Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas

ÁREA: C5
MÓDULO: CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

JET GROUTING. TRATAMIENTO DE TÚNELES

PONENTES: Silmara de Assis
T.C.C.P.
FERTISA

Día: 24/05/07
Hora: 18:15 A 19:15

JET-GROUTING: TRATAMIENTO NUMÉRICO

Autora:

SILMARA CRISTINA DE ASSIS E SILVA

Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Área y Subárea: C (Construcción) 5

JET-GROUTING: MANERAS DE REPRESENTRALO. TRATAMIENTO NUMÉRICO DE LOS EFECTOS DE LA EJECUCIÓN DE COLUMNAS DE JET-GROUTING

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta una metodología y procedimiento de cálculo desarrollados para representar numéricamente la ejecución y el efecto que producen las columnas de jet-grouting en el terreno y su entorno.

Este estudio tiene como objetivo definir el diseño de tratamientos con jet-grouting en función de la calidad del terreno, basándose en un estudio teórico previo del comportamiento de las presiones y de los movimientos inducidos por la introducción de columnas de jet-grouting asociados a la excavación de túneles y definiendo así un procedimiento de cálculo que pudiera ser utilizado por profesionales de la geotecnia en diferentes tipologías de terreno.

La representación numérica de la columna de jet conlleva el análisis de diferentes variables y factores de la técnica que componen un tratamiento de este tipo. Entre los factores más influyentes en la práctica podemos citar: el tipo de terreno, la presión de salida de la bomba, la velocidad de giro del varillaje, la velocidad ascensional, la longitud de la columna y el ángulo de inclinación de la misma.

En esta línea de investigación cabe la posibilidad de utilizar unos u otros métodos de cálculo: Diferencias Finitas, Elementos Finitos, etc. Se puede realizar toda la representación numérica con modelos bidimensionales, debido a su menor complejidad. Después de estudiar las posibilidades de diversos códigos, se decidió realizar simulaciones numéricas con el método MEF a través del código Plaxis, desarrollado en la Universidad de Delft a partir de 1987.

terreno

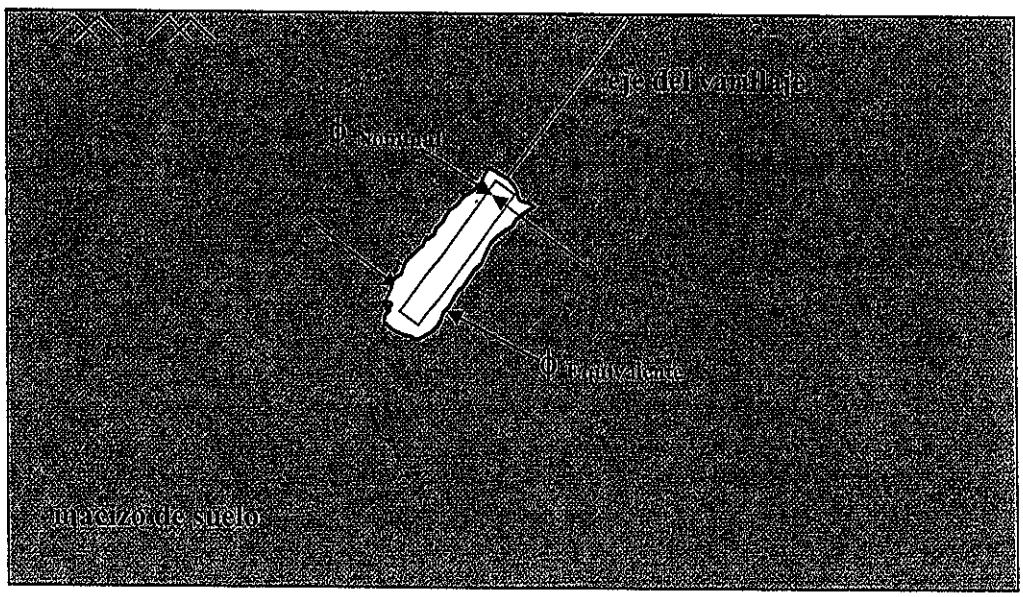

Figura 1.1: Croquis del concepto del diámetro equivalente.

Desde un punto de vista práctico este objetivo puede desdoblarse en dos diferentes tipos de análisis numérico:

1) En el primero se estudia la influencia, en el terreno, al ejecutar las columnas. Se estudian los levantamientos en superficie que se pueden producir al construir la columna (como se ha podido constatar en la realidad) y la magnitud de la zona mejorada (figura 1.2).

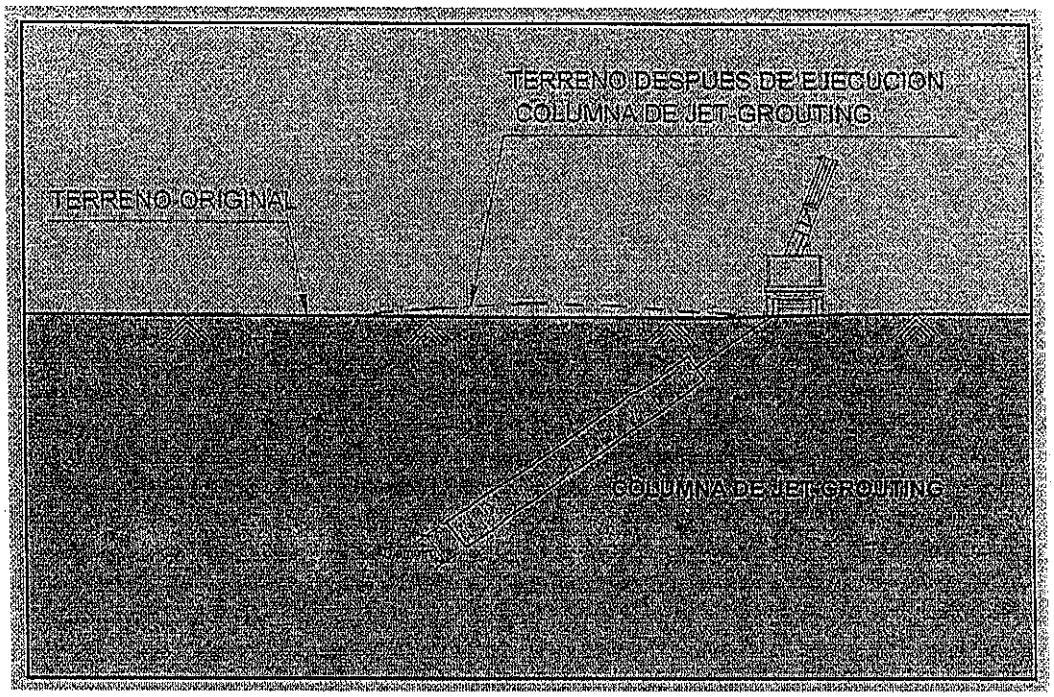

Figura 1.2: Efectos de la ejecución solo de columnas de jet-grouting.

2) En el segundo estudio se analiza la influencia de la ejecución de las columnas de jet-grouting, definidas por una columna equivalente (en deformaciones), y el conjunto columna y terreno afectado por su construcción asociado a la introducción de movimientos generados por la excavación de un túnel próximo (figura 1.3).

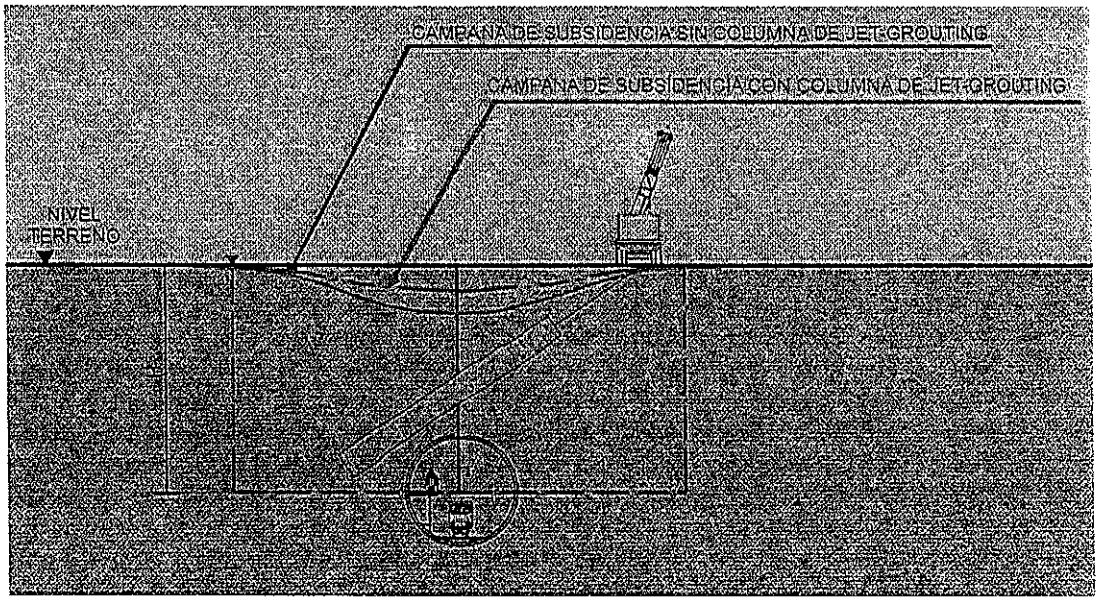

Figura 1.3 : Efectos de la construcción asociada con una excavación de túnel.

3) Uno de los modelos desarrollados representa una "columna equivalente" a partir del diámetro nominal de la columna, parámetros de diseño, propiedades del jet, estratigrafía y parámetros del suelo cuyas propiedades representen el efecto de la construcción de la columna sobre el terreno. Podemos definir una columna "equivalente" tal que su diámetro es superior al de la columna ejecutada, pero cuya deformabilidad sea **equivalente** al del conjunto de la columna nominal y de todo el terreno circundante afectado por el tratamiento (perforación, compresión por la introducción de la lechada, etc)

4) Modelos con diferentes configuraciones: A partir del análisis correspondiente a la representación de una sola columna, una vez definida la columna "equivalente", se han estudiado modelos teóricos con diferentes configuraciones, en especial un modelo con la configuración tipo "tienda de campaña" (o de V invertida), como tratamiento de protección previo a la excavación de un túnel próximo. Este estudio reproduce una situación ampliamente empleada en la última ampliación del Metro de Madrid y que se esta utilizando en la actualidad.

2. SIMULACIÓN NUMÉRICA

2.1 INTRODUCCIÓN

En las simulaciones numéricas se ha utilizado el código PLAXIS, específicamente desarrollado para aplicaciones en el campo geotécnico, el cuál permite analizar problemas de estabilidad y tensión-deformación, en deformación plana (2D), además de simular procesos de modificación y mejora del terreno, diferentes fases de construcción, etc. El nombre PLAXIS viene de las palabras inglesas PLasticity AXISymmetric y fue desarrollado a partir de 1987, inicialmente en la Universidad de Delft (Holanda).

Este programa constituye una buena herramienta de cálculo para el análisis de problemas geotécnicos. La experiencia adquirida en su uso durante los últimos años hacen de él un instrumento de cálculo suficientemente conocido y experimentado.

Trabaja en el entorno de Windows (en la versión 8.1), con un PC sin excesivos requerimientos en cuanto a memoria y velocidad de proceso.

Plaxis utiliza la técnica de los Elementos Finitos para la resolución numérica de las ecuaciones que rigen el equilibrio estático de un sistema sometido a distintos procesos de cargas. Los cálculos se realizan en dos dimensiones (2D) bajo las hipótesis de deformación plana o de simetría axial, o sea bidimensionales y axilsimétricos.

Como en otros programas de elementos finitos de carácter más general, los análisis tipo están dividido en tres etapas: preproceso, cálculo y postproceso. A continuación se exponen las tres etapas, señalando las características y posibilidades del programa.

En nuestro caso, como se trata de filas de columnas, se ha decidido abordar el análisis en 2D, ya que en 3D supone una seria complicación de tiempo y medios disponibles.

2.2. FASE DE PREPROCESO

En el preproceso se introduce la geometría, parámetros de los materiales, nivel freático, estructuras, tipo de vinculación, etc. En esta fase se adopta también la densidad de la malla que se utilizará. Se trata de introducir toda la información de partida en cuanto a:

A) Elección del tipo de modelo a utilizar: Deformación plana o axilsimétrico.

- Deformación plana para estructuras donde predomina una dimensión (longitud), con generatrices paralelas a un eje, estando sometido a acciones normales, y de valor constante, a las generatrices.
- Modelo 3D axilsimétrico para estructuras cuya geometría, propiedades geomecánicas y cargas presenten simetría axial.

B) Tipo de elemento. **PLAXIS** utiliza elementos triangulares de 6 o 15 nudos con dos grados de libertad por nudo. Con los elementos de 15 nudos se obtienen resultados más precisos, si bien se requiere mayor potencia de cálculo.

C) Características geométricas: Contornos, separación de distintas zonas diferenciadas según sus propiedades geomecánicas, diferentes zonas por procesos constructivos. Se distinguen pues diferentes áreas con características diferenciadas.

D) Definición de elementos estructurales: Permite el uso de elementos viga de 3 o 5 nodos (con tres grados de libertad por nodo), para simular estructuras delgadas, con rigidez a flexión y rigidez longitudinal (revestimientos del túnel, muros pantalla, losas de cimentación, etc.). Elementos con sólo rigidez longitudinal y que únicamente pueden trabajar a tracción como es el caso de los geotextiles. Elementos "interface" para modelar el contacto y su interacción entre elementos estructura-terreno. Elementos muelle con rigidez axial (puntales y tirantes entre puntos).

E) Tipos de vinculaciones: Se puede restringir movimientos en determinados puntos, limitando desplazamientos en sentido vertical, horizontal, etc.

F) Cargas: Se pueden definir cargas superficiales y longitudinales, con componentes tanto horizontales como verticales.

G) Propiedades geotécnicas y mecánicas de todos los materiales que intervienen en la simulación dentro de las áreas definidas geométricamente y de los elementos estructurales, existiendo, por ejemplo, la posibilidad de introducir un aumento del módulo de deformación y de la cohesión con la profundidad

H) Modelos de comportamiento: El programa considera distintos modelos constitutivos para modelizar el comportamiento de los materiales que representan el terreno: elástico lineal, plástico perfecto y plástico con endurecimiento. El modelo de comportamiento elástico está definido por el módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson. Un modelo elastoplástico perfecto con plasticidad no asociada, con el criterio de rotura formulado mediante Mohr-Coulomb está definido por el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, cohesión, ángulo de rozamiento y ángulo de dilatancia. El código tiene implementado también un modelo con endurecimiento, desarrollado por Shanz (1998) en el que la superficie de fluencia puede expandir debido a la deformación plástica. El modelo permite tener en cuenta el carácter no

lineal de la relación tensión-deformación. En cuanto al material, puede seleccionarse con comportamiento drenado, no drenado y no poroso.

Transcurrida esta primera parte de asignación de las propiedades de elementos estructurales, características del terreno y modelaciones a emplear, se procede a generar la malla de elementos finitos con las condiciones expresadas. Como herramienta del programa, esta malla puede ser densificada en su conjunto o según áreas concretas (clusters).

Creada la malla, se introducen las condiciones en lo que se refiere a condiciones de borde y situación del nivel freático. A continuación se define el estado tensional inicial, desactivando aquellos elementos y estructuras que no forman parte del estado inicial. El código permite definir el estado tensional inicial mediante un coeficiente, Ko, de empuje al reposo.

2.3. FASE DE CÁLCULO

Con toda la información de partida y modelada la situación inicial, se procede al cálculo de las distintas partes y fases en las que se puede desglosar la simulación, tratando de reproducir el correspondiente proceso constructivo. Esta fase de cálculo permite simular cada obra con sus distintas etapas constructivas, imponer fuerzas de presión, relajación de tensiones en los macizos, expansión volumétrica, etc. Esto se consigue activando y desactivando los distintos elementos, cargas, situaciones del terreno, etc.

PLAXIS dispone de tres tipos básicos de cálculo:

A) Cálculo plástico: Es el aplicable cuando no se producen grandes deformaciones y se parte del estado de tensiones inicial definido en el preproceso, con deformaciones nulas. Existen diferentes posibilidades de intervenir en este proceso de cálculo, en el que se puede permitir variar la distribución de presiones de agua, modificar los parámetros geotécnicos del terreno, introducir parámetros que simulan la relajación parcial de tensiones al efectuar la excavación de un túnel e incluso considerar una expansión volumétrica.

B) Análisis de consolidación: Utilizado para el análisis del desarrollo y disipación de presiones intersticiales en suelos cohesivos en una escala temporal, permite analizar la evolución en el tiempo de tensiones, movimientos, deformaciones, etc.

C) Cálculo con malla actualizada: Se realiza cuando se tienen en consideración grandes deformaciones que impliquen cambios significativos de la geometría.

2.4. FASE DE POSTPROCESO

En esta fase se pueden observar los resultados de los cálculos realizados. Estos resultados se representan por medio de gráficos y tablas con todos los valores obtenidos, como son:

- esfuerzos y movimientos en elementos estructurales (esfuerzos en revestimientos, esfuerzos de cizalla, momentos flectores, desplazamientos máximos y mínimos, etc).
- estado tensional (tensiones verticales y horizontales, totales y efectivas, principales, tensiones principales, etc).
- movimientos en las diferentes partes del modelo (en superficie, en profundidad, etc.).
- análisis de flujos (red de flujos).
- geometrías deformadas, etc.

Los gráficos pueden ser generados en múltiples formatos (líneas equipotenciales o mediante gradación colorimétrica). Estas salidas que el Plaxis genera son un complemento bastante útil a la hora de comparar los resultados obtenidos con los estimados previamente, pues visualmente posibilitan una rápida interpretación.

3. METODOLOGÍA DESARROLLADA PARA EL CÁLCULO DE COLUMNAS DE JET-GROUTING

3.1. INTRODUCCIÓN

Son diversas las formas en las que se puede representar y enfocar un tratamiento del terreno en jet-grouting. Después de haber estudiado algunos modelos numéricos, se llegó a la conclusión de que una buena representación sería aquella que nos permitiese reproducir diferentes situaciones:

1ª. Modelos representado una sola fila de columnas de jet-grouting.

2ª. Modelos representando la influencia de las columnas sobre edificios en la superficie.

3ª. Modelo con la "columna equivalente", que es el diámetro equivalente de la columna de jet, o sea, la zona que realmente mejora y la medida en la que lo hace. Este diámetro (columna) "equivalente" no se representa con presiones ni dilataciones, más con una mejora del Modulo de Elasticidad del terreno

4ª Modelos representando diferentes configuraciones.

A continuación se describe cada una de las fases

3.2. REPRESENTACIÓN NUMÉRICA DE UNA COLUMNA DE JET-GROUTING

Se ha considerado un modelo constituido por una sola fila de columnas de jet-grouting, analizando su comportamiento tenso-deformacional, fundamentalmente las tensiones ejercidas sobre el terreno y los movimientos originados en la superficie. Las mayores dificultades de este análisis radican en la cantidad de factores que intervienen en este tipo de proceso de inyección, siendo los más influyentes el tipo de terreno, la presión de la lechada y la velocidad de extracción del varillaje. Teniendo en cuenta las longitudes medias que habitualmente se ejecutan en los tratamientos previos a la

construcción de un túnel, se decidió fijar la longitud de la columna en 12 m, variando la inclinación y el diámetro de la misma.

En los primeros modelos desarrollados se prestó especial atención a la simulación de la velocidad de ascensión del jet, intentando reproducir la formación de la columna por etapas a lo largo de su longitud. Sin embargo el cálculo presentaba numerosos problemas numéricos, principalmente de convergencia y los resultados que se obtenían, en los casos que se alcanzaban, distaban de la realidad en cuanto a los movimientos en la superficie del terreno.

Para representar la presión ejercida sobre el terreno por la columna de jet-grouting durante su ejecución, se utilizó una de las varias posibilidades que permite el código Plaxis: el cambio de volumen. Los cambios de volumen utilizados deben estar en correspondencia con las presiones que son necesarias y utilizadas en la práctica para la destroza del terreno y posterior mezcla. La deformación volumétrica (ε_v) utilizada se ha situado en el rango del 1% al 3%. Este intervalo de valores por un lado se explica por los levantamientos máximos producidos en la superficie, los cuales no deben superar un cierto valor ya que las estructuras no toleran valores de levantamientos algo significativos. Por otro lado, estas deformaciones de volumen, se sitúan en el rango de las adoptadas en el apartado 3.5, donde se analiza la distribución de presiones en torno a una columna cuando se considera una deformación volumétrica en el volumen ocupado por ésta.

Lo que en realidad, a efectos de cálculo, está representando el modelo es una pantalla de espesor **a**, que se corresponde en inercia a una fila de columnas al tresbolillo como la presentada en la figura 3.1.

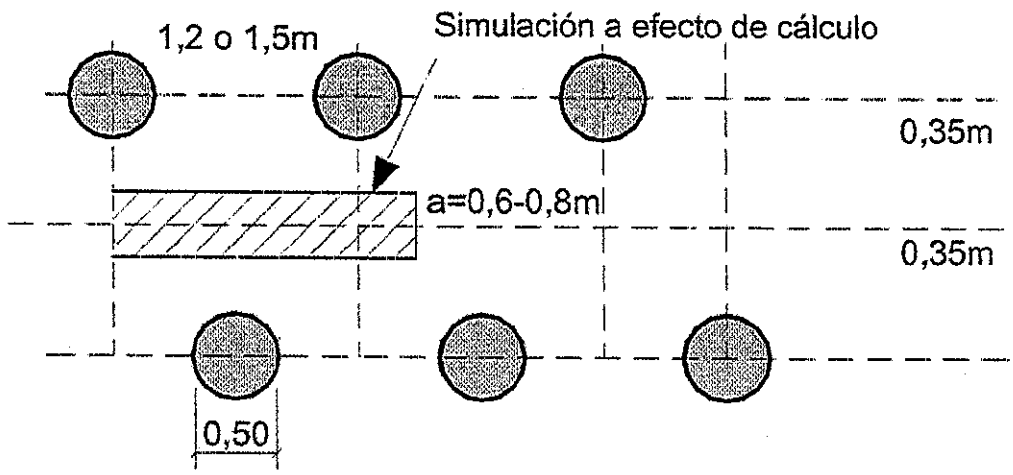

Figura 3.1: Equivalencia en inercia de las filas de columnas.

La situación aquí analizada trata de simular únicamente los efectos de una fila de columnas (de la forma esquematizada en la figura 3.1), de una determinada longitud, con distintas inclinaciones y diámetros, considerando diferentes tipos de suelo. Se han adoptado dos diámetros: 60cm. y 80 cm. (ancho de la pantalla en 2D, equivalente en inercia a una distribución al tresbolillo como la indicada en la figura 3.1), tres inclinaciones (α = 0, 45° y 60°, con la vertical), y dos tipos de suelo, típicos de Madrid (relleno y terciario), de acuerdo con el croquis de la figura 3.2.

La selección de las inclinaciones (0° - 45° - 60° con la vertical) se corresponde con la experiencia habitual, siendo las inclinaciones de 0° (vertical) y de 45° las más utilizadas. Estas inclinaciones se determinan en relación a la vertical del punto en superficie desde donde se introduce el eje del varillaje.

La columna vertical es muy utilizada cuando se trata de obtener barreras continuas (muros-pantallas) para aminorar el efecto de la cubeta de subsidencias, en calles muy angostas y en edificios muy próximos a la calle, sin grandes aceras, con poco espacio para maniobras

La inclinación de 45° es muy utilizada en la práctica, debido a su estabilidad ya que presenta menos problemas (cierre de la perforación, control de rechazo, etc.) que columnas más inclinadas y a la capacidad de maniobra de los equipos en calles muy estrechas. Su mayor ventaja es que necesita, en la mayor parte de las veces, menor

longitud de columna que las barreras verticales para cortar la cubeta de subsidencia (en forma de campana de Gauss), resultando más económicas.

La columna de 60° con la vertical es un elemento con una componente horizontal excesiva, pero que ofrece la ventaja de poder trabajar con taladros muy largos, lo que muchas veces se hace necesario debido a la poca disponibilidad de espacio en la superficie, obligando a estar al otro lado de avenidas o calles anchas.

La geometría del modelo se compone por una masa de suelo rectangular con un resguardo de 4 m desde la superficie hasta la cabeza de la columna, adoptándose para el material situado por debajo propiedades análogas a las de arena de miga (Terciario 1). No se ha considerado la existencia de un nivel de agua. Los bordes del modelo se han alejado lo suficiente como para que su interferencia no se deje sentir en el estado tensión-deformación en torno a la columna simulada. Se han mantenido las tres inclinaciones y los dos diámetros del modelo anterior. Las deformaciones volumétricas varían entre el 1% y el 3%(figura 3.2).

En otra representación se consideraron 10 m de material tipo relleno desde la superficie hasta la mitad de la columna, adoptando para el resto del material las características correspondientes al material denominado Terciario 1 (arena de miga). Se consideran las mismas inclinaciones y diámetros. Las deformaciones volumétricas se situan en el rango de las adoptadas en los modelos anteriores.

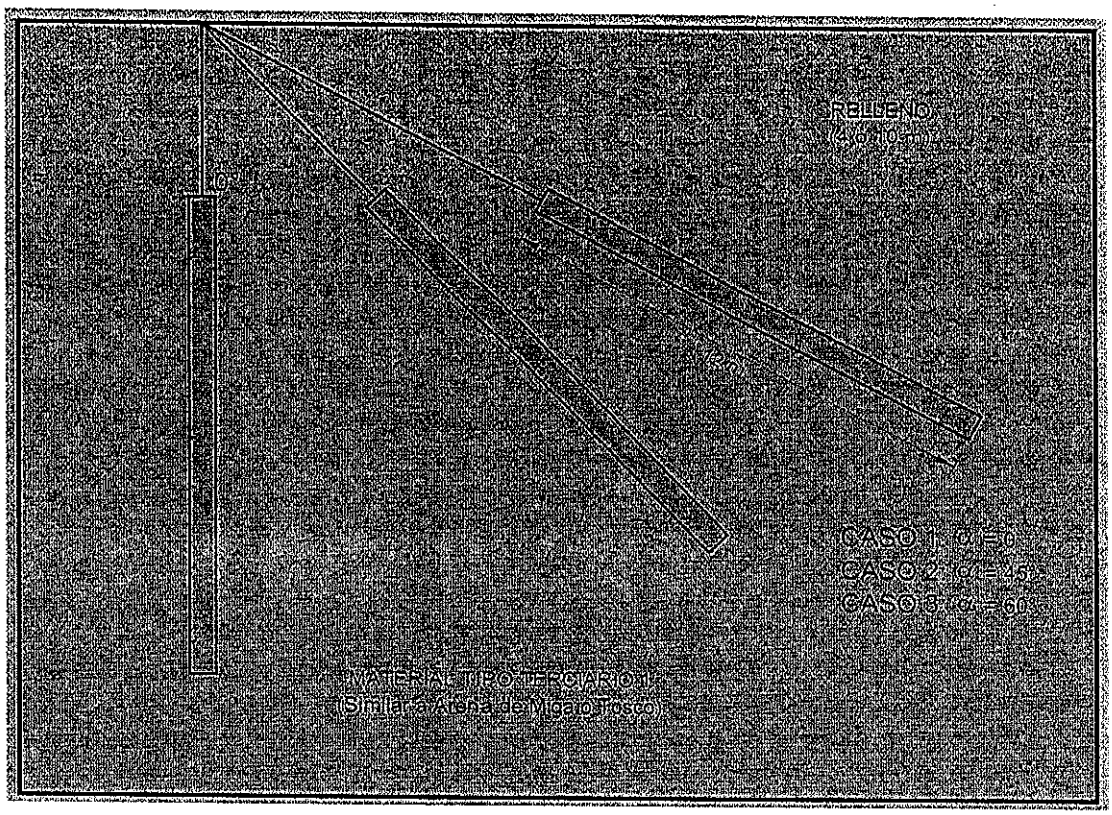

Figura 3.2: Croquis del modelo con geometrías con 4 m o 10 m de material más flojo.

Consideramos que la metodología con la que mejor hemos podido simular un tratamiento con jet-grouting, consta de dos fases de calculo. Estas fases representan las fases de ejecución de una columna de jet-grouting A continuación se explican cada una de estas fases y se presenta un croquis ilustrativo.

Fase inicial:

- Cálculo del estado inicial de tensiones en el que actúa sólo el peso propio del terreno. Para las tensiones horizontales se ha adoptado un coeficiente de empuje al reposo

1ª. Fase:

- En esta fase se imponen desplazamientos nulos en las líneas que definen el principio y final de la columna.

- En esta misma fase se simula la inyección, mediante la modificación de las propiedades de los materiales situados dentro del rectángulo que define la columna, asociado a una deformación volumétrica del 1% al 3% (para

representar el cambio del volumen). El nuevo material tiene propiedades muy superiores al suelo anterior (propiedades de jet-grouting).

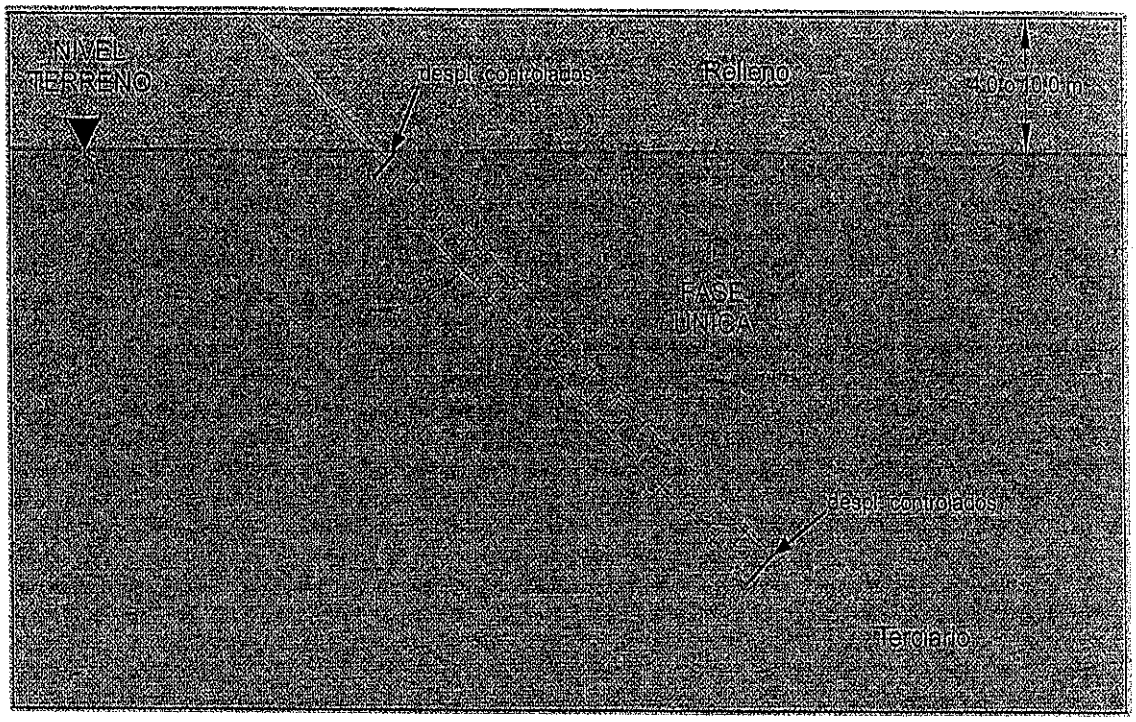

Figura 3.3: Metodología de cálculo para una columna de jet-grouting.

El procedimiento desarrollado y explicado anteriormente, permite, a nuestro juicio, una simulación aceptable del tratamiento con columnas de jet. Es la base de todos los modelos posteriores de nuestro estudio: con y sin edificios, con túneles, con distinta configuración de columnas, etc.

Debido a la considerable cantidad de simulaciones realizadas con el modelo homogéneo y con el modelo bicapa (con 4 m o 10 m de suelo más blando), solo se presentan aquí los algunos resultados obtenidos con este ultimo modelo.

La figura 3.4, a continuación, representa los movimientos en superficie de una columna de jet-grouting de 80 cm de diámetro nominal, con una inclinación de 45° con la superficie del terreno. La columna esta inmersa en un material Terciario con propiedades de arena de miga. Por encima de la columna hay 4 m. de material flojo con propiedades similares al Relleno.

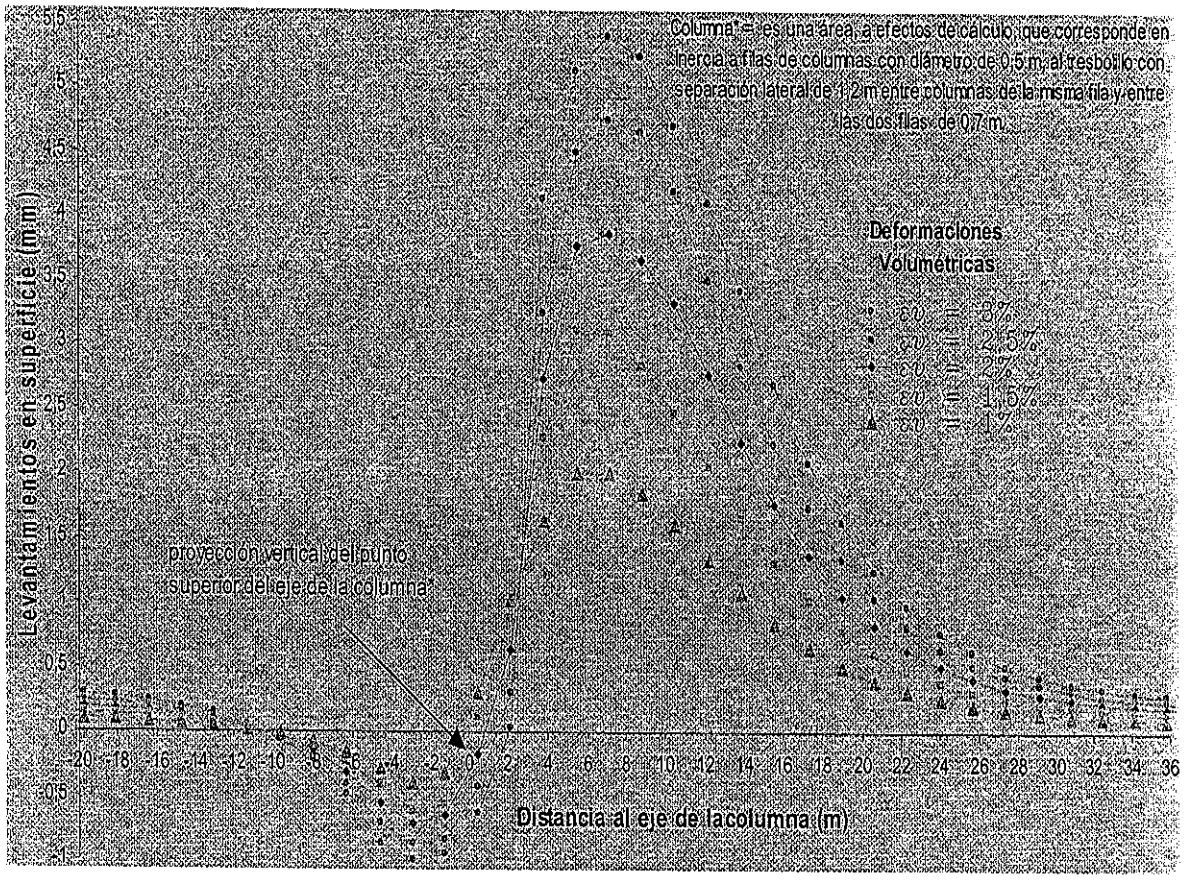

Figura 3.4: Columna de diámetro de 80 cm, inclinada 45°, con 4 m de material blando sobre la parte superior de la columna.

Se observa que los máximos levantamientos, para el rango de deformaciones volumétricas utilizadas, varían de 1,9 a 5,5 mm. En relación con estos levantamientos, cabe señalar que 5,5 mm es un valor algo considerable. Dependiendo del tipo de cimiento de las estructuras cercanas, una magnitud de ascenso de 5 mm puede provocar daños importantes. Se obtuvo un asiento inferior a 1mm (para una deformación volumétrica, ε_v = 3%), que es un valor bajo y que puede perfectamente presentarse en la práctica

Cuando se analiza los levantamientos generados en el mismo modelo, pero con 10 m de material blando (desde la mitad de la columna hasta la superficie), la magnitud de los levantamientos máximos en la superficie es bastante superior que en el modelo con 4 m de suelo flojo. El orden de magnitud de estos levantamientos van desde 2,4 mm hasta 7 mm. Aquí también se observa un asiento no significativo de 0,5 mm cuando se adopta la máxima deformación volumétrica (ver figura 3.5).

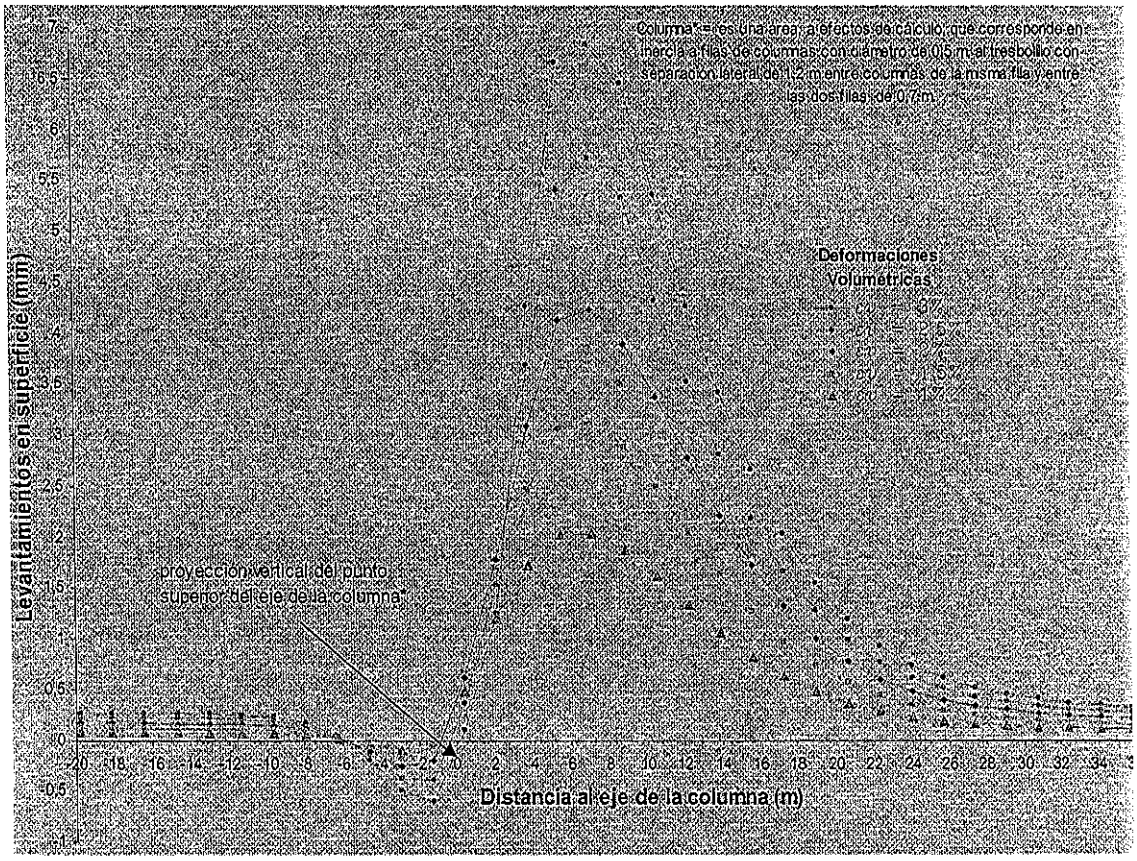

Figura 3.5: Columna de diámetro de 80 cm, inclinada 45°, con 10 m de material blando (4 m de ellos sobre la parte superior de la columna).

Además de la magnitud de los levantamientos superficiales, las situaciones expuestas se diferencian en el ancho de la zona que sufre levantamientos, más reducida cuanto mayor es la cantidad de material blando

El modelo presentado en la figura 3.6, difiere de los modelos anteriores en que el diámetro de la columna es menor (60 cm). La inclinación de la columna es 45°. Se considera un nivel de 4 m de suelo blando por encima de la columna.

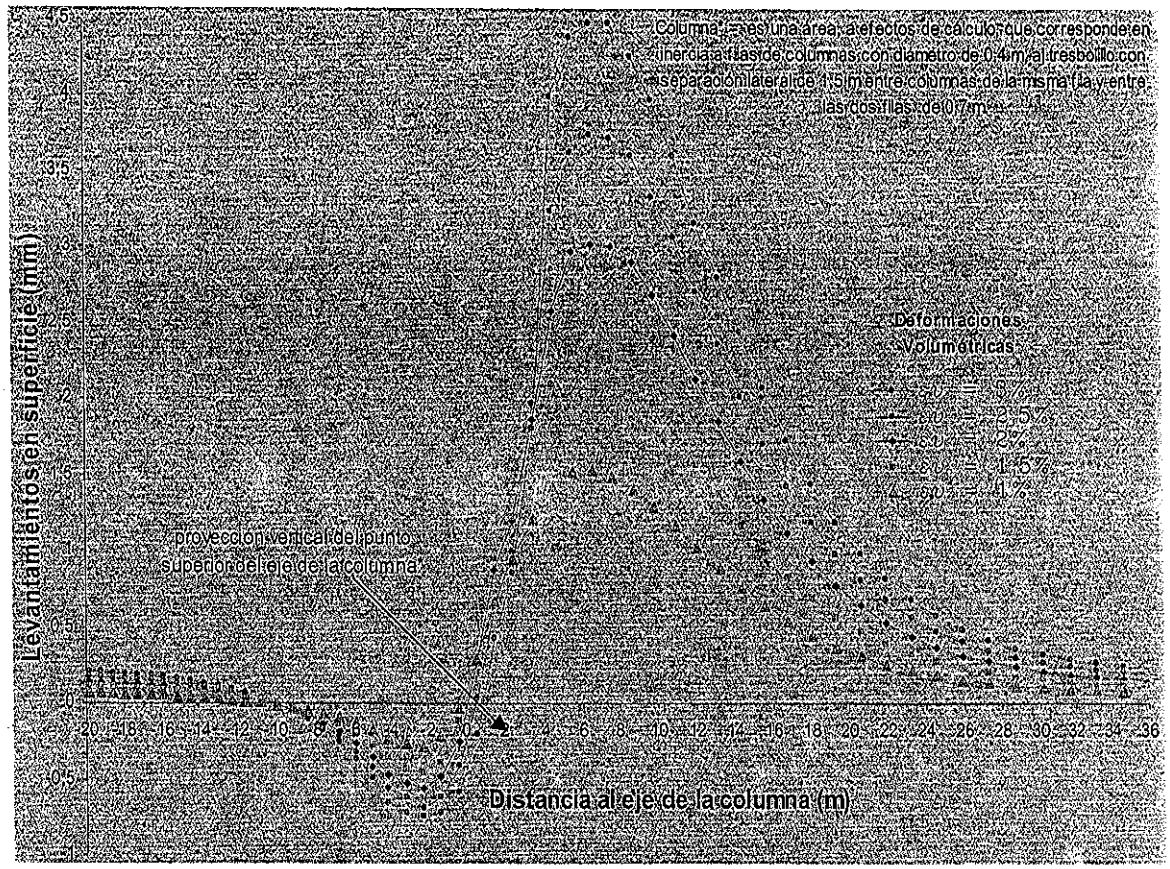

Figura 3.6: Columna de diámetro de 60 cm, inclinada 45º, con 4 m de material blando sobre la parte superior de la columna.

Como era de se esperar, un diámetro menor produce menos influencia en el entorno, y en consecuencia en los levantamientos superficiales Los levantamientos son inferiores a los obtenidos en su modelo homólogo, con columna de 80 cm de diámetro. El ascenso máximo es de 4,4 mm para una deformación volumétrica ε_v = 3%) y el mínimo de 1,2 mm para ε_v = 1%. El máximo descenso es inferior a 1mm

En la figura 3.7, con una columna con diámetro de 60 cm, se puede observar los levantamientos provocados por la introducción de la columna con 10 m de suelo blando.

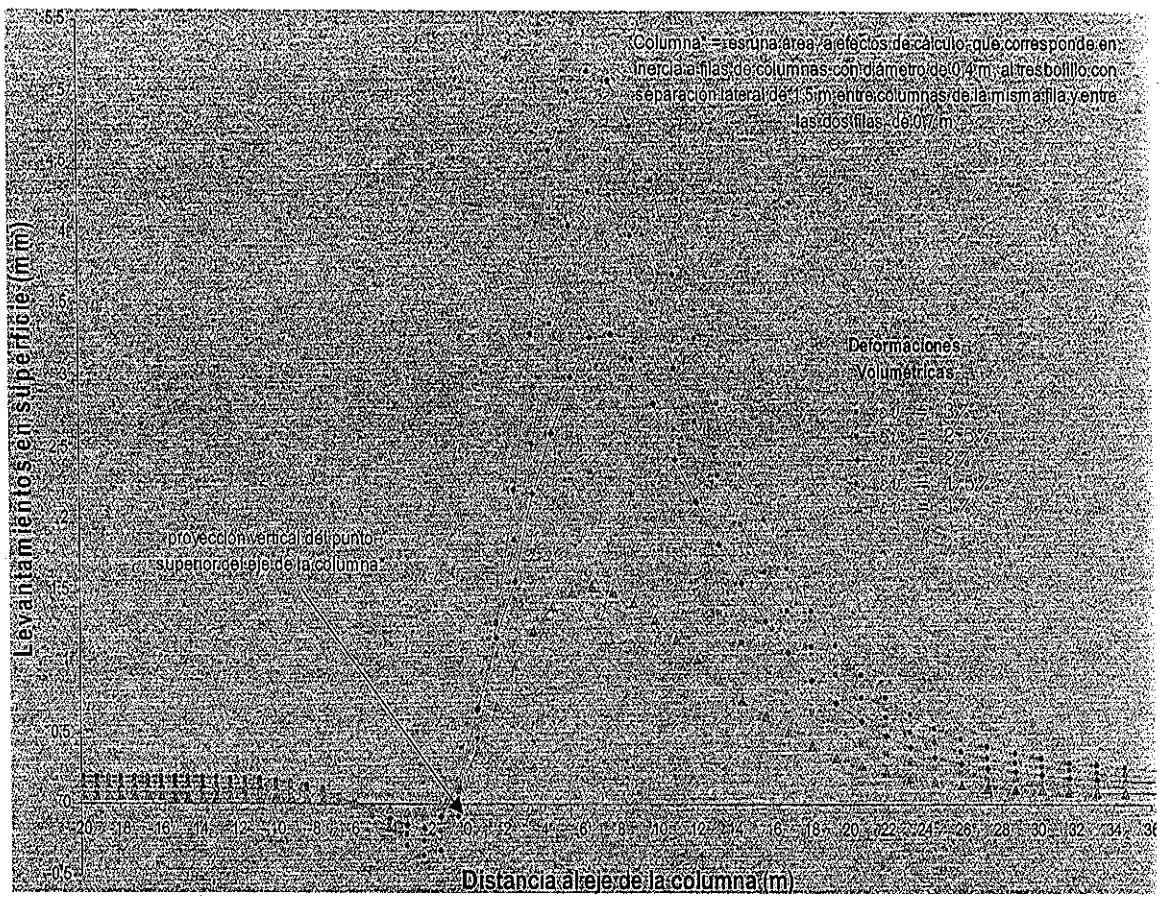

Figura 3.7: Columna de diámetro de 60 cm, inclinada 45º, tiene 10 m de material blando (4 m de ellos sobre la parte superior de la columna).

El levantamiento mínimo es de 1,5 mm y el máximo de 5,5 mm. En este caso, como en el del modelo con columna de diámetro de 80 cm, hay un descenso muy bajo, del orden de 0,35 mm. Se observa, al igual que en el modelo con columna de 80 cm de diámetro, que a más material blando más reducida y concentrada es la zona que sufre los mayores levantamientos.

La sensibilidad y la práctica del ingeniero ponen de manifiesto que los levantamientos son mayores cuanto mayor es el espesor de material blando, y esto se verifica en los resultados obtenidos, tanto en la columna de 60 cm como en la de 80 cm.

En los gráficos presentados, es importante observar la tendencia de la curva de levantamientos, la cual tiene una fuerte similitud con la forma de las curvas reales. Puede decirse que cuanto mayor es el diámetro de la columna, mayor es su influencia en el macizo y su entorno. En relación con los asientos originados por la columna, podemos señalar que cuanto mayor es el espesor de la capa de material blando, menor es el asiento que se genera.

En todos los resultados de los modelos presentados anteriormente se observa un mismo comportamiento: una zona de levantamientos y una de pequeños asientos. La figura 3.4 y 3.5 difieren en cuanto al espesor del material blando. En la figura 3.5 hay más espesor de este material y, por lo tanto, son mayores los levantamientos superficiales y menores los asientos. Las figuras 3.6 y 3.7 también se distinguen en cuanto al espesor del suelo blando, pero en relación a las figuras anteriores el diámetro de la columna es menor: 60 cm. Ponen de manifiesto, tal como ocurre en la realidad, que un diámetro inferior tiene menor influencia en la superficie del terreno, tanto en levantamientos como en asientos.

3.3. REPRESENTACIÓN DE LA INFLUENCIA DE COLUMNAS DE JET-GROUTING SOBRE EDIFICIOS PRÓXIMOS

La geometría del tratamiento con jet-grouting viene impuesta por una gama de factores entre los que cabe señalar: edificaciones próximas o no a la calle, aceras estrechas o anchas, tipo y antigüedad de la estructura, profundidad, tipo, y estado de las cimentaciones del edificio, anchura de la calle (pocos o muchos carriles), tipo de calle (locales, colectoras o arteriales), profundidad y diámetro de la excavación, material de cobertura en clave, presencia de servicios problemáticos, presencia o ausencia de agua, etc. (figura 3.8).

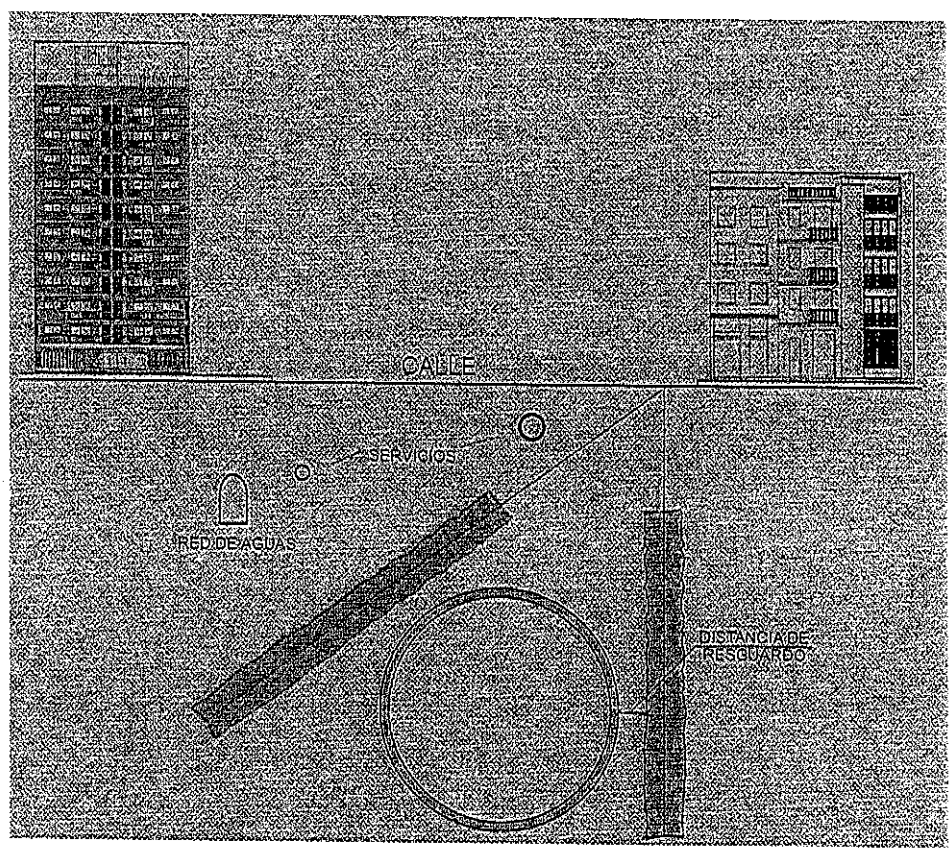

Figura 3.8: Tipos de problemas y soluciones de tratamientos.

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del tratamiento del terreno mediante jet-grouting es la protección de edificios frente a una excavación subterránea, se ha desarrollado un estudio para analizar la influencia de la ejecución de una fila de columnas de jet en un edificio próximo.

Para ello se ha simulado la ejecución de una fila de columnas de 12 m de longitud Los parámetros variables del tratamiento son los diámetros de 60 y 80 cm (espesor de la pantalla equivalente en inercia a las filas de columnas de jet-grouting distribuidas al tresbolillo) y dos inclinaciones: vertical e inclinada 45°. Se estudiaron distintas distancias de la columna a la fachada del edificio. En las columnas verticales se analizaron columnas con edificios a 1,5 m, 3 m y 5 m de distancia. Para la columna inclinada a 45° los edificios se situan a 3 m, 4 m, 6 m, 9 m y 12 m.

Las curvas de levantamientos teóricas obtenidas en la simulación numérica se comparan con los datos disponibles relativos a movimientos experimentados por edificios en zonas donde se ha efectuado un tratamiento con jet-grouting.

Aunque también se han analizado los efectos debidos a la ejecución de columnas con una inclinación de 60°, no se presentan los resultados por no disponer de datos reales.

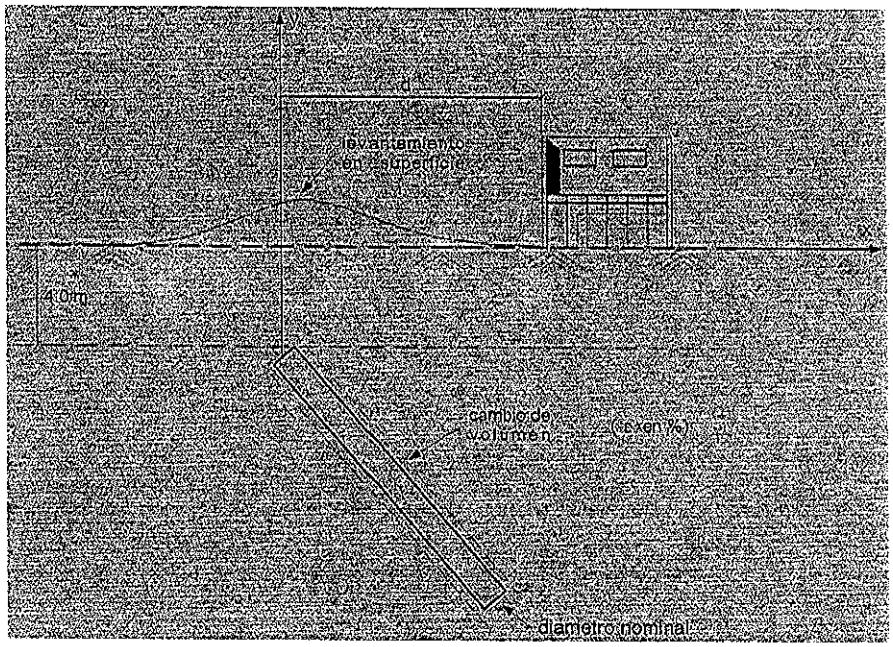

Figura 3.9: Croquis de una columna inclinada con 4 m de material flojo desde la parte superior de la columna hasta la superficie

En primer lugar se define la geometría del modelo: situación, diámetro e inclinación de las columnas y situación del edificio. En esta fase del preproceso se definen también los bordes de la malla y las condiciones de contorno (en general se impiden los movimientos horizontales en los bordes laterales y todos los movimientos en el borde inferior).

A continuación se definen los distintos niveles de terreno a considerar (Relleno, Terciario 1, Terciario 2), con sus propiedades geomecánicas. En todos los casos se ha considerado un comportamiento elastoplástico de los materiales, con el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

El estado inicial de tensiones se introduce mediante la definición de un coeficiente, K_0, de empuje al reposo.

Finalizada la fase de preproceso, se pasa a la fase de cálculo Esta es la fase a la que más atención se ha prestado en la metodología desarrollada.

La metodología que se describe a continuación tiene en cuenta la propia ejecución del jet-grouting. Para simular la destroza del terreno circundante e inyección de lechada, se utiliza la deformación volumétrica ε_v (%), opción disponible en el código PLAXIS.

Se han considerado las siguientes fases:

Fase inicial:

- Definición, mediante un coeficiente de empuje al reposo del estado inicial de tensiones (K_0 = 0,5 en el relleno y K_0 = 0,8 en materiales terciarios).

1ª. Fase:

- Se simula la existencia de un edificio. Los edificios se localizan a distancias variables de la columna y tienen 20 m. de longitud. La cimentación del edificio esta compuesta por 5 zapatas de 2,5 m. de ancho, con distancia de 4 m de centro a centro de zapata. Se ha supuesto que las zapatas transmiten al terreno un presión de 1,5 kg/cm^2

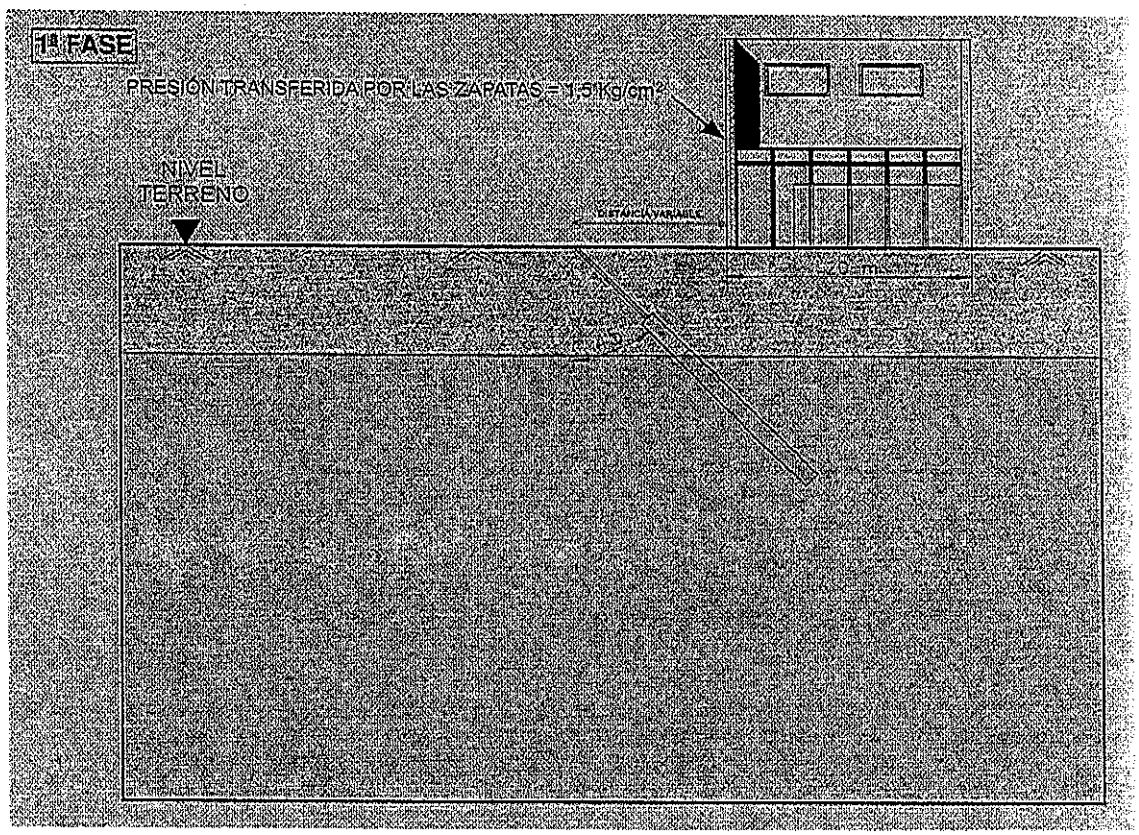

Figura 3.10: Introducción de las cargas referentes al peso del edificio.

2ª. Fase:

- En primer lugar se anulan los desplazamientos originados por las acciones transmitidas por el edificio.

- Se prescriben desplazamientos nulos en los extremos de la columna (en la dirección del eje).

- En esta misma fase se simula la inyección considerando una modificación del material de dentro del rectángulo que simula la columna, asociado a una deformación volumétrica del 1% al 3% (para representar el cambio del volumen). El nuevo material que rellena el rectángulo de la columna tiene propiedades muy superiores al suelo anterior (propiedades de jet-grouting).

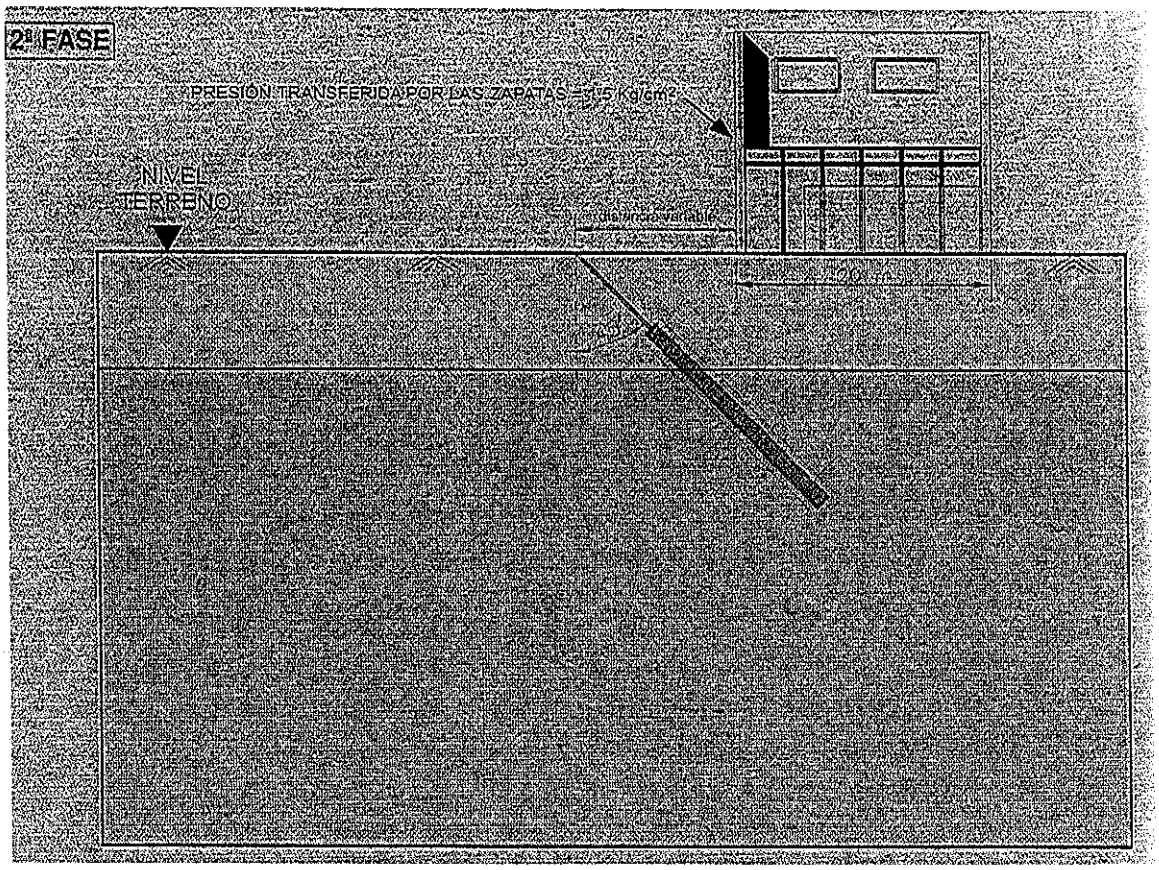

Figura 3.11: Simulación de la inyección de jet-grouting de la columna.

En relación con la cimentación del edificio, en los primeros tanteos se utilizó una estructura tipo losa. Analizando los resultados obtenidos, se decidió cambiar la cimentación para zapatas, y así estaría considerándose una estructura porticada en la que es más sencillo reproducir asientos diferenciales entre pórticos.

La deformación del volumen, ε_v,, que posibilita representar la destroza y posterior inyección de lechada, se produce en todas las direcciones del rectángulo de la columna por lo que también se producen desplazamientos en la dirección del eje de la misma, poco acordes con la realidad. Para evitar este problema se coaccionan los movimientos, en la dirección del eje, en los extremos de la columna.

3.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO CON MEDIDAS REALES.

Una vez realizados los cálculos, contemplando la existencia de edificios y utilizando la metodología propuesta, se han comparado los resultados con diversos datos disponibles.

Para ejecutar este estudio, se han utilizado los datos reales registrados en las distintas obras de las últimas dos ampliaciones del Metro de Madrid, 1995-1999 y 1999-2003. Personalmente la autora de estas páginas ha intervenido en alguna de las obras que se citan (principalmente en la zona del Paseo de La Habana y en Alcorcón y Leganés), formando parte del equipo que dirigía uno de los directores de la tesis. En estas obras colaboró con Geocisa y la USAC del MINTRA en la definición de controles a realizar, instalación de sensores y referencias, ejecución de medidas y elaboración de informes con los resultados obtenidos en campo. El resto de los datos se deben a la gentileza de la Dirección del MINTRA, organismo que ha llevado a cabo la construcción de la Ampliación del Metro (1995-2003).

A continuación, se presenta el gráfico que contiene estos datos reales, los cuales se componen de levantamientos provocados en fachadas de edificios por columnas verticales e inclinadas ubicadas a diferentes distancias de la fachada (figura 3.12).

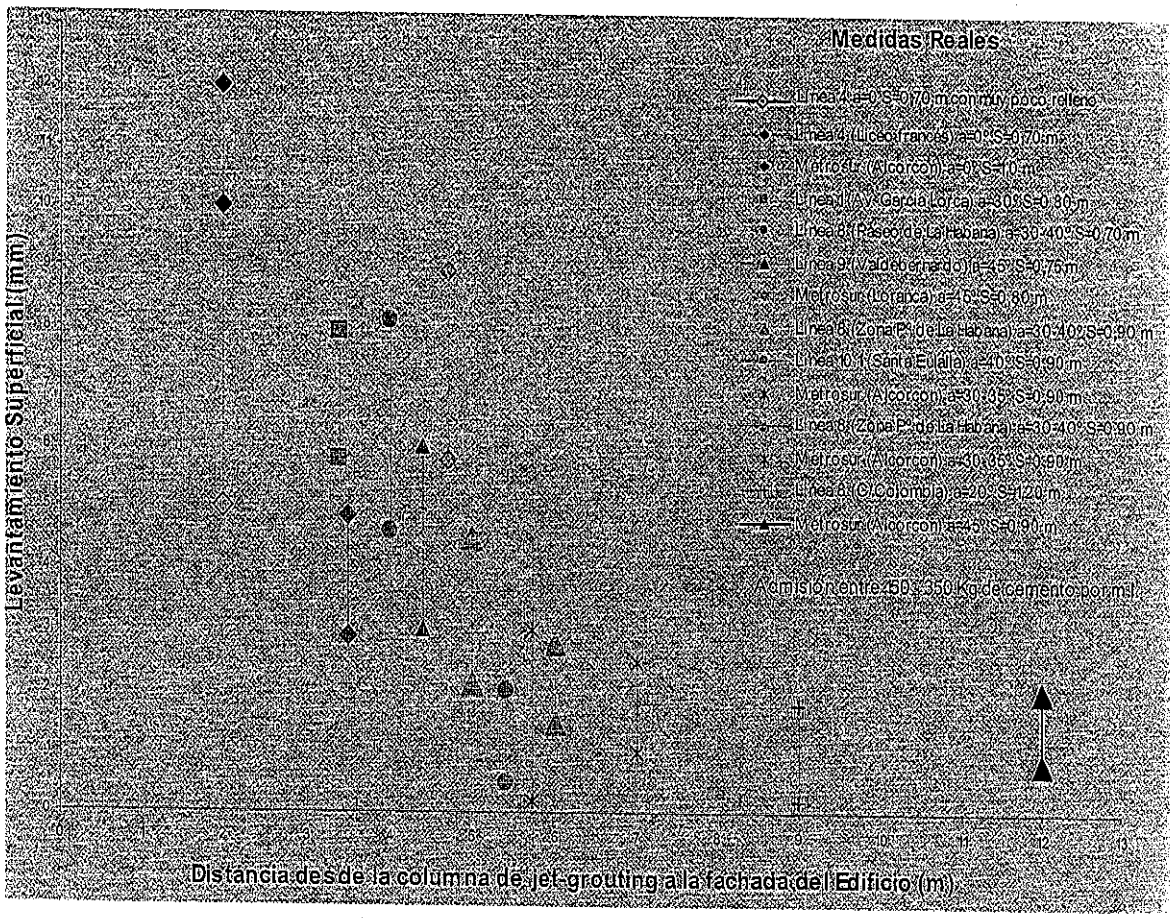

Figura 3.12: Levantamientos en fachada originados por diversas barreras de jet-grouting (datos reales).

En la figura 3.12 se resumen los datos disponibles. El diámetro de las columnas está comprendido entre 0,7 m y 0,8 m. El ángulo de inclinación (a) del eje de la columna con la superficie del terreno es variable y la distancia (d) de la columna a la fachada del edificio también. La separación entre filas de columnas es 0,50 m, y en el sentido longitudinal, de centro a centro, la separación (S) varía de 0,70 m hasta 1,2 m (figura 3.13).

3.5. ESTUDIO DE LAS PRESIONES ORIGINADAS EN EL TERRENO POR UNA DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA

Para llegar a definir la columna equivalente es preciso conocer la distribución de presiones alrededor de una columna cuando se considera una deformación volumétrica.

Mediante el modelo elastoplástico axilsimétrico de la figura 3.16, donde se observa un corte longitudinal a lo largo de la columna, y considerando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb se han analizado tres situaciones, con diámetros de 40 cm, 60 cm y 80 cm.

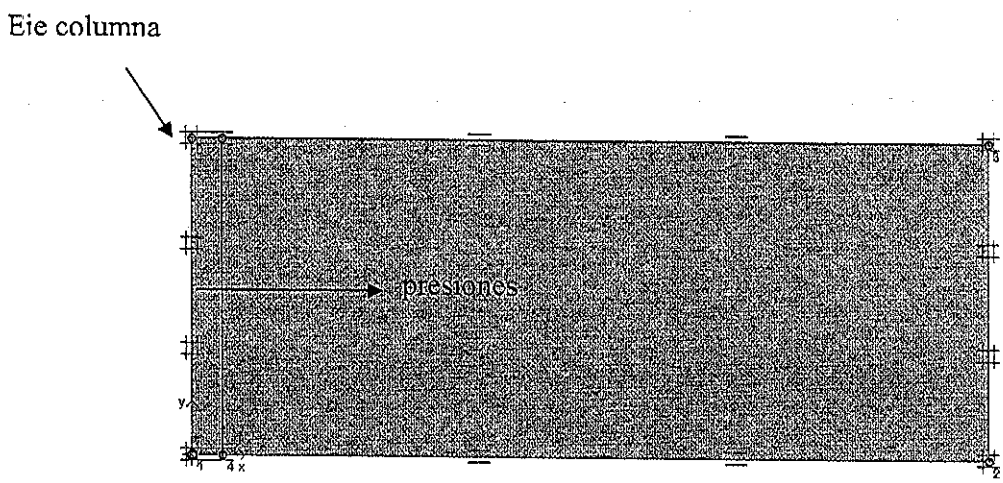

Figura 3.16: Geometría estudiada para columna de 60 cm de diámetro. Representación de un corte longitudinal a lo largo de la columna.

Los parámetros del suelo y del jet-grouting utilizados son los reflejados en la tabla 3.1.

Adoptando un terreno sin peso, se considera una sola fase de cálculo, en la que una vez modificadas las propiedades del terreno en la columna se supone una deformación volumétrica donde para ε_v se han tomado valores comprendidos entre 0,5 % y el 5 %.

Tabla 3.1: Parámetros geotécnicos utilizados.

TIPO DE MATERIAL	E carga (kN/m^2)	c´ (kN/m^2)	ϕ (°)	ν	K_0
Relleno	10000		29	0,33	0,5
Terciario 1 (similar a Arena de Miga)	50000	15	34	0,3	0,8
Jet-Grouting	**500000**	**400**	**45**	**0,28**	-

En lo que sigue se presentan los resultados obtenidos (figura 3.17) para los diámetros 40, 60 y 80 cm. Los resultados se exponen en forma adimensional. En abscisas, la relación d/R (relación entre la distancia al eje de la columna y su radio). En ordenadas se presenta la relación $P/P_{máx}$ (relación entre la presión a una distancia relativa d/R y la máxima presión considerada).

A partir de d/R = 1 la presión relativa $P/P_{máx}$ disminuye con la relación d/R, pero apenas depende de la deformación volumétrica, ε_v. La relación mediante la cual se puede aproximar la variación de la presión relativa con la distancia al eje de la columna, para distintos valores de la deformación volumétrica y del diámetro de la columna es:

$$\frac{P}{P_{máx}} = \left(\frac{d}{R}\right)^{\alpha=0,90}$$

Para el posterior análisis de la columna equivalente, se han considerado cuatro zonas, diferenciadas tanto por la distancia relativa al eje de la columna, como por la presión relativa $P/P_{máx}$:

- En la zona 1, $P/P_{máx} \approx 1$.
- En la zona 2, $0,5 - 0,55 \leq P/P_{máx} \leq 1$
- En la zona 3, $0,35 \leq P/P_{máx} \leq 0,5$
- En la zona 4, $P/P_{máx} \leq 0,35$

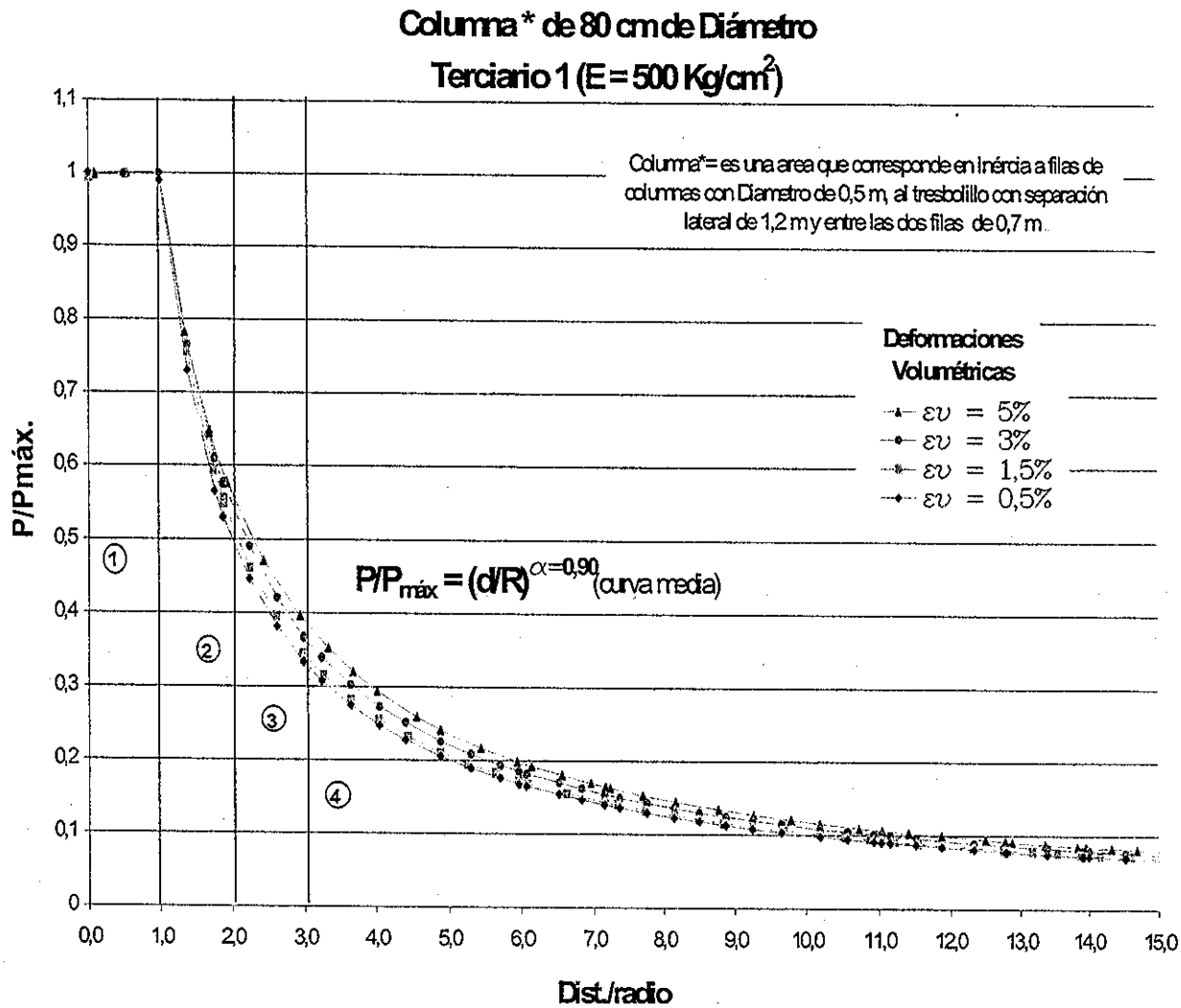

Figura 3.17: Valores de tensiones adimensionales para columna con diámetro igual a 80 cm.

3.6. MODELO CON LA COLUMNA EQUIVALENTE

Una columna de jet-grouting es una mezcla del terreno circundante destrozado con la inyección de lechada, o sea, una columna compuesta por suelo-cemento. Las propiedades resistentes del jet-grouting se empobrecen, por tanto, cuanto más nos alejamos del centro de la columna. Esto se debe a que la lechada cuando se aleja del centro de la columna se mezcla con menor intensidad con el terreno original, por lo que sus propiedades geomecánicas son más pobres.

Los resultados de este tratamiento, en términos de la uniformidad conseguida y de las propiedades mecánicas, dependen de un gran número de factores entre los que hay que considerar tanto las características del terreno como los parámetros del tratamiento con jet-grouting.

Para definir la columna equivalente en términos de zona del terreno entorno a la columna de jet-grouting con unas determinadas propiedades de deformación, hemos considerado el gráfico 3.17, en los que se relaciona para distintos diámetros, la presión relativa originada por una deformación volumétrica, con la distancia al eje de la columna. De esta forma se han definido cuatro zonas a partir del eje de la columna:

- Zona 1 ($d/R \leq 1$, donde R es el radio de la columna de jet y d la distancia al eje): zona donde la presión es constante e igual a la máxima.
- Zona 2 ($1 \leq d/R \leq 2$): zona donde la presión media es $\approx 3{,}5\ P_0$, donde P_0 es una presión del orden del 20 % de la máxima alcanzada, presión que se produce a una distancia del eje $d/R \geq 2$.
- Zona 3 ($2 \leq d/R \leq 3$): zona donde la presión media es es $\approx 2{,}5\ P_0$, siendo P_0 una presión del orden del 20 % de la máxima alcanzada, presión que se produce a una distancia del eje $d/R \geq 3$.
- Zona 4 ($d/R \geq 3$): En esta zona la presión máxima es inferior al 30 % – 35 % de la máxima alcanzada en la simulación numérica, debida a una deformación volumétrica.

Con objeto de asignar un módulo elástico medio a cada una de estas zonas, hemos tenido en cuenta la figura 3.18 (De la Fuente y Oteo, 1985) en la que se relaciona el módulo edométrico medio y la presión efectiva en diversos ensayos edométricos (conservando la humedad natural, en muestras saturadas y en ensayos efectuados con velocidad de deformación constante) sobre muestras de tosco arenoso de Madrid Asignado un módulo E_0 a la presión P_0 existente en la zona 4, zona donde la variación volumétrica tiene poca importancia, los gráficos de la figura 3.18 permiten asignar módulos de elasticidad de valor 2 E_0 , a la zona 3, donde la presión media originada por la variación volumétrica es 2,5 P_0 . Estos resultados quedan reflejados en la figura 3.19.

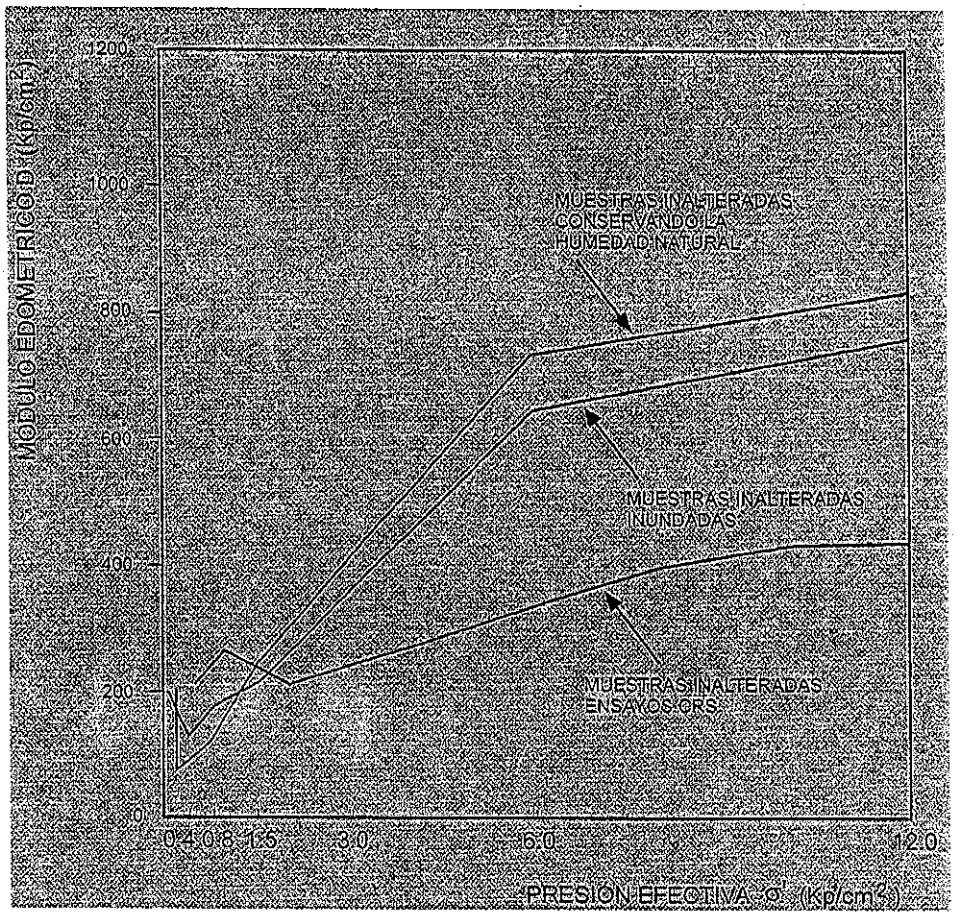

Figura 3.18: Relación entre el módulo edométrico y la presión efectiva en ensayos efectuados sobre muestras inalteradas de tosco arenoso (De la Fuente y Oteo, 1985).

El esquema de la figura 3.19 representa lo que hemos denominado columna equivalente, en la que se diferencian cuatro zonas en módulos de elasticidad distintos.

Esta columna se ha utilizado en el análisis de distintas situaciones reales, correspondiente a la ejecución de algunos tramos de la ampliación del Metro de Madrid, en los que se han podido registrar movimientos al perforar el túnel después de un tratamiento del terreno con columnas de jet-grouting.

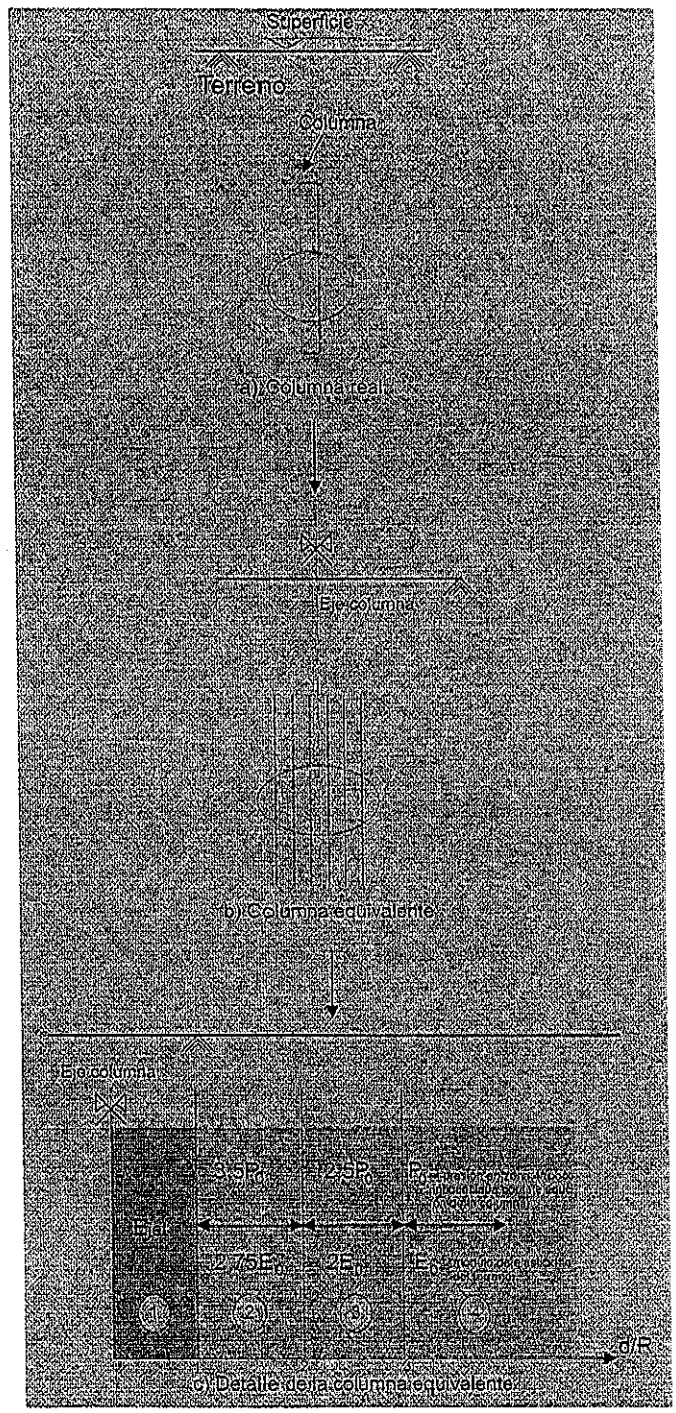

Figura 3.19 : La columna equivalente.

3.7. RECAPITULACIÓN

De todo lo anteriormente se deduce:

- Mediante técnicas de incremento de volumen se ha "simulado" el efecto de la ejecución de una columna de jet-grouting en el terreno, variando este incremento entre el 1 y el 5%. Se ha introducido el efecto de estructuras próximas cimentadas en la superficie.

- Comparando estos resultados teóricos con medidas reales de los levantamientos de edificios próximos a tratamientos con jet-grouting (ampliación del Metro de Madrid) se ha acotado la magnitud del incremento de volumen que debe emplearse.

- Con esta magnitud se ha estudiado el efecto tenso-deformacional de la construcción teórica de una columna en su entorno.

- Con ello se ha deducido la "columna equivalente" (figura 3 19) que conlleva el considerar la columna real y unos cilindros concéntricos, con un terreno mejorado respecto al inicial, para obtener un conjunto equivalente (en deformaciones) a la acción del tratamiento, a fin de introducir su geometría en la simulación de problemas reales