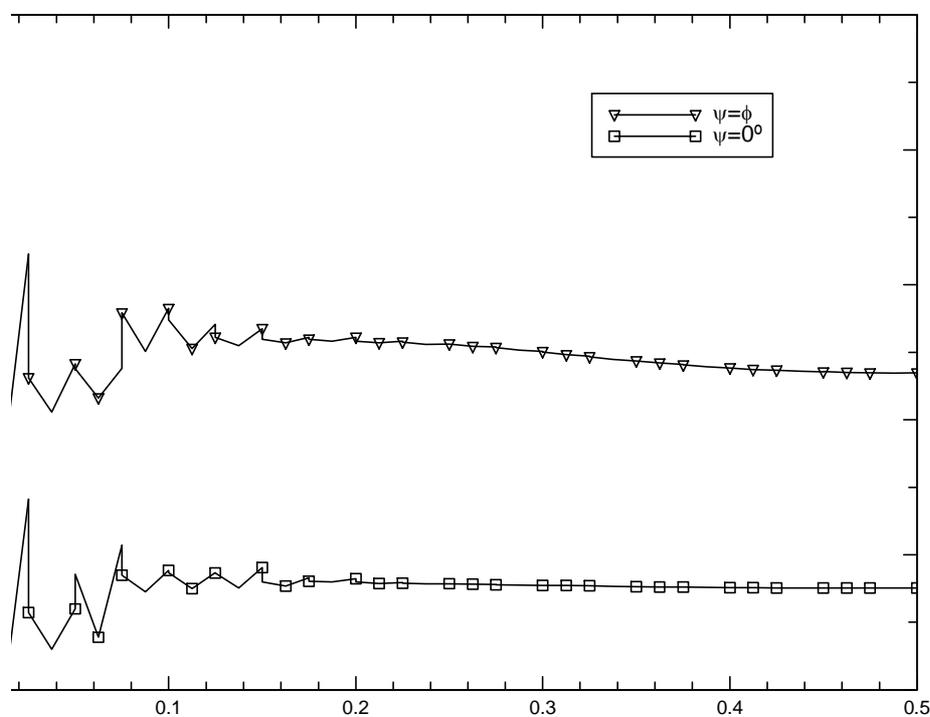


Figura 4.28. Deformada de la malla. Efecto de la dilatación

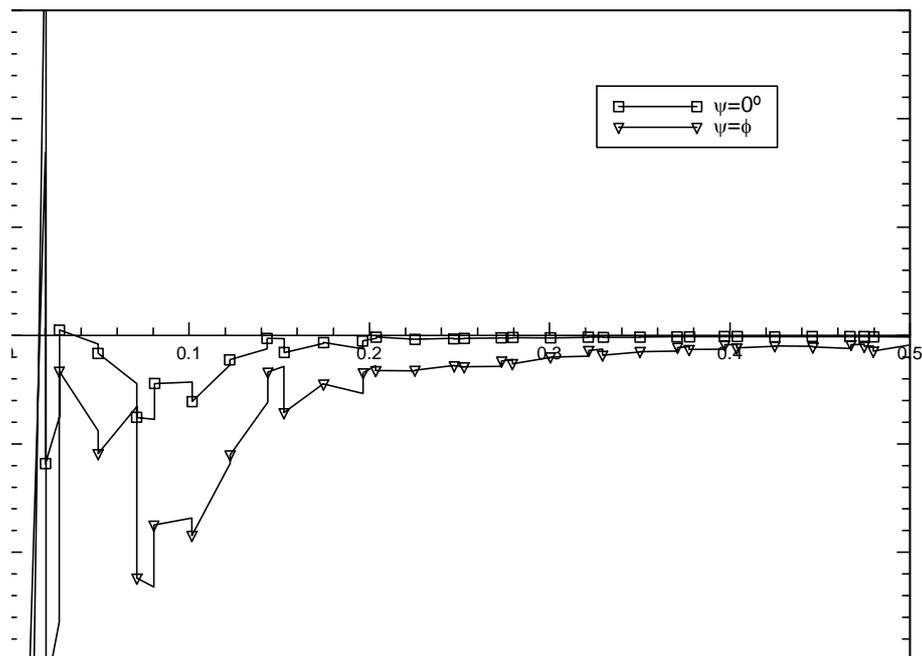
rozamiento interno, pero con malla sobre la superficie del terreno, el levantamiento anterior no se produce en tales dimensiones debido a la presencia de la malla; pero sí se observa en esa zona una concentración de tensiones tanto en la malla como en el suelo bajo ella. Este efecto se puede observar en las Figura 4.29 y Figura 4.30.

En el caso con malla en la superficie, quizá un aspecto más importante que el mayor levantamiento en el caso de dilatación mayor, es la mayor tensión que se encuentra soportando la malla en ese caso. En la Figura 4.28 se presenta el valor correspondiente a dicha tensión de la malla para ambos casos. Cuando el ángulo de dilatación es cero dicha tensión tiene un valor medio en la malla de 15 kN/m, valor que se triplica cuando el ángulo de dilatación es igual a  $20^\circ$ , llegándose en este caso a un valor medio de tensión en la malla de 50 kN/m.

En cuanto a la tensión normal en el suelo situado justo bajo la malla, su valor es mayor cuanto mayor es el ángulo de dilatación, tendencia que coincide con la de la fuerza axial en la malla (Figura 4.29 y Figura 4.30)



**Figura 4.29. Fuerza axial en la malla de refuerzo. Efecto de la dilatación**



**Figura 4.30. Tensiones en el suelo bajo la malla de refuerzo. Efecto de la dilatancia**

Estos resultados vienen a confirmar el hecho de que en problemas en los que el suelo se encuentra confinado, tal es el caso analizado con la malla de refuerzo situada en la superficie, el valor del ángulo de dilatancia tiene una gran influencia en los resultados que se obtienen (Houlsby, 1991), y por tanto se ha de prestar especial atención en su elección. Sobre todo es necesario tener cuidado si se emplean programas que toman por defecto un ángulo de dilatancia igual al ángulo de rozamiento interno, valor que es muy elevado y puede dar lugar a resultados como los obtenidos con respecto a la tensión en la malla, tres veces superior en un caso que en otro.

#### **4.3.7. Reproducción del ensayo de carga distribuida sobre la malla de refuerzo**

El análisis mediante elementos finitos de la malla de refuerzo sometida a una carga distribuida en su superficie que se presenta en este apartado, consiste en tratar de reproducir el ensayo de laboratorio descrito en el Capítulo 3, mediante el empleo del programa PLAXIS.

Para ello, en primer lugar se establece la forma de representar en dicho programa cada uno de los elementos que se emplean en el ensayo; a continuación se establecen las fases necesarias en el cálculo; y finalmente se presentan los resultados obtenidos.

### **Modelización de los distintos elementos**

Los elementos principales que forman parte del ensayo de laboratorio de carga distribuida sobre la malla (ver Capítulo 3) son, la malla TECCO G-65, los sacos de grava empleados para distribuir la carga aplicada por los gatos hidráulicos, y la viga formada por dos perfiles UPN 180 sobre la cual aplican directamente la carga los gatos.

Para representar cada uno de los elementos anteriores en el programa PLAXIS es necesario elegir el tipo de elemento, de entre los que dispone el programa, que mejor se adapte para representar el comportamiento de cada uno de ellos.

Como se ha justificado al comienzo de este Capítulo, el elemento que mejor representa el comportamiento de la malla es el tipo 'geotextil'. También se ha indicado que este tipo de elemento se define por el valor de su rigidez a tracción por unidad de ancho ( $E \cdot A$ ), que para la malla en estudio (TECCO G-65) es de 1800 kN/m.

La viga formada por los dos perfiles UPN 180 solidarizados se representa mediante elementos tipo 'beam'. Se trata de un elemento que se caracteriza por su rigidez a axil ( $E \cdot A$ ) y a cortante ( $E \cdot I$ ), ambos por unidad de ancho; su peso ( $W$ ) por unidad de área; y el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ). Para obtener estos valores basta con calcular las dimensiones y características resistentes de un elemento de sección rectangular, de forma que presente un comportamiento equivalente al de los dos perfiles UPN 180. Teniendo en cuenta las características del perfil UPN 180, los parámetros adoptados para la viga rectangular equivalente resultan ser:

$$E \cdot A = 37.8 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$$

$$E \cdot I = 102060 \text{ kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$$

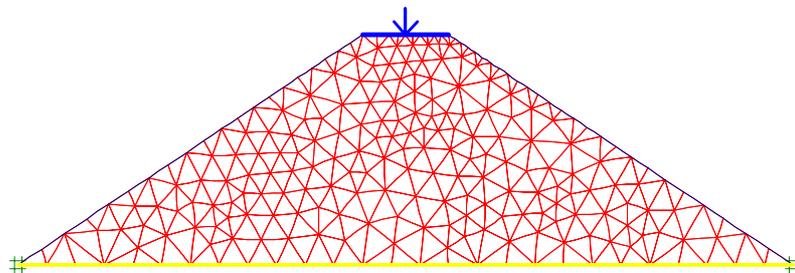
$$\mu = 0.1$$

$$W = 2.2 \text{ kN/m}^2$$

Para representar los sacos de grava se han empleado elementos tipo 'soil' con un modelo de comportamiento elástico lineal. Los parámetros necesarios para definir dichos elementos son, el módulo de elasticidad (E), el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y el peso específico ( $\gamma$ ). Estos parámetros, en principio desconocidos y difíciles de definir ya que se trata de un conjunto de sacos de grava, se dejan como parámetros libres, cuyos valores se obtendrán del ajuste con los resultados de los ensayos de laboratorio.

La geometría correspondiente a la zona de suelo que representa los sacos de grava se establece con forma trapezoidal (al igual que en el ensayo). Es por tanto necesario definir las dimensiones de dicho trapecio, de forma que se ajusten a las del ensayo, y supongan una equivalencia en peso con respecto al peso de los sacos de grava.

La dimensión de la base mayor del trapecio viene dada por la longitud de la malla ensayada, 1.8 metros. Para la altura del trapecio se ha tomado un valor de 0.5 metros, de forma que únicamente queda por definir el valor de la base menor del trapecio. Dicho valor no puede ser cualquiera, sino que viene dado por la condición de que el peso del suelo se corresponda con el de los sacos de grava, para una densidad considerada del suelo de  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ . Al realizarse el análisis numérico bajo la condición de deformación plana, la equivalencia de pesos se ha de establecer por unidad de ancho de la malla, teniendo en cuenta que en el ensayo dicho ancho es de 1.74 metros. Considerando todo lo anterior, el valor que resulta para la base menor del trapecio es de 0.2 metros. En la Figura 4.31 se puede observar la forma trapezoidal



**Figura 4.31. Discretización de elementos finitos para el análisis de la malla de refuerzo sometida a carga uniforme en su superficie**

adoptada para representar los sacos de grava, junto con la malla de refuerzo situada bajo dicho trapecio y la viga metálica representada en la parte superior. Se presenta también la discretización de elementos finitos considerada para el cálculo.

### **Fases consideradas en el análisis y tipo de cálculo**

Las fases definidas en el cálculo tratan de representar a aquellas que se producen durante la ejecución del ensayo de laboratorio. Para ello se han considerado las siguientes:

1. En la primera fase tiene lugar la toma de peso tanto del suelo como de la viga.
2. La segunda fase, y sucesivas, consisten en la aplicación sobre la viga de una carga 'Q' que representa la acción de los gatos hidráulicos. En esta segunda fase es necesario marcar la opción de 'reset displacements to zero', con el fin de poner a cero los desplazamientos y deformaciones que han tenido lugar durante la primera fase. Esto se hace con objeto de poder comparar luego la deformada de la malla con la obtenida en los ensayos de laboratorio, donde como ya se ha comentado en el Capítulo 3, el origen de desplazamientos corresponde a la situación de la malla con los sacos de grava y la viga encima.

Sobre el tipo de cálculo considerado en cada una de las fases es necesario hacer una serie de observaciones.

En primer lugar hay que tener en cuenta que, al igual que en el resto de celdas elementales, el cálculo ha de realizarse considerando cambios de geometría, en caso contrario, al estar la malla dispuesta entre dos puntos fijos y con carga perpendicular a su geometría inicial, se tendría un valor de deformación nula, ya que todos los desplazamientos que ocurren son perpendiculares a la geometría inicial. En el programa PLAXIS existe la opción de cálculo denominada 'update mesh' que consiste en un cálculo considerando en cada momento la geometría deformada de la malla de elementos.

Por otro lado, el programa PLAXIS, después de un cálculo con cambio de geometría, no permite poner a cero los desplazamientos. Por tanto, para poder poner

a cero los desplazamientos tras la primera fase de cálculo, y establecer así como origen de desplazamientos la fase después de la toma de la sobrecarga, es decir la segunda fase, es necesario realizar la primera sin cambios de geometría.

Como consecuencia de las observaciones anteriores, la primera fase de toma de peso se realiza sin considerar el cambio de geometría, y con comportamiento elástico al haberse considerado el suelo como tal; mientras que para la segunda y sucesivas fases, el cálculo se realiza considerando los cambios que tienen lugar en la geometría.

También es necesario tener en cuenta que el análisis con el programa PLAXIS se realiza considerando un estado de deformación plana, por tanto, los valores de la carga  $Q$  ejercida por los gatos, que en el ensayo actúan sobre una superficie de  $1.8 \times 1.74 \text{ m}^2$ , es necesario dividirlos por  $1.74 \text{ m}$  para obtener los valores correspondientes por unidad de ancho.

En el cálculo realizado se han considerado un total de 7 fases, la primera correspondiente a la toma de peso, y las otras seis correspondientes a distintos niveles de carga aplicada, cuyos valores se presentan en la Tabla 4.1. Todos los valores considerados, salvo el primero, se corresponden con valores de carga para los que se tienen resultados del ensayo de laboratorio. A ellos se ha añadido el primer valor de  $28.74 \text{ kN}$ , que correspondería con una carga en el ensayo de  $50 \text{ kN}$ .

$Q_{\text{ensayo}}(\text{kN})$	-----	70	100	150	180	$Q_{\text{rot}}=246.18$
$Q_{\text{PLAXIS}}(\text{kN})$	28.74	40.23	57.47	86.21	103.45	141.48
Nº Fase	2	3	4	5	6	7

**Tabla 4.1. Cargas consideradas en cada fase de cálculo del análisis con elementos finitos de la malla de refuerzo sometida a carga distribuida sobre su superficie**

#### **Ajuste del valor del módulo de elasticidad del suelo**

Como se ha comentado, el valor del módulo de elasticidad del suelo que se emplea para representar los sacos de grava resulta difícil de suponer. Por ello, se

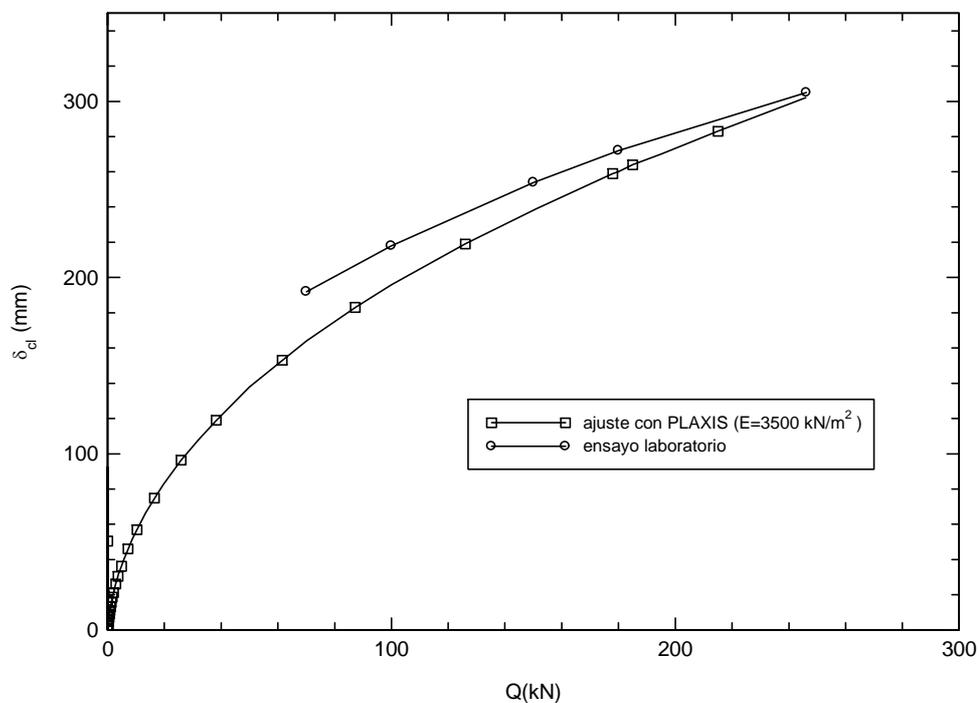
propuso realizar el cálculo para diferentes valores de dicho parámetro, y tomar el que de lugar a un mejor ajuste con respecto a los resultados de los ensayos de laboratorio.

De todos los casos analizados, el mejor ajuste se consigue para un valor del módulo de elasticidad del suelo de  $3500 \text{ kN/m}^2$ . Por tanto, se ha adoptado este valor para todos los análisis que se presentan a continuación.

### **Resultados obtenidos mediante cálculo con elementos finitos y comparación con los del ensayo de laboratorio**

Los resultados obtenidos, y que se comparan con los de los ensayos de laboratorio, se refieren a tres aspectos principales. Por un lado, la relación que existe entre la carga 'Q' aplicada y el valor del desplazamiento en el centro luz de la malla; por otro lado, para cada valor de carga 'Q' la correspondiente deformada de la malla; y finalmente resultados sobre el esfuerzo de tracción que se encuentra soportando la malla, también en función de la carga 'Q' actuante.

En la Figura 4.32 se presenta la ley  $Q-\delta_{cl}$  obtenida del cálculo con el programa PLAXIS, junto con la correspondiente al ensayo. En la curva correspondiente al cálculo

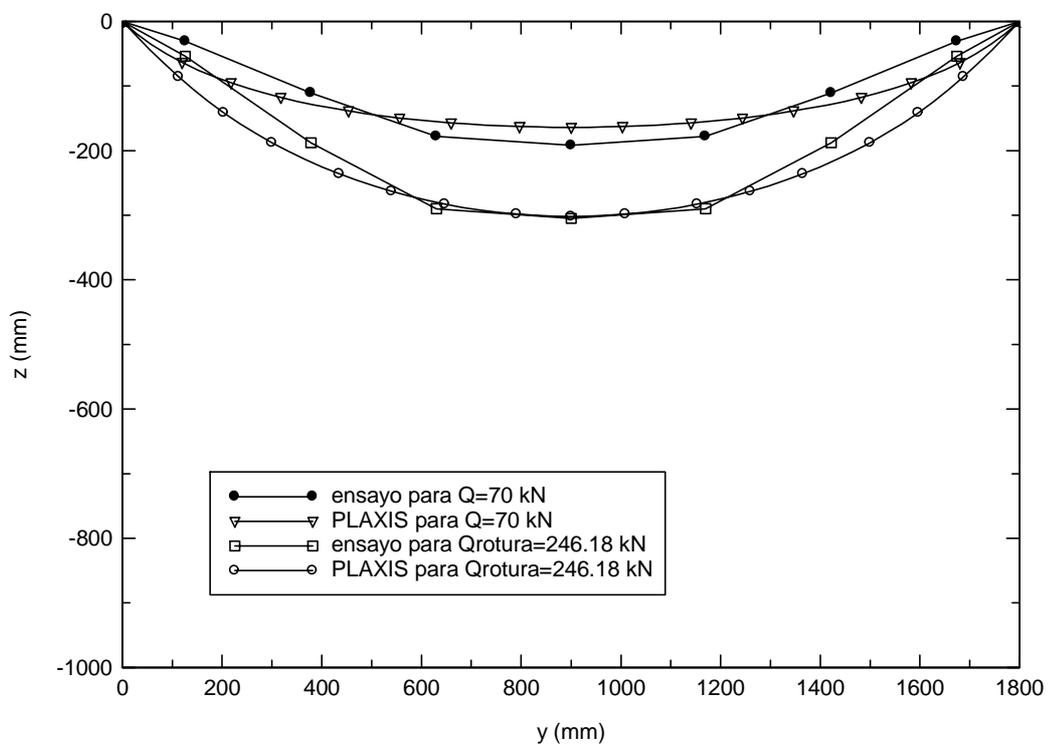


**Figura 4.32. Relación  $Q-\delta_{cl}$  según PLAXIS y ensayos de laboratorio**

con PLAXIS se observa un primer tramo que discurre en el eje de ordenadas, y que corresponde a la fase de toma de peso del suelo. Se puede observar también, que cuando finaliza dicha fase, los desplazamientos se vuelven a cero, y por tanto, la ley vuelve al origen de coordenadas, punto del que parte para la segunda fase de aplicación de carga.

Este proceso de cálculo hace que la pendiente de la curva en el origen de la segunda fase sea la correspondiente al nivel de tensiones alcanzado en la situación de la malla con la sobrecarga actuando, esto se consigue gracias a la fase de toma de peso de suelo y viga.

En la Figura 4.33 se presentan los resultados correspondientes a la deformada de la malla, para los valores extremos de la carga 'Q' considerada en los ensayos (70 kN y  $Q_{rot}=246.18$  kN), también acompañados de los resultados del ensayo. Las gráficas correspondientes al resto de valores de 'Q' se presentan en el Apéndice C.

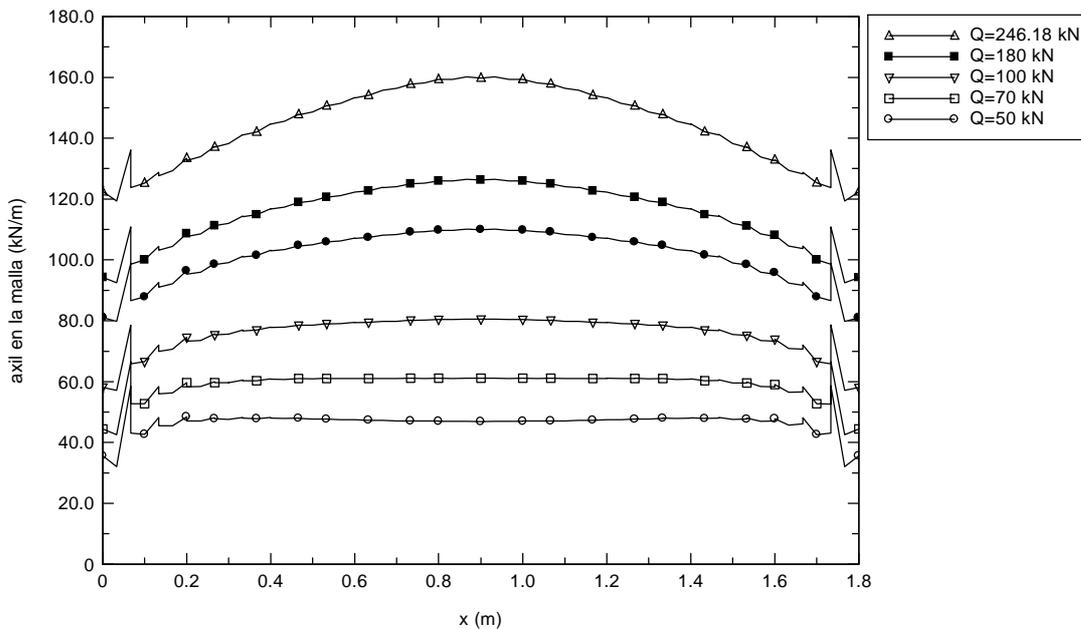


**Figura 4.33. Deformada de la malla de refuerzo según ensayos de laboratorio y resultados con PLAXIS**

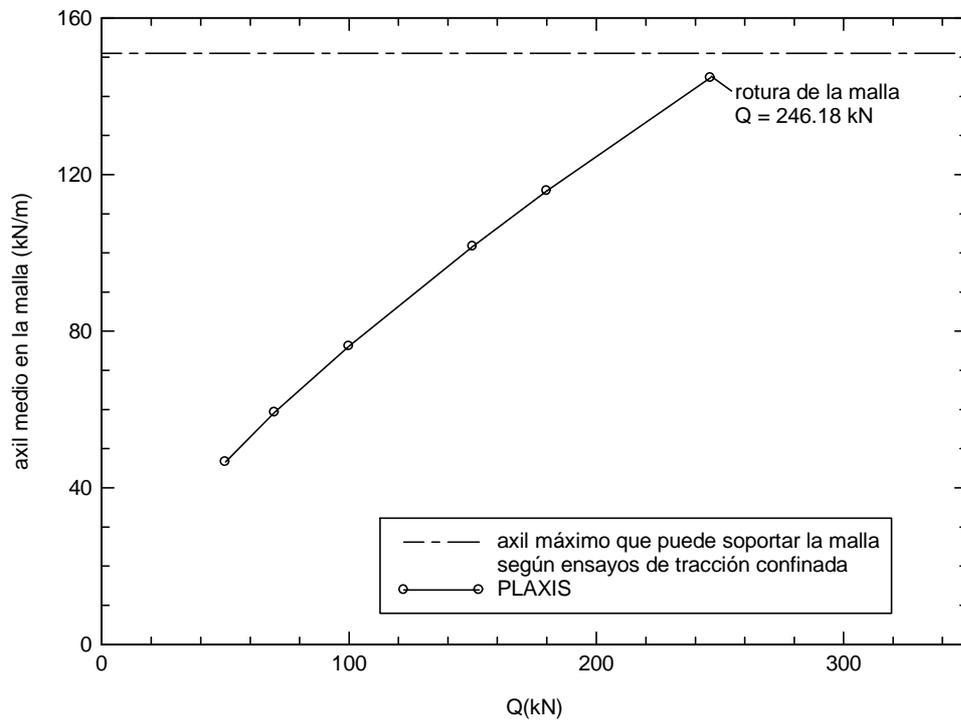
En la Figura 4.34 se presentan los valores obtenidos con el programa PLAXIS de la tensión axial que soporta la malla, para diferentes valores de carga exterior aplicada. De los valores correspondientes a dicha figura, se puede establecer un valor medio del axil que se encuentra soportando la malla, para cada uno de los valores de la carga aplicada 'Q'.

En la Figura 4.35 se presenta la relación obtenida del análisis numérico, entre el axil en la malla y el valor de la carga 'Q' aplicada. La curva obtenida no se puede comparar con resultados de los ensayos, ya que en éstos no se han realizado medidas correspondientes al esfuerzo que soporta la malla. Sin embargo, se dispone del valor correspondiente al axil de rotura obtenido en los ensayos de tracción directa realizados cuyo valor es de 151 kN/m (ver Capítulo 3). Este valor se ha introducido en la Figura, y muestra como para un valor de 'Q' de 246.18 kN, correspondiente a la rotura, el valor del esfuerzo axial que se encuentra soportando la malla resulta ser muy próximo al citado valor de 151 kN/m.

De los resultados anteriores se concluye el buen funcionamiento de la malla bajo la acción de una carga distribuida en su superficie, siendo ésta acción semejante a la que se va a ver sometida la malla en el talud.



**Figura 4.34. Fuerza axial en la malla de refuerzo en función de la carga aplicada sobre su superficie**



**Figura 4.35. Axil en la malla de refuerzo en función de la carga aplicada en su superficie**

#### 4.4. ANÁLISIS DE TALUD

##### 4.4.1. Talud sometido a presiones en su superficie. Comparación con los resultados de equilibrio límite

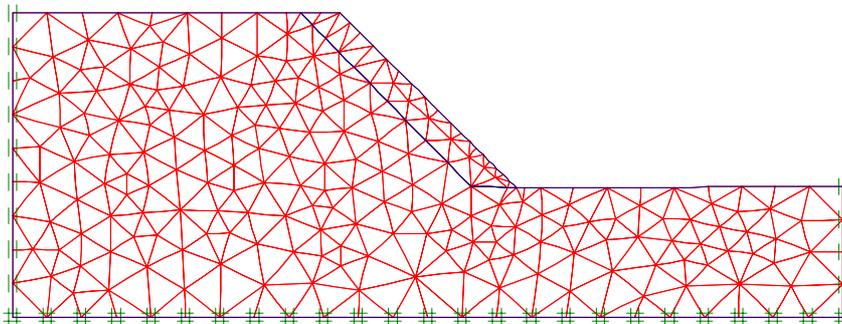
En este apartado se presenta el análisis realizado con el programa PLAXIS de un talud sometido a presiones sobre su superficie, y se comparan los resultados con los obtenidos en el Capítulo 2 mediante la aplicación del método de equilibrio límite.

Al igual que en el Capítulo 2, se trata de conocer la relación entre la presión que debe actuar sobre la superficie del talud y los parámetros resistentes del terreno, para conseguir un cierto coeficiente de seguridad frente a un posible deslizamiento superficial.

El análisis se ha realizado considerando una única geometría de talud, siendo variables la cohesión en la zona superficial del terreno, que se supone sufre una alteración, y la presión que actúa sobre la superficie del talud.

En la Figura 4.36 se presenta la discretización de elementos finitos empleada para el cálculo, siendo los parámetros que definen la geometría del talud:

- Inclinación ( $\beta$ ):  $45^\circ$



**Figura 4.36. Discretización de elementos finitos para análisis del talud sometido a presiones en su superficie**

- Altura (H): 8 m.

En dicha discretización se puede apreciar que se ha definido una zona superficial con objeto de establecer la capa de terreno que se supone va a sufrir una alteración de sus propiedades resistentes. El espesor considerado para dicha capa superficial es de 1.3 metros.

En cuanto a los parámetros resistentes del terreno, se consideran los siguientes:

- Módulo de elasticidad (E):  $10^4$  kN/m<sup>2</sup>
- Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ): 0.3
- Peso específico del terreno ( $\gamma$ ): 18 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ): 15°
- Ángulo de dilatación ( $\psi$ ): 0°
- Cohesión (c): variable en la zona superficial, y  $10^4$  kN/m<sup>2</sup> en el resto del terreno. Con este último valor tan elevado se pretende que la zona no superficial del talud no llegue a plastificar, y con ello representar únicamente la inestabilidad superficial del talud.

El análisis que se realiza consiste en simular una pérdida de cohesión en la zona superficial del terreno, y con ello comprobar hasta qué valor se puede reducir la cohesión en dicha zona antes de llegar a rotura, todo ello con una cierta presión actuando sobre el talud. Se define así, para cada valor de la presión  $p$  que actúa sobre el talud, el valor mínimo de la cohesión en la zona superficial, de forma que el coeficiente de seguridad sea la unidad.

Por tanto, se han considerado distintos valores de presión  $p$  actuando con dirección normal al paramento del talud, de forma que para cada uno de ellos, y para las características del talud descritas, se obtiene el mínimo valor de la cohesión para el cual se produce la rotura en la zona superficial del talud. Este análisis se ha planteado con el empleo del programa PLAXIS de dos formas distintas.

Una de ellas consiste en, para cada valor de la presión  $p$ , ir ejecutando casos independiente del talud sometido a dicha presión, cada uno de ellos con un valor cada vez menor de la cohesión del terreno en la zona superficial, hasta que dicho valor de la cohesión sea tal que se produzca la rotura. En cada uno de estos análisis independientes se consideran dos fases de cálculo, la primera consiste en la aplicación sobre la superficie del talud de la presión  $p$  correspondiente, mientras que durante la segunda tiene lugar la toma de peso del talud. Los valores de la presión  $p$  se han elegido de forma que durante la primera fase de cálculo no se produzca plastificación del terreno. En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos para tres valores distintos de presión sobre la superficie del talud.

Presión en la superficie (kN/m <sup>2</sup> )	Cohesión (kN/m <sup>2</sup> ) para F=1
8.4	5.0
13.5	3.5
16.2	2.5

**Tabla 4.2. Relación entre presión en la superficie del talud y cohesión para F=1. Análisis de forma individual de cada caso con el programa PLAXIS**

En la Figura 4.37 se presenta la forma de rotura que se produce en el talud para los pares presión-cohesión de la tabla anterior, y se observa como dicha rotura es superficial, tal y como debe de ser dado el valor tan alto que se ha considerado para la cohesión en la zona no superficial del talud.

La otra forma de análisis considerado consiste en el empleo de la opción 'stage construction' que presenta el programa PLAXIS. Mediante dicha opción el programa permite, dentro de un mismo cálculo, ir cambiando las propiedades de los materiales. Así, en la zona superficial del talud se puede considerar inicialmente un suelo con una cohesión de valor elevado, y durante el cálculo ir cambiando el material que constituye dicha zona por otro de cohesión menor, hasta que se llegue a situación de rotura.

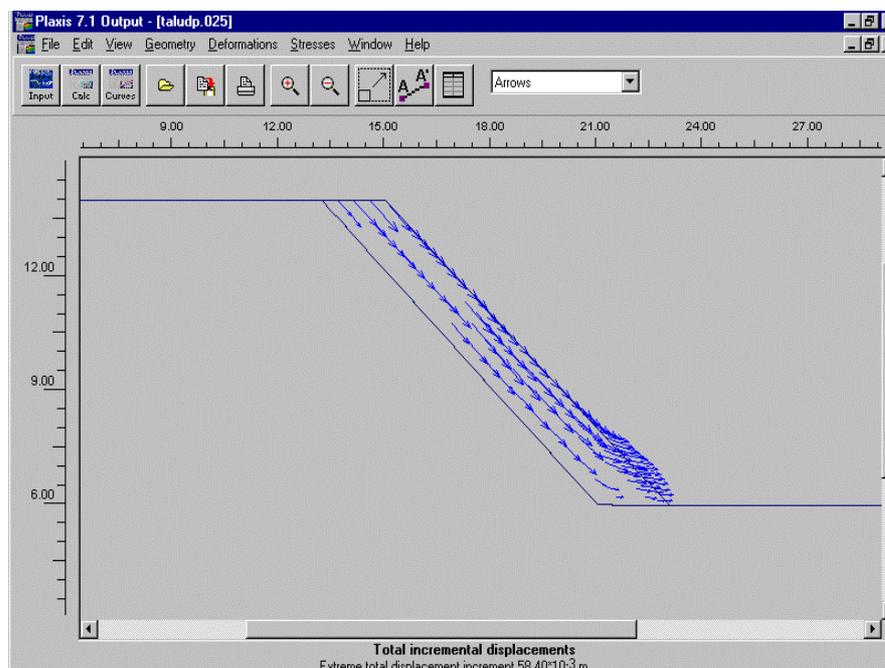
Aunque en el manual del programa no queda claro que implica este cambio de las propiedades de un material, en principio un análisis de este tipo en cualquier programa de elementos finitos se debe entender como una sustitución de los elementos afectados por otros con otras propiedades. De ser así, esta sustitución

implica que los nuevos elementos se colocan con tensiones nulas, es decir se va perdiendo la historia de tensiones en la zona de terreno donde se produce el cambio. En principio esta pérdida de la historia tensional hace que el proceso no sea correcto, sin embargo, en este caso, al tratarse de los elementos que se encuentran en la zona de la superficie, parece que dicha consideración no debe afectar demasiado.

En cualquier caso, la forma ideal de cálculo es la descrita en los párrafos anteriores como primera forma empleada.

El proceso de ir cambiando las propiedades del terreno en la zona superficial sólo se puede hacer de forma discreta, es decir considerando valores de la cohesión que van siendo cada vez menores, pero cada uno con cierta diferencia con respecto al anterior. Esto hace que durante el análisis se tenga un valor de cohesión para la cual el talud aún es estable, sin embargo para el siguiente no lo es. Con ello se delimita una franja de valor de la cohesión comprendida entre dichos límites para la cual se produce la rotura, es decir el coeficiente de seguridad es la unidad.

En el análisis realizado se han considerado distintas fases de cálculo. En la primera se realiza la toma de peso del terreno. La segunda fase se corresponde con la



**Figura 4.37. Forma de rotura en el análisis con PLAXIS de talud con presión en superficie mediante cálculos individuales**

aplicación de la presión sobre la superficie del terreno, para lo cual al comienzo de esta fase se ponen a cero los desplazamientos debidos a la anterior, es decir a la toma de peso. El valor inicial de la cohesión en la zona superficial del terreno ha de ser lo suficientemente elevado para que durante estas dos primeras fases no se produzca plastificación del terreno. A partir de esta situación, se desarrollan una serie de fases cada una de ellas consistente en el cambio del terreno situado en la zona superficial por otro con menor cohesión.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos mediante esta forma de análisis.

Presión en la superficie (kN/m <sup>2</sup> )	Cohesión (kN/m <sup>2</sup> ) para F=1
5	6 - 7
10	4 - 5
15	3 - 4
20	2 - 3
25	0.5 - 1
30	<0.2

**Tabla 4.3. Relación entre presión en la superficie del talud y cohesión para F=1. Análisis mediante cambio de material en la superficie con el programa PLAXIS**

En la Figura 4.38 se muestra, como al igual que en la primera forma de análisis descrita, la rotura que se produce al disminuir la cohesión se corresponden con un deslizamiento de la zona superficial del talud, donde la cohesión es menor.

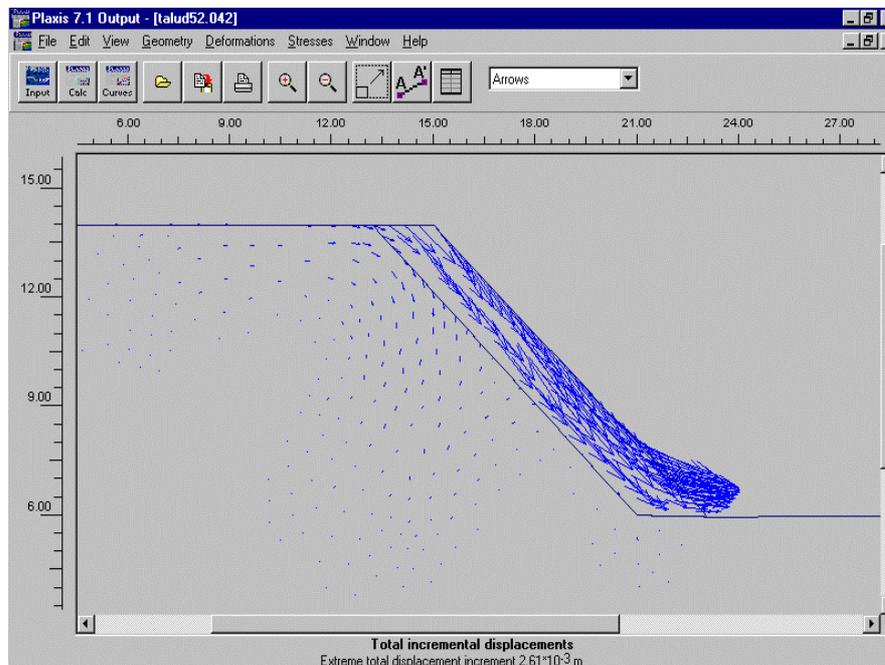
Con objeto de comparar los resultados obtenidos con los que se tendrían mediante un análisis de equilibrio límite, se han analizado los casos anteriores mediante el método y ábacos presentados en el Capítulo 2. Así, para cada una de las cohesiones obtenidas del análisis numérico, se ha calculado mediante el citado método y ábacos, el valor de la presión necesaria sobre la superficie del talud, para un valor del coeficiente de seguridad de la unidad, y para las mismas características del talud ( $\beta$ , H,  $\phi$ ,  $\gamma$ , espesor de zona superficial) que las consideradas en el análisis anterior. Con ello se obtiene la relación presión-cohesión para F=1, en este caso mediante equilibrio límite. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.4.

Cohesión (kN/m <sup>2</sup> )	Presión en la superficie (kN/m <sup>2</sup> ) para F=1
6	8.4
4	13.5
3	16.2
0.5	23.3

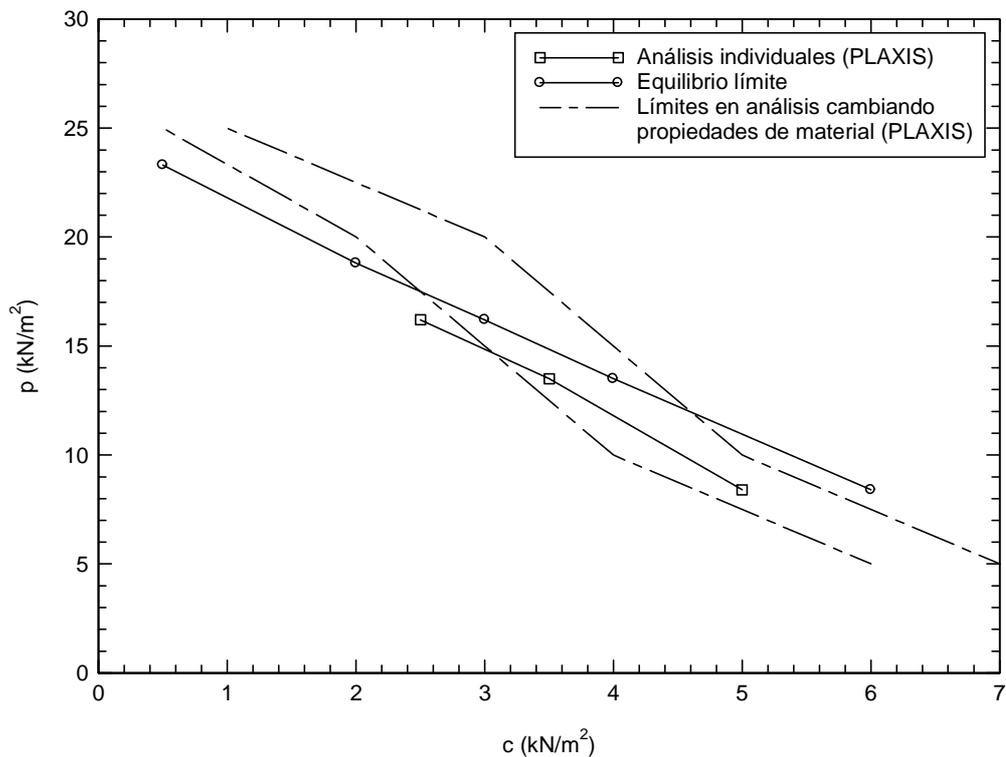
**Tabla 4.4. Relación entre presión en la superficie del talud y cohesión para F=1. Análisis mediante equilibrio límite**

En la Figura 4.39 se presentan las gráficas presión-cohesión para F=1, resultantes de los dos análisis numéricos realizados con el programa PLAXIS y del realizado mediante equilibrio límite.

En la figura se puede observar que los resultados obtenidos difieren ligeramente para cada uno de los análisis realizados. Sobre los resultados correspondientes al análisis con elementos finitos cambiando las propiedades del terreno de la superficie, conviene recordar que no está del todo claro la forma de proceder en el programa PLAXIS cuando se emplea dicho proceso de cálculo. Por otro



**Figura 4.38. Forma de rotura en el análisis con PLAXIS de talud con presión en superficie mediante cambio de las propiedades del terreno en superficie**



**Figura 4.39. Relación entre la presión sobre superficie del talud y cohesión para  $F=1$ . Resultados de equilibrio límite y PLAXIS**

lado, en todos los casos se observa el beneficio que supone, con respecto a la estabilidad superficial de un talud, la acción de una presión actuando sobre su paramento, de forma que para presiones actuantes mayores, menor es el valor de la cohesión que puede llegar a tener el talud en su zona superficial, antes de llegar a una situación de rotura.

#### 4.4.2. Ejemplo de construcción de un terraplén

En este apartado se presenta como ejemplo de interacción suelo-refuerzo, el análisis por elementos finitos, de la construcción de un terraplén que se va reforzando mediante la colocación de la malla, a medida que se va construyendo. Con este análisis no se pretende más que conocer la influencia de la colocación del refuerzo, con respecto a otro caso en que no se dispusiese. El análisis que se presenta se ha realizado con el empleo del programa de elementos finitos PLAXIS.

El análisis propuesto consiste en la construcción de un terraplén en el que se tienen dos tipos de terreno, uno menos resistente en una capa superficial de dos

metros de espesor, y otro más resistente que constituye el resto del terraplén. Evidentemente la situación descrita no se corresponde con una real donde ya de partida se tuviese el material degradado en superficie, pero como ya se ha indicado se trata de un análisis comparativo entre dos situaciones una con refuerzo y otra si él para únicamente conocer la implicación que ello conlleva.

El análisis se realiza por fases, cada una de ellas correspondiente bien a la colocación de una nueva tongada, o bien a la colocación del refuerzo.

### **Características geométricas del terraplén y resistentes del suelo**

Las características geométricas del terraplén, y resistentes del terreno que se han considerado en el análisis son las siguientes:

- Inclinação del talud ( $\beta$ ) =  $45^\circ$
- Espesor de las tongadas ( $h_t$ ) = 2m
- Inclinação de los anclajes respecto a la horizontal ( $\xi$ ) =  $20^\circ$
- Espesor de la capa de terreno de menor resistencia ( $d$ ) = 2 m.
- Módulo de elasticidad del terreno ( $E$ ) =  $10^4$  kN/m<sup>2</sup>
- Peso específico del terreno ( $\gamma$ ) = 18 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de rozamiento del terreno ( $\phi$ ) =  $20^\circ$
- Ángulo de dilatación del terreno ( $\psi$ ) =  $0^\circ$
- Cohesión del terreno ( $c$ ) = 2 kN/m<sup>2</sup> para la capa superficial y 50 kN/m<sup>2</sup> para el resto del terreno.
- E·A node to node anchor (anclaje) =  $2 \cdot 10^5$  kN
- $L_{\text{spacing}}$  (separación entre anclajes en la dirección perpendicular al plano de estudio) = 2.5 m
- E·A geotextile =  $1 \cdot 10^5$  kN/m

El modelo de comportamiento del terreno es elasto-plástico perfecto, con criterio de plastificación de Mohr Coulomb.

### **Proceso de construcción**

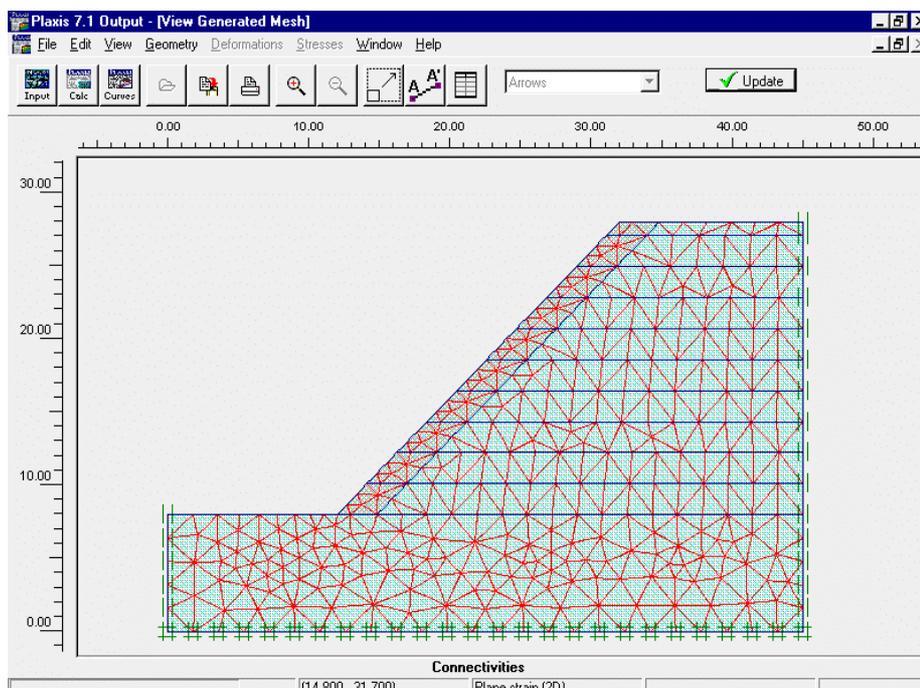
#### **Terraplén sin refuerzo**

La construcción del terraplén se simula en el cálculo mediante fases, incrementándose en cada una de ellas la altura de terraplén en 2 metros. En la Figura 4.40 se muestra la discretización de elementos finitos empleada en el análisis, junto con las condiciones de contorno impuestas. Evidentemente, al comienzo del análisis no existe el suelo correspondiente a la zona de terraplén.

#### **Terraplén con refuerzo**

En el análisis de la construcción del terraplén con refuerzo se han considerado las siguientes fases:

1. Colocación de la primera tongada de terreno



**Figura 4.40. Discretización de elementos finitos. Terraplén sin refuerzo**

2. Colocación de la segunda tongada de terreno
3. Colocación del refuerzo correspondiente a la zona de la primera tongada (se colocan los anclajes sin pretensar).
4. Colocación de la tercera tongada de terreno
5. Colocación del refuerzo correspondiente a la segunda tongada

Y así sucesivamente.

Es decir, se trata de ir elevando el terraplén, y con un cierto desfase ir colocando el refuerzo.

En la Figura 4.41 se muestra la discretización de elementos finitos empleada para cálculo, junto con las condiciones de contorno impuestas. Al igual que en caso anterior, la zona correspondiente al terraplén no existe al comienzo del análisis.

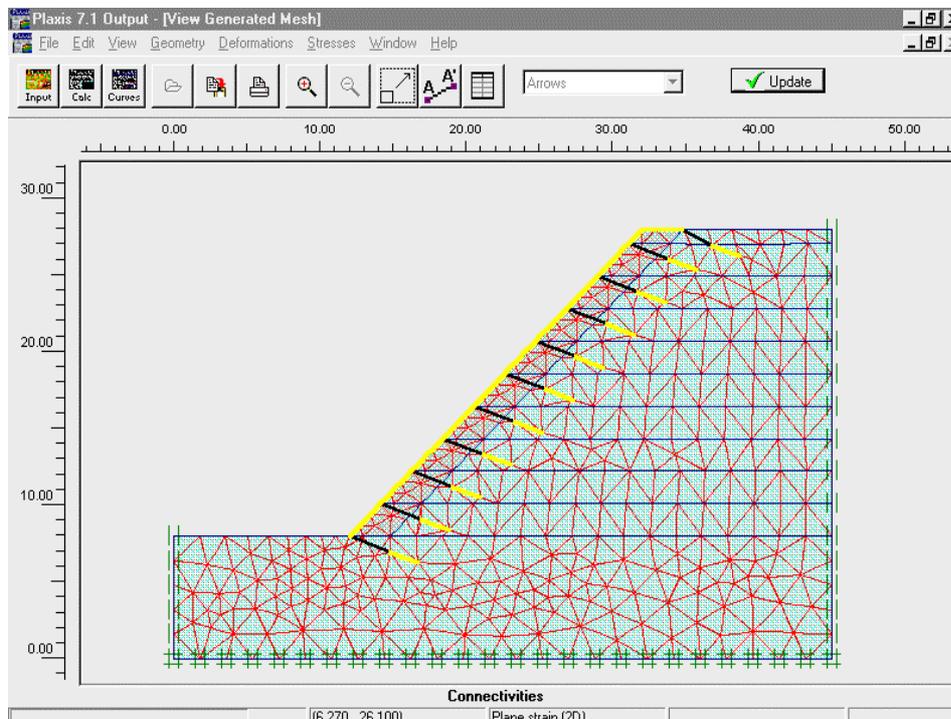


Figura 4.41. Discretización de elementos finitos. Terraplén con refuerzo

## **Resultados obtenidos**

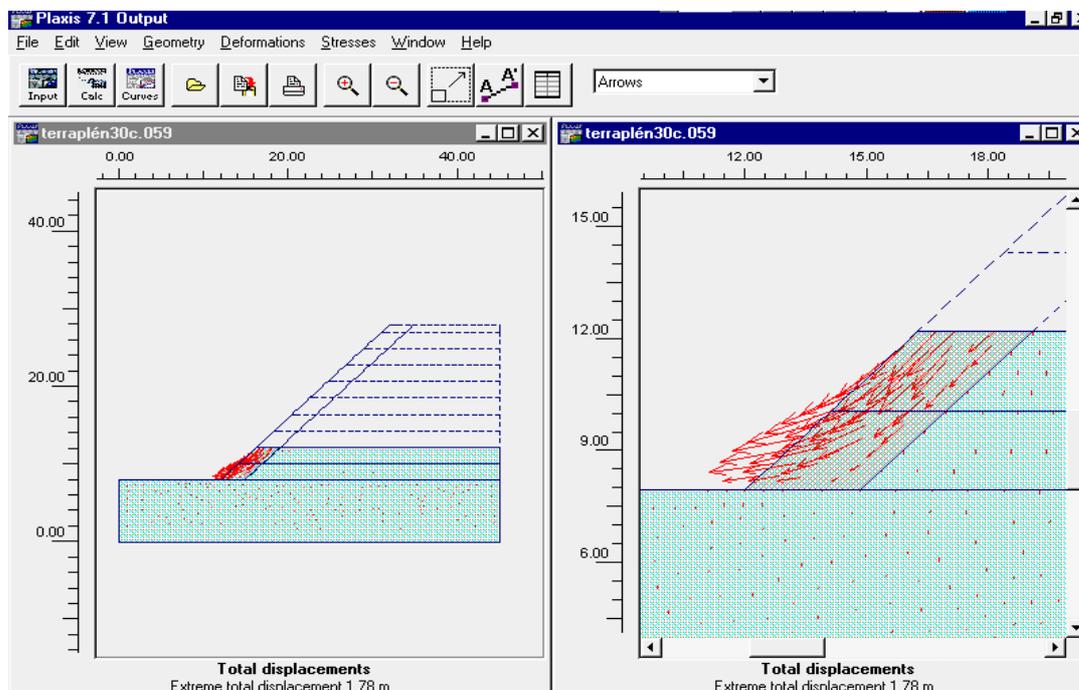
### **Terraplén sin refuerzo**

En el caso de construcción del terraplén sin refuerzo, cuando la altura de terraplén llega a unos cuatro metros, se produce el colapso por deslizamiento de la zona superficial. Este valor de la altura que produce el colapso es razonable si se tiene en cuenta la geometría y características resistentes del terreno. En la Figura 4.42 se muestra la forma de rotura que tiene lugar, y se observa como corresponde a un deslizamiento superficial, con dicha zona superficial plastificada.

### **Terraplén con refuerzo**

En este caso el efecto del refuerzo colocado hace que el colapso no se produzca hasta que el terraplén alcanza una altura de 11 m, valor casi 3 veces superior al alcanzado en el caso de no disponer el refuerzo.

En la Figura 4.43 se presenta la deforma del talud reforzado antes de producirse el colapso. En dicha figura se observa como la malla se encuentra deformada, soportando el empuje que el terreno le transmite.



**Figura 4.42. Rotura del terraplén sin refuerzo**

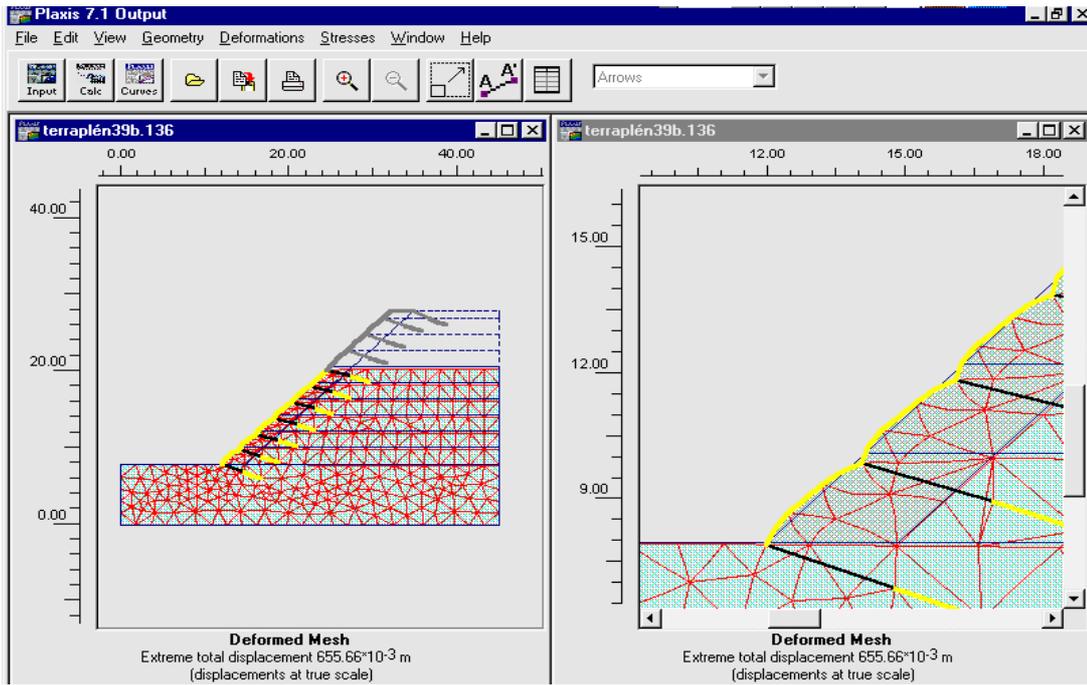


Figura 4.43. Deformada del terraplén reforzado

#### 4.5. PROBLEMÁTICA Y NECESIDADES

En este Capítulo se ha pretendido conocer el comportamiento conjunto de la malla de refuerzo y del terreno, estando ambos elementos caracterizados por una rigidez muy diferente. Para ello, se han analizado una serie de celdas elementales en las que ambos elementos se encuentran trabajando conjuntamente.

Ello ha llevado no sólo a conocer el comportamiento de los distintos casos de interacción estudiados, si no también, a establecer una serie de consideraciones a tener en cuenta a la hora de su análisis con elementos finitos, obtenidas dichas consideraciones de la problemática surgida en alguno de los casos.

Como consecuencia surgen unas necesidades que deben cumplirse a la hora del empleo de programas de elementos finitos en análisis de la interacción entre el suelo y el refuerzo. Dichas necesidades se resumen a continuación.

- Sobre los elementos empleados para representar a malla de refuerzo en el programa de elementos finitos, se ha de tratar de elementos que únicamente tengan rigidez a tracción y no a compresión, tal es el comportamiento real de las mallas de refuerzo estudiadas. Sobre todo si se prevé la posibilidad de que la malla en algún momento pueda entrar en una situación correspondiente a un posible estado de compresión.
- Sobre el ángulo de dilatación del suelo, se ha de prestar especial cuidado a la hora de elegir este parámetro, ya que dado el estado de confinamiento en que se encuentra el terreno debido a la presencia de la malla, se pueden obtener valores de tensiones en el terreno y de fuerza axial en la malla, muy diferentes a las correspondientes a la realidad. En este sentido, hay que tener precaución si se emplean programas de elementos finitos que adopten por defecto como ángulo de dilatación el mismo valor que el indicado para el ángulo de rozamiento interno del terreno, es decir, comportamiento asociado del material.
- Finalmente, hay que tener en cuenta la necesidad de realizar los cálculos con adaptación de la geometría, de forma que en cada momento se emplee la geometría correspondiente.

Todas estas consideraciones es necesario tenerlas en cuenta a la hora de analizar mediante elementos finitos la inestabilidad superficial en taludes reforzados, debida a la degradación del terreno; análisis que se presenta en el Capítulo 5.