

5

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE LA EXCAVACIÓN DE UN TÚNEL URBANO.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE LA EXCAVACIÓN DE UN TÚNEL URBANO.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA OBRA.

5.1.1 Características Generales.

La excavación de túneles es un tipo de obras de Ingeniería Geotécnica en las que tradicionalmente se han medido desplazamientos del terreno durante su ejecución. El nuevo método austriaco de construcción de túneles, y la necesidad de realizar túneles en zonas urbanas y en condiciones difíciles, ha obligado a realizar sistemáticamente medidas de desplazamientos "in situ". Por su parte, el desarrollo paralelo de las técnicas de instrumentación ha permitido realizar esas medidas con una fiabilidad cada vez mayor. Habitualmente estas medidas han servido únicamente como instrumento de control en obra, pero los métodos de identificación de parámetros permiten intuir un buen futuro para el análisis retrospectivo en detalle de estos problemas, puesto que extraen información adicional de las mismas.

Como aplicación de la metodología expuesta en los apartados anteriores, se presenta un ejemplo de identificación de parámetros en un caso real. Se trata de un túnel urbano para ferrocarril construido bajo una calle principal de la ciudad de Terrassa (Barcelona). El proyecto realizado a tal efecto en 1981 contemplaba la ejecución de tres tramos, los dos primeros a construir a cielo abierto mediante muros pantalla, y el tercero, a ejecutar en túnel perforado.

El primer tramo correspondía al acceso, el segundo a la propia estación de ferrocarril, y el tercero a la cola de maniobras. Este último tramo se situaba en una de las zonas más céntricas de la ciudad, por lo que se desaconsejaba una ejecución a cielo abierto, construyéndose finalmente mediante túnel perforado. Este capítulo trata del estudio en detalle de este último tramo, aplicándole las técnicas de identificación descritas.

A efectos constructivos, existían tres condicionantes básicos que dificultaban la ejecución de la obra:

- La traza del túnel, de 200 metros de longitud, discurría bajo una calle de 25 metros entre fachadas de edificios, de los cuales el propio túnel ocupaba 10. Existía además un aparcamiento subterráneo que se situaba casi tangente al hastial del túnel cerca de su emboquille.
- El recubrimiento de tierras por encima de la clave del túnel variaba entre 6 y 10 metros aproximadamente, debido a la pendiente de la calle.
- Existía un antiguo colector de unos 4 metros de diámetro entre el nivel de la calle y la clave del túnel del que se sabía que tenía abundantes pérdidas de caudal.

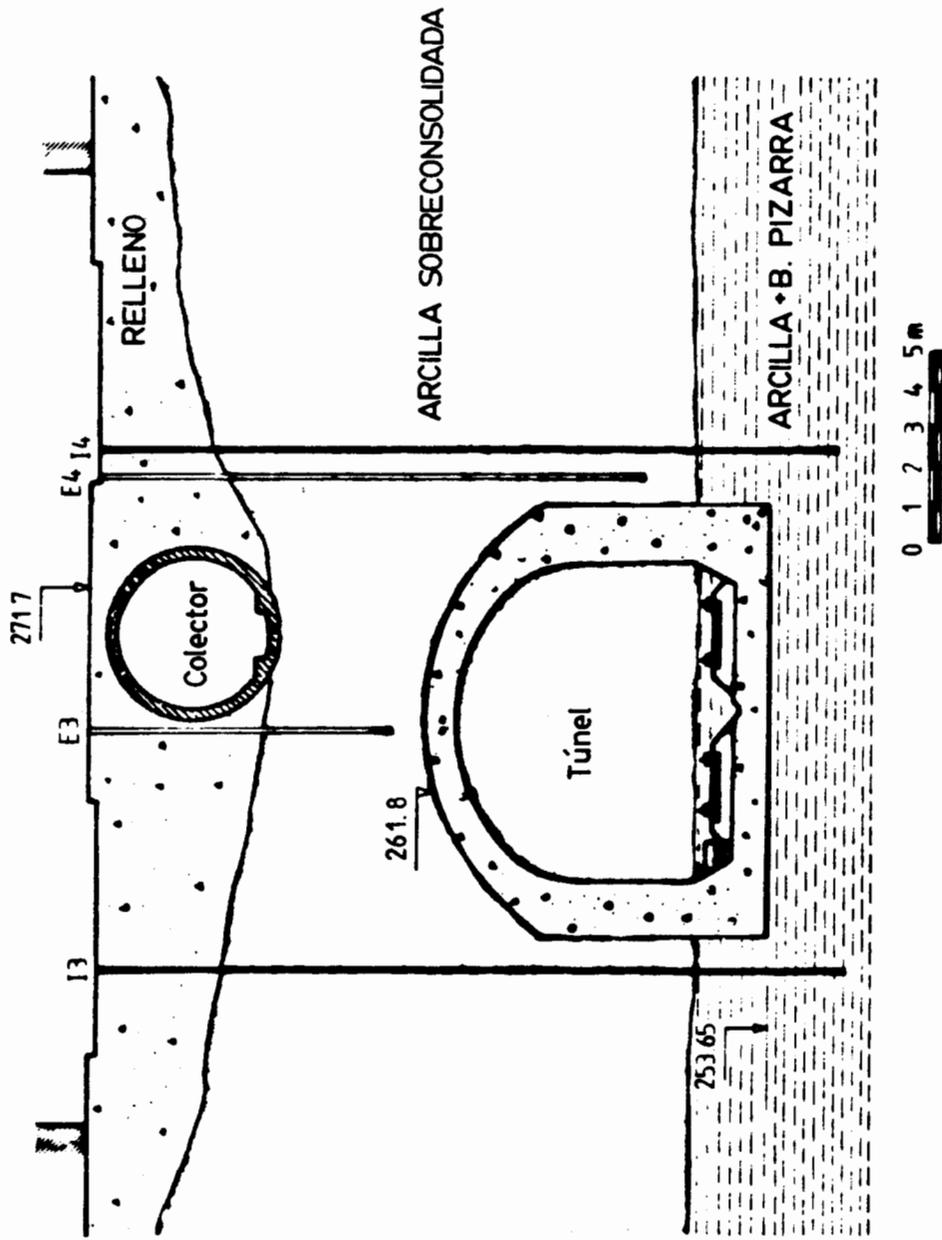


Figura 5.1. Sección transversal tipo.

5.1.2 Geología.

Una sección transversal tipo con la columna litológica puede verse en la figura 5.1.

Geológicamente la zona que nos ocupa se situa en la depresión del Vallés. Esta contiene sedimentos del Terciario caracterizados por una serie arcillosa que alterna con tramos de gravas pizarrosas. Sobre estos materiales, preconsolidados, se situa el Cuaternario constituido por arcillas, gravas y arenas.

El estudio geotécnico proporcionó la siguiente información de detalle sobre la columna litológica:

- Hasta 5 - 6 metros por debajo del nivel de la calle hay, bajo el pavimento, un relleno heterogéneo parte del cual se colocó al construir el colector, canalizar la riera y urbanizar la calle. Quedan en este relleno restos de los antiguos muros de encauzamiento de la riera.
- Bajo éste y variable hasta 13 - 20 metros de profundidad existe una capa de arcilla limosa compacta, de tonos marrón y verdoso, propia del Terciario, y que se encuentra de forma generalizada en toda la zona. El túnel discurre prácticamente por este estrato.
- Por último, por debajo de este estrato se encuentra la misma arcilla pero con intercalaciones frecuentes de bloques de pizarra del Mioceno.
- No se apreció en ningún sondeo la existencia de nivel freático definido. Los ensayos Lefranc que se realizaron en los sondeos confirmaron que el estrato de arcilla era prácticamente impermeable. Por su parte, los ensayos de identificación reflejaron que se trataba de una arcilla parcialmente saturada.

- Los ensayos de laboratorio realizados a partir de los sondeos de la capa de arcilla dieron valores de resistencia relativamente bajos. Los ensayos de compresión simple realizados para el proyecto proporcionaron una carga de rotura entre 2.6 y 3.2 Kp/cm². Por otra parte, los ensayos triaxiales realizados para la arcilla afectada por la excavación de los muros pantalla, proporcionaron valores del ángulo de rozamiento interno entre 20 y 25 grados, y de cohesión entre 0. y 0.5 Kp/cm². No se pudieron realizar ensayos de los otros estratos, debido a su heterogeneidad y a la presencia de bloques.

5.1.3 Procedimiento Constructivo.

El aspecto más importante desde un punto de vista constructivo era el disminuir los movimientos inducidos en el terreno, con el fin de evitar efectos dañinos en las edificaciones próximas. Para intentar conseguir esto, se procedió a perforar el túnel siguiendo el método alemán, que para este caso se pone en práctica con las siguientes fases:

- Excavación de galerías laterales en las zonas de hastiales, colocando cerchas TH de sostenimiento provisional y hormigonando posteriormente.
- Excavación del intradós de la bóveda del túnel. Se colocan también cerchas TH apoyándose en los hastiales ya hormigonados y como sostenimiento provisional. La separación de las cerchas sería modificable en función del comportamiento del terreno observado con la instrumentación. Se coloca posteriormente el encofrado y se hormigona la bóveda.

- Excavación del machón central del túnel y destroza.

5.1.4 Justificación Del Control A Realizar.

Los problemas definidos anteriormente condicionaban la ejecución de la obra y requerían tomar una serie de medidas de precaución en cuanto a aspectos constructivos.

Sin embargo, de forma independiente, convenía disponer de métodos de control del sistema túnel - terreno - edificios colindantes. Las difíciles condiciones constructivas aconsejaban destinar recursos al seguimiento de los movimientos del terreno y de su efecto sobre las estructuras vecinas. Máxime teniendo en cuenta la incertidumbre sobre las propiedades geomecánicas del terreno afectado: el relleno superior y el estrato inferior no pudieron ensayarse, debido a su propia macroestructura, mientras que los ensayos realizados sobre las muestras del estrato intermedio de arcilla proporcionaban valores de deformabilidad altos.

La consecuencia directa de estas consideraciones fue la decisión de establecer un plan de instrumentación del terreno afectado por el túnel, que permitiera medir los movimientos originados por la perforación. La instrumentación surgió, por tanto, como una necesidad inicial de control. Posteriormente se aplicaron las técnicas de identificación que se han descrito en los capítulos anteriores. Este estudio se llevó a cabo con dos fines principales y convergentes: por una parte investigadores, y por otra, obtención de toda la información adicional posible de las

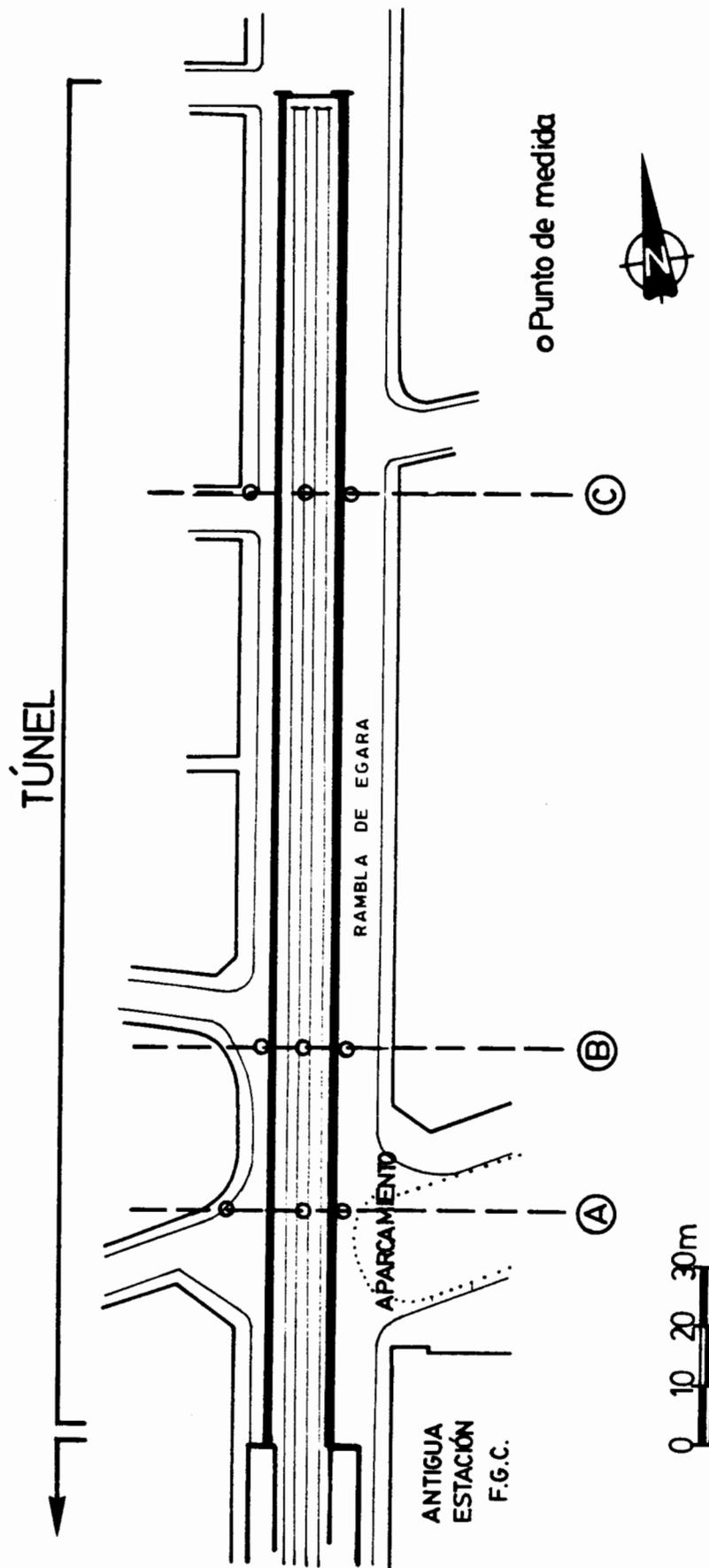


Figura 5.2. Planta de situación del túnel para ferrocarril en estudio. Discurre bajo la Rambla de Egara, en la ciudad de Terrassa (Barcelona) y se sitúa a continuación de la estación subterránea, para ser utilizado como cola de maniobras. Se indican las tres secciones instrumentadas.

medidas de campo, para completar el control de la obra.

5.2 DISPOSICIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.

La disposición de la instrumentación en la traza del túnel respondió a dos condicionantes básicos: Por una parte se deseaba concentrar varias medidas al principio de la obra, con el fin de obtener lo antes posible información de su comportamiento. Por otro lado, convenía reunir las medidas en unas pocas secciones bien instrumentadas. Con estas condiciones, y teniendo en cuenta la limitación de recursos disponibles para este tipo de control, se definieron tres perfiles básicos de medida en los que se concentró la instrumentación (perfiles A, B y C de figura 5.2). Los perfiles A y B se encuentran al principio de la obra, y el C en el último tercio de la misma, como perfil de comprobación, y para evitar extrapolar los datos obtenidos en A y B al resto de la obra.

La instrumentación que se definió incluía los siguientes aspectos:

- Nivelación topográfica superficial de los puntos de la calle correspondientes a esos perfiles, refiriéndose a puntos fijos, alejados del túnel.
- Nivelación topográfica de puntos marcados en la pared del aparcamiento más cercana al túnel, tomando como referencia un punto del propio aparcamiento suficientemente alejado de dicha pared.
- Medida de movimientos en el interior del terreno utilizando dos extensómetros de varillas (E) y dos inclinómetros (I) en cada perfil (figuras 5.3, 5.4 y 5.5). Uno de los extensómetros se instaló siempre lo más cerca posible del eje del túnel, dado que es

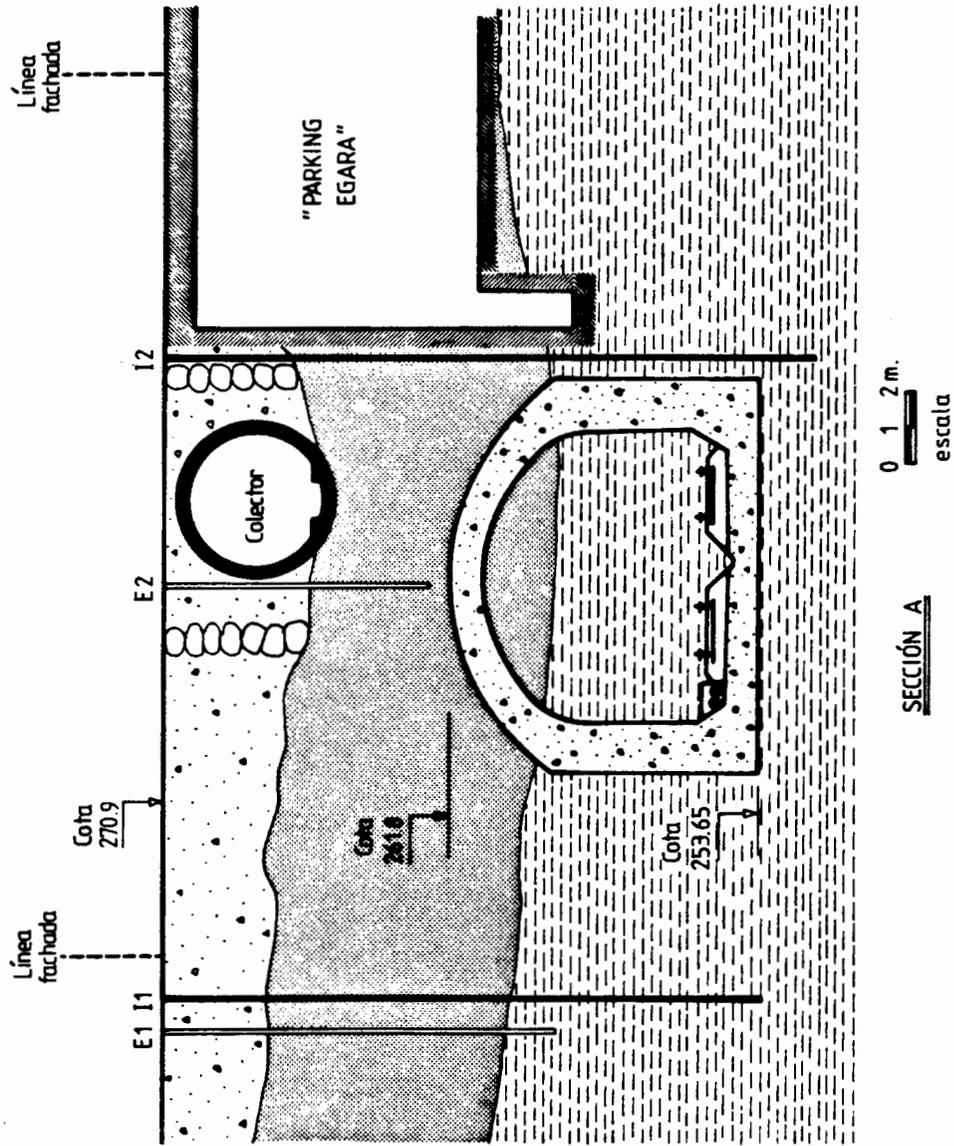


Figura 5.3. Sección A instrumentada con los extensómetros E1, E2 y los inclinómetros I1, I2.

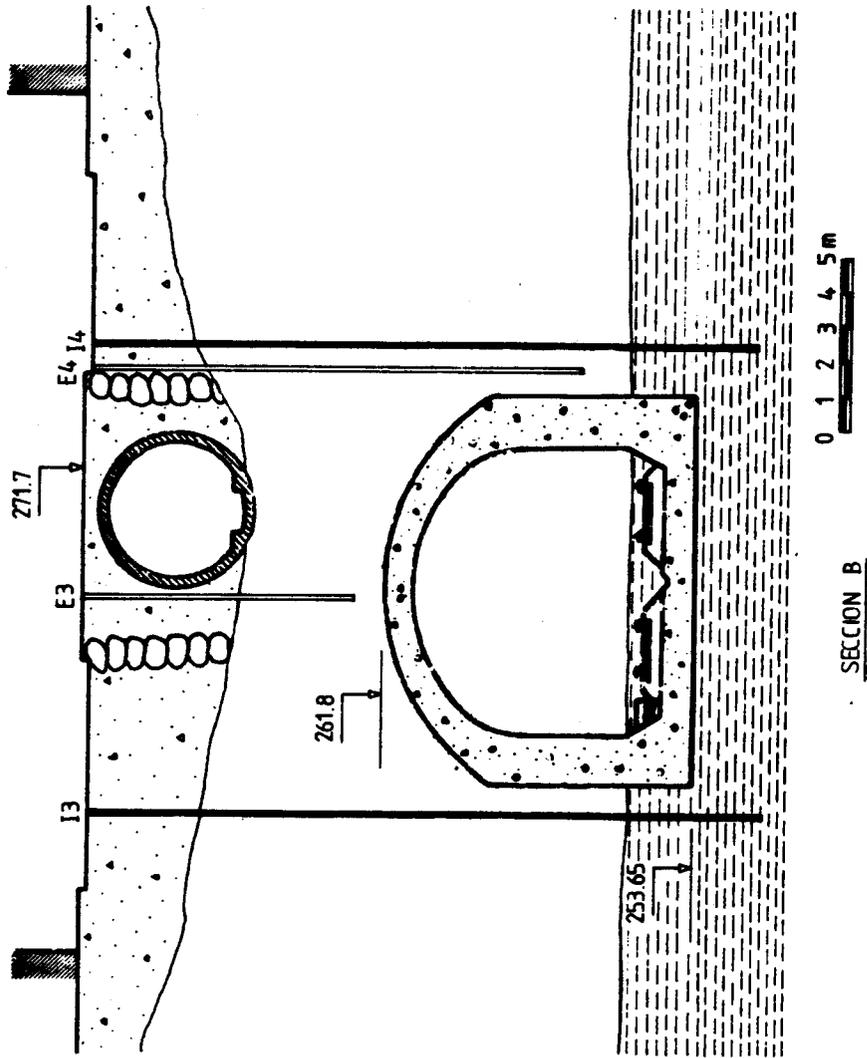


Figura 5.4. Sección B instrumentada con los extensómetros E3, E4 y los inclinómetros I3, I4.

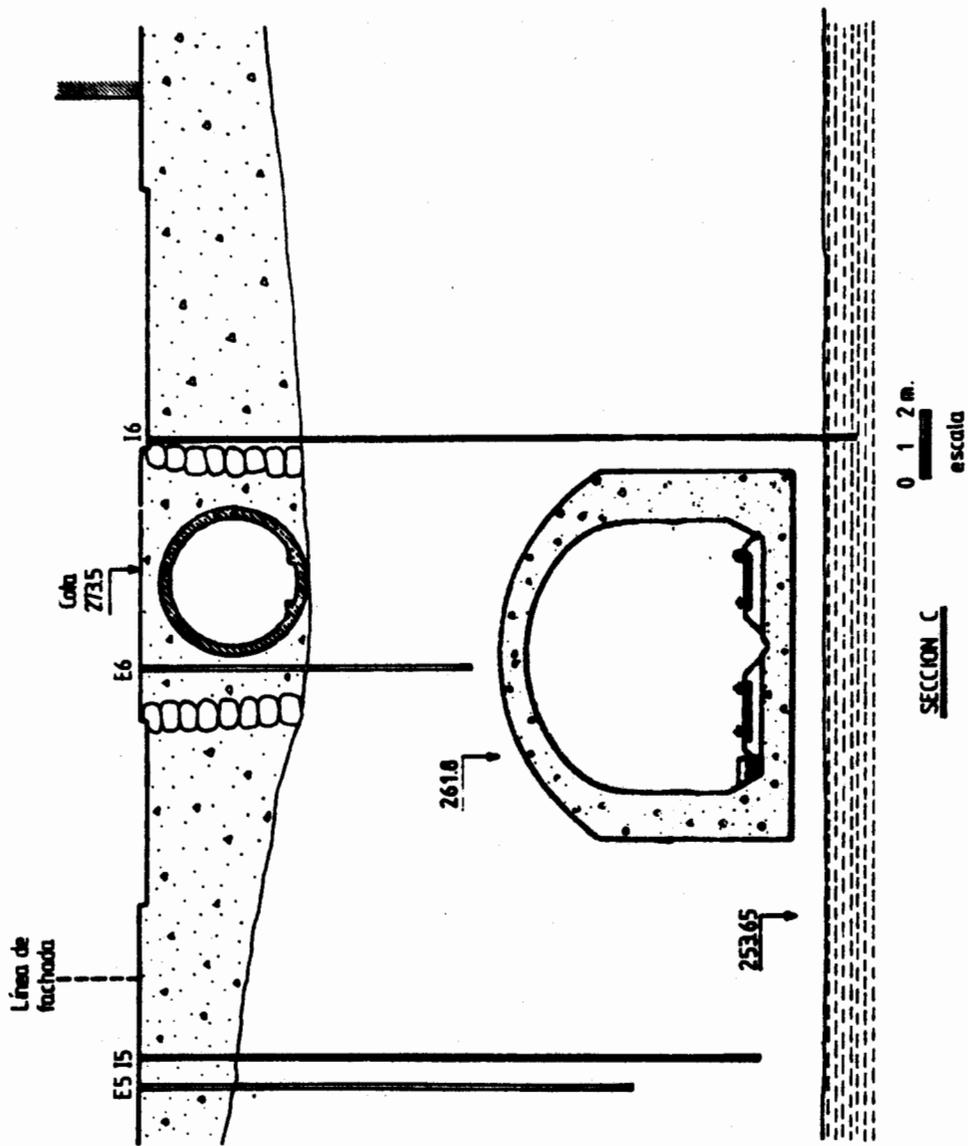


Figura 5.5. Sección C instrumentada con los extensómetros E5, E6 y los inclinómetros I5, I6.

en esa zona donde los movimientos verticales son máximos. También por lo menos uno de los inclinómetros se situó junto a los hastiales, por ser ésta la zona de máximos movimientos horizontales. Los sondeos inclinométricos se llevaron hasta una profundidad suficiente como para considerar el punto inferior como fijo. La campaña de nivelación topográfica superficial permitió referir los cabezales de los extensómetros a puntos fijos, con el fin de obtener movimientos absolutos.

Información de detalle sobre la instalación de la instrumentación puede verse en el informe final correspondiente (Ledesma, Gens y Alonso, 1986).

Con la instrumentación señalada se quería controlar el efecto que sobre las edificaciones producía la excavación del túnel. Es decir, se utilizaba la instrumentación, en principio, como medio de control de obra. Al mismo tiempo, aprovechando la oportunidad de la toma de medidas en un problema real, se decidió aplicar además la metodología anterior sobre identificación de parámetros.

5.3 ENSAYOS DE LABORATORIO.

La información principal del comportamiento de la obra se esperaba obtener a partir de los perfiles de instrumentación colocados. Al efectuarse las medidas desde superficie, el control de movimientos se realizaba sin entorpecer el trabajo en el interior del túnel. Sólo a efectos de comprobación se extrajeron muestras bloque del frente y hastiales del túnel, con el fin de ensayarlas en el laboratorio. Estas muestras corresponden al estrato de arcilla compacta que se atraviesa a lo largo de toda la

obra. No se pretendía realizar una campaña sistemática de ensayos, sino simplemente recoger pocas muestras en buenas condiciones y comparar los resultados de sus ensayos con la información procedente de las medidas de campo. Conviene recordar que la estabilidad del túnel no sólo venía condicionada por el comportamiento mecánico del estrato de arcilla, sino que también dependía en gran medida del relleno superior, y éste no era ensayable en el laboratorio.

Aprovechando la propia excavación del túnel se extrajo una muestra bloque de arcilla a 12 metros de profundidad. Se intentó trabajar en el laboratorio con la mayor precisión posible, especialmente en lo que hace referencia a la medida de módulos a bajos niveles de deformación.

Los ensayos de identificación proporcionaron los siguientes datos medios:

- Peso específico de las partículas: 2.78 gr/cm^3
- Humedad natural: 12.5 %
- Densidad natural: 2.25 gr/cm^3
- Densidad seca: 2.0 gr/cm^3
- Límite líquido: 31
- Límite plástico: 20
- Índice de plasticidad: 11
- Índice de poros: 0.4
- Grado de saturación: 0.87

Corresponden estos valores a una arcilla tipo "CL", según la clasificación de Casagrande.

Dos son los tipos de ensayos de deformabilidad que se llevaron a cabo: edométricos y de compresión simple. Los resultados que aquí se presentan corresponden a dos muestras, una tallada en sentido vertical y otra en sentido horizontal. El número de muestras no es suficientemente representativo como para deducir un comportamiento general de este tipo de terreno, pero los resultados permiten en cualquier caso comparar con la información procedente de campo.

Mediante los ensayos edométricos se pretendía obtener información acerca de la compresibilidad de la arcilla y de su posible sobreconsolidación. En las figuras 5.6 y 5.7 se indican las curvas edométricas obtenidas. La primera corresponde a una muestra tomada en sentido vertical, y la segunda a una muestra horizontal. Teniendo en cuenta que la muestra bloque se extrajo a 12 metros de profundidad, estos resultados confirmaban la sobreconsolidación de la arcilla, y mostraban ciertas diferencias de comportamiento entre la muestra horizontal y vertical, lo que suponía un comportamiento anisótropo del terreno.

Los ensayos de compresión simple no se llevaron hasta rotura, debido a la compacidad de la arcilla extraída. Con el fin de medir correctamente las deformaciones en la propia muestra, se utilizaron bandas extensométricas adheridas a ella. De esta forma se conseguiría deducir con cierta exactitud las leyes tensión - deformación y módulo - deformación a bajos niveles de deformación. En general se obtuvieron valores de módulos superiores a los determinados con muestras procedentes de sondeos (del orden de 10 veces mayores). En las figuras 5.8 y 5.9 se representan las gráficas tensión - deformación y módulo - deformación para ambas

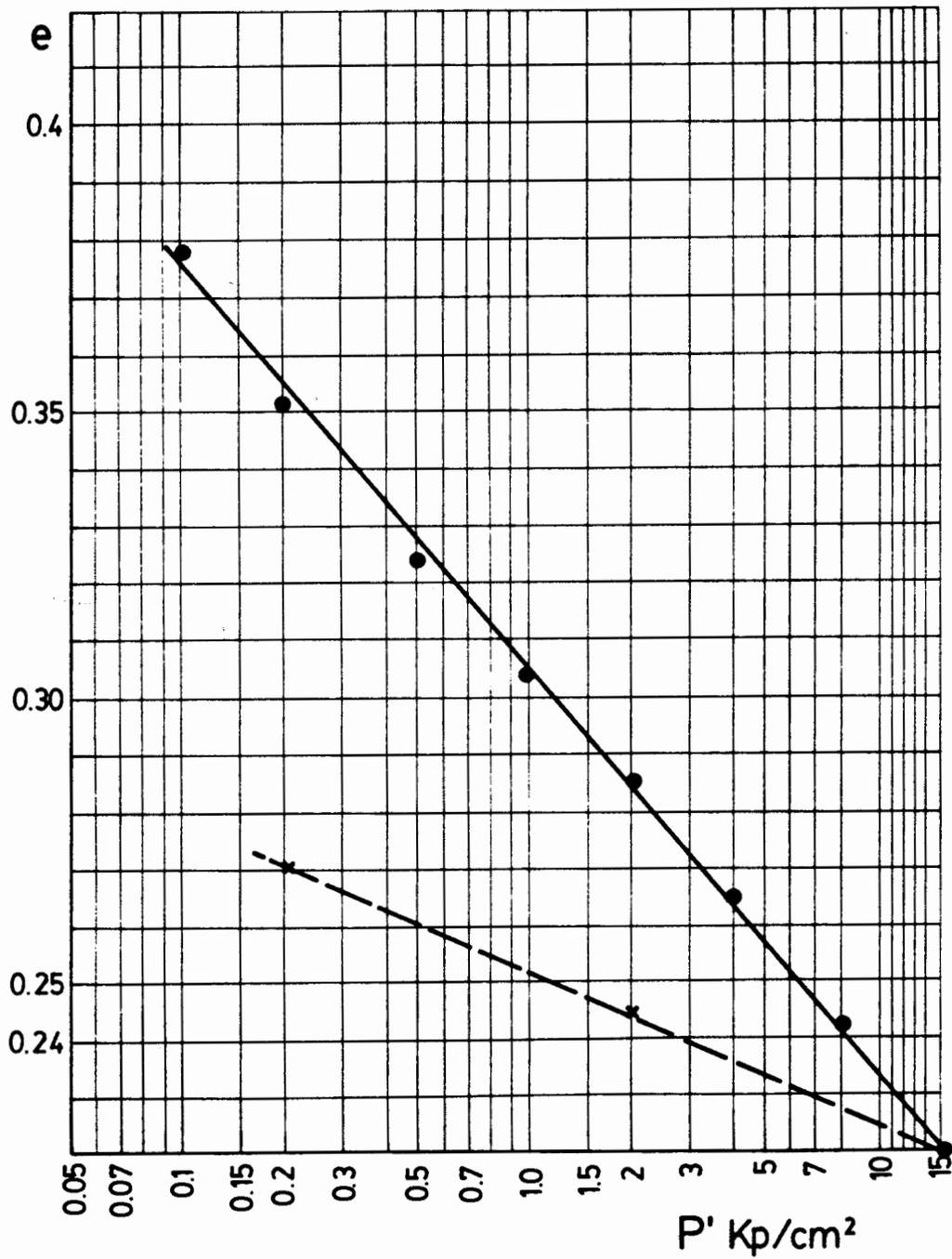


Figura 5.6. Resultado del ensayo edométrico realizado con una muestra de arcilla extraída en sentido vertical de un bloque del estrato intermedio (curva índice de poros - presión vertical efectiva).

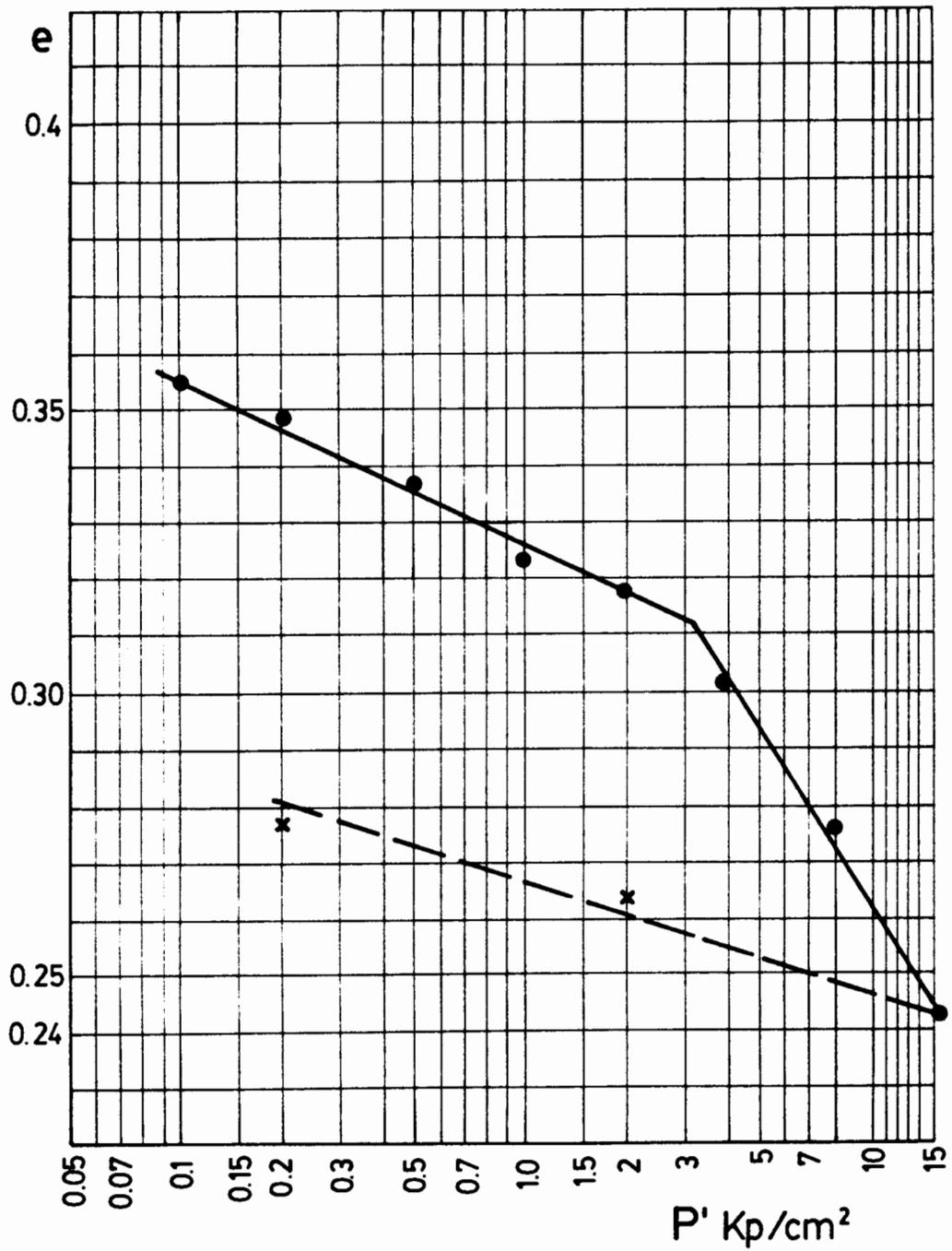


Figura 5.7. Resultado del ensayo edométrico realizado con una muestra de arcilla extraída en sentido horizontal de un bloque del estrato intermedio (curva índice de poros - presión vertical efectiva).

muestras. Puede observarse que los módulos a bajos niveles de deformación presentan valores muy altos. Las diferencias entre los ensayos del informe geotécnico del proyecto y los obtenidos con la muestra bloque se pueden atribuir a dos factores: por una parte al hecho de que se efectuaran las medidas en el interior de la muestra, y por otra a la calidad de la muestra utilizada.

5.4 MEDIDAS DE CAMPO REALIZADAS.

En cuanto a medidas de campo se refiere, éstas corresponden a los desplazamientos obtenidos con la instrumentación colocada. El primer perfil de medida sirvió para conocer al principio de la obra los órdenes de magnitud de los desplazamientos. Su situación, cercana al emboquille, y su proximidad al aparcamiento subterráneo, hacen difícil un modelado numérico de su geometría. Por este motivo se utilizó el segundo perfil como sección de estudio, a efectos de intentar realizar la identificación de los parámetros del terreno.

La instrumentación reflejó en todo momento la evolución de la excavación y del hormigonado del túnel. Una evolución del asiento en clave para los perfiles A y B, en función del tiempo se representa en la figura 5.10. Obsérvese que una curva de estas características es muy dependiente del proceso constructivo, aunque siempre se produce una estabilización del movimiento una vez hormigonada la sección. Se realizaban inyecciones de lechada después del hormigonado con el fin de asegurar el relleno de los posibles huecos dejados entre hormigón y terreno.

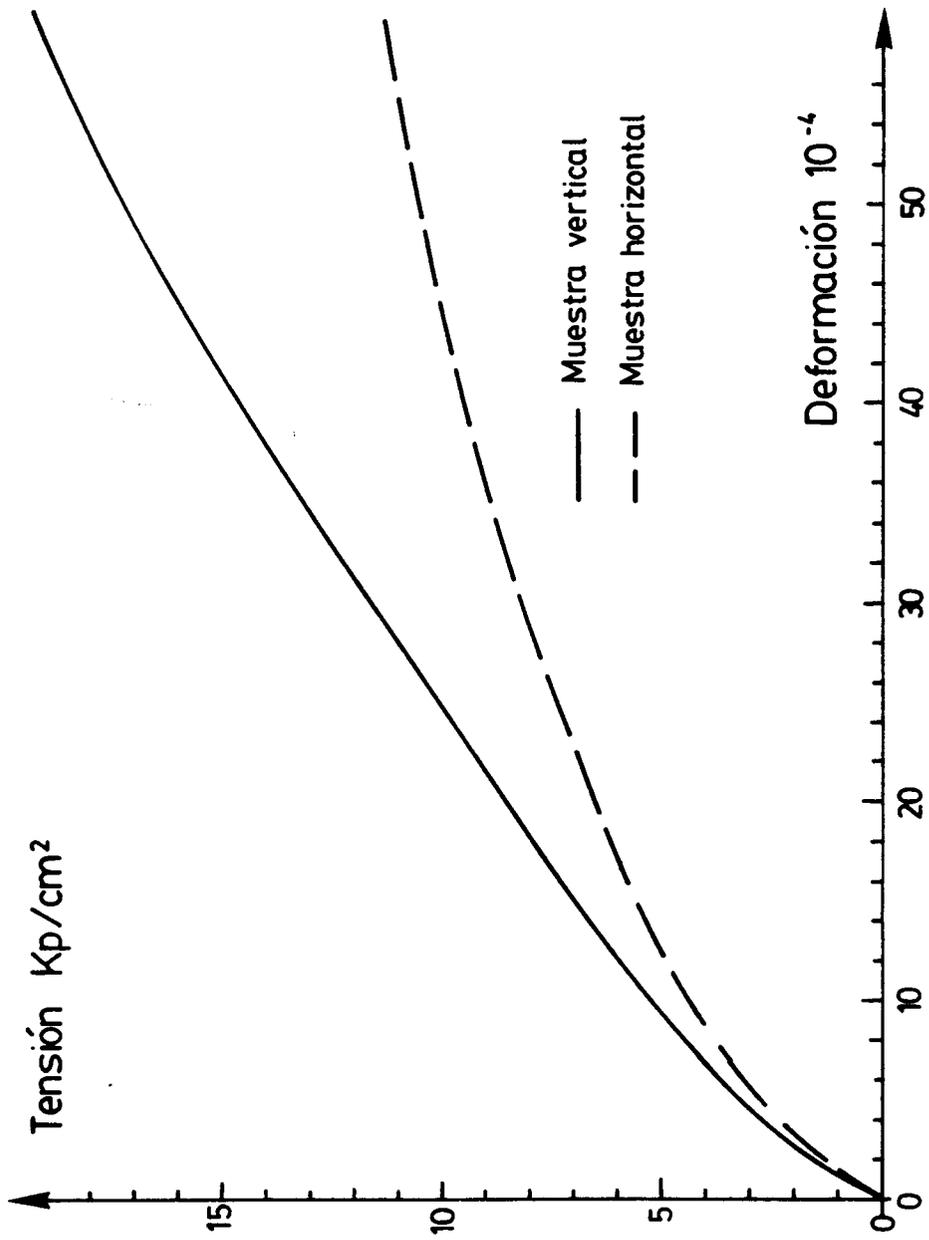


Figura 5.8. Curvas tensión - deformación obtenidas de ensayos de compresión simple para muestras extraídas en sentido horizontal y vertical.

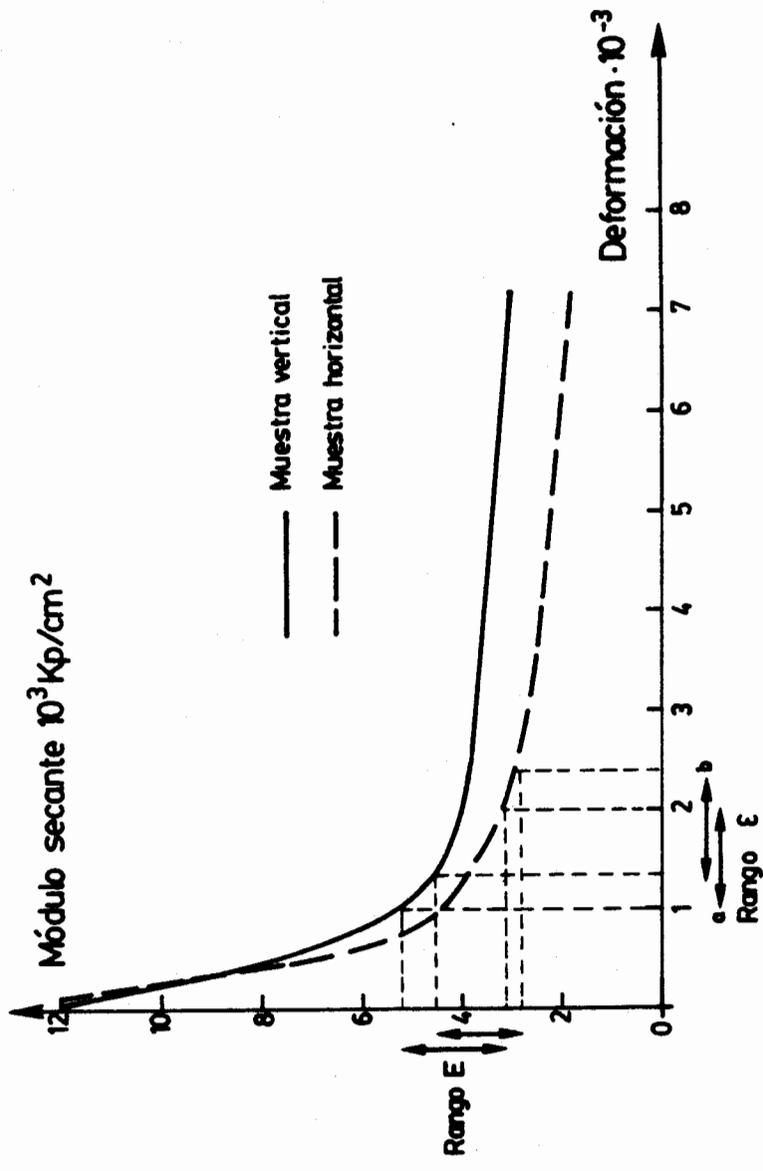


Figura 5.9. Curvas módulo secante - deformación obtenidas a partir de ensayos de compresión simple para muestras extraídas en sentido horizontal y vertical. Se indica el rango de deformaciones estimado calculando el problema directo con dos conjuntos de parámetros: a) parámetros identificados con el criterio de mínimos cuadrados, b) parámetros identificados con el criterio de máxima verosimilitud y matriz de covarianzas llena. Se indica asimismo el rango de módulos que según estas curvas corresponderían a estos rangos de deformaciones.

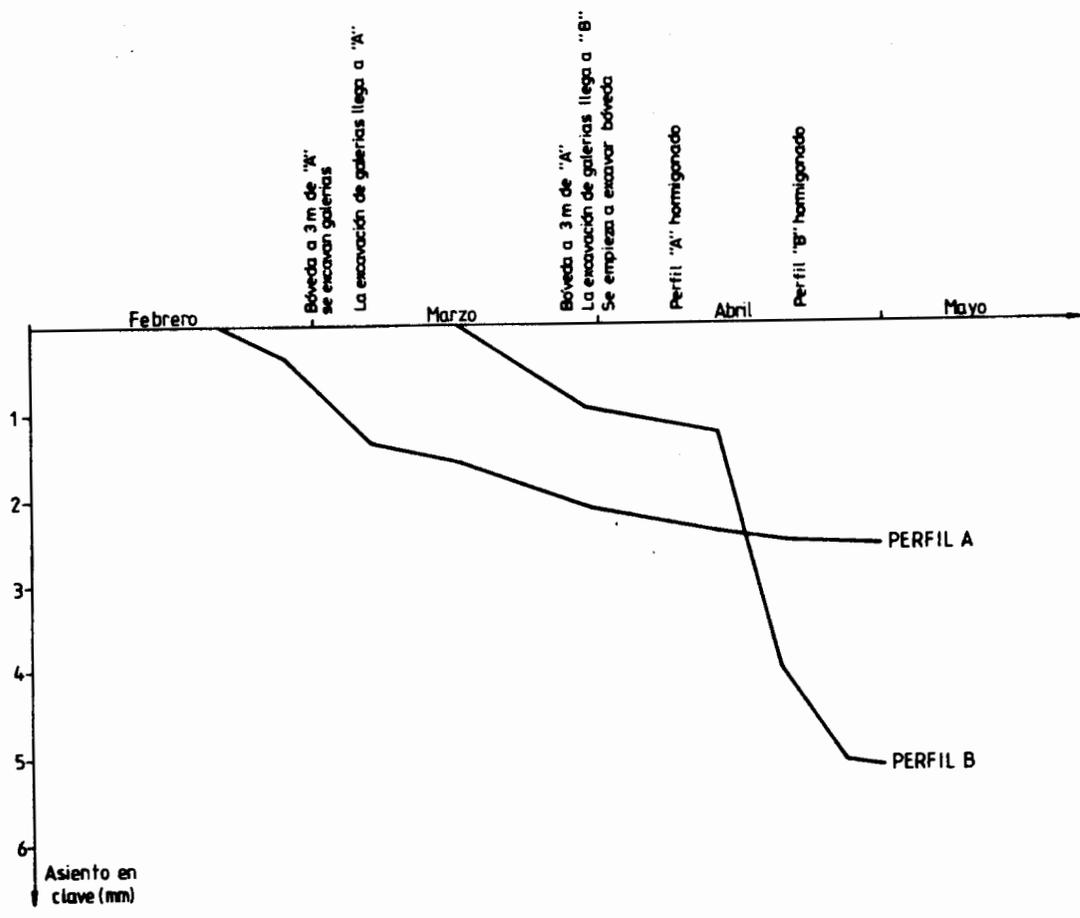


Figura 5.10. Evolución del asiento en clave a lo largo del proceso constructivo (1985), para los perfiles A y B.

A efectos de realizar la identificación de los parámetros de los tres estratos afectados por la construcción del túnel, se consideraron los valores finales de los movimientos medidos. Esto puede suponer que si se identifican, por ejemplo, módulos, se obtengan valores algo superiores a la realidad, debido a que se está incluyendo en las medidas el efecto favorable del hormigonado. En cualquier caso, el mayor porcentaje de desplazamiento se suele producir al excavar la bóveda, comenzándose a estabilizar los movimientos en cuanto se colocan las cerchas. La evolución completa de los movimientos con el proceso constructivo puede verse en el informe correspondiente a la instrumentación del túnel (Ledesma, Gens y Alonso, 1986).

Para el problema inverso en estudio, se han considerado las medidas de desplazamientos totales o máximos en el perfil B, en el que se han concentrado todos los esfuerzos en lo que a identificación de parámetros se refiere. Estas medidas se representan en las figuras 5.11 y 5.12.

La primera figura (5.11) corresponde a los movimientos verticales, y en ella puede observarse que son de pequeña magnitud (5.2 mm el valor máximo) y que apenas son apreciables en superficie. Tampoco se detectaron movimientos en la zona superficial mediante la campaña de nivelación topográfica efectuada. Por otra parte y como era de esperar, el mayor movimiento vertical se produce sobre la clave del túnel. Cabe destacar también el hecho de que la zona inferior del extensómetro E4 experimentó un movimiento vertical ascendente, aunque muy pequeño.

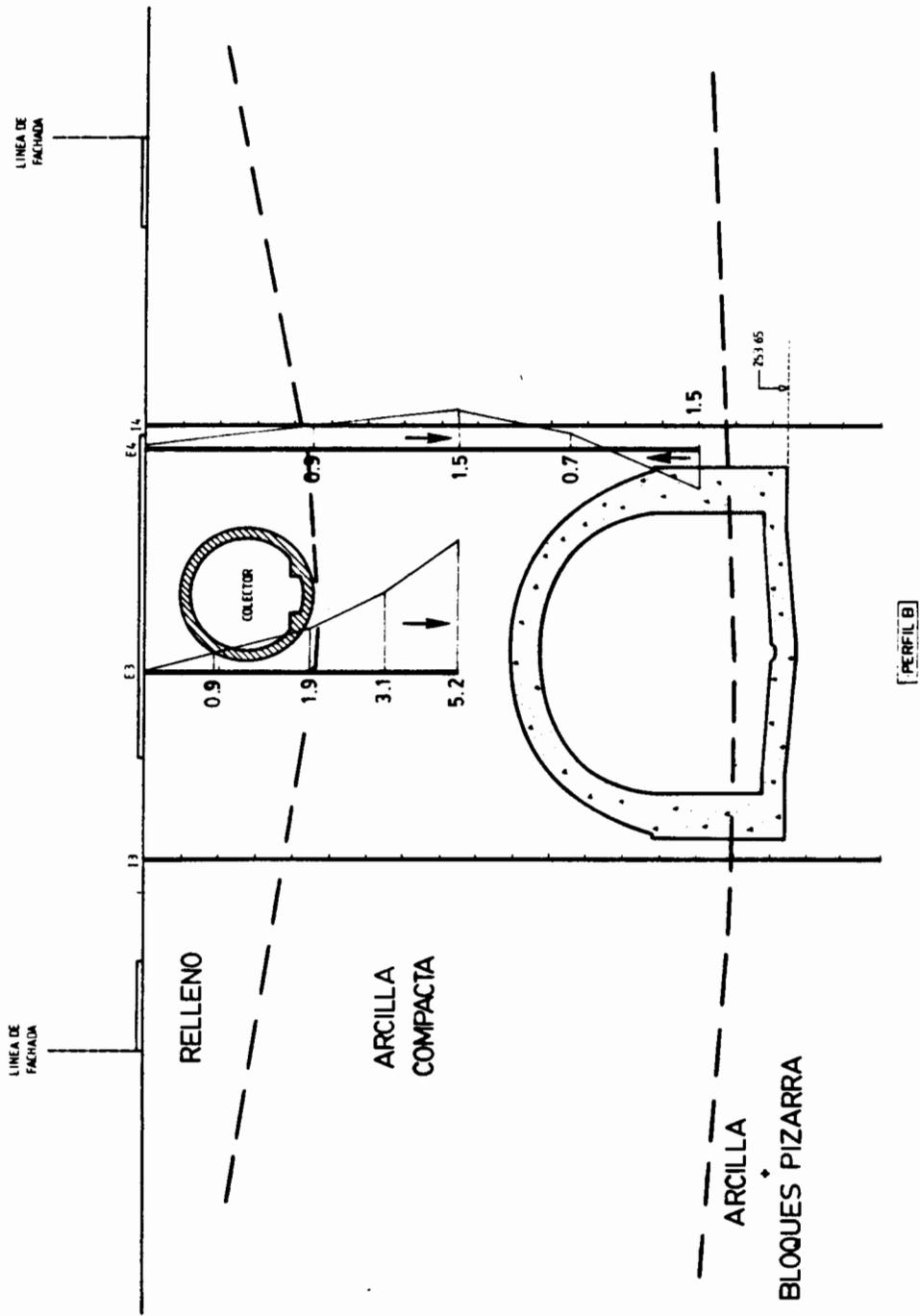


Figura 5.11. Desplazamientos verticales máximos medidos en el perfil B, utilizados como base para el proceso de identificación. Valores en mm.

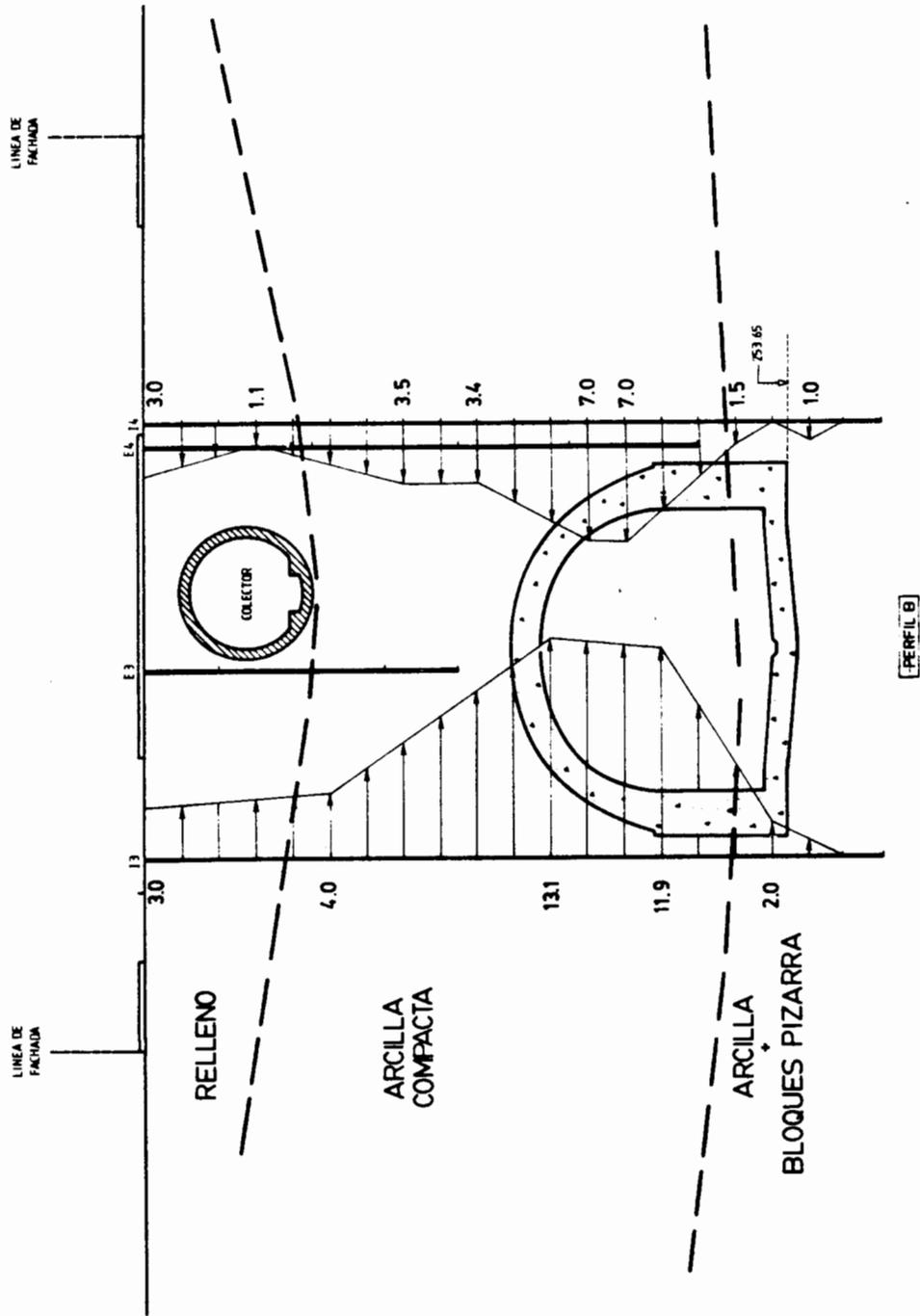


Figura 5.12. Desplazamientos horizontales transversales máximos medidos en el perfil B, utilizados como base para el proceso de identificación. Valores en mm.

En la segunda figura (5.12) se han dibujado los desplazamientos horizontales medidos en los dos inclinómetros de hastiales. Son mucho mayores que los verticales. Se comprueba también que las leyes de movimientos horizontales no son simétricas, y que hay diferencias considerables entre los desplazamientos horizontales máximos a izquierda y derecha del túnel (13.1 y 7.0 mm respectivamente). Dado que el problema es desde un punto de vista geométrico, casi simétrico, estas diferencias pueden atribuirse a efectos localizados en el terreno. A pesar de ello, se consideró importante el tomar como válidas todas las medidas a efectos de identificar parámetros. Las razones que motivaron esta decisión fueron fundamentalmente dos: por una parte se deseaba utilizar el método de identificación en un caso real, con todas las consecuencias prácticas que ello supone, y por otra parte, el proceso de identificación planteado en términos estadísticos en los capítulos anteriores, debería ser capaz de asimilar esta "asimetría" de las medidas frente a un modelo casi "simétrico".

Conocida la geometría del problema, y utilizando estas medidas como base, puede plantearse el problema de identificación de parámetros tal como se realizó en el capítulo anterior, una vez escogido un modelo de comportamiento para el material.

5.5 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS.

5.5.1 Definición Del Problema.

Adoptando como observaciones de nuestro sistema, las medidas

finales obtenidas en el perfil B (figuras 5.11 y 5.12), se ha planteado el problema de estimación de los parámetros de los estratos afectados por la excavación del túnel. Como hipótesis razonable se ha considerado el problema bidimensional, y se ha utilizado un modelo elástico lineal e isótropo para definir el comportamiento del material. La elección de este modelo se fundamentó en base a dos circunstancias: los movimientos medidos habían sido relativamente pequeños (eran de esperar pocas zonas plastificadas), y además la poca información disponible no aconsejaba el uso de modelos más complejos y con mayor número de parámetros.

El modelo elástico lineal e isótropo viene definido por el módulo de elasticidad o de Young y el coeficiente de Poisson. Este último se fijó en base a criterios prácticos, suponiendo que debido a que el terreno se encontraba parcialmente saturado, admitiría cierta compresibilidad. Por otra parte, su influencia no era sustancial, y se deseaba introducir en el proceso de identificación únicamente los parámetros más significativos. En este sentido conviene recordar que la dificultad en la resolución del problema inverso aumenta mucho con el número de parámetros, y el número de medidas disponible ha sido ya fijado. Por estos motivos se tomó $\nu = 0.3$, y se consideraron los módulos de elasticidad de los tres estratos como parámetros a estimar.

Finalmente, la mayor importancia de las medidas horizontales frente a las verticales aconsejó tomar también el coeficiente de empuje al reposo, K_0 , como un parámetro más a identificar. En todo el desarrollo se trabajó en tensiones totales, de manera que en estas condiciones K_0 puede definirse como el cociente entre la

tensión inicial horizontal y vertical en cada punto. La posible sobreconsolidación del terreno en el que se excavaba el túnel y que explicaría la importancia de las medidas horizontales, debería reflejarse en este parámetro.

En lo que hace referencia a las medidas proporcionadas por el perfil B, se consideraron 24, 16 de ellas horizontales (8 de cada inclinómetro) y 8 verticales. La importancia del número de medidas ya se puso de manifiesto en el capítulo anterior, pero en este caso el número de medidas adoptado es consecuencia directa de la instrumentación colocada en el perfil B.

Con los supuestos anteriores el problema queda completamente definido: Se conoce la geometría, dividida en tres estratos de terreno diferenciados, y se desea obtener una estimación de los módulos de elasticidad de esos estratos y del coeficiente K_0 medio de la zona excavada, a partir de las 24 medidas tomadas en el perfil B. El problema así planteado encaja perfectamente en la formulación del problema inverso realizado en los capítulos precedentes, una vez fijado el criterio de identificación adoptado. Utilizando el criterio de mínimos cuadrados y el de máxima verosimilitud, se analiza este problema en los siguientes apartados.

5.5.2 Criterio De Mínimos Cuadrados.

El criterio de estimación más simple (no requiere información adicional) y el más utilizado es el de mínimos cuadrados, y por este motivo es el que se aplica a este caso en primer lugar.

El paso inicial a realizar consiste en discretizar la geometría del problema mediante una malla de elementos finitos. En la figura 5.13 se representa la malla utilizada para este caso, donde se han representado las interfases entre estratos. Por facilidad de cálculo, se hicieron coincidir los nodos de la malla con puntos de medida. Una ampliación de la zona de la malla cercana al túnel se representa en la figura 5.14. En ella se han señalado los 24 puntos tomados como dato para este problema. Los elementos excavados quedan definidos por el contorno del túnel.

En el proceso de generación de la malla hay que tener en cuenta que en los problemas elásticos la situación de los contornos tiene importancia en los desplazamientos. En este caso los contornos se colocaron en función de la información facilitada por el primer perfil (permitía correlacionar los movimientos con la estructura geológica), y teniendo en cuenta las recomendaciones de Moya et al (1981) relativas a las dimensiones de la malla. Como condición de contorno se impuso movimiento horizontal y vertical nulo en todos los nodos del contorno inferior y de los dos contornos laterales.

Utilizando la discretización señalada y el criterio de mínimos cuadrados se procedió, en primer lugar, a identificar un caso simulado en el que las medidas correspondían a desplazamientos proporcionados por el programa de elementos finitos para los módulos $E_1=10$, $E_2=80$ y $E_3=240$ Mpa, y para $K_0=1$. De esta forma se comprobaba de nuevo la fiabilidad del método. No se consideró, en ninguno de los análisis relativos a este ejemplo, información previa relativa a los parámetros, dado que no se suponía fiable.

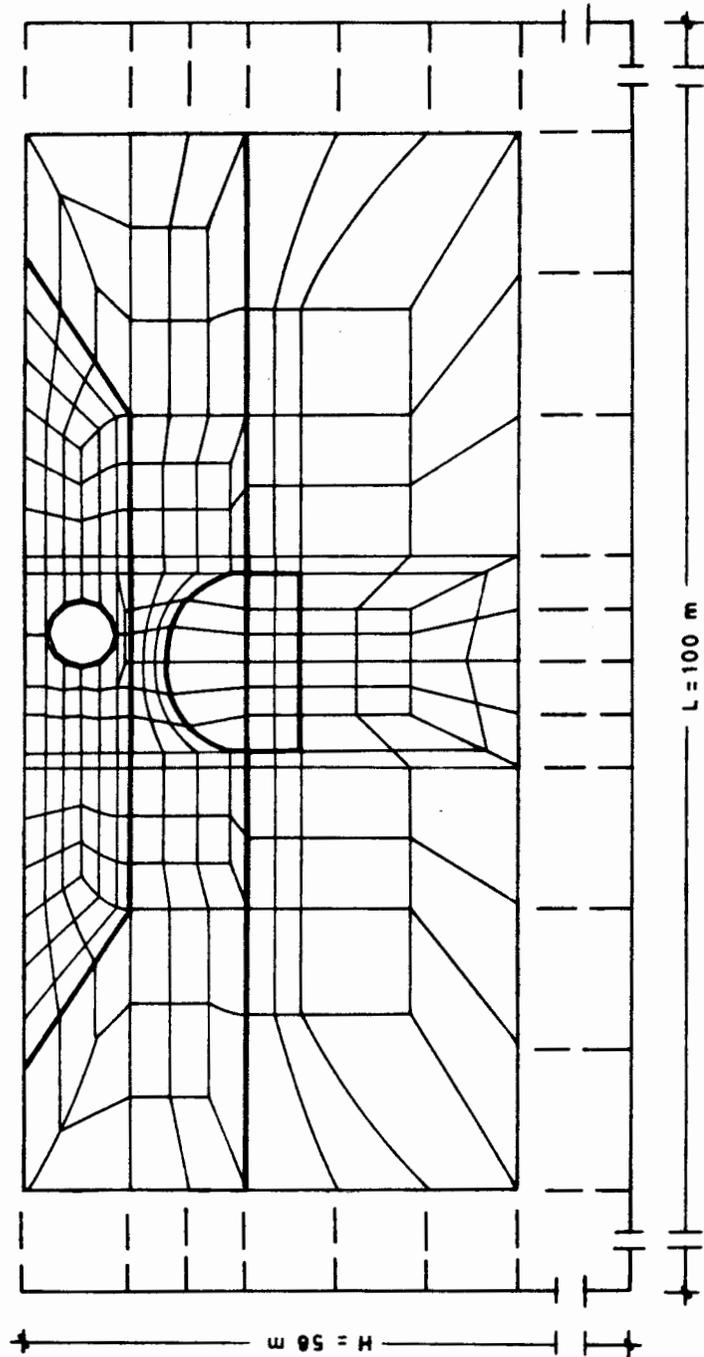
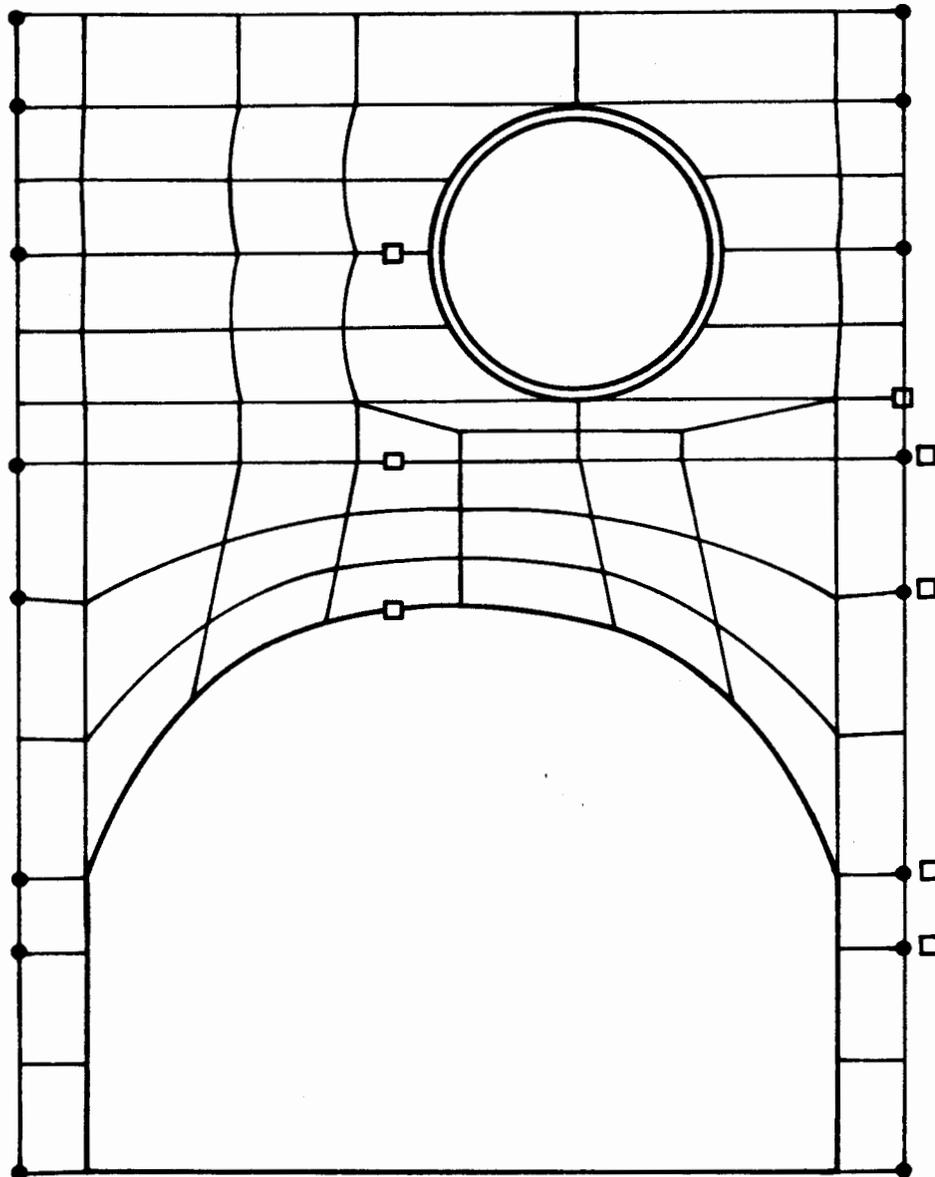


Figura 5.13. Malla de elementos finitos, correspondiente al perfil B, utilizada en la identificación de parámetros.



- Punto de medida vertical
- Punto de medida horizontal

Figura 5.14. Detalle de la malla de elementos finitos en la zona de excavación del túnel, indicando los puntos considerados como puntos de medida: 16 para desplazamientos horizontales y 8 para movimientos verticales.

En la figura 5.15 puede observarse cómo en 7 iteraciones se identifican correctamente estos parámetros. Puede considerarse que se trata de una rápida convergencia, ya que los valores de partida fueron $E_1 = E_2 = E_3 = 5 \text{ MPa}$ y $K_0 = 0.5$.

Una vez comprobado el buen funcionamiento del caso simulado, se aplicó el proceso de identificación a las medidas reales obtenidas en los extensómetros e inclinómetros del perfil B (figuras 5.11, 5.12 y 5.14). Utilizando el criterio de mínimos cuadrados, se obtuvo el proceso iterativo mostrado en la figura 5.16. Se comprueba también que en 7 - 9 iteraciones el método converge a unos valores que pueden considerarse en principio lógicos: $E_1 = 98 \text{ MPa}$, $E_2 = 309 \text{ MPa}$, $E_3 = 407 \text{ MPa}$ y $K_0 = 2.17$.

En la figura 5.17 se observa la variación de la función objetivo con el número de iteraciones, tanto para el caso real, como para el ejemplo simulado. Lógicamente, el valor mínimo es mucho menor en el caso simulado, en el que, salvo errores de redondeo del ordenador, debería ser cero. El mínimo en el caso real proporciona una medida del orden de magnitud del error del problema de identificación, que podemos comparar con el de nuestras medidas. Este valor puede calcularse con la expresión (Wiggins, 1972):

$$\sigma = \sqrt{\frac{J}{m - n}} \quad [5.1]$$

que para este problema, con un valor residual de la función objetivo de $1.33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ conduce a $\sigma = 2.5 \text{ mm}$. Esta es una estimación de la desviación típica "media" de nuestras medidas.

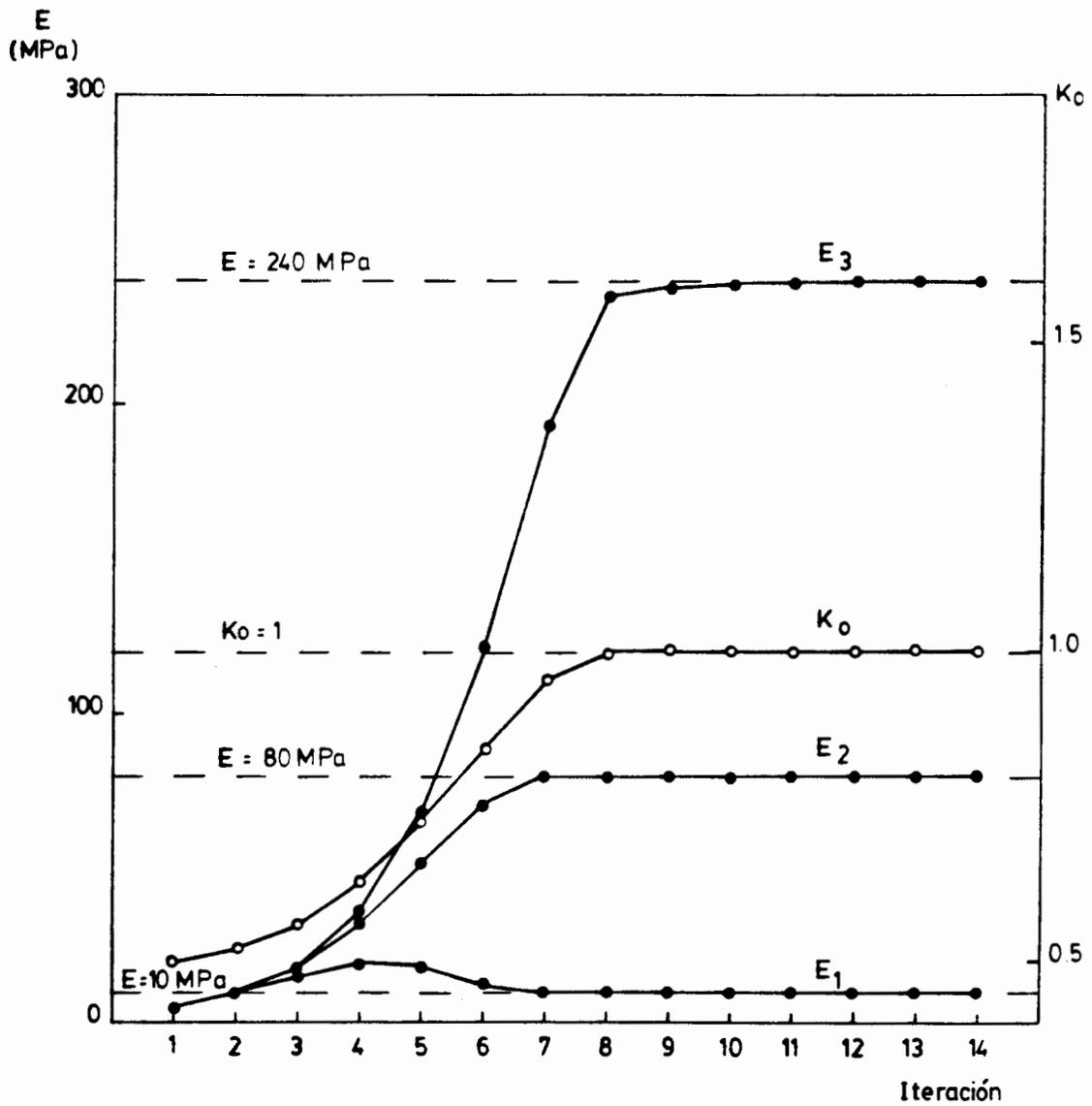


Figura 5.15. Evolución de los valores de los parámetros a identificar con el proceso iterativo. Ejemplo simulado y criterio de mínimos cuadrados.

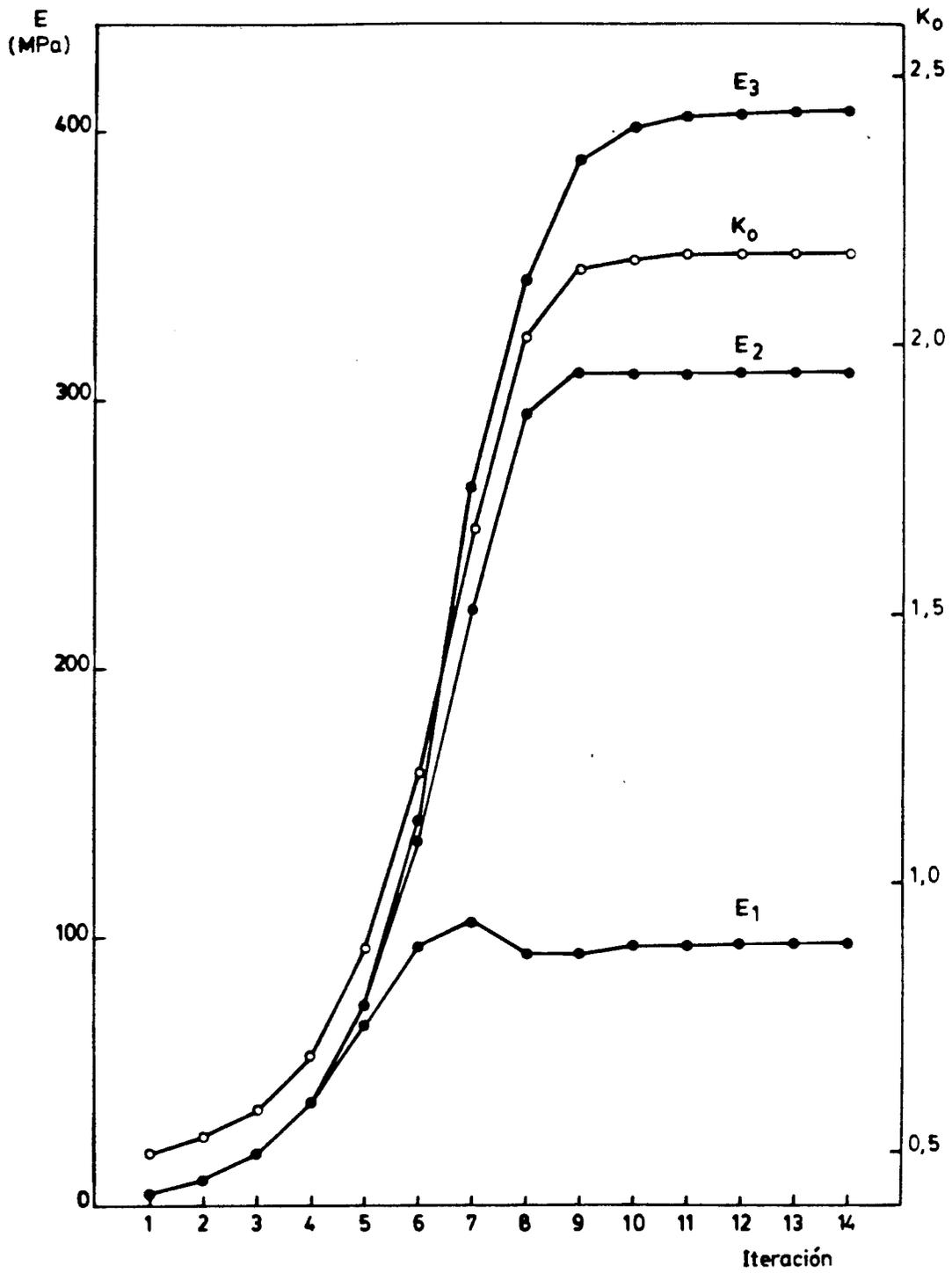


Figura 5.16. Evolución de los valores de los parámetros a identificar con el proceso iterativo. Caso con medidas reales y criterio de mínimos cuadrados.

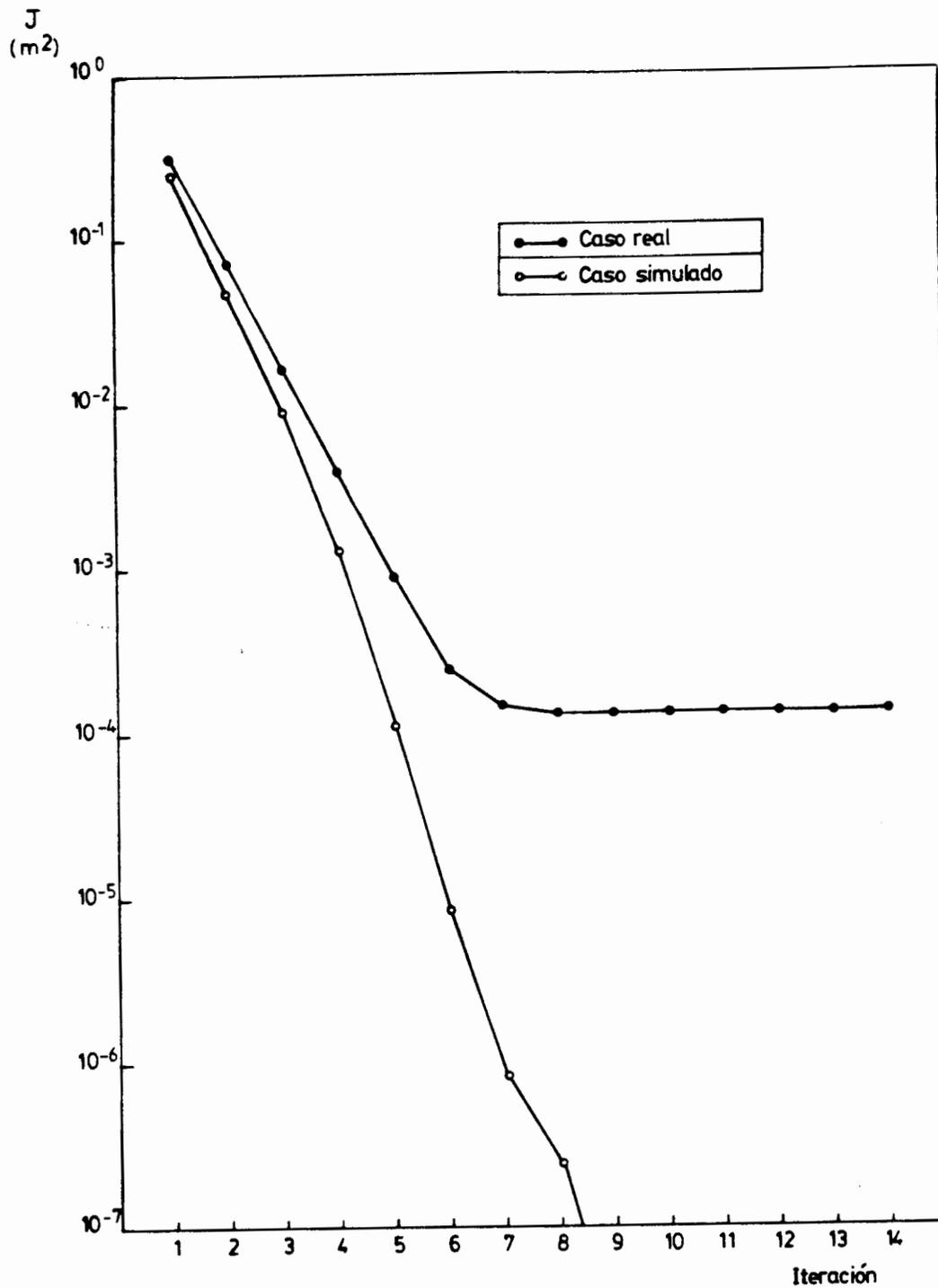


Figura 5.17. Variación del valor de la función objetivo con las iteraciones, tanto para el caso real como para el ejemplo simulado. Corresponde a la identificación realizada con el criterio de mínimos cuadrados.

La figura 5.18 muestra el perfil en estudio con los desplazamientos medidos, y los que proporciona el método de identificación descrito, con los parámetros identificados. Se observa una buena concordancia entre ambos, aunque esta apreciación es totalmente subjetiva, y la "concordancia objetiva" la hemos definido mediante los llamados criterios de identificación. El criterio empleado ha minimizado la suma de los cuadrados de las diferencias entre desplazamientos medidos y calculados en los 24 puntos escogidos. El punto número 5 es el que más se separa de la predicción. La razón básica es que el modelo es esencialmente simétrico, mientras que las medidas no, debido presumiblemente a efectos locales. En general se puede ver que los movimientos horizontales previstos son como un promedio de los medidos, salvo el valor número 5. Los movimientos verticales, sin embargo, se predicen muy bien.

Al igual que se hizo en el ejemplo sintético utilizado en el capítulo cuarto, es interesante estudiar la función objetivo en el entorno del mínimo, puesto que se puede obtener información sobre la "calidad" de la solución encontrada. Por ejemplo, la matriz de sensibilidad (matriz de derivadas de los desplazamientos respecto a los parámetros) permite, obtener información acerca de la estructura del modelo y la interdependencia de las medidas. La matriz densidad de información (apartado 2.4) nos indica esta interdependencia:

$$S = AH = UU^T \quad [5.2]$$

En las figuras 5.19a y 5.19b se han dibujado los coeficientes de algunas de las filas de esta matriz, correspondientes a movimientos

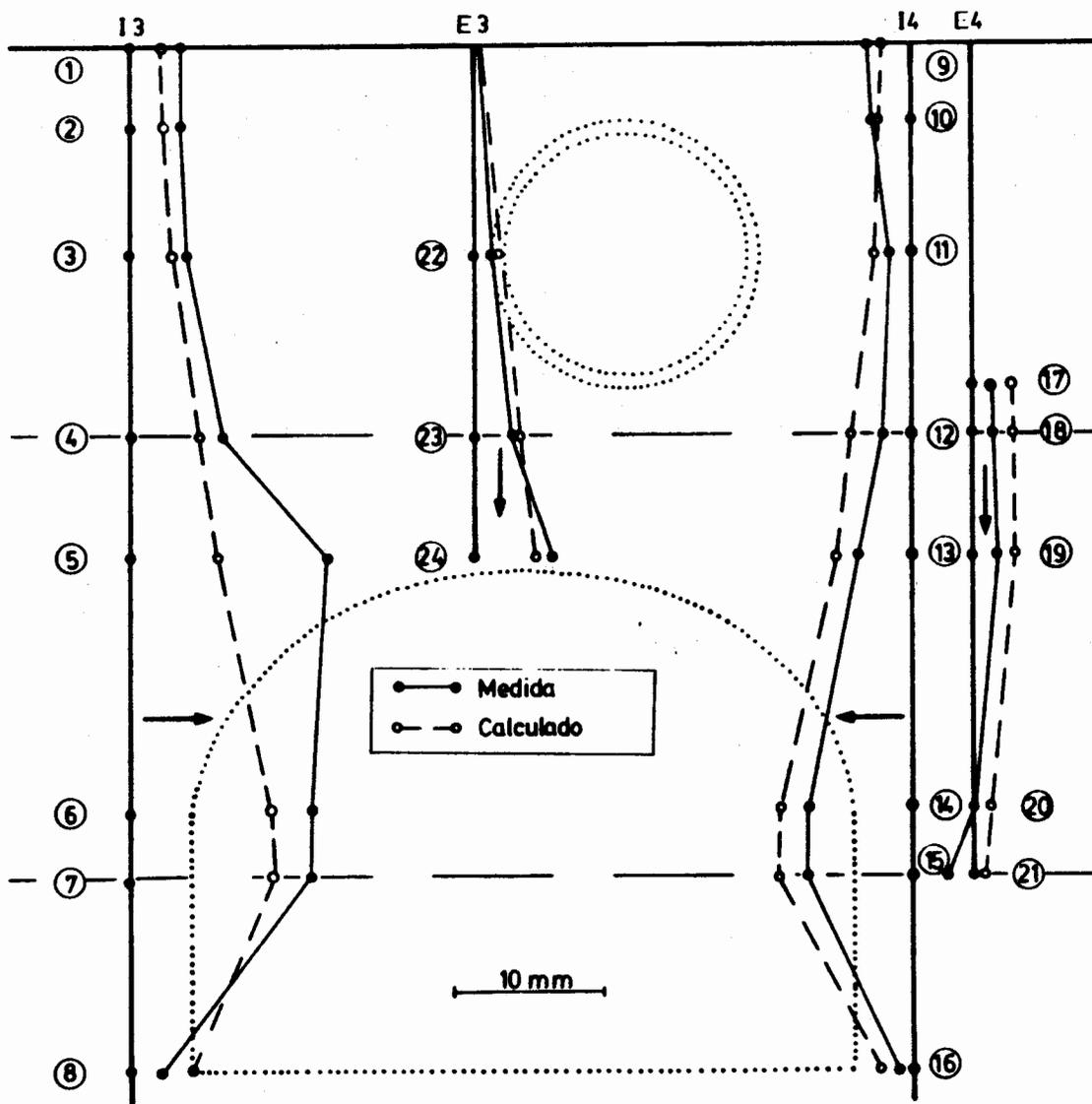


Figura 5.18. Comparación entre movimientos medidos y los calculados utilizando los parámetros identificados con el criterio de mínimos cuadrados. Perfil B.

horizontales y verticales. Puede observarse claramente la simetría del modelo: la medida 6, por ejemplo, presenta un pico positivo y otro negativo, correlacionándose con la medida 14. Ambas corresponden a puntos situados a la misma altura a izquierda y derecha del túnel. Finalmente, puede verse que las medidas del extensómetro E3 son relativamente independientes de las otras, lo cual refleja la necesidad de medir tanto movimientos horizontales como verticales, si se desea identificar módulos y K_0 .

5.5.3 Análisis De Errores.

La ventaja de la metodología estadística desarrollada para identificar parámetros es que permite un análisis de errores de la estimación. Tal como se indicó en el apartado 2.4, este análisis puede llevarse a cabo a partir de la matriz inversa generalizada, o a partir de los valores y vectores propios de la descomposición singular.

Como los parámetros no son dimensionalmente homogéneos, el cálculo de los valores y vectores propios se ha realizado, para este caso concreto, usando 100 MPa como unidad para el módulo de Young, de manera que los valores numéricos de éstos y del coeficiente de empuje al reposo son del mismo orden de magnitud. Esto facilita la comparación directa entre valores propios y entre varianzas de diferentes parámetros.

En la figura 5.20 se indican los valores y vectores propios de la descomposición singular en el mínimo de la función objetivo. Observando la combinación lineal de los parámetros fijada por los

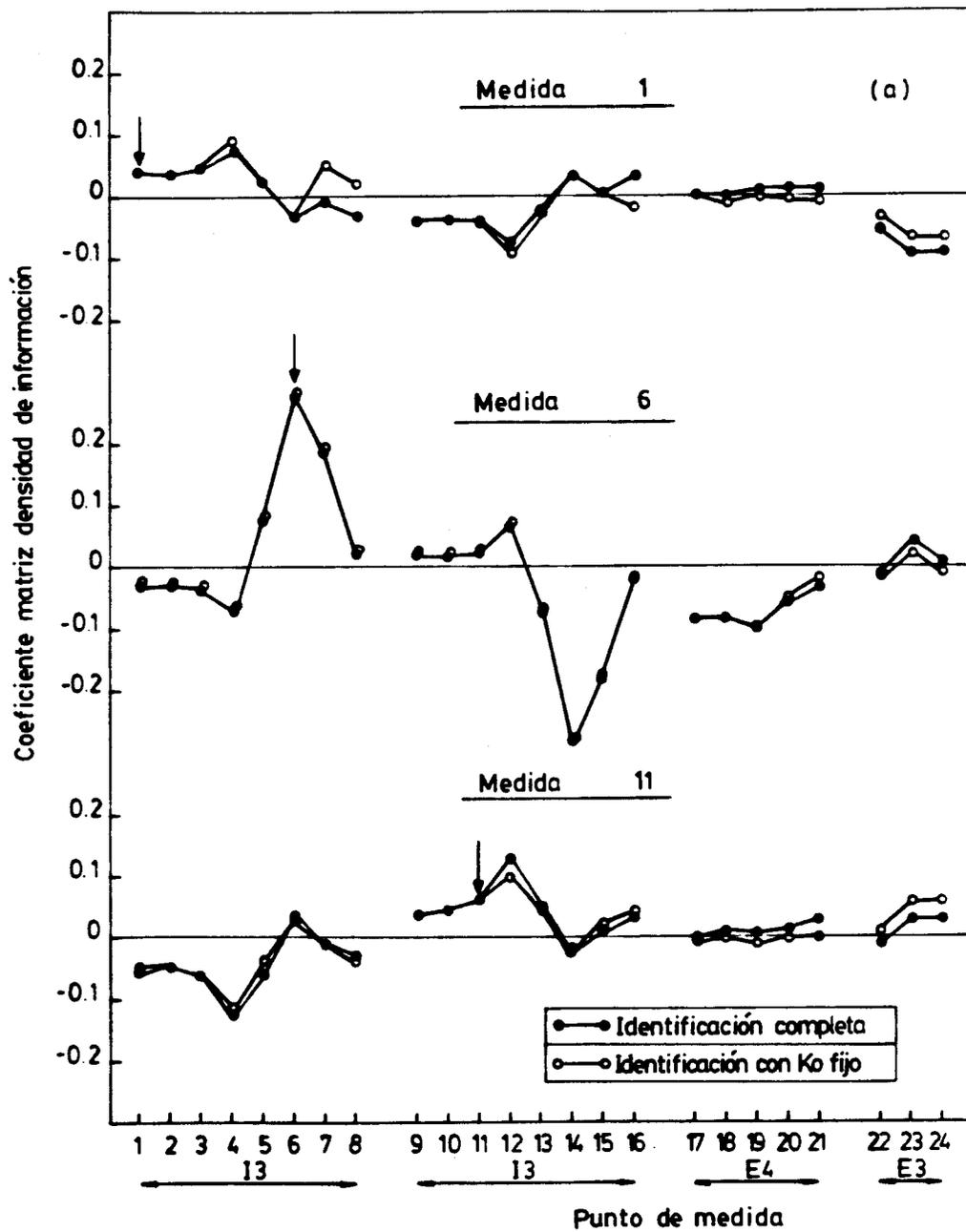


Figura 5.19a. Representación gráfica de algunas de las filas de la matriz densidad de información para los parámetros identificados con el criterio de mínimos cuadrados en el supuesto de que se consideren todos los parámetros y en el caso de que se identifique fijando el valor de K_0 . Corresponde a las medidas horizontales 1, 6 y 11.

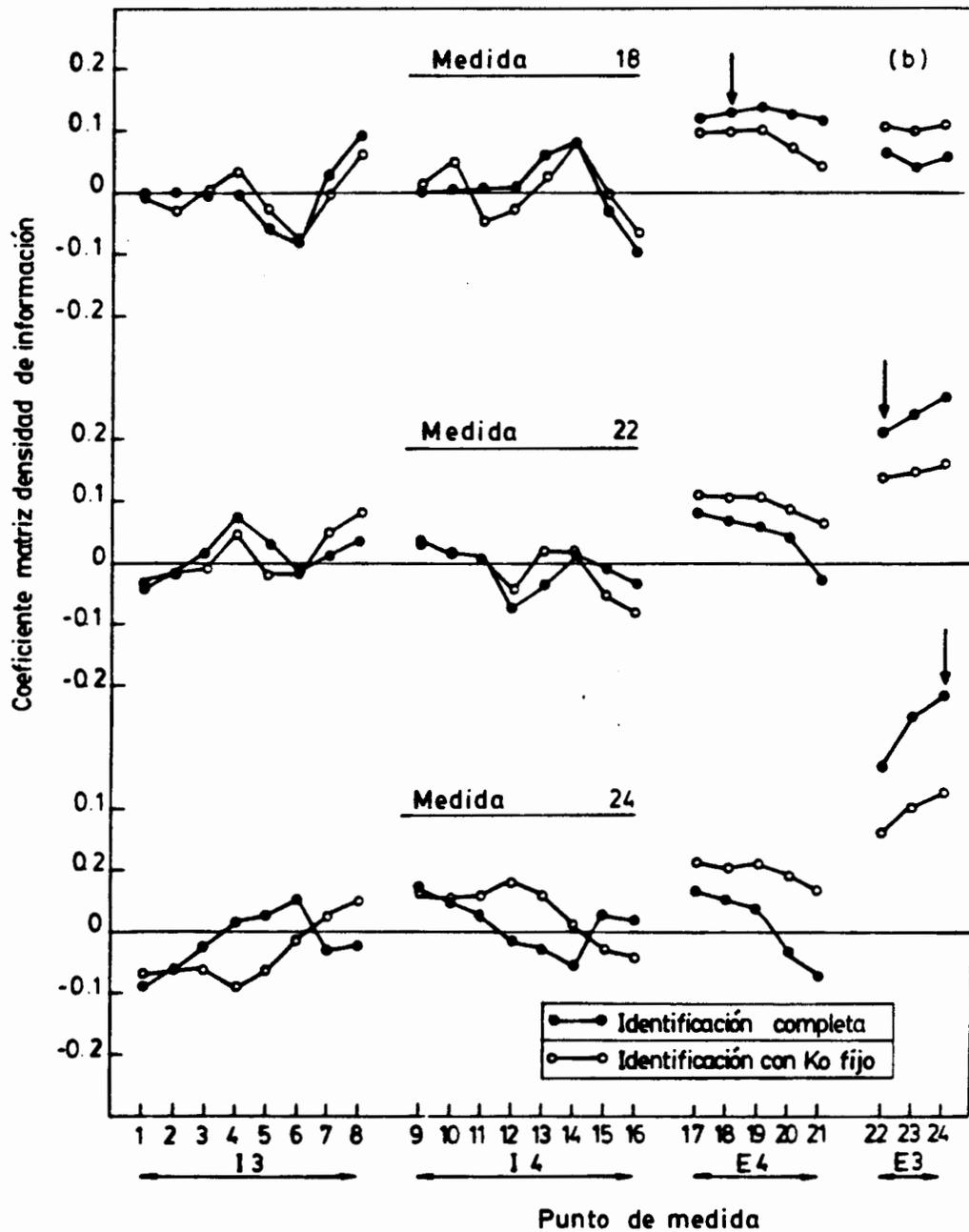


Figura 5.19b. Representación gráfica de algunas de las filas de la matriz densidad de información para los parámetros identificados con el criterio de mínimos cuadrados en el supuesto de que se consideren todos los parámetros y en el caso de que se identifique fijando el valor de K_0 . Corresponde a las medidas verticales 18, 22 y 24.

vectores propios, se deduce que el valor propio mínimo está asociado al módulo E3 , mientras que el valor propio máximo está más relacionado con Ko . Los parámetros E1 y E2 están interrelacionados con los vectores propios 2 y 3. Todo esto influye en los valores de las varianzas, calculadas tomando una varianza uniforme para los desplazamientos medidos $\sigma^2 \text{ mm}^2$. La máxima varianza está asociada al valor propio menor, y en consecuencia, a E3 , y la mínima está asociada a Ko . El hecho de que el tercer módulo sea el "peor" identificado, en el sentido de que es el que tiene mayor varianza, parece estar relacionado con la circunstancia de que se disponen de pocas medidas de ese estrato, y de que los desplazamientos medidos no están muy afectados por las variaciones del módulo E3 .

Utilizando las varianzas indicadas en la figura 5.20, y el valor de 2.5 mm como desviación típica de las medidas, (obtenido a partir de la fórmula [5.1]) que multiplica a todas ellas, puede escribirse el resultado de la identificación de mínimos cuadrados en la forma:

$$\begin{aligned} - E1 &= 98 \pm 15 \text{ MPa} \\ - E2 &= 309 \pm 15 \text{ MPa} \\ - E3 &= 407 \pm 25 \text{ MPa} \\ - K0 &= 2.17 \pm 0.68 . \end{aligned} \tag{5.3}$$

A efectos de comparación, se indican también en la figura 5.20 los valores y vectores propios y las varianzas para el ejemplo simulado utilizado como prueba. Las varianzas de los parámetros identificados son menores en este caso. Sin embargo esto es debido a los diferentes parámetros identificados en cada caso, y no a que la función objetivo tienda a cero en el ejemplo simulado. Si se

<u>Valores Propios</u>		<u>ANÁLISIS REAL</u>		<u>Vectores Propios</u>		
		E		E		Ko
1.370	10 ⁻²	0.0128	-0.1640	-0.2058	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.9647
6.475	10 ⁻³	-0.6758	-0.7156	0.1583	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.0786
1.241	10 ⁻³	-0.7265	0.6128	-0.3072	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.0483
0.947	10 ⁻³	-0.1240	0.2925	0.9155	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.2467
<u>Varianza / σ²</u>		0.3705	0.3514	0.9971	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.0745

<u>Valores Propios</u>		<u>ANÁLISIS SIMULADO</u>		<u>Vectores Propios</u>		
		E		E		Ko
1.9487	10 ⁻¹	0.9257	0.3717	-0.0057	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.0689
3.8379	10 ⁻²	-0.1117	0.4437	0.0928	(10 ² MPa ² /mm ²)	-0.8844
1.6416	10 ⁻²	0.3608	-0.8148	0.8912	(10 ² MPa ² /mm ²)	-0.4450
1.4206	10 ⁻²	0.0166	-0.0387	-0.9917	(10 ² MPa ² /mm ²)	-0.1231
<u>Varianza / σ²</u>		0.0007	0.0032	0.4870	(10 ² MPa ² /mm ²)	0.0088

Figura 5.20. Valores y vectores propios obtenidos en el mínimo de la función objetivo en el caso real y en el ejemplo simulado.

prepara un ejemplo simulado con los parámetros identificados en el ejemplo real, de manera que la función objetivo sea cero en el mínimo, se obtienen las mismas varianzas que en el caso real. Es decir, las varianzas de los parámetros identificados dependen fundamentalmente de los valores de los propios parámetros identificados (además, por supuesto, de la varianza de las medidas). Esta circunstancia es muy importante en el sentido de que limita, por ejemplo, las posibilidades de un diseño óptimo de una instrumentación. Un estudio sobre la mejor colocación de los extensómetros o inclinómetros con el fin de disminuir las varianzas de los parámetros que se vayan a identificar a posteriori, exige suponer en un principio unos valores de dichos parámetros. Se requiere, en definitiva, proporcionar una cierta información a priori.

En consecuencia, la instrumentación óptima (entendiendo como tal aquella que nos va a proporcionar menores varianzas, fijado un modelo determinado) depende de los valores de los parámetros que se identifiquen. Es decir, sólo si se dispone de información previa sobre el orden de magnitud de los parámetros, se puede optimizar la disposición de la instrumentación con este criterio. Por ello, si no se dispone de dicha información, un criterio posible es colocar los instrumentos de medida en las zonas de máximos movimientos previstos. Para los problemas clásicos de excavación de túneles con geometrías similares, estas zonas se sitúan sobre la clave y junto a los hastiales.

Hasta ahora se ha supuesto que todas las medidas tenían la misma varianza. Sin embargo, en este ejemplo, hay dos grupos de medidas claramente diferenciadas: las horizontales y las verticales. Al estar realizadas con instrumentos diferentes se debería considerar la varianza de cada instrumento por separado, tal como se hizo en los ejemplos teóricos resueltos en el capítulo anterior. Para tener en cuenta estas diferencias, sería preciso en primer lugar utilizar el criterio de máxima verosimilitud como método de identificación. De esta forma se introduciría en el cálculo la matriz de covarianzas de las medidas, que ya no sería la identidad.

Sin embargo, puede hacerse una primera estimación de las varianzas de los parámetros considerando varianzas diferentes para cada grupo de medidas, utilizando el criterio de mínimos cuadrados, mediante la expresión [2.87]:

$$\text{var}(\Delta p_i) = \sum_{j=1}^p \left(\frac{V_{ij}^2}{\lambda_j^2} \right) \text{var}(\Delta x_j^*) \quad [5.4]$$

donde debe usarse una varianza para las medidas verticales σ_E^2 y otra para las medidas horizontales σ_I^2 . Esta fórmula es una aproximación útil cuando sólo se ha planteado el método de mínimos cuadrados, pero en cualquier caso es mejor calcular las varianzas correctamente introduciendo la matriz de covarianzas completa en la función objetivo y utilizando el criterio de máxima verosimilitud (en el siguiente apartado se calculan así). Los valores orientativos obtenidos con la expresión 5.4 se han dibujado en la figura 5.21, en función de la relación entre desviación típica de medidas horizontales y verticales. Las varianzas están referidas a un valor medio calculado según la expresión [4.16].

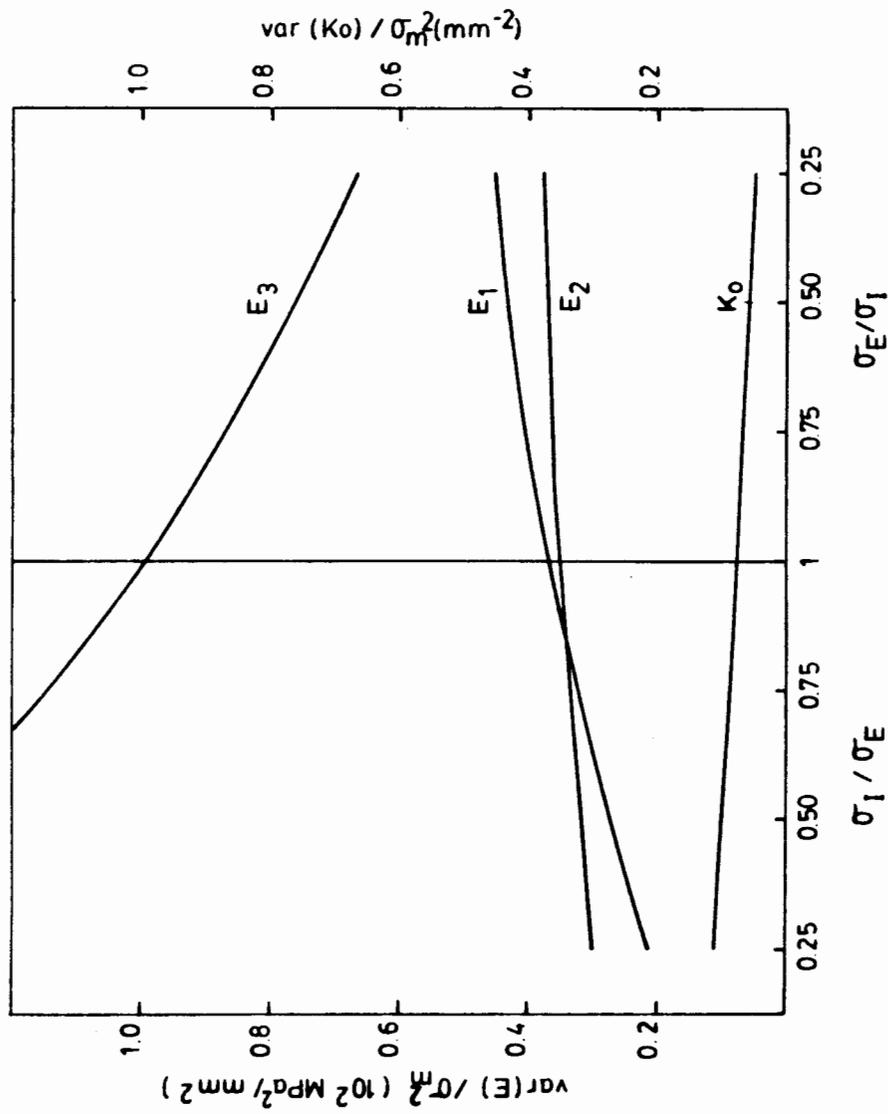


Figura 5.21. Varianzas de los parámetros estimados en función de la relación entre desviaciones típicas de medidas horizontales y verticales, calculadas de forma aproximada utilizando el criterio de mínimos cuadrados.

Puede comprobarse que para algunas combinaciones de σ_I / σ_E , el tercer módulo se hace prácticamente inidentificable.

5.5.4 Identificación De K_0 .

El coeficiente de empuje al reposo, K_0 , es un parámetro que tradicionalmente ha sido difícil de determinar. Sin embargo es muy importante disponer de una estimación ya que los movimientos del terreno dependen mucho de su valor.

Ya se ha visto que con la metodología propuesta es posible identificarlo correctamente. No obstante, debido a su importancia, se ha querido estudiar en detalle el proceso de identificación asociado a este parámetro.

Para ello se consideró fijo el valor de K_0 y se identificaron los tres módulos de los estratos. De esta forma se generó la gráfica J (valor de la función objetivo en el mínimo) - K_0 , que se ha representado en la figura 5.22 Lógicamente el valor mínimo corresponde a $K_0 = 2.17$, coincidente con el encontrado en la identificación completa con los cuatro parámetros. En realidad, la figura 5.22 representa una sección no plana de la función objetivo del caso completo. La forma de la función objetivo indica que cualquier valor de K_0 comprendido entre 1.7 y 2.7 proporcionaría medidas parecidas. En realidad se identifican rangos de valores para los parámetros, y no valores concretos. Esto es consistente con la varianza de K_0 obtenida en el proceso de identificación.

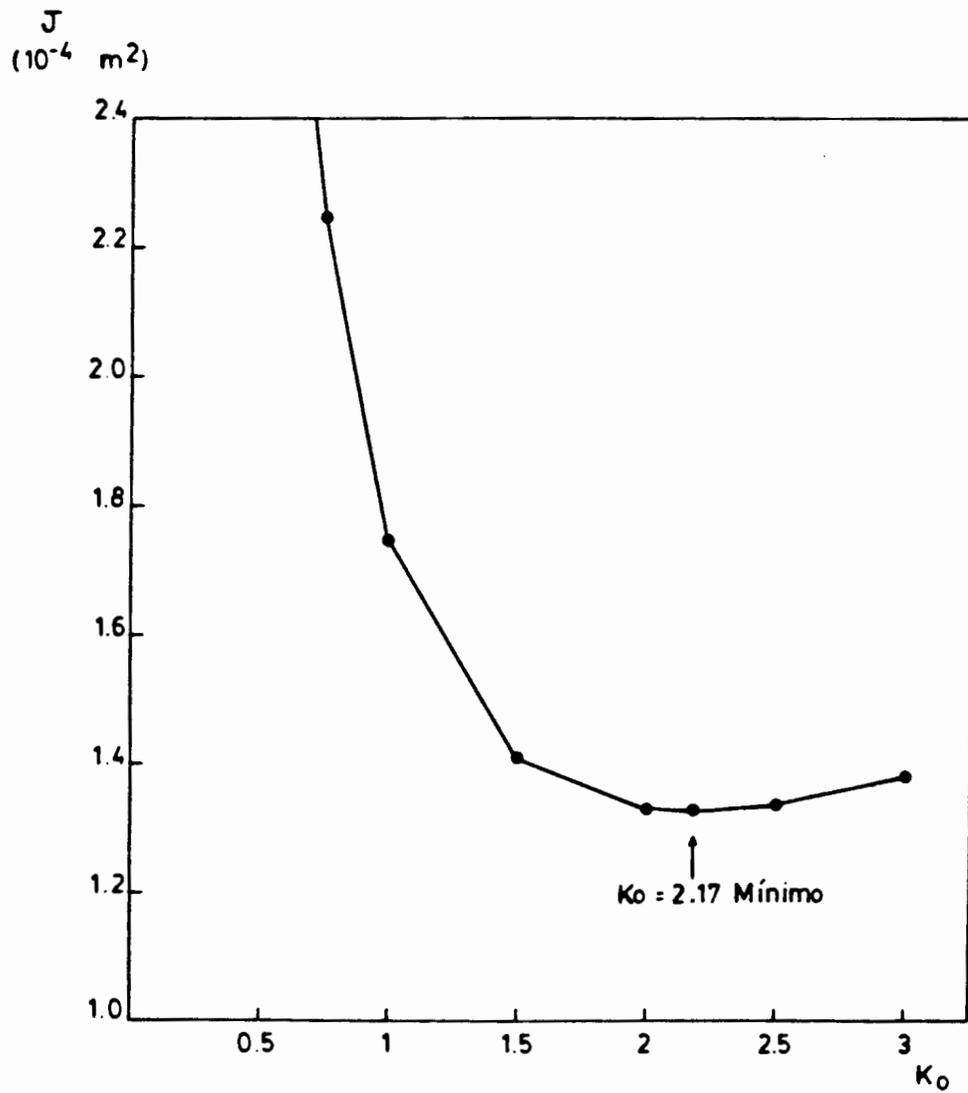


Figura 5.22. Valor del mínimo de la función objetivo obtenido en diferentes procesos de identificación en los que se fijó el parámetro K_0 (criterio de mínimos cuadrados).

Los módulos de elasticidad identificados fijando diferentes valores de K_0 se han dibujado en la figura 5.23. Puede observarse que para el rango de K_0 entre 1.7 y 2.7, los valores de los módulos son, en principio, lógicos. De nuevo se comprueba que E_1 y E_2 varían relativamente poco, mientras que pequeñas variaciones de K_0 influyen mucho en E_3 . De una forma clara se comprueba que valores de K_0 menores de 1.5 conducen a módulos no coherentes con el problema planteado, aumentando excesivamente el módulo de elasticidad del relleno.

En lo que se refiere a la estructura del modelo y su interrelación con las medidas, representada por la matriz densidad de información, los cambios respecto a la identificación incluyendo K_0 no son importantes. En la figura 5.19 se han dibujado las filas de la matriz densidad de información para el caso de que se fije $K_0 = 2.17$ y sólo se identifiquen los tres módulos. Por supuesto, los parámetros estimados en este caso coincidieron con los obtenidos anteriormente en la identificación completa, sin embargo, el problema es distinto en cuanto a planteamiento, y la figura 5.19 muestra el cambio que esto produce en la estructura del modelo: se observa una mayor interdependencia entre los extensómetros E_3 y E_4 , y entre los desplazamientos horizontales y verticales.

5.5.5 Criterio De Máxima Verosimilitud.

En el apartado 5.5.2 se calcularon las varianzas de los parámetros identificados considerando distintas las varianzas de las medidas horizontales y verticales, a partir de la ecuación

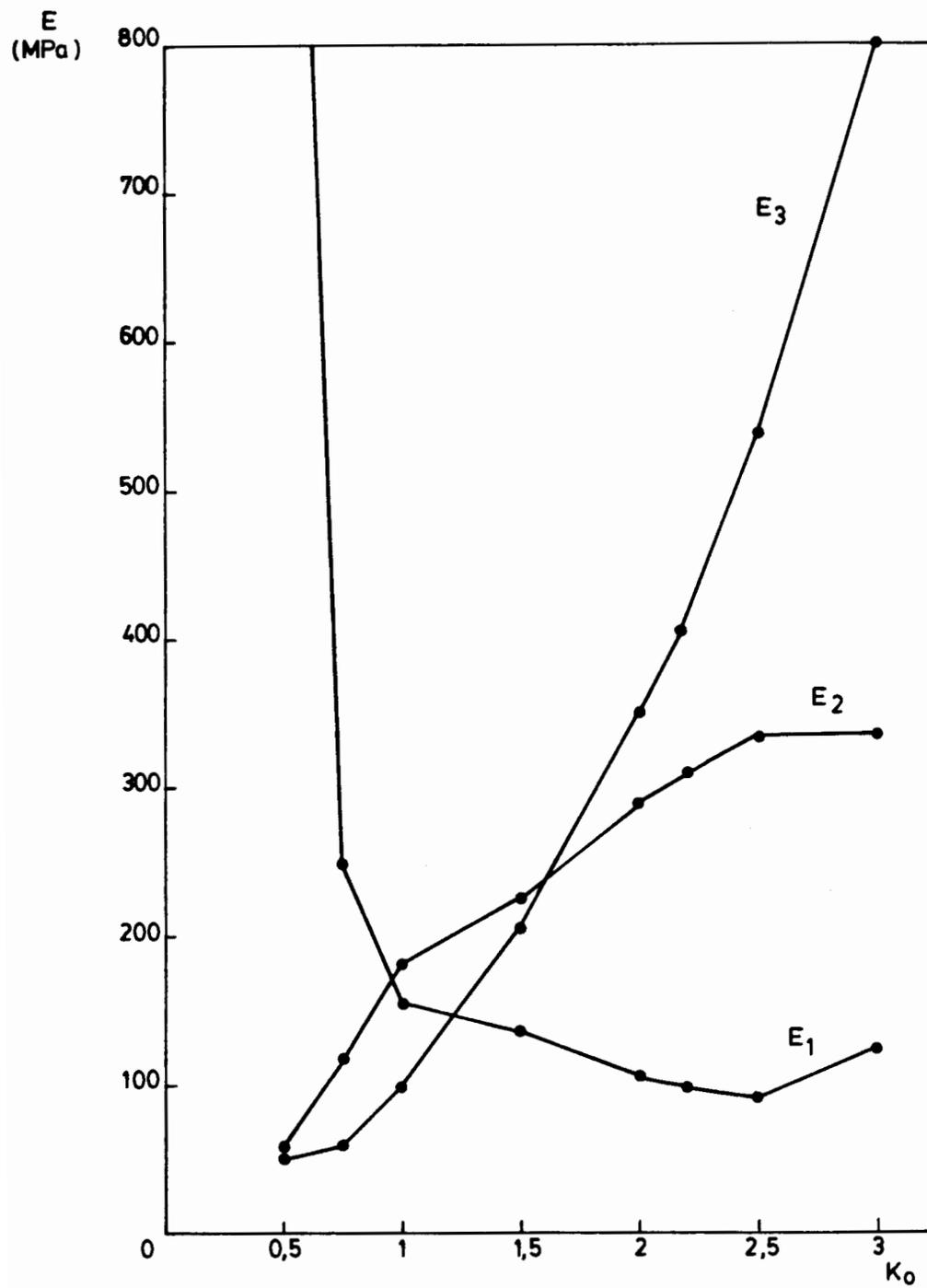


Figura 5.23. Valor de los parámetros estimados en cada proceso de identificación con K_0 fijado (criterio de mínimos cuadrados).

[5.4]. Ya se ha comentado que este no es el procedimiento correcto para ese caso y que el criterio a utilizar es el de máxima verosimilitud. La razón es que el criterio de mínimos cuadrados es un caso particular del de máxima verosimilitud con una matriz de covarianzas del tipo: $\sigma^2 I$. De manera que si se desea reproducir las diferentes varianzas de las medidas horizontales y verticales, la matriz de covarianzas a usar debe ser del tipo:

$$\begin{pmatrix} \sigma_I^2 & & & & 0 \\ & \sigma_I^2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \sigma_E^2 & \\ 0 & & & & \sigma_E^2 \end{pmatrix} \quad [5.5]$$

asignando a cada medida su varianza en el propio proceso de identificación. Tiene entonces más sentido usar la ecuación [5.4] para este caso.

Si se supone que los errores en las medidas son independientes entre sí, la matriz anterior es diagonal. Con este supuesto, y utilizando los procedimientos descritos en los capítulos tercero y cuarto, se estimó un nuevo conjunto de parámetros maximizando la verosimilitud de observar unos desplazamientos medidos. Se realizaron análisis de identificación suponiendo las siguientes varianzas de las medidas:

$$\begin{aligned} \sigma_I^2 / \sigma_E^2 &= 2.25, 4. \text{ y } 9. \\ \sigma_E^2 / \sigma_I^2 &= 2.25, 4. \text{ y } 9. \end{aligned}$$

Por supuesto, el análisis con $\sigma_E/\sigma_I = 1$ corresponde a la solución de mínimos cuadrados obtenida anteriormente. Los parámetros obtenidos en estas condiciones se han representado en la figura 5.24. Puede observarse que los módulos E1 y E2 varían muy poco, mientras que E3 y Ko dependen bastante de σ_E^2/σ_I^2 .

Como ejercicio de comparación se han dibujado en la figura 5.25 los desplazamientos medidos en el perfil B, y los correspondientes a una estimación de máxima verosimilitud con $\sigma_I/\sigma_E = 2$ y $\sigma_E/\sigma_I = 2$. Como era de esperar, en el primer caso se obtiene una buena aproximación en los desplazamientos verticales, mientras que en el segundo se predicen mejor los movimientos horizontales a costa de una peor aproximación a los verticales. A pesar de todo, es muy difícil realizar una predicción mejor de los movimientos horizontales, debido a la no simetría de las medidas realizadas (debida seguramente a circunstancias locales del suelo), enfrentada con la simetría propia del modelo utilizado.

Las varianzas de los parámetros calculadas identificando con el criterio de máxima verosimilitud se han representado en la figura 5.26 en función de σ_E/σ_I , referidas a una varianza media σ_m^2 . Comparando con la figura 5.21 se observa un aspecto general parecido, aunque los valores numéricos en algunos casos son bastante diferentes. Es interesante destacar que para valores de $\sigma_E/\sigma_I < 1$ el aumento en la varianza de E3 hace este parámetro prácticamente no identificable.

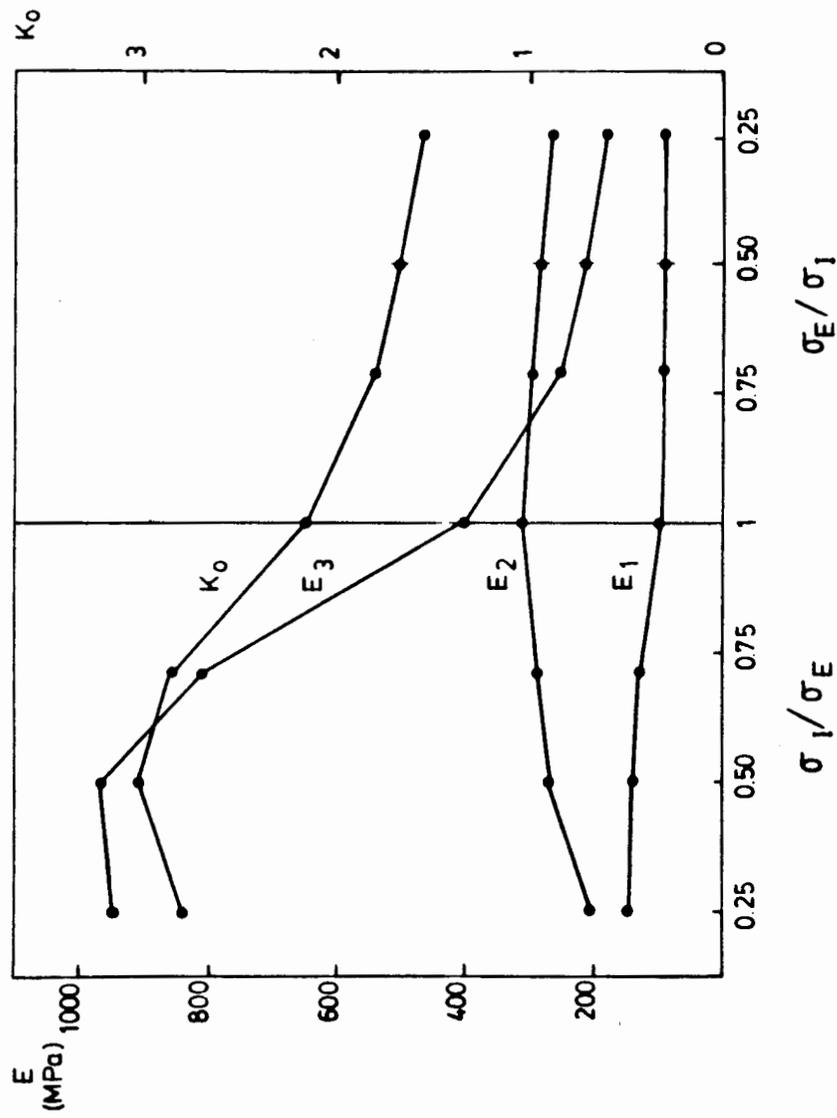


Figura 5.24. Valor de los parámetros estimados utilizando el criterio de máxima verosimilitud, en función de la matriz de covarianzas diagonal usada, definida a partir de la relación entre desviaciones típicas de medidas horizontales y verticales.

La estimación de las varianzas de las medidas realizadas puede efectuarse a través de dos caminos: estudiando el error cometido en el propio proceso de medida (lo cual no siempre es factible), o intentando identificar estas varianzas como un parámetro más. Este método se utilizó con éxito en los ejemplos del capítulo anterior. Sin embargo, un intento de identificar el cociente σ_I / σ_E en este ejemplo, tal como se describió en dicho capítulo, conducía a valores muy altos del mismo. Esta circunstancia es debida a que el modelo es prácticamente simétrico y las medidas no, de manera que el proceso de identificación atribuye las diferencias entre medidas y predicciones a errores del instrumento correspondiente. En este caso el modelo no puede reproducir la asimetría de las medidas horizontales, por lo que no puede aplicarse el criterio de máxima verosimilitud y atribuir los errores al inclinómetro, sin haber estudiado antes el problema real. Este efecto puede ser especialmente importante en algunos problemas (de hecho, en el capítulo cuarto se vio la importancia del propio modelo en la identificación de las varianzas).

En general, tanto el estudio de los aparatos de medida, como el propio proceso de identificación, parece indicar que la varianza de las medidas verticales ha sido menor que la varianza de las horizontales, en un rango cercano a la unidad. La influencia de esta relación en los parámetros se ve en las figuras 5.24 y 5.26. Puede observarse en dichas figuras que para este ejemplo, y con dicho rango, el valor numérico de los parámetros no difiere sustancialmente del obtenido con el método de mínimos cuadrados.

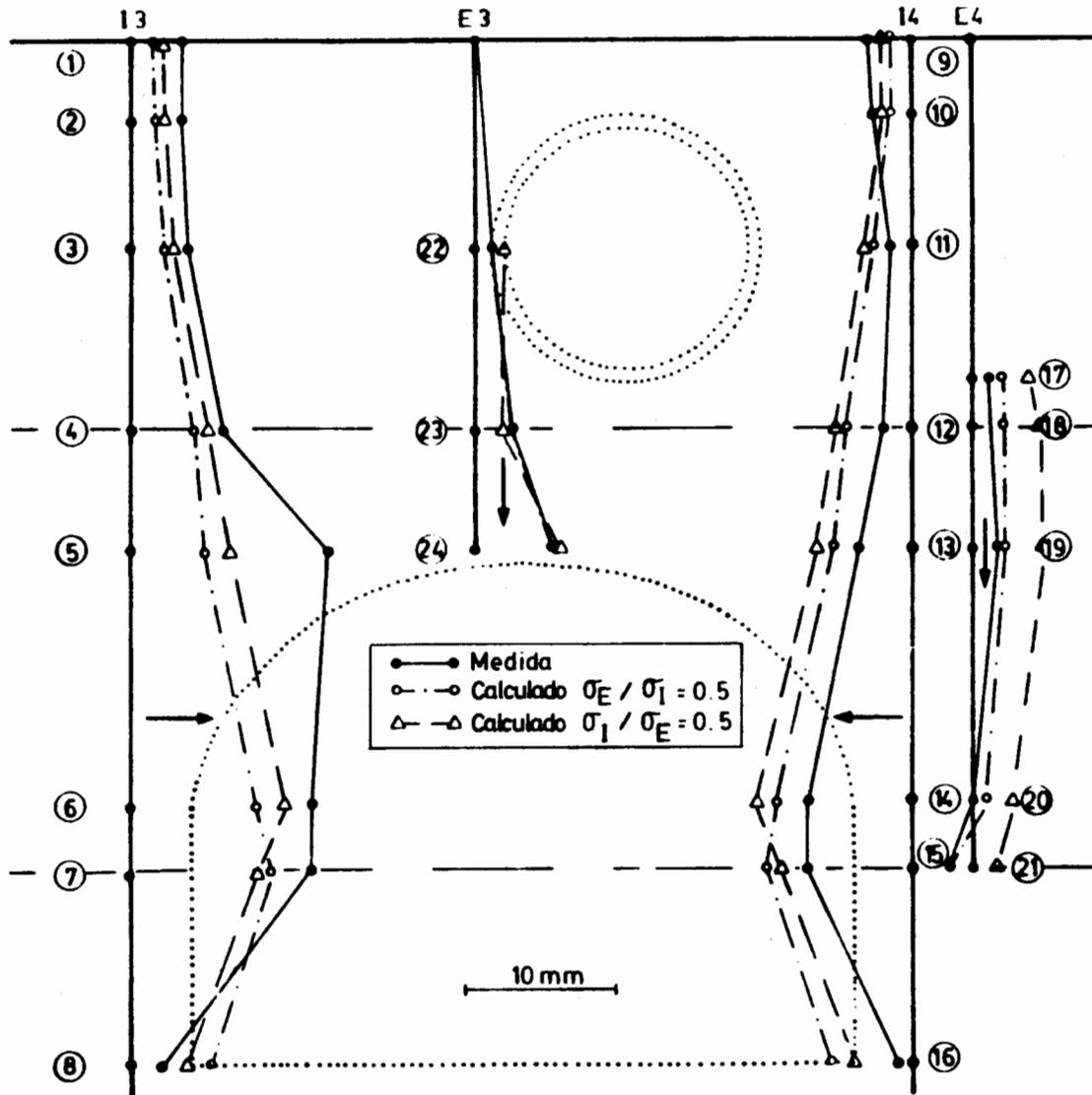


Figura 5.25. Representación de los movimientos medidos y los calculados con los parámetros identificados con dos matrices de covarianza diagonales diferentes. Perfil B.

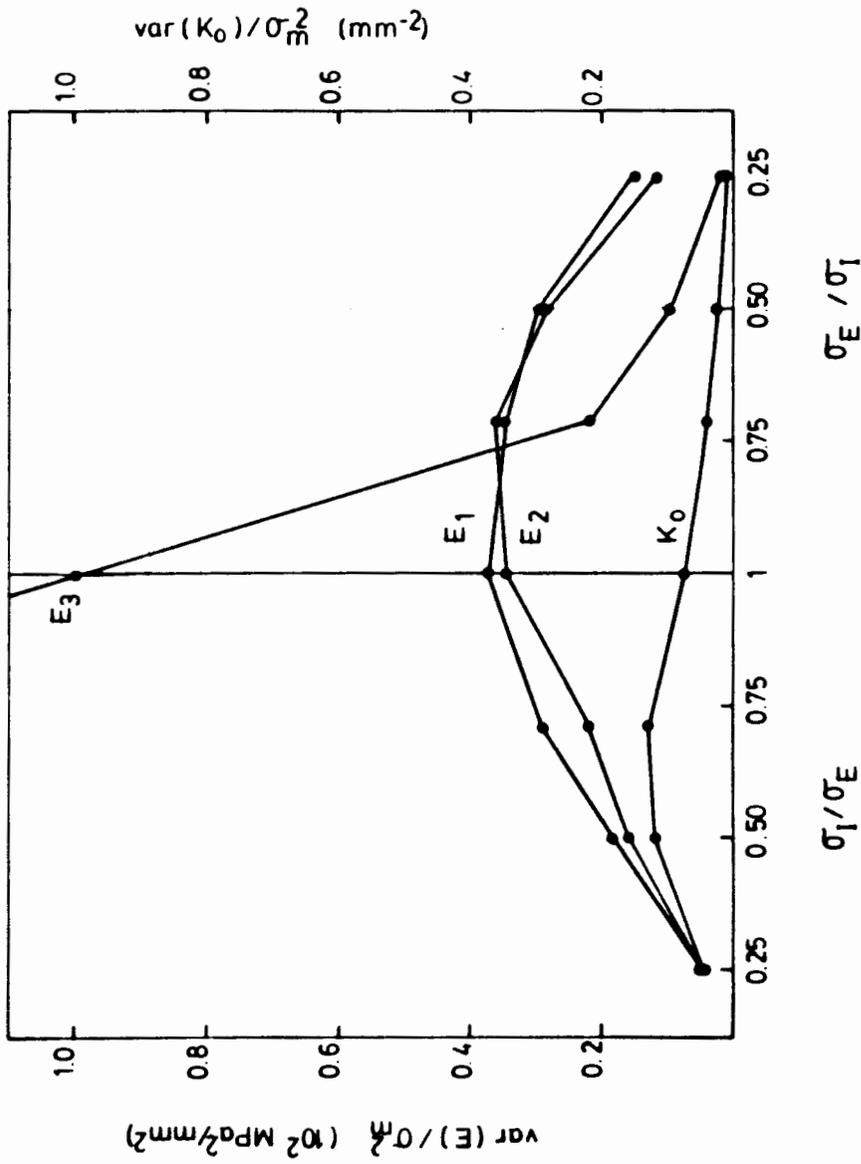


Figura 5.26. Valor de las varianzas de los parámetros identificados utilizando el criterio de máxima verosimilitud, en función de la matriz de covarianzas diagonal usada, definida a partir de la relación entre desviaciones típicas de medidas horizontales y verticales.

5.5.6 Utilización De Matrices De Covarianza Completas.

En un proceso de aproximación continuada al problema planteado, y utilizando la metodología descrita en los capítulos anteriores, se realizó finalmente la estimación de parámetros considerando las medidas no independientes entre sí, es decir, tomando una matriz de covarianzas no diagonal (completa) para las medidas. En este caso, las medidas verticales se consideraron independientes entre sí, mientras que las horizontales, realizadas con un inclinómetro, se tomaron dependientes en la forma indicada en la ecuación [4.36]. La matriz de covarianzas de las medidas que resulta es del tipo:

$$\left[\begin{array}{c|c} C_{ij} = \sigma_I^2 \sum_{m=1}^{\min(i,j)} t_m^2 & 0 \\ \hline 0 & \begin{array}{cc} \sigma_E^2 & 0 \\ 0 & \dots \\ & \sigma_E^2 \end{array} \end{array} \right]$$

[5.6]

donde se ha tomado el orden y las longitudes definidos en la figura 5.18: las 16 primeras medidas son horizontales y las 8 siguientes verticales. Lógicamente, las medidas de la zona superior de los inclinómetros son las de mayor varianza, debido a la acumulación de los errores. Se consideró el punto inferior como fijo y con varianza nula. Con el fin de poder llevar a cabo un análisis de sensibilidad del problema, se realizaron varias identificaciones variando σ_E / σ_I . En este caso, como no se puede hablar de una sola varianza horizontal, se ha fijado la submatriz

correspondiente a las medidas horizontales, y se ha variado la submatriz debida a las medidas verticales, que era de la forma $\sigma^2 I$.

Desde un punto de vista exclusivamente numérico, el empleo de matrices de covarianzas no diagonales requirió en general el uso del algoritmo de Marquardt, descrito en el capítulo segundo, ya que el algoritmo de Gauss-Newton por sí solo no convergía en muchos casos. En la figura 5.27 se puede observar la evolución del proceso iterativo, para un ejemplo típico con matriz de covarianzas completa. Puede observarse cómo el método de Marquardt permite obtener una convergencia en un ejemplo en el que el método de Gauss-Newton diverge, si bien requiere un número importante de iteraciones.

En la figura 5.28 se representan los parámetros estimados variando $\beta = 1/\sigma_E^2$. Estos resultados no son comparables de forma directa con los obtenidos para el caso de matriz de covarianzas diagonal (figura 5.24), pero puede estudiarse una posible coincidencia entre ambos conjuntos de resultados. En efecto, para σ_E^2 bajo se observa que los valores de los parámetros son del mismo orden de magnitud. Esto responde al hecho de que si la varianza de las medidas verticales es pequeña, la matriz de covarianzas concede más peso a estas medidas, frente a las horizontales (cuya matriz de covarianzas es fija en todo el proceso). Es decir, en la matriz de covarianzas inversa, la submatriz $C_{x I}^{-1}$ es constante, y $C_{x E}^{-1} = (1/\sigma_E^2) I$ aumenta. Como consecuencia de ello, el efecto de que $C_{x I}^{-1}$ sea llena en vez de diagonal, es poco perceptible en este ejemplo.

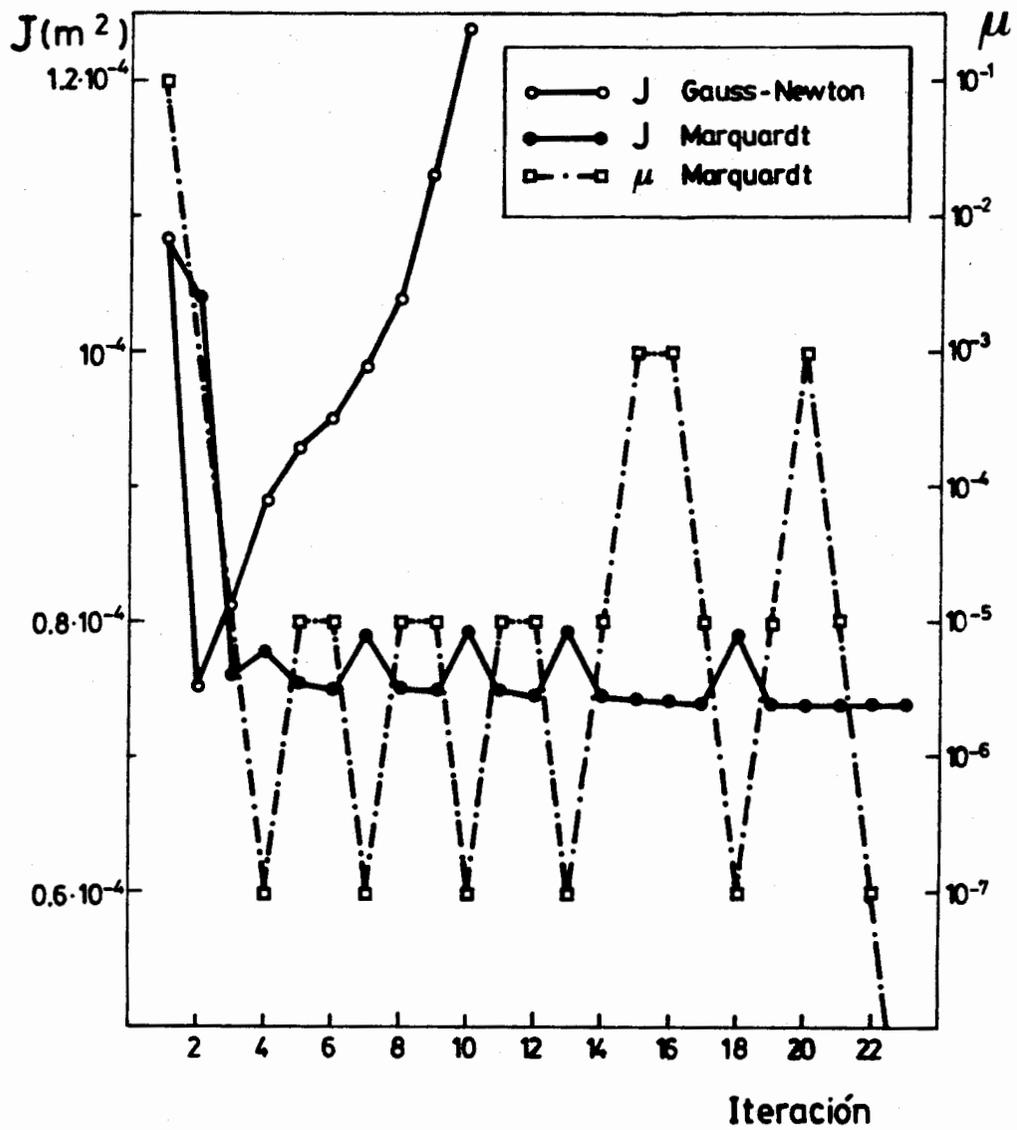
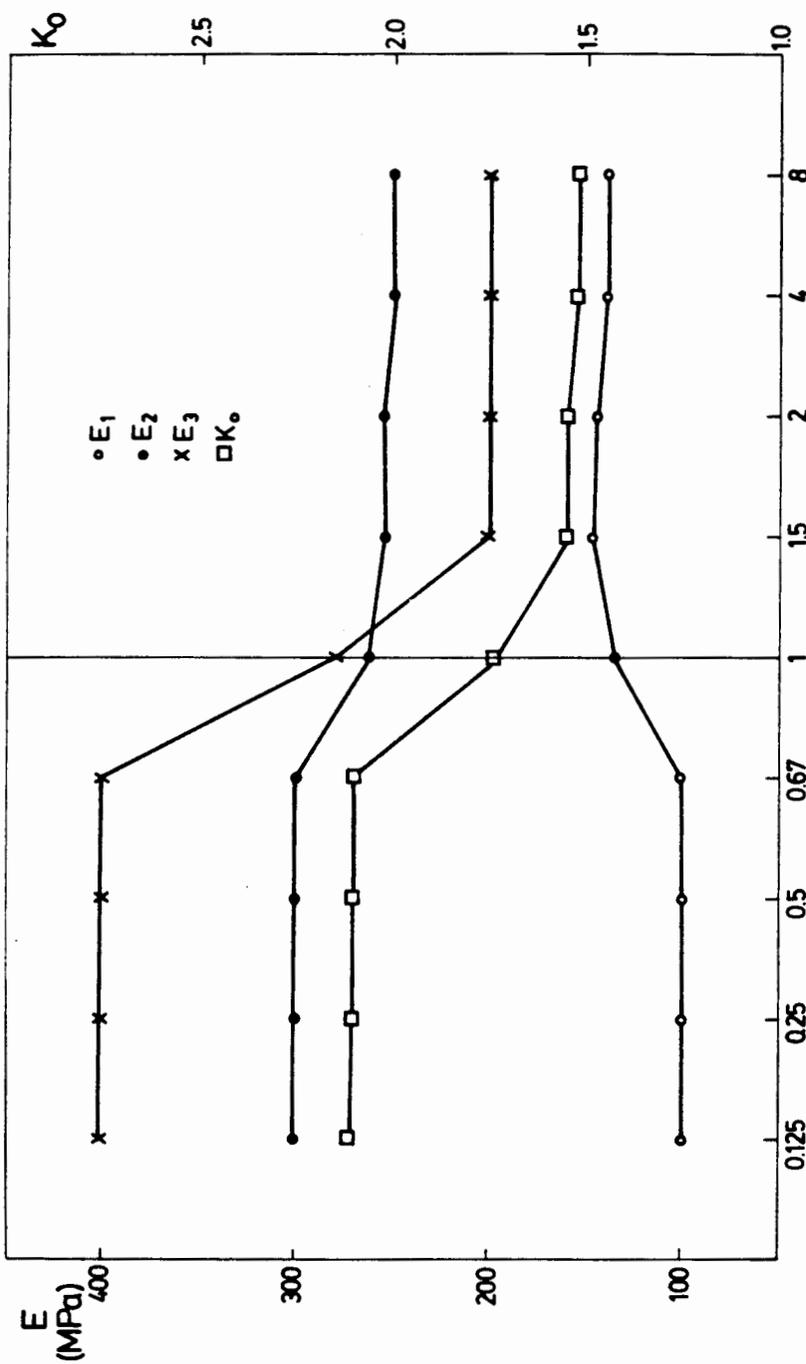


Figura 5.27. Evolución de la función objetivo y del parámetro de Marquardt en función del proceso iterativo. Se considera el algoritmo de Gauss-Newton y el de Levenberg-Marquardt.



$$\beta = \frac{1}{\sigma_E^2} (Cx)^{-1} E = \beta I$$

Figura 5.28. Valores de los parámetros identificados con el criterio de máxima verosimilitud en función de la matriz de covarianzas llena utilizada.

Salvo esta coincidencia, los puntos correspondientes a varianza alta de las medidas verticales no son comparables en las figuras 5.24 y 5.28, y en cualquier caso, presentan valores mucho más diferentes, prueba de que en esos casos la matriz de covarianzas llena tiene influencia.

Las varianzas obtenidas en el proceso de identificación se representan en la figura 5.29, referidas como siempre a una varianza media, calculada en este caso con la expresión [4.16] y tomando un valor fijo $\sigma_I^2 = 1$.

De nuevo las figuras 5.26 y 5.29 no son directamente comparables, debido a que la estructura de error de las matrices de covarianza es diferente en cada figura. Además, la varianza media usada en cada caso ha sido distinta.

La identificación correspondiente a $\beta = 1$ se ha calculado utilizando una desviación típica de 2 mm, obtenida con la fórmula [5.1] a partir del valor de J en el mínimo. Los resultados obtenidos son:

- E1=135 ± 23 MPa
- E2=268 ± 15 MPa
- E3=278 ± 16 MPa
- Ko=1.74 ± 0.6 . [5.7]

Estos valores son ligeramente diferentes a los presentados en la identificación por mínimos cuadrados, pero es preciso tener en cuenta que corresponden al valor $\beta = 1$, y las variaciones de los parámetros en su entorno son importantes.

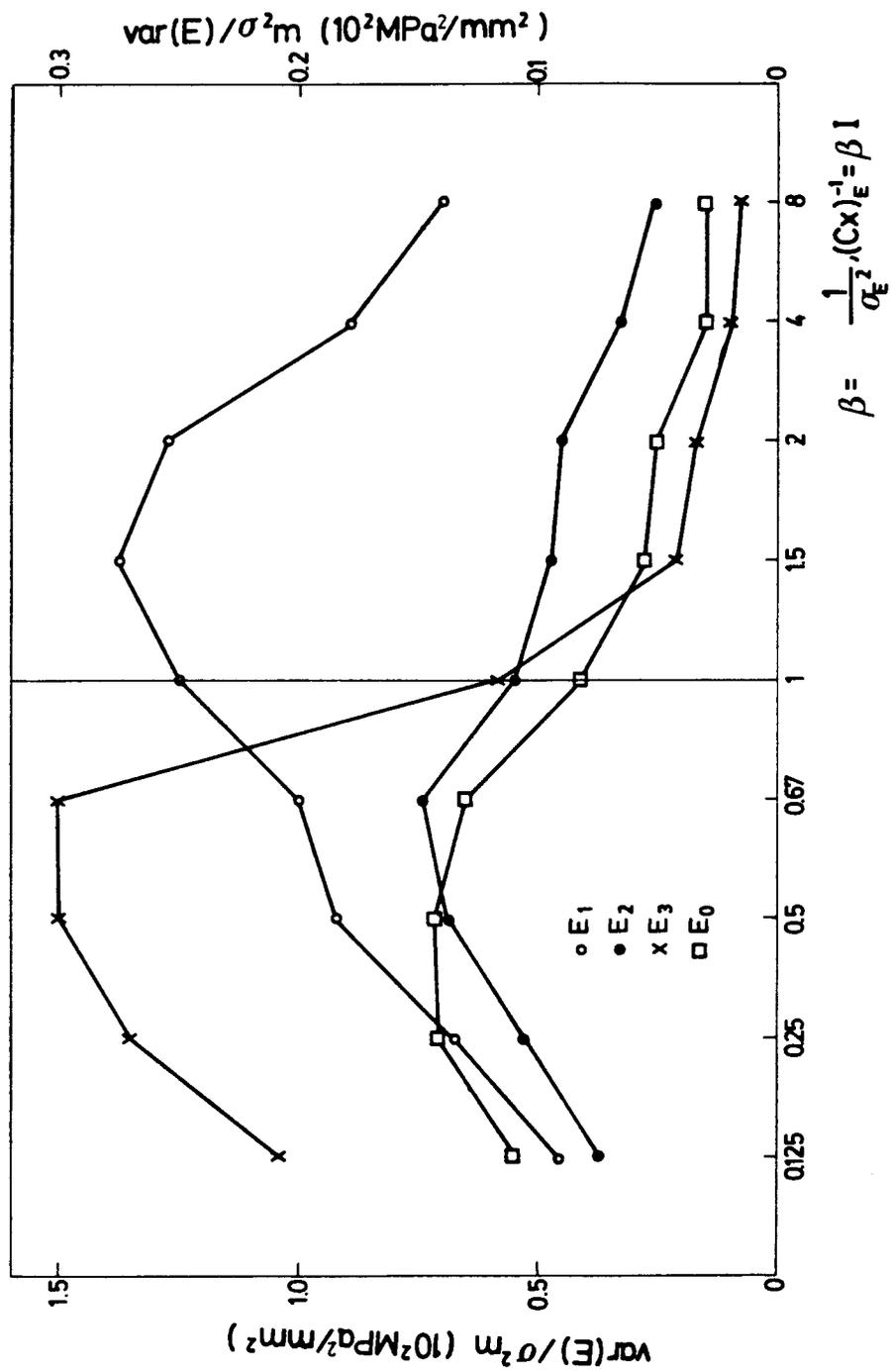


Figura 5.29. Varianzas de los parámetros identificados con el criterio de máxima verosimilitud en función de la matriz de covarianzas llena utilizada.

Por otra parte, en base al tipo de instrumentos utilizados, parece razonable suponer que el valor real de β es cercano a la unidad, y para ese caso las varianzas asignadas a las medidas horizontales y verticales serán parecidas. En concreto, respecto a la estimación por mínimos cuadrados se observa que los módulos E2 y E3 acortan sus diferencias (en realidad no hay grandes diferencias entre la arcilla del estrato intermedio y los primeros metros del tercer estrato que contiene arcilla y bloques de pizarra). Se observa también una ligera disminución en el valor de K_0 , si bien sigue indicando una sobreconsolidación de la arcilla importante.

En lo que hace referencia al estudio de la matriz densidad de información, ésta proporciona datos interesantes. En la figura 5.30 se dibujan algunas filas de esta matriz tanto para el análisis con matriz de covarianzas diagonal con $\sigma_E / \sigma_I = 1$, como para el análisis con matriz de covarianzas completa con $\beta = 1$. La figura 5.30a corresponde a algunas medidas horizontales, y la 5.30b a medidas verticales.

Esta matriz refleja la estructura del modelo en ambos casos, y las figuras indican que no hay muchas diferencias en el uso de una u otra matriz de covarianzas. Esto es más notorio para las medidas verticales, ya que éstas no se ven afectadas por la comparación (la matriz de covarianzas llena sólo afecta a las medidas horizontales).

En todos los casos la matriz **S** refleja una interrelación importante entre medidas horizontales y verticales, además de la estructura simétrica del modelo utilizado.

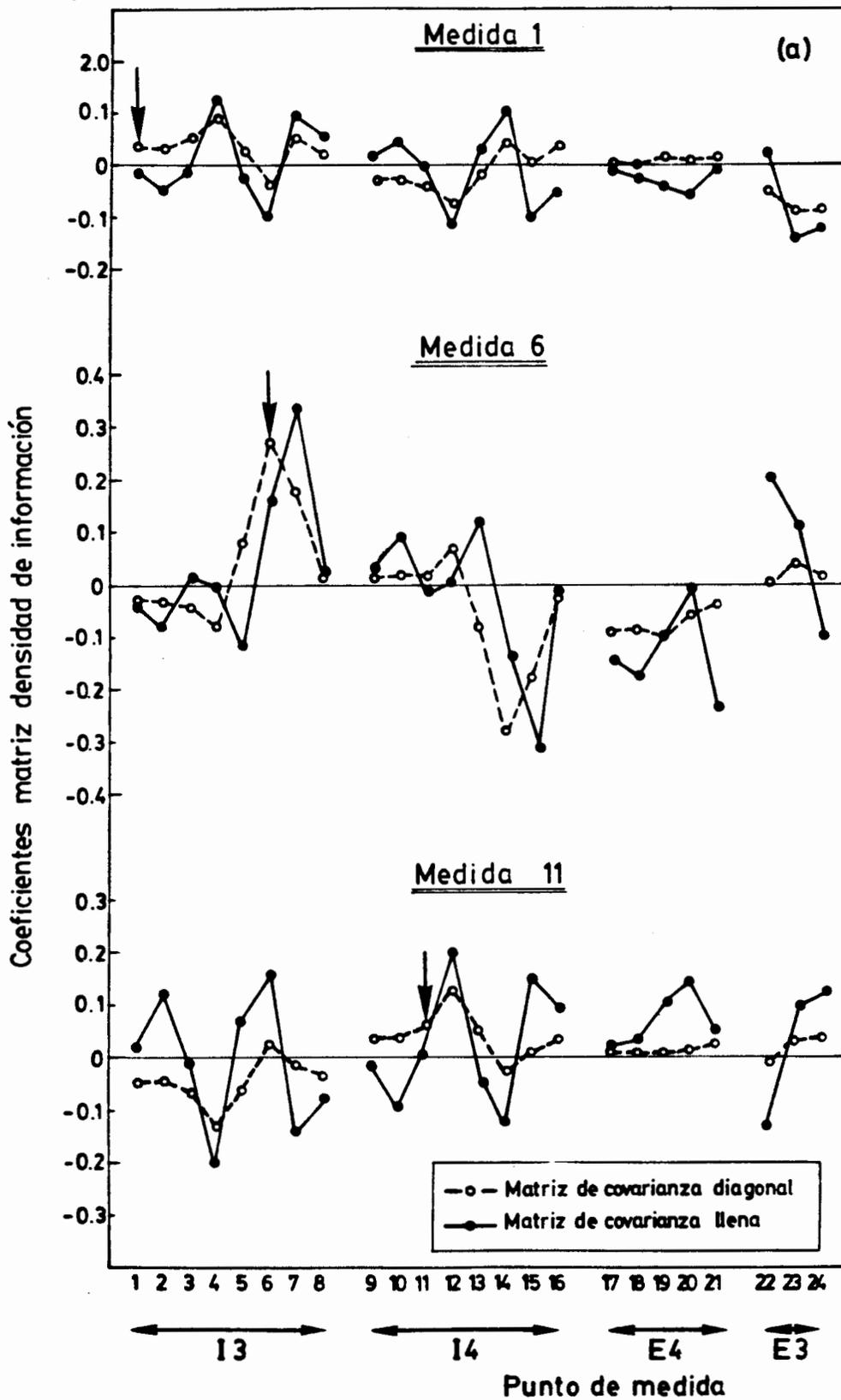


Figura 5.30a. Representación gráfica de los valores de algunas de las filas de la matriz densidad de información en el mínimo de la función objetivo, para el ejemplo en estudio, utilizando el criterio de máxima verosimilitud con matriz de covarianzas diagonal y llena. Corresponde a las medidas horizontales 1,6 y 11.

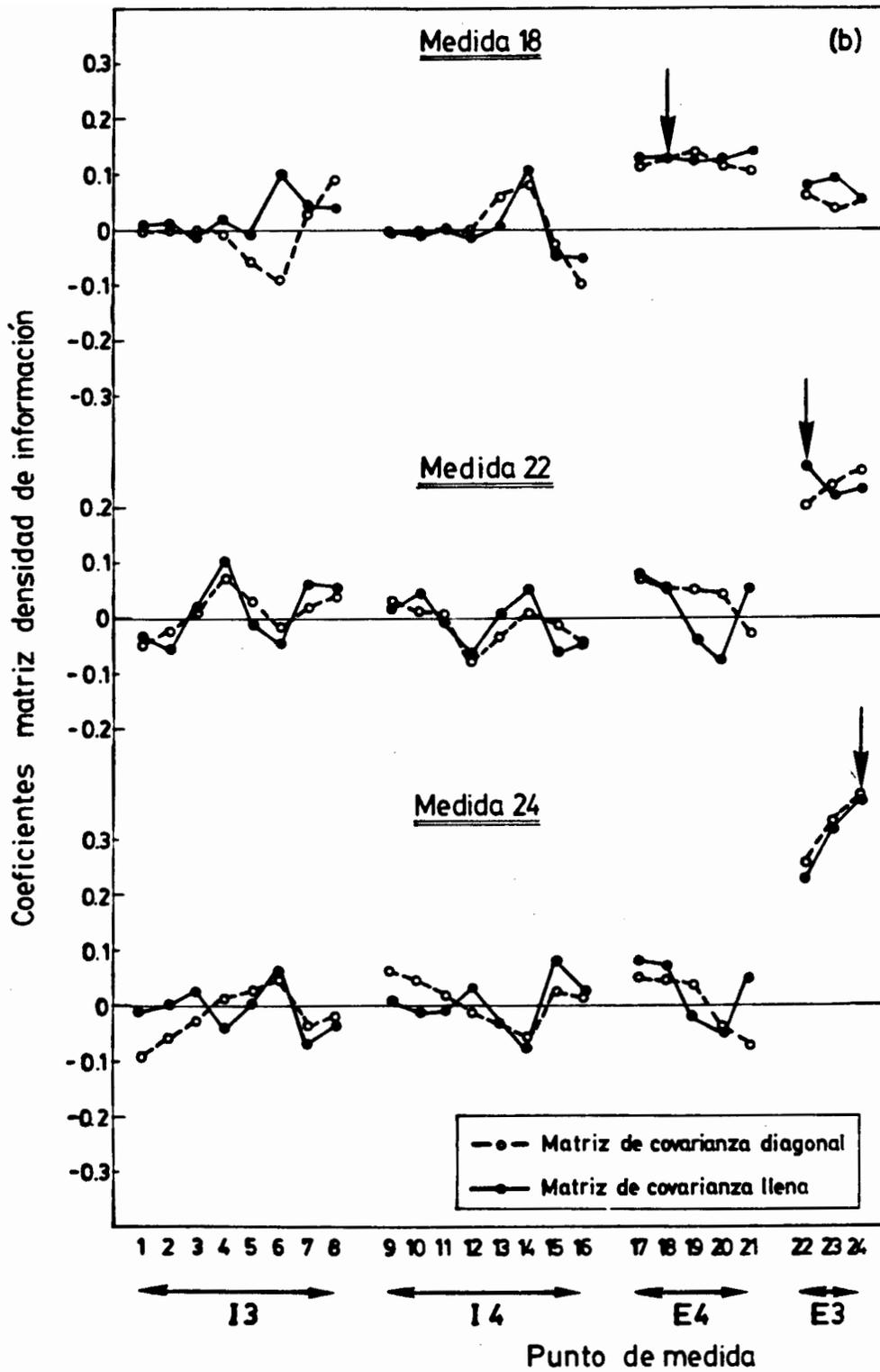


Figura 5.30b. Representación gráfica de los valores de algunas de las filas de la matriz densidad de información en el mínimo de la función objetivo, para el ejemplo en estudio, utilizando el criterio de máxima verosimilitud con matriz de covarianzas diagonal y llena. Corresponde a las medidas verticales 18, 22 y 24.

Se han realizado para este ejemplo tres análisis de identificación: el primero utilizando el criterio de mínimos cuadrados, el segundo usando el criterio de máxima verosimilitud con una matriz de covarianzas diagonal, pero distinguiendo entre varianzas de medidas horizontales y verticales, y finalmente, en el tercero, se ha usado el mismo criterio pero con una matriz de covarianzas completa. Como ya se ha indicado, el criterio de mínimos cuadrados es un caso particular del de máxima verosimilitud con igual varianza para medidas horizontales y verticales.

La siguiente tabla muestra en forma resumida los resultados obtenidos con el primer y tercer análisis, considerados como más representativos:

	Mín. cuad.	Máx. ver. (matriz llena)
E1	98	135
σ (E1)	15	23
E2	309	268
σ (E2)	15	15
E3	407	278
σ (E3)	25	16
(En MPa)		
Ko	2.17	1.74
σ (Ko)	0.68	0.6
J(m ²)	1.33 10 ⁻⁴	0.77 10 ⁻⁴

5.6 COMPARACIÓN ENTRE MEDIDAS DE CAMPO Y DE LABORATORIO.

El ejemplo descrito en este capítulo constituye una aplicación válida de la metodología desarrollada en este trabajo, presentando un doble interés teórico y práctico.

En este caso concreto, la utilización del perfil B como base de identificación se debe principalmente al hecho de que al estar situado al principio de la obra permitía obtener resultados rápidamente, y por ello se concentró en él el esfuerzo de análisis. Posteriormente, la estimación de unos parámetros en los primeros metros de ejecución del túnel sirvió para llevar a cabo predicciones de desplazamientos en secciones posteriores, obteniéndose buenos resultados. Estas predicciones permitieron estudiar el posible efecto de la excavación del túnel sobre las edificaciones colindantes (Ledesma et al, 1986).

Como ejemplo de esta predicción en secciones posteriores se presentan, en la figura 5.31, los movimientos medidos y calculados en el denominado perfil C. En este caso se tomaron para el cálculo los parámetros identificados en el perfil B con el criterio de mínimos cuadrados, y los parámetros identificados con el criterio de máxima verosimilitud para $\beta = 1$.

Obsérvese que las leyes de desplazamientos que se obtienen con los parámetros identificados con cada uno de los criterios son muy parecidas. De hecho, en este caso existe un amplio rango de parámetros que proporcionan desplazamientos parecidos y que serían aceptables a simple vista (es decir, con criterios subjetivos).

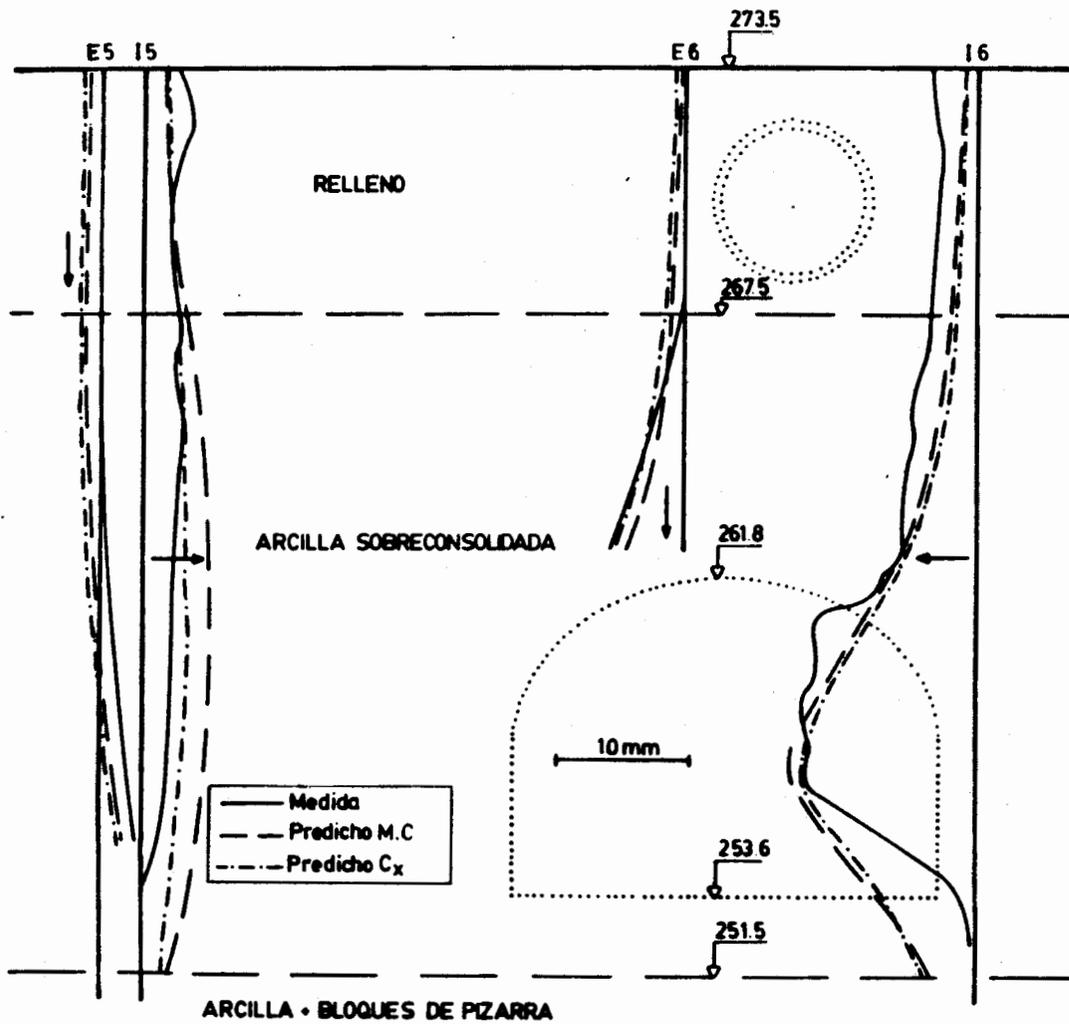
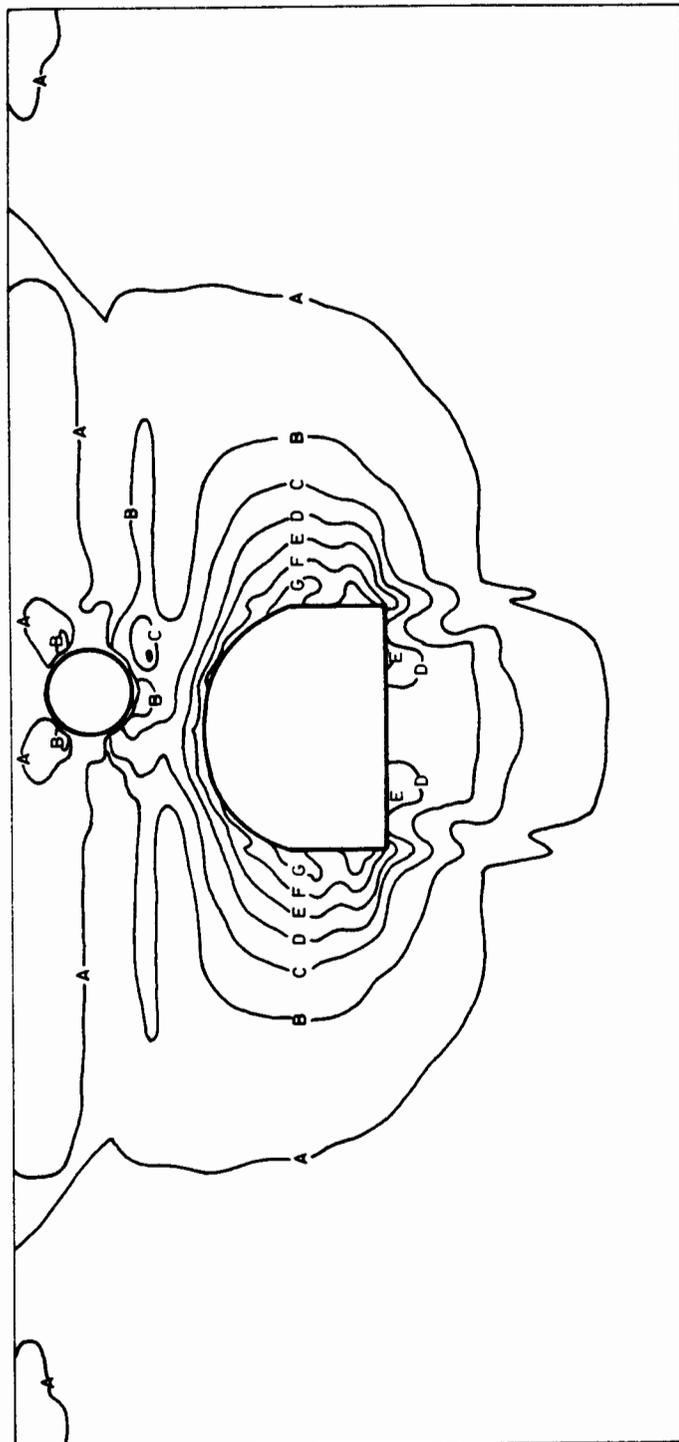


Figura 5.31. Comparación entre los movimientos medidos en el perfil C y las predicciones realizadas utilizando los parámetros obtenidos en la identificación con el criterio de mínimos cuadrados y con el criterio de máxima verosimilitud y matriz de covarianzas llena.

Puede concluirse que el ajuste es aceptable (de hecho, algo mejor para la ley de desplazamientos correspondiente a los parámetros identificados con el criterio de máxima verosimilitud), dado que no existen diferencias importantes, si bien puede considerarse favorable el hecho de que la geometría y los tipos de materiales del problema no cambiaran mucho de un perfil a otro.

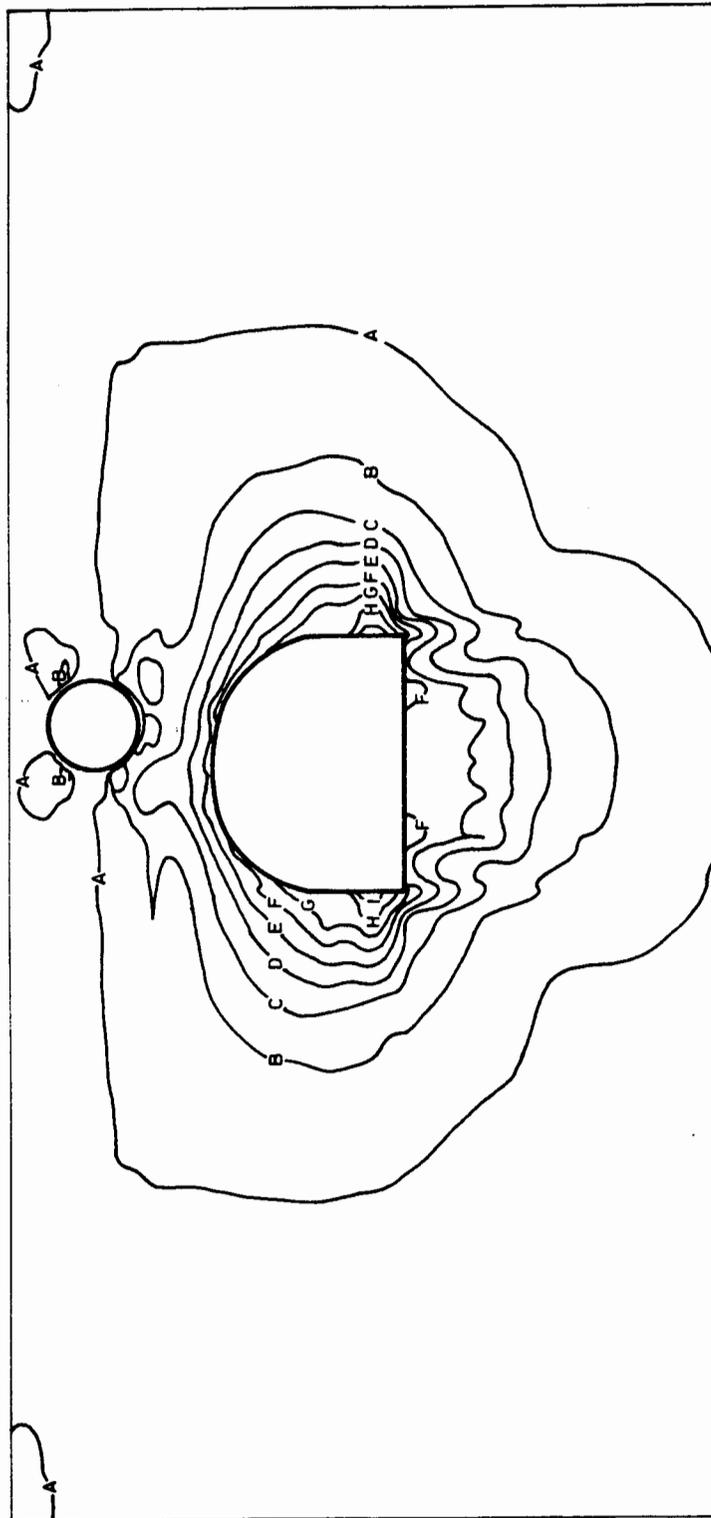
El trabajo de laboratorio llevado paralelamente sirvió de comprobación de algunos de los resultados obtenidos en el problema inverso. En concreto, la curva módulo secante - deformación obtenida en el laboratorio (figura 5.9) permitiría comparar, para un nivel de deformación fijo, los valores de los módulos obtenidos en el laboratorio y los identificados. Lógicamente esta operación sólo puede hacerse para la arcilla compacta (estrato intermedio), y en cualquier caso es una simple comparación de carácter orientativo, ya que el número de ensayos realizado no es representativo.

Para poder llevar a cabo esta comparación, es preciso evaluar el nivel de deformaciones alcanzado por el terreno al excavarse el túnel. Para ello se resolvió el problema directo con el modelo y los parámetros identificados en el perfil B, y se dibujaron los contornos de igual deformación principal mayor. El resultado se presenta en las figuras 5.32 y 5.33. En la primera se ha calculado el nivel de deformaciones suponiendo los parámetros estimados con el criterio de mínimos cuadrados. La segunda (5.33) se ha calculado utilizando los parámetros obtenidos en la identificación con el criterio de máxima verosimilitud y $\beta = 1$.



—A—	0.20	E-3
—B—	0.40	E-3
—C—	0.60	E-3
—D—	0.80	E-3
—E—	0.10	E-2
—F—	0.12	E-2
—G—	0.14	E-2

Figura 5.32. Contornos de puntos de igual deformación principal mayor debido a la excavación del túnel, calculados con los parámetros estimados con el criterio de mínimos cuadrados.



—A—	0.20	E-3
—B—	0.40	E-3
—C—	0.60	E-3
—D—	0.80	E-3
—E—	0.10	E-2
—F—	0.12	E-2
—G—	0.14	E-2
—H—	0.16	E-2
—I—	0.18	E-2

Figura 5.33. Contornos de puntos de igual deformación principal mayor debido a la excavación del túnel, calculados con los parámetros estimados con el criterio de máxima verosimilitud.

Se observa que el nivel de deformaciones en el terreno situado cerca del contorno de la excavación varía entre $0.5 \cdot 10^{-3}$ y $1.5 \cdot 10^{-3}$ aproximadamente, para la figura 5.32 (mínimos cuadrados) y entre $0.5 \cdot 10^{-3}$ y $1.8 \cdot 10^{-3}$ para la figura 5.33 (máxima verosimilitud). Este es el orden de magnitud que proporciona el cálculo con los parámetros identificados. Como comprobación, si se toma este rango de deformación en la gráfica módulo - deformación obtenida en laboratorio (figura 5.9), se obtiene un rango aproximado de variación de los módulos entre 270 y 520 MPa. Teniendo en cuenta que los módulos identificados con las medidas de campo, para las diferentes hipótesis planteadas, vienen dados por [5.3] y [5.7], puede concluirse que los resultados de laboratorio, encajan bastante con la identificación realizada, considerando el rango de variabilidad de los módulos y el tipo de comparación llevada a cabo.

Cabe destacar que la utilización de los ensayos de laboratorio ha sido posible gracias a que en ellos se midió con precisión a bajos niveles de deformación. Esta condición es básica para usar datos experimentales en problemas que estáticamente se encuentran lejos de rotura. Finalmente, es importante remarcar que la metodología de identificación utilizada ha permitido obtener información útil, y por otra parte lógica, a partir de las medidas de campo. En concreto, el valor de K_0 obtenido es coherente con el carácter sobreconsolidado de la arcilla.