

**INTERACCION ENTRE DOS NUEVOS TUNELES GEMELOS Y UN TUNEL DE GRAN DIAMETRO PREEXISTENTE EXCAVADOS EN ROCAS DESCOMPUESTAS PARA EL METRO DE CARACAS**

Gianfranco Perri, Profesor de Diseño Geotécnico de Túneles en la Universidad Central de Venezuela

**RESUMEN**

Se lleva a cavo un análisis numérico por elementos finitos a objeto de simular las excavaciones de dos nuevos túneles gemelos a ser construidos muy próximos a un túnel de gran diámetro preexistente perteneciente a la Línea II en operación del Metro de Caracas. Se verifica la estructura del túnel preexistente bajo las condiciones a ser inducidas por los nuevas excavaciones y se dan las recomendaciones a seguir para reducir a términos aceptables toda influencia negativa de la construcción sobre la operación de los trenes de la preexistente Línea II.

**ABSTRAT**

A numerical analysis by finited element method is carried out to simulate the excavations of two new twin tunnels very close to a big diameter tunnel of Line II in Caracas sub way. Laterr the structure of the big tunnel already built is verified and is indicated consequently the measures to be implementes to reduce to acceptable values all influence of the new excavations on the operation of the two way Line II tunnel.

**ZUSAMMENFASSUNG**

Es wurde eine numerische Analyse von feinen Elementen durchgefuehrt, mit der Idee, die Ausgrabungen fuer die neuen Zwillingtunnel zu simulieren, die sehr nahe neben einem Tunnel mit grossem Durch-messer gegraben werden sollen. Es handelt sich um einen Tunnel, der als Linie II von der Metro Caracas betrieben wir. Es wird die Struktur dieses vorh. Tunnels ueberprueft, um Massnahmen vorzuschlagen, die negative Eibfluesse, bedingt durch den Neubau, auf ein Minimum zu reduzieren.

## **INTRODUCCION**

Debido al rápido incremento del número de pasajeros en la Línea I del Metro de Caracas, se está proyectando la construcción de una nueva Línea I.

Este nuevo proyecto prevé la construcción en su comienzo, de dos túneles gemelos de aproximadamente 6 m de diámetro, paralelos al túnel de dos vías de 11 m de diámetro perteneciente a la otra línea en operación: la Línea II.

Estos nuevos dos túneles gemelos, en el sector más crítico se localizarán muy cerca del túnel de gran diámetro existente pasando a una distancia, entre el piso de tal túnel y el techo de uno de los dos nuevos, de aproximadamente 5 m y con una asimetría horizontal de doble vía en operación y los gemelos.

Es de esperar que debido a las excavaciones de los túneles gemelos, se produzcan deformaciones importantes en el revestimiento del túnel existente lo cual podrá causar daños a su estructura y consecuentemente afectar la operación de los túneles de la Línea II que no deberá ser interrumpido.

## **GEOMETRIA**

Entre las progresivas 0+000 y 0+300 los túneles gemelos, saliendo de la Estación Capuchinos con alineamiento paralelo al túnel doble vía, se ubicarán lateralmente a este con una separación aproximada de 5 m y por lo tanto, durante la excavación de estos túneles gemelos de 6 m de diámetro, se producirá una descompresión en el terreno que confina las paredes del túnel de doble vía, induciendo inevitablemente deformaciones y sollicitaciones en la estructura del revestimiento de este túnel (Fig. 1).

Entre las progresivas 0+300 y 0+460, ambos túneles gemelos tienden a acercarse al túnel de doble vía hasta disponerse paulatinamente por debajo de este último con una separación mínima de 5 m entre clave y solera de ambos túneles respectivamente, dando lugar a una nueva configuración crítica en relación con los asentamientos del terreno que, producidos por la excavación de los túneles gemelos, se transmitirán a la solera del revestimiento del túnel de doble vía en operación. Considerando que la curvatura de la campana de los asentamientos que se producen en el terreno como consecuencia de la excavación de los túneles gemelos tiende a aumentar a medida que la separación entre los mismos disminuye y, tomando en cuenta que las condiciones críticas se producirán cuando los túneles gemelos se ubiquen por debajo del túnel doble vía y en forma asimétrica con respecto a este último, se considera como sección crítica de análisis aquella ubicada en la progresiva 0+400, por cuanto en la misma se presenta una fuerte asimetría en la ubicación de los túneles gemelos con respecto al doble vía y porque la separación entre ambos túneles gemelos es aproximadamente 15.0 m, con una separación entre la clave del túnel izquierdo y la solera del de doble vía en el orden de los 5.90 m (Fig. 2).

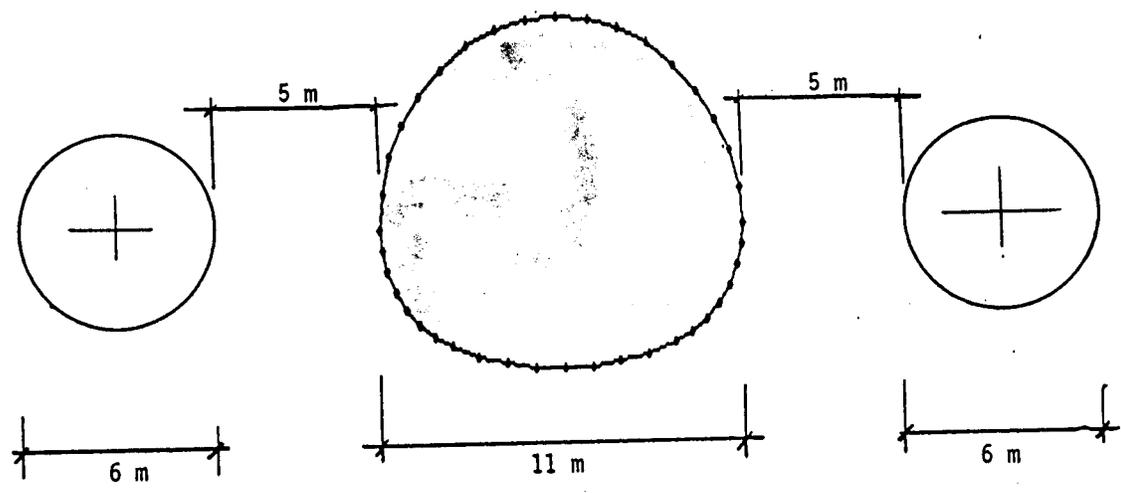


FIGURE 1

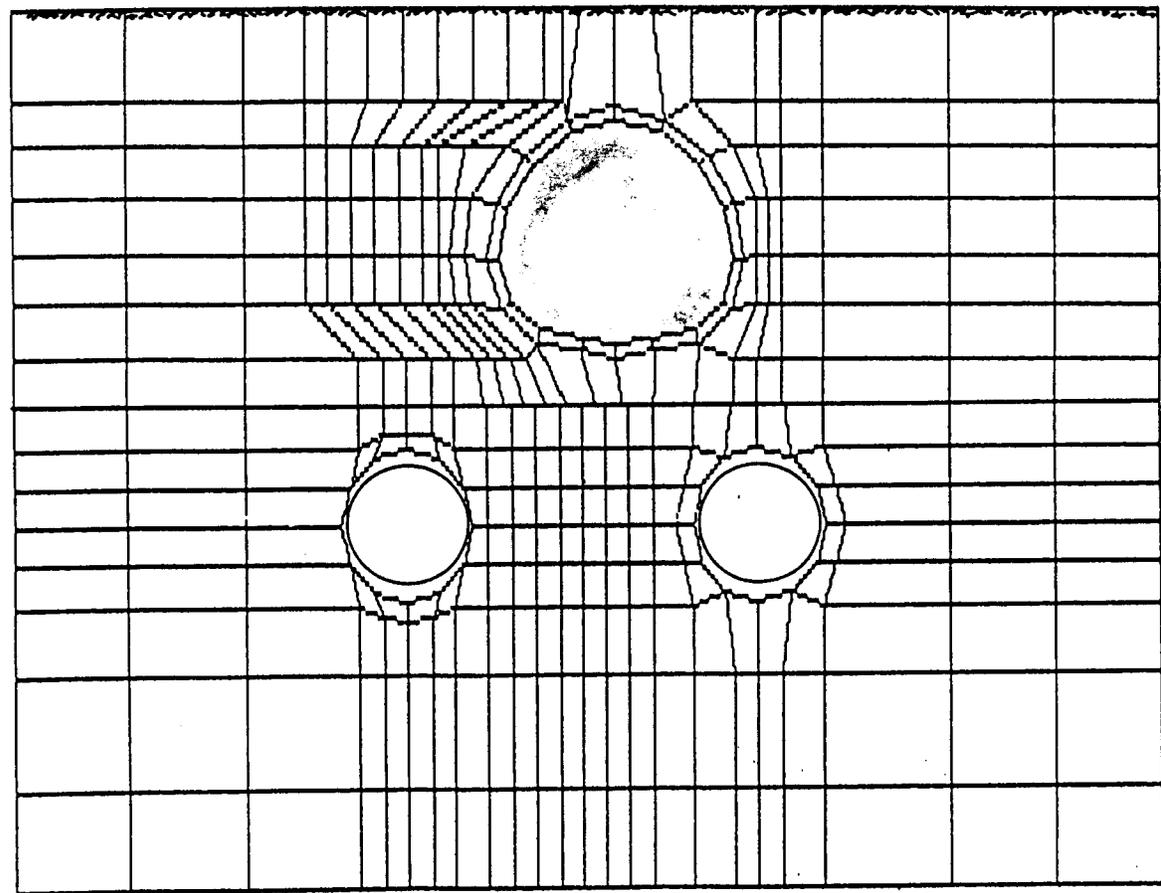


FIGURE 2

## GEOTECNIA

Básicamente el subsuelo del sector se caracteriza por un manto de suelos de origen coluvial y aluvional, de cráter predominantemente granular y de compacidad media a densa, que descansa directamente sobre los estratos rocosos en sitio caracterizados como esquistos cuarzo-micáceos, meteorizados, fracturados, blandos a duros, con porcentajes brutos de recuperación variables entre 0% y 26%.

El contacto entre los suelos de origen coluvio-aluvional y los estratos rocosos en sitio se presenta a lo largo de todo el sector en forma muy errática, por lo cual los túneles atraviesan alternativamente estas dos formaciones geológicas, y en consecuencia las condiciones geotécnicas varían a medida que los túneles se encuentren total o parcialmente en una u otra formación.

Considerando que la condición geotécnica más desfavorable será aquella que se produce cuando la totalidad del revestimiento definitivo de los túneles, o un gran porcentaje del mismo, se ubique en los estratos coluvio-aluvionales más débiles, se optó por realizar los análisis pertinentes bajo las siguientes condiciones geotécnicas:

- Progresivas 0+000 a 0+300:

- a) La totalidad del túnel de doble vía se ubica en suelo coluvio-aluvional
- b) La solera del túnel de doble vía está apoyada en roca y los hastiales y la clave en suelo coluvio-aluvional.

- Progresivas 0+300 a 0+460:

- a) La totalidad de los túneles se ubica en suelo coluvio-aluvional.

Los parámetros geotécnicos del subsuelo para los análisis efectuados fueron los siguientes:

Módulo de Elasticidad: 20000 t/m<sup>2</sup>  
 Módulo de Poisson: 0.40  
 Módulo de Reacción del suelo: 3000 t/m<sup>3</sup>  
 Módulo de Reacción de la roca: 15000 t/m<sup>3</sup>  
 Angulo de Fricción del suelo: 30°  
 Cohesión del suelo: 1 t/m<sup>2</sup>

## ANALISIS NUMERICO

### Progresivas 0+000 a 0+300:

Mediante el uso de elementos finitos unidimensionales se modeló el revestimiento definitivo del túnel de doble vías (Fig. 1) y se aplicaron las condiciones de carga existentes correspondientes a

las presiones geostáticas e hidrostáticas: cobertura de 8 m y nivel freático a -10 m.

Para cada análisis efectuado, se consideraron dos condiciones de carga, la primera con solo las presiones geostáticas y la segunda con las presiones geostáticas y las hidrostáticas.

La descompresión del terreno, consecuente a la excavación de los túneles gemelos, fue simulada mediante la reducción en un 83.33% de la magnitud de los módulos de reacción del terreno. Este valor simula suficientemente el proceso de excavación de los túneles gemelos mediante el uso de un escudo mecanizado y montaje de anillos prefabricados de concreto armado en la cola del escudo, según la práctica constantemente utilizada en la construcción del Metro de Caracas (Perri y Centeno, 1987). Esta descompresión fue aplicada primeramente en una mitad del túnel, con lo cual se simula la excavación de un túnel gemelo y posteriormente fue aplicada en la otra mitad para simular la excavación del otro túnel gemelo. En total se analizaron cuatro casos para simular la eventualidad que el túnel de doble vías está apoyado en roca, o en suelo.

#### **Progresivas 0+300 a 0+460:**

Para simular la excavación de los túneles gemelos y así poder estudiar la interacción con el túnel doble vías, se elaboró un modelo de elementos finitos planos constituidos por 378 nodos y 323 elementos cuadrangulares isoparamétricos (Fig. 2).

Geoméricamente el modelo incluye los dos túneles gemelos y el túnel doble vías y se extiende desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 2 diámetros por debajo del fondo de los túneles gemelos y lateralmente hasta una distancia mínima de 2.5 diámetros de la pared de cada túnel.

Posteriormente se simuló la excavación de los túneles gemelos, simulando primeramente la excavación de túnel izquierdo y a continuación la excavación de derecho y asignando al terreno un modelo de comportamiento elasto plástico según Mohr-Coulomb.

Estos análisis fueron realizados considerando tres distintas eficiencias del proceso constructivo, las cuales fueron modeladas asumiendo presiones internas de equilibrio final en las excavaciones iguales al 87.5%, 70% y 30% de la presión final geostática vertical, valores estos que representan reducciones en la magnitud de la presión geostática natural de 12.5%, 30% y 70% respectivamente (Perri, 1989).

En el modelaje del túnel de doble vía, se tomó en cuenta la presencia del revestimiento definitivo, el cual posee un espesor de 0,50 m y fue construido con concreto de resistencia a la compresión a los 28 días de edad igual a 280 Kg/cm<sup>2</sup>.

A manera de complemento del análisis de la interacción túneles gemelos - túnel doble vía, en esta sección (Prog. 0+300 - 0+460) se llevó a cabo un análisis simplificado de verificación del revestimiento del túnel de doble vía bajo las sollicitaciones

inducidas como consecuencia de la onda de los asentamientos derivados de la excavación de los subyacentes túneles gemelos: se considera al revestimiento del túnel de doble vía como una estructura de viga tubular doblemente empotrada a la cual se le impone un asentamiento diferencial de apoyos (Fig. 3).

**ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

**Progresivas 0+000 a 0+300:**

Se presenta en la figura 4 un ejemplo de resultado gráfico de las deformaciones y sollicitaciones del revestimiento de túnel de doble vías en correspondencia con la excavación del primer túnel gemelo.

- a) Para la condición de carga N°1 (solo acciones geostáticas) la combinación de carga axial y momento flector en la clave del túnel, para los cuatro casos analizados, y en los hastiales y la solera, para los casos de apoyo en suelo, resulta inaceptables para la capacidad admisible del revestimiento.
- b) Para la condición de carga N°2 (acciones geostáticas + acciones hidrostáticas) la combinación de carga axial y momento flector actuantes, tanto en la clave, hastiales y solera del túnel resulta aceptable para la capacidad estructural del revestimiento, para los cuatro casos analizados.
- c) Independientemente del caso analizado, la sección de concreto del túnel posee suficiente capacidad para absorber satisfactoriamente las sollicitaciones cortantes generadas.

**Progresivas 0+300 a 0+460:**

- a) Durante la excavación del túnel PVI a medida que se reduce la eficiencia (magnitud de la presión de equilibrio) del proceso constructivo, la magnitud de los asentamientos experimentados por el túnel de doble vía tiende a aumentar, siendo la distribución de estos asentamientos ligeramente asimétrica y de mayor magnitud en la zona ubicada encima del túnel PVI. Las distorsiones angulares estimadas para la sección transversal del revestimiento del túnel de doble vía, calculadas entre nodos consecutivos, tiende a aumentar hasta valores ligeramente superiores al límite máximo tolerable de 1/500 en el caso de menor eficiencia del proceso constructivo.
- b) A medida que progresa la excavación del túnel PVD y se reduce la eficiencia del proceso constructivo, la magnitud de los asentamientos tiende a aumentar pero la distribución de los mismos tiende a ser aproximadamente simétrica con respecto al eje del túnel doble vías, y en consecuencia las magnitudes de las distorsiones angulares en la sección transversal del revestimiento son despreciables.

Es importante señalar que en todos los casos analizados es posible observar que el comportamiento de la sección transversal del túnel de doble vía, durante la excavación de los túneles gemelos, es el de un cuerpo rígido el cual tiende a rotar alrededor de un punto

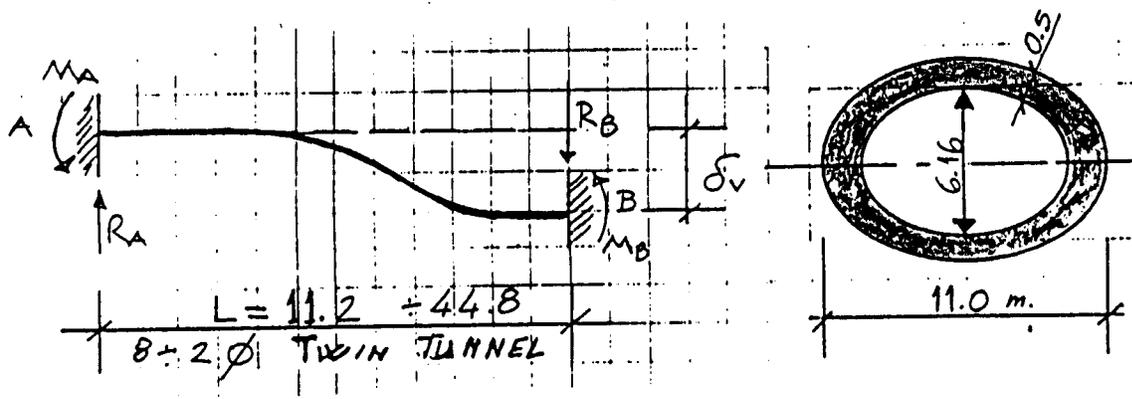


FIGURE 3

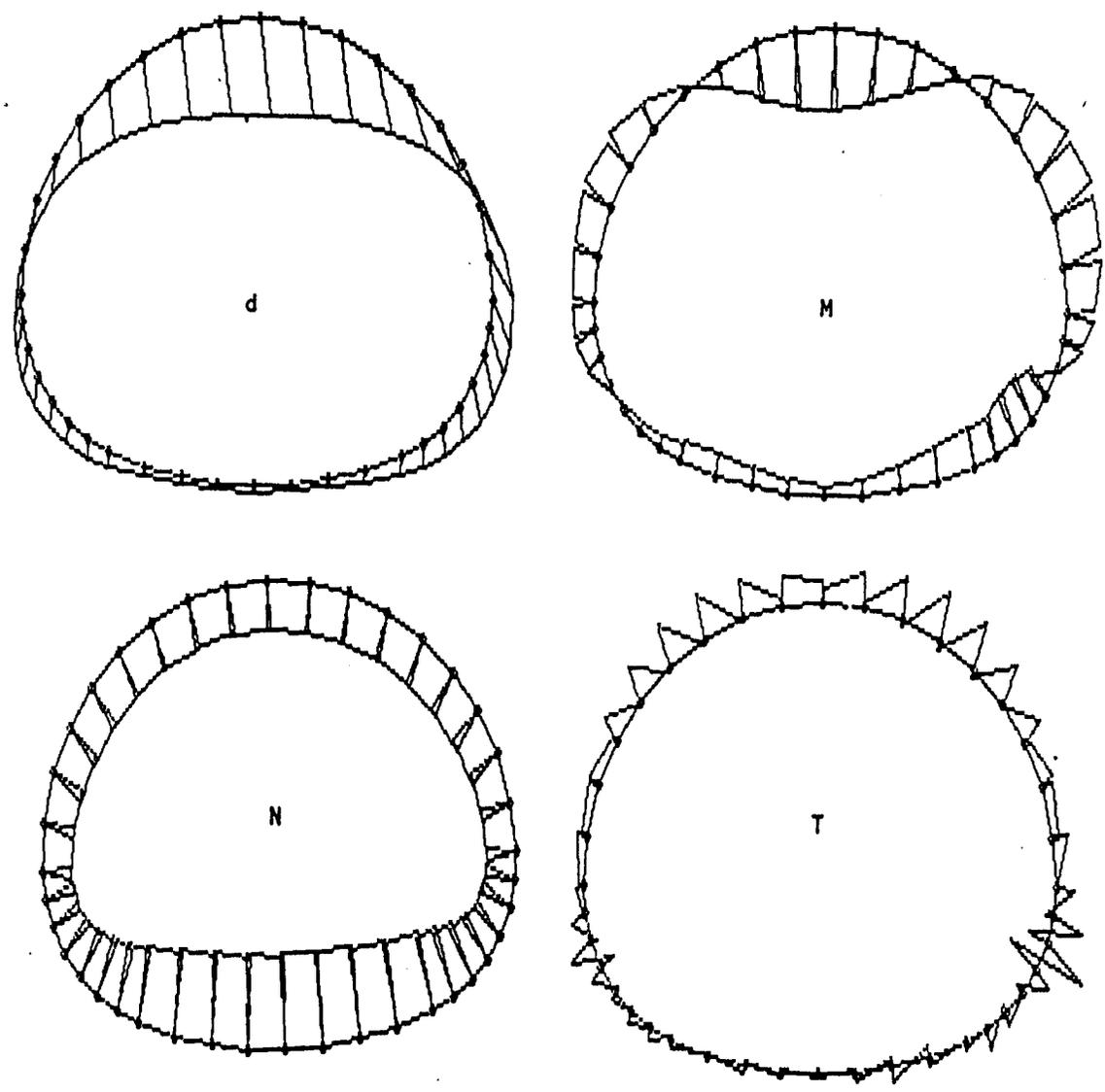


FIGURE 4

ubicado por debajo de la solera del mismo, no generándose por lo tanto convergencias de magnitud apreciable en este revestimiento (Fig. 5). También es posible observar que la presencia del túnel de doble vía puede generar una ligera sobrecarga sobre el túnel PVI, la cual deberá ser tomada en consideración para la verificación del revestimiento definitivo de los túneles gemelos.

El análisis simplificado de la estructura tubular afectada por un asentamiento diferencial impuesto a sus empotramientos perfectos, se llevó a cabo variando el rango de la longitud del tramo tubular analizada (L) entre un mínimo muy conservador de 2 veces el diámetro de los túneles gemelos (11.2 m), el doble de tal valor y finalmente otra vez el doble. En los cálculos elásticos se asimiló la sección del revestimiento del túnel de doble vía a una elipse y se obtuvieron los resultados siguientes:

- a) En el caso de  $L=11.2$  m, debido a la gran rigidez que el tubo posee, un asentamiento de pequeña magnitud ( $\approx 1.0$  cm), generaría grandes esfuerzos internos en la sección del túnel que superarían la capacidad admisible del revestimiento. Téngase presente que este revestimiento no posee un refuerzo metálico longitudinal significativo capaz de absorber los esfuerzos de tracción que se generan.
- b) En el caso de  $L=22.4$  m, la magnitud de las sollicitaciones en la sección del revestimiento sigue aún insoportable por la estructura (esfuerzo de tracción máximo de cerca de  $100$  Kg/cm<sup>2</sup>).
- c) En el caso de  $L=44.8$  m, las sollicitaciones se reducen a magnitudes compatibles con la resistencia del concreto (esfuerzo de tracción y compresión máxima de aproximadamente  $25$  Kg/cm<sup>2</sup>).

## CONCLUSIONES

- a) Entre las progresivas 0+000 y 0+300, siempre y cuando se mantengan las condiciones hidrostáticas presentes, evitando un abatimiento importante del nivel freático durante la excavación de los túneles gemelos, la descompresión del terreno como consecuencia de esta excavación, no afectará en forma significativa la capacidad estructural del revestimiento del túnel doble vía.
- b) Esencialmente los problemas a experimentar por el túnel doble vías como consecuencia de la excavación de los túneles gemelos, se deben a los asentamientos absolutos que esta estructura puede sufrir y no a las distorsiones angulares que en su sección transversal se puedan producir.
- c) En efecto, entre las progresivas 0+300 y 0+460, dependiendo de la eficiencia del método constructivo, la magnitud de los asentamientos absolutos pueden variar entre  $1.0$  cm y  $7.0$  cm, lo cual resulta inadmisibles por cuanto se afectaría el buen funcionamiento del túnel además de inducir sollicitaciones importantes en su sección estructural.

- d) Indudablemente que para admitir la utilización del mismo método constructivo que se ha venido empleando con éxito, en los túneles gemelos de las líneas I, II y III del Metro de Caracas, debería efectuarse una consolidación previa del terreno circundante a la solera del túnel de doble vías y hasta algo más abajo de la clave de los túneles gemelos, con la finalidad de minimizar la magnitud de los asentamientos que se puedan producir.
- e) Sin embargo, para poder efectuar una adecuada y efectiva consolidación de esta franja de terreno, la misma debería ejecutarse desde adentro del túnel doble de vías, lo cual se traduciría en un proceso sumamente lento por cuanto deberá efectuarse solo de noche (cuando el túnel de doble vía se encuentra afuera de operación) y durante un lapso de tiempo muy extenso por la limitada productividad de las labores.
- f) Otra posibilidad sería de actuar, durante la excavación de los túneles gemelos, desde el mismo frente mediante inyecciones de consolidación de suma dificultad operativa, y con resultados inciertos y grandes demoras de tiempo en el avance de las excavaciones.
- g) Estas circunstancias sugieren la necesidad de emplear un método constructivo más avanzado y tecnificado, el cual se deberá basar en el empleo de escudos de excavación de frente cerrado capaces de mantener las presiones geostáticas naturales en el terreno sin que se produzcan descompresiones geostáticas naturales importantes ni flujo abundante de agua subterránea. Un escudo "HIDRO SCHIELD" que a través de sistemas hidráulicos genera una presión a todo su alrededor de magnitud igual a la presión geostática del sector, con lo cual se minimizan la descompresión del terreno y el flujo de agua subterránea.
- h) Mediante el empleo de este tipo de escudo de excavación, se lograría una eficiencia del método constructivo tal que la reducción en la magnitud de la presión geostática vertical se encuentre por debajo del 10%, con lo cual se minimizarían los asentamientos en el túnel doble vías y además, se evitaría el descenso del nivel freático, garantizando por lo tanto las condiciones de confinamiento requeridas para el mismo túnel.
- i) Finalmente, en alternativa o como complemento de lo anterior, se deberá planificar cuidadosamente el orden de construcción de los dos túneles gemelos, en forma tal de excavar primero el que no produzca importantes problemas y desde su interior estabilizar adecuadamente el terreno previamente a la excavación del segundo y más negativamente influyente de los túneles gemelos.

## REFERENCIAS

Perri, G. & Centeno, R. 1987. Numerical Analysis of interaction Caracas Subway. VII PCSMFE. Cartagena, Colombia.

Perri, G. 1989. Interazione terreno-struttura nelle gallerie della metropolitana di Caracas. Int. Cong. on Geoengineering. Torino, Italia.

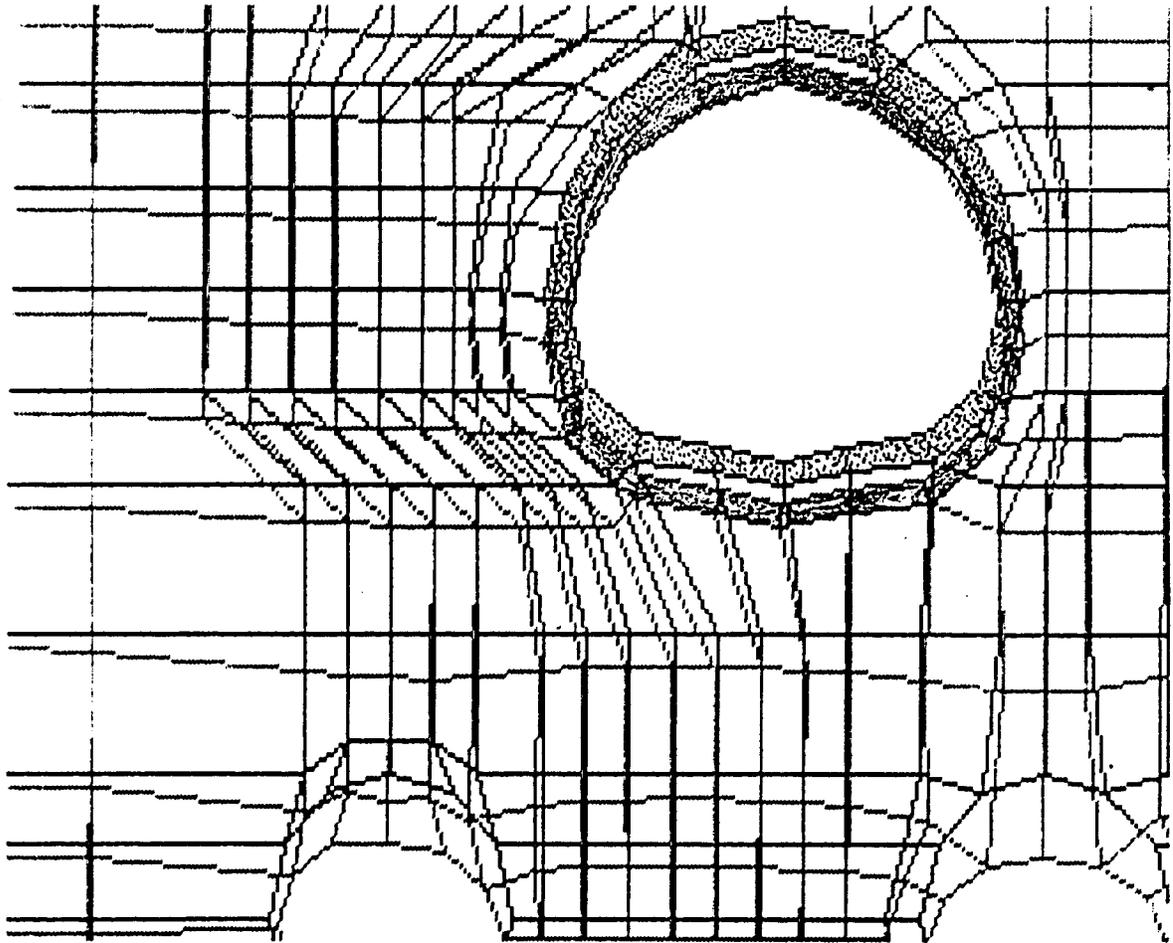


FIGURE 5