

ANALISIS NUMERICO DE INTERACCION. METRO DE CARACAS
NUMERICAL ANALYSIS OF INTERACCION. CARACAS SUBWAY

Centeno Werner, Roberto.

Ingeniero Consultor. Profesor de Ingenieria Civil en la Universidad Metropolitana de Caracas, Venezuela.

Perri, Gianfranco.

Ingeniero Consultor. Profesor de Mecanica de Rocas en la Universidad Central de Venezuela.

SINOPSIS

Se presenta una metodologia de simulación numérica del proceso constructivo de los túneles gemelos de la Línea I del Metro de Caracas, basada en el método de los elementos finitos, incluyendo la calibración de la malla en base a lecturas instrumentales de campo, con la finalidad de analizar la interacción terreno-revestimiento.

Se proponen indices numericos, derivados de la calibracion instrumental del sistema, para la evaluacion de la eficiencia del proceso constructivo. Se describen las técnicas empleadas para la instrumentación de campo y se discuten los resultados obtenidos en las secciones analizadas.

INTRODUCCION

Con la finalidad de llevar un control de los asentamientos superficiales causados por el proceso de excavación de los túneles gemelos de 5.9 metros de diámetro, cada uno, del tramo Chacaíto-Los Cortijos de la Línea I del Metro de Caracas, y de poder emplear dicho control para hacer una estimación de carácter previo de los asentamientos superficiales en secciones no instrumentadas del mismo tramo; se planificó y llevó a cabo un programa conjunto de instrumentación de campo y de simulación numérica en tres (3) secciones del referido tramo.

La escogencia de las secciones donde se colocó la instrumentación obedeció a un análisis previo del perfil litológico longitudinal del tramo, a partir del cual se señalaron tres secciones que representan las condiciones extremas e intermedia de la rigidez del suelo en dicho perfil longitudinal.

En cada una de las secciones instrumentadas se analizo una malla de elementos finitos cuadrangulares, la cual fue calibrada con los resultados que arrojaban los instrumentos a medida que avanzaba el proceso de excavacion de los tuneles.

En el caso específico de la Línea I, la excavación de los túneles fue realizada con la ayuda de una máquina excavadora integral, marca LOVAT, tipo "escudo", dotada de un equipo interno para colocación de segmentos de anillos prefabricados de concreto armado, con facilidad para realizar una inyección primaria de contacto para lograr el llenado de una cavidad "quasi anular" que se genera entre el terreno y el extradós del revestimiento al quedar colocado el anillo en el espacio excavado por la máquina.

Durante el proceso de avance de la excavación, e inmediata colocación del anillo de revestimiento, se induce una redistribución de esfuerzos con deformaciones asociadas en el frente y en los laterales del área excavada. La magnitud de la redistribución de los esfuerzos y de las deformaciones asociadas es función del diámetro de cada túnel, de la separación transversal entre túneles, de la posición de la sección excavada con respecto a la superficie del terreno y de las características geomecánicas de este último (Figura 1).

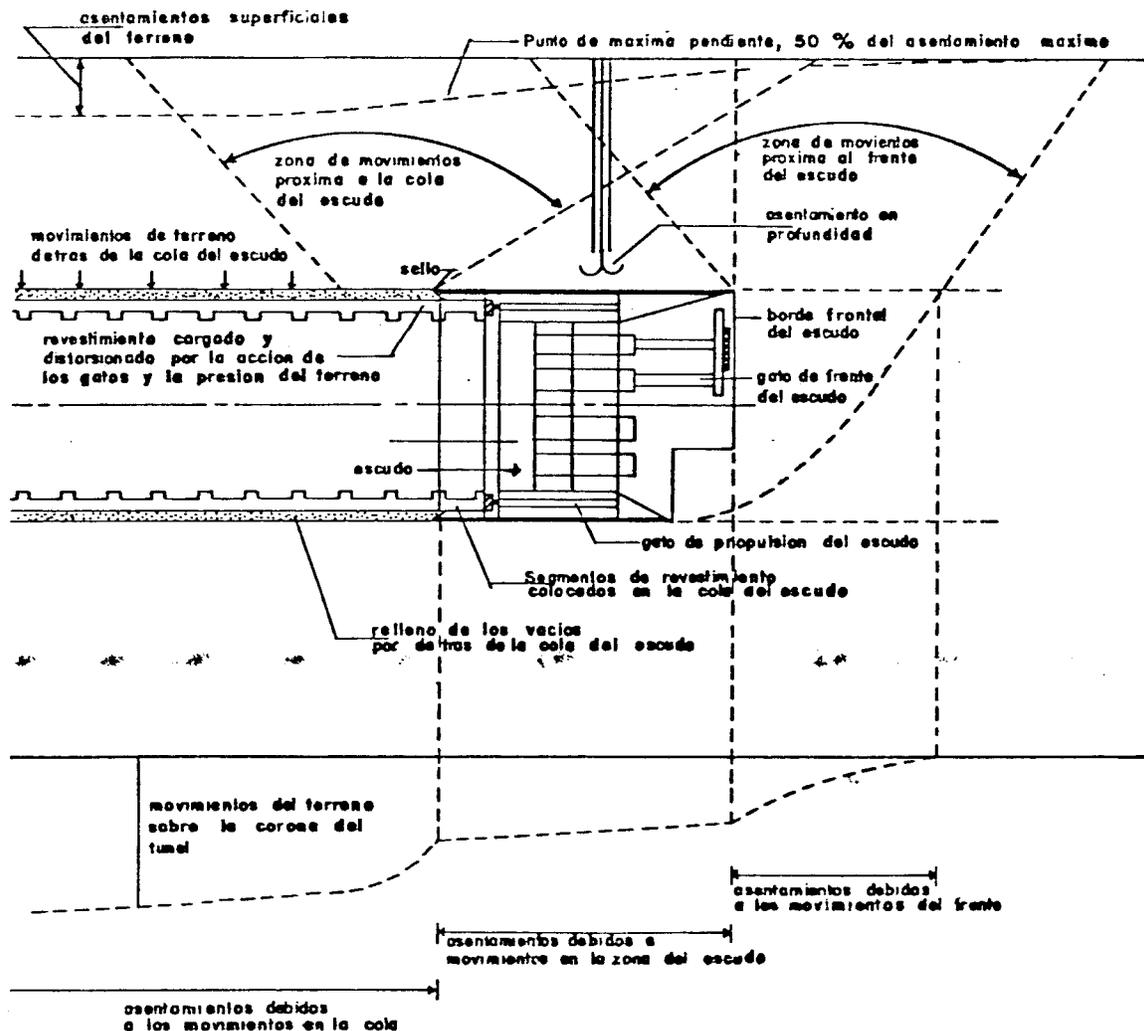


FIG. -1-

Es un hecho indiscutible el que la magnitud de las deformaciones superficiales, asociadas al proceso de excavación de túneles en suelos blandos, esté directamente relacionada con el cuidado que se tenga en evitar pérdidas de suelo en el frente de la excavación, o lo que es lo mismo, con la eficiencia que muestre la cuadrilla de mineros para evitar dichas pérdidas.

La simulación de distintos índices de eficiencia relacionados con el proceso constructivo permite asociar las deformaciones reportadas por los instrumentos con la magnitud de dichos índices.

En efecto, es posible evaluar la intensidad y la distribución de las deformaciones que se producen en el conjunto terreno-anillo para el caso de una situación ideal en la que el terreno se adapta perfectamente al anillo y no existiera el vacío quasi anular entre el revestimiento y el terreno.

En la realidad, el proceso de excavación realizado con cualquier escudo deja un espacio "quasi anular" entre el extradós del anillo de revestimiento y la circunferencia del hueco dejado por el escudo. El espesor medio del referido espacio coincide con el espesor de la lamina con la que está fabricado el escudo, ya que el diámetro externo del anillo coincide con el diámetro interno de la cola del escudo.

Se dice que el espacio es quasi anular por cuanto el anillo tiende a descender para apoyarse en el terreno al ser expulsado de la cola del escudo, y por lo tanto, el espacio es mayor cerca de la clave de la excavación, estableciéndose así una especie de media luna vacía entre el terreno y el revestimiento.

La simulación del avance del escudo hacia la sección instrumentada se hace suponiendo que el núcleo de tierra correspondiente a la sección del túnel va decomprimiéndose con dicho avance. Dicho núcleo es reemplazado en el modelo por fuerzas radiales contra la circunferencia de la excavación, con lo cual se logra economizar un gran número de elementos en el modelo.

Cuando el espacio vacío no es rellenado en forma rápida y completa, empleando para ello mortero de cemento-bentonita-arena, se producen deformaciones en la masa de suelo vecina al túnel, con inmediata generación de asentamientos diferenciales en la superficie del terreno, lo cual puede traer consecuencias indeseables en calles, edificaciones y servicios públicos.

La incorporación de este espacio interanular en el modelo de elementos finitos constituye la principal dificultad del proceso de simulación numérica, pues ocurre un momento en el proceso de excavación del túnel en el que no es posible inyectar la media luna vacía por detrás del anillo, debido al espacio que ocupan los equipos internos del escudo, tales como la correa transportadora de tierra, el equipo de colocación de segmentos y los vagones del tren de escombros.

Durante el tiempo que permanece el espacio anular sin inyectar, se van produciendo deformaciones en el terreno ubicado alrededor del anillo y estas deformaciones crecen a medida dicho tiempo crece por motivos de ineficiencia en la construcción; por ello se puede decir que las deformaciones del suelo aumentan considerablemente en coincidencia con el lapso que pasa entre el momento de la expulsión del anillo y el inicio del proceso de inyección primaria.

En efecto esta etapa constructiva es la fase más delicada en todo el proceso de excavación y revestimiento de túneles ejecutados con escudo; en consecuencia, se hace muy difícil realizar una evaluación directa de la eficiencia de la inyección primaria, pues no es fácil medir, en forma práctica y económica, el grado de obturación logrado y la rigidez del espacio anular inyectado.

El objetivo principal del análisis numérico es justamente evaluar en forma indirecta la calidad y la eficiencia de este delicado y fundamental aspecto del proceso constructivo.

Para lograr este objetivo, se modela previamente el subsuelo de la sección instrumentada, luego se simulan las primeras etapas del proceso, coincidentes con el acercamiento del escudo a dicha sección, para concluir con la evaluación de la eficiencia de la última etapa, cuando se procede a inyectar el espacio interanular. El proceso de control se concluye cuando el frente del escudo se ha alejado a una distancia aproximadamente equivalente a la profundidad del centro del círculo del túnel, momento en el que cesa la deformación en el caso de un buen proceso de inyección.

TECNICA DE LA INSTRUMENTACION

En cada una de las tres secciones estudiadas se ha programado y llevado a cabo un proceso de instrumentación geotécnica el cual contempló lo siguiente:

a) Realización de un mínimo de dos (2) taladros exploratorios con diámetro BX (60.3 m.m) para ejecución de ensayos presiometricos con sonda tipo GB; con la finalidad de obtener el modulo de deformación de las distintas capas que conforman el perfil litológico hasta una profundidad que equivalga a un diametro por debajo del fondo del túnel.

b) Colocación de doce (12) puntos de nivelación superficial, constituidos por barras metálicas sembradas a un (1) metro de profundidad por debajo del pavimento de la calle, para evitar la incidencia del efecto loss del referido pavimento. La ubicación de los puntos en la sección debe ser simétrica, aunque en algunos casos es difícil lograrlo por las dificultades que impongan el tránsito de vehículos, los servicios de agua, electricidad o alcantarillado.

c) Colocación de un (1) tubo de asentamiento tipo telescópico de 3 pulgadas de diámetro, dotado con anillos magnéticos espaciados regularmente, para servir de referencias a una sonda torpedo que ubica eléctricamente la posición de los referidos anillos, permitiendo evaluar los asentamientos por debajo de la superficie del terreno.

d) Colocación de tubos plásticos ranurados de dos pulgadas de diámetro para servir de guías a una sonda torpedo inclinómetro marca SINCO, con la cual se registran los movimientos horizontales del suelo a diferentes profundidades.

e) Colocación de barras de nivelación con extremo inferior sembrado a una profundidad determinada, con el objeto de medir la deformación del terreno en un punto específico de la malla de elementos finitos con fines de calibración.

El tubo telescópico de asentamiento en profundidad se coloca preferentemente en coincidencia con el eje del túnel, para poder medir las deformaciones en puntos ubicados por encima de la clave del revestimiento, por ser la zona más sensible del modelo.

Todos los instrumentos se colocan con suficiente antelación al paso del frente por la sección de ensayo, procediéndose a efectuar la primera medición, llamada de referencia, cuando dicho frente de excavación se encuentra a treinta (30) metros de la sección instrumentada. Se escoge esta distancia por tratarse de túneles cuyo fondo se ubica máximo a unos veinte (20) metros de profundidad con respecto al nivel de la calle.

Como regla general se establece que la posición crítica del frente del escudo es la que coincide con la intersección del plano que pasa por el punto más bajo de la circunferencia del túnel y que buza hacia la superficie con un ángulo de cuarenta y cinco (45) grados sexagesimales. A partir de esta posición se producen deformaciones al avanzar la máquina hacia la sección.

La nivelación de todos los puntos de medición se realiza con un nivel de precisión N2 marca WILD, dotado con una placa plano paralela de la misma marca, con la cual se obtiene una precisión de 1/10 de milímetro en cualquier medida.

Se establece un punto de referencia para la nivelación ubicado a una distancia no menor de cuarenta (40) metros del eje del túnel en dirección perpendicular al mismo.

La frecuencia de medición depende del avance de la construcción del túnel, razón por la cual se establece una comunicación continua entre el frente de la excavación, bajo tierra, y la superficie. Esto ayuda a conocer con exactitud la posición del frente del escudo en cualquier momento.

Como regla general se trata de que el proceso de medición simule lo mejor posible el avance del escudo, incluyendo medidas cuando dicho frente se encuentre a 20, 15, 10 y 5 metros antes y después de la sección de ensayo, y naturalmente cuando se encuentre exactamente en coincidencia con dicha sección.

Se establecen tres turnos de operación para el personal que realiza las mediciones, exigiéndose que los resultados se procesen a medida que se van obteniendo, a fin de que sirvan de alerta para quienes inspeccionan la construcción del túnel.

Durante el proceso de medición se anota la hora de inicio y de terminación de cada actividad constructiva dentro del túnel, tales como empuje para excavación, colocación de anillo dentro del escudo, expulsión del anillo de la cola del escudo, inyección primaria y medidas de convergencia del revestimiento realizadas por la contratista.

Los cálculos de todo el proceso se realizan con la ayuda de un microcomputador marca IBM tipo XT con 640 Kb de memoria RAM, y se guardan en una base de datos Dbase III plus para su posterior manejo.

En la figura 2 se muestra en planta y corte, una de las secciones instrumentadas y se indican posiciones y el tipo de los instrumentos colocados.

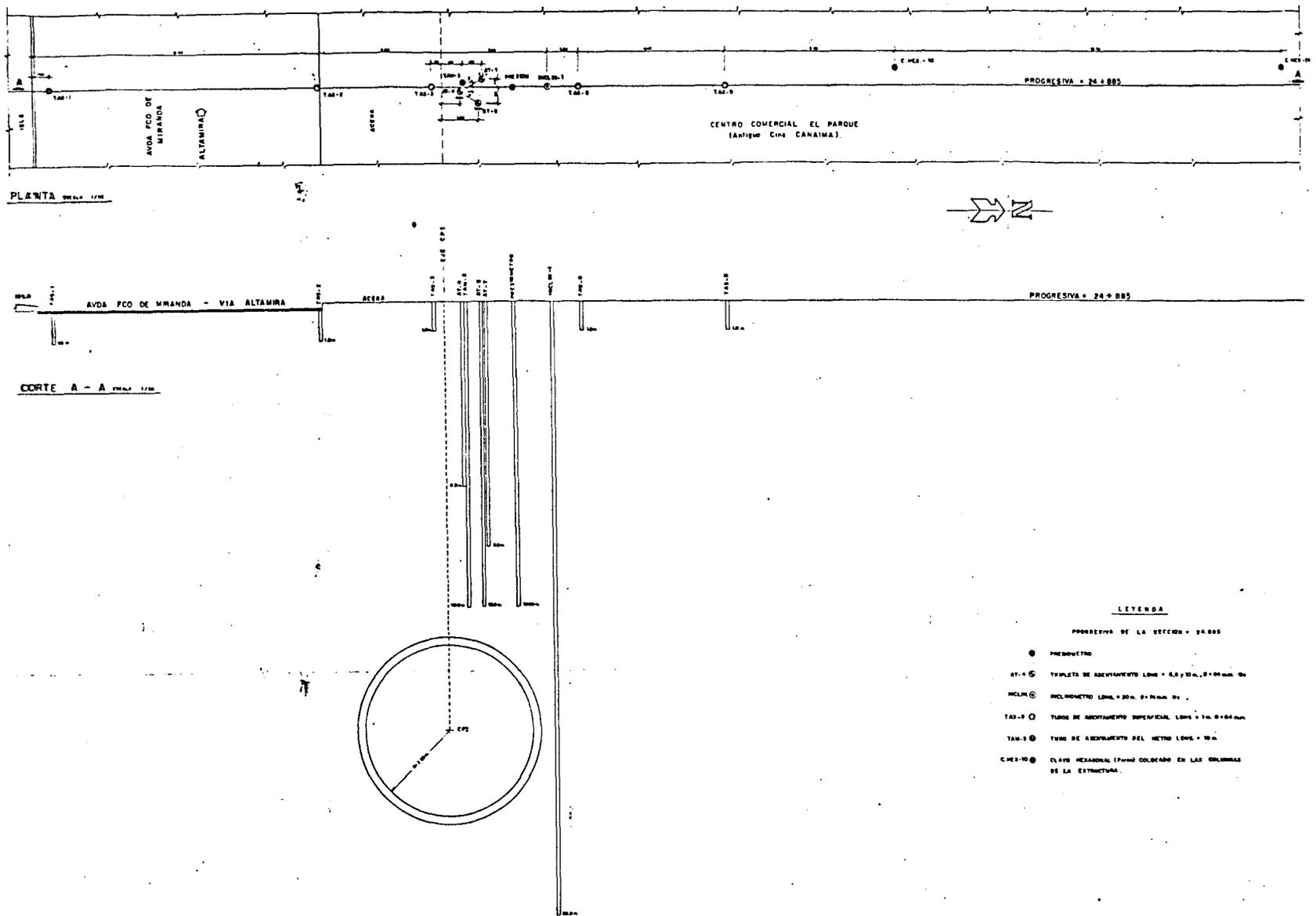
Es de hacer notar que el establecimiento de los puntos de control de asentamiento a profundidades fijas obedece a la necesidad de calibrar la malla de elementos finitos en puntos bien distribuidos de la misma, por ese motivo se escogen algunos puntos ubicados a tres (3) y a cinco (5) radios del túnel, medidos a partir del eje del mismo.

De nuevo se insiste en que la ubicación de los puntos de medición no siempre puede ser escogida en forma simétrica, pues lo más frecuente es que no se pueda realizar en el campo por coincidir con servicios públicos, o porque el proceso de medición molesta la corriente de tráfico vehicular.

En el caso del tramo Chacaíto-Los Cortijos de la Línea I del Metro de Caracas, se presentó una situación de mucha dificultad para lograr la instrumentación de la sección II, pues ella queda ubicada en la vecindad de un cruce vial muy congestionado. Igualmente la instrumentación de la sección III fué dificultada por el intenso flujo de tránsito en el sector de Los Palos Grandes.

LA SIMULACION NUMERICA

Una vez lograda la caracterización geomecánica del subsuelo en las tres (3) secciones objeto del estudio de instrumentación y simulación numérica, realizada como ya se dijo con la ayuda del presiómetro de Menard y con la evaluación de muestras obtenidas en taladros ejecutados en el sitio, se procedió a la formulación



METRO DE CARACAS

FIG. -2-

de un modelo geonumerico del subsuelo, el cual se muestra en la figura No 3.

Originalmente se confeccionó un modelo para el estudio del comportamiento de un solo tunel, pues el programa de trabajo del contratista contempló la ejecución de un tunel a la vez, sin que en ningun momento coincidieran dos procesos de excavación en forma simultanea en la misma seccion.

El primer modelo fué diseñado para el caso de un tunel sencillo y se baso en el empleo de elementos finitos de forma triangular, para ser manejado en un microprocesador cuya capacidad de memoria RAM es de 512 Kb. Dicho modelo permite procesar 250 elementos y considera el suelo como un elemento de comportamiento elástico lineal, lo cual es cierto para el caso del túnel sencillo excavado en suelos rigidos como los del tramo en estudio.

Para el caso del análisis de los tuneles gemelos se empleó un modelo isoparamétrico basado en el uso de elementos cuadrangulares de comportamiento no lineal. La No Linealidad del medio obedece a que el suelo presenta una deformación acumulada por el paso del primer tunel cuando se analiza el paso del segundo en la vecindad del primero.

Por otra parte, el modelo isoparamétrico de elementos cuadrangulares permite hacer un aprovechamiento mas eficiente de la memoria del microprocesador, ya que se trata de manejar dos túneles al mismo tiempo sin condicion de simetria y por ello se requiere un minimo de 150 elementos para lograr la precisión deseada.

Con el modelo utilizado fué posible simular todo el proceso constructivo del tunel, incluyendo la aproximación, el paso y el alejamiento del frente de excavación con referencia a la seccion.

El modelo permitió, además, simular el proceso de inyección del espacio interanular vacio, otorgando diferentes módulos de deformación al material de inyección, dependiendo de la calidad de obturación lograda.

Ya establecido el modelo geonumerico se procedió a realizar la calibración del mismo, para lo cual se emplearon los resultados de las mediciones instrumentales y de las nivelaciones de precisión en superficie, retroalimentando dichos resultados de forma tal de simular todas y cada una las fases constructivas.

La simulación de las etapas del proceso constructivo en cada seccion en estudio contempló el analisis de los siguientes casos:

a) Frente del escudo suficientemente alejado de la seccion de estudio, caso en el cual no se ha producido descompresion del suelo por excavacion del nucleo correspondiente al tunel. Se supone que actuan fuerzas radiales contra la circunferencia de futura excavacion, los cuales impiden la deformacion

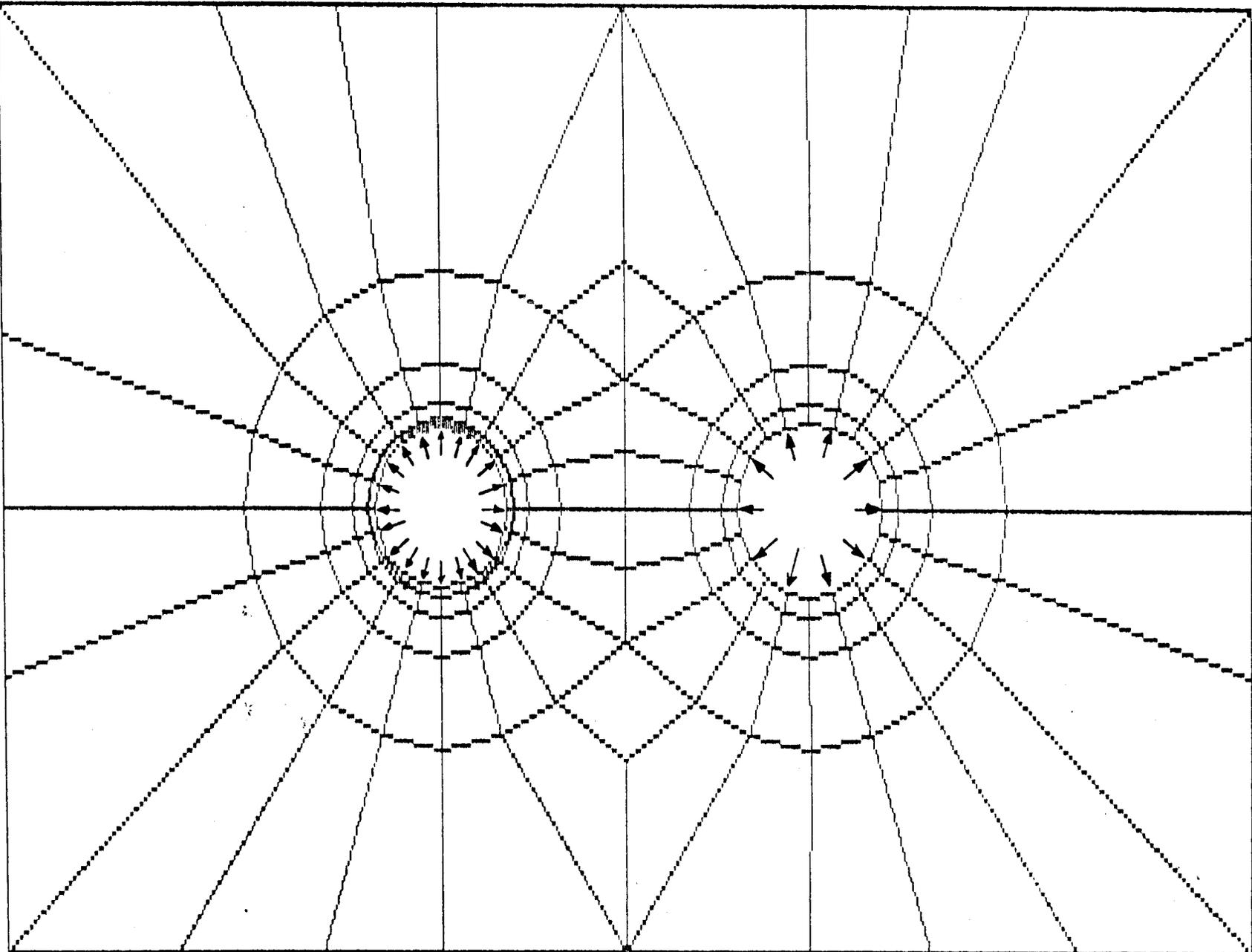


FIG. -3-

de los nodos de la malla, con lo que se logra simular la condición inicial del proceso de calibración.

b) Acercamiento paulatino del frente del escudo hacia la sección instrumentada, con inicio de descompresión en la vecindad de la circunferencia del túnel y ligero movimiento de los nodos ubicados en la vecindad de dicha circunferencia.

c) Ubicación del frente del escudo en coincidencia con la sección de ensayo, con aumento de la descompresión en la vecindad del túnel y hacia la clave.

d) Paso de la cola del escudo por la sección de ensayo, con expulsión del anillo y creación brusca de un espacio interanular vacío. Se genera mayor descompresión y se producen deformaciones significativas en la vecindad del túnel y en la superficie del terreno.

e) Alejamiento de la cola del escudo con referencia a la sección en estudio: aumento de la deformación.

f) Proceso de inyección del espacio quasi-anular, con estabilización de la descompresión y de las deformaciones del terreno.

La figura 4 muestra las diferentes etapas del proceso de avance de la excavación y revestimiento del túnel.

La simulación del proceso de descompresión se realiza haciendo una disminución porcentual de la presión radial que actúa contra la circunferencia de la excavación, a dicha presión se le asigna un ciento por ciento (100%) de su valor cuando el frente del escudo se encuentra suficientemente alejado de la sección de ensayo, constituyendo el caso de la medición base y se le va aplicando una disminución porcentual para simular el acercamiento y paso por la sección.

La eficiencia relativa del proceso de inyección se expresa como porcentaje de la rigidez asignada al anillo de interfase con respecto a la rigidez del terreno vecino.

CUANTIFICACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las características de los suelos encontrados en las tres secciones estudiadas son las siguientes:

Suelos sedimentarios densos, constituidos por materiales predominantemente areno-arcillosos, con presencia de gravas en lentes y con algunos horizontes de centas de esquistos y gneises meteorizados o muy meteorizados, de procedencia aluvio torrencial.

Modulos de Elasticidad promedio, obtenidos de ensayos presiométricos: $E = (100 - 500) \text{ Kg/cm}^2$. Nivel freático mas alto que la clave del túnel en la mayoría de los casos.

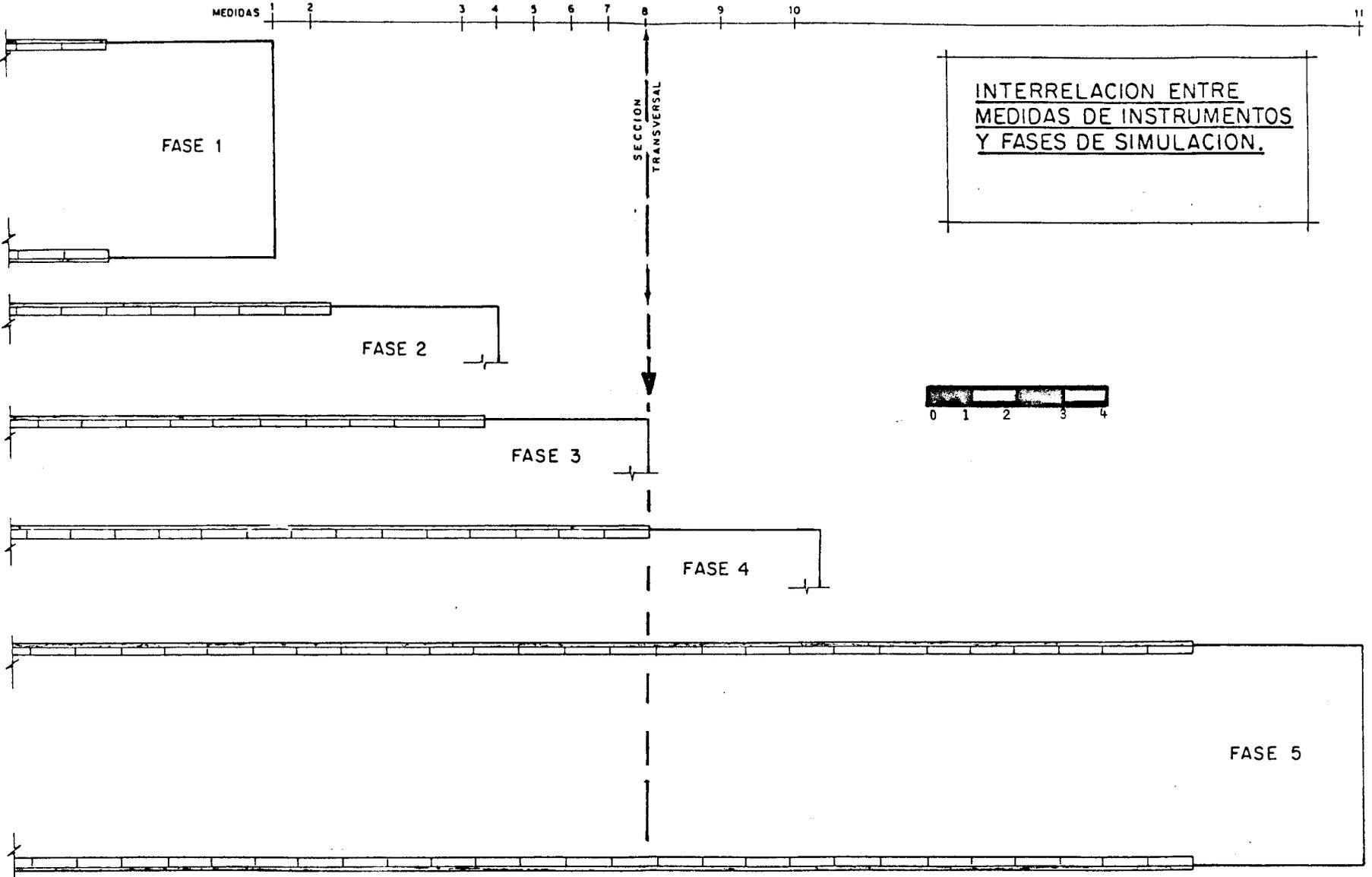


FIG. -4-

Profundidad de la clave del túnel entre 7 y 14 metros referida al nivel de la calle.

En el caso de la sección III, ubicada en el sector de Los Palos Grandes, donde el subsuelo es más gravoso, el contratista decidió reforzar el suelo con el empleo de inyecciones de cemento (CCP). La inyección se colocó por encima de la clave del segundo túnel.

Asentamientos máximos obtenidos en correspondencia del eje del primer túnel, entre 2.0 y 3.5 cm, antes del paso del segundo, con ligero aumento de dichos valores a 2.5 y 4.5 cm, en correspondencia con el eje del primer túnel al paso del segundo.

Los asentamientos en correspondencia con el eje del segundo túnel se situaron entre 2.0 y 2.5 cm, notándose que el verdadero máximo valor ocurre en la columna de suelo ubicada entre los dos túneles y no con el eje de alguno de los túneles.

Los movimientos verticales superficiales, en coincidencia con el eje del túnel, se comenzaron a detectar a una distancia comprendida entre 12 y 10 m (4 R) del frente de excavación y los mismos se estabilizaron cuando el frente del escudo llegó entre 12 y 20 metros de la sección instrumentada.

La eficiencia global del proceso constructivo medida con el valor porcentual de la presión interna de equilibrio calibrada al final del proceso, se evaluó en 50% - 60% y 52% respectivamente, para las tres secciones analizadas al paso del primer túnel.

La eficiencia de la etapa correspondiente a la colocación del revestimiento y relleno del anillo de vacío en la interfase terreno revestimiento, medida con el valor porcentual de la rigidez relativa calibrada se evaluó en 30%, 32% y 27% respectivamente, para las tres secciones analizadas en caso de túneles gemelos.

CONCLUSIONES

Una vez calibrado el modelo para las secciones tipo, es posible emplearlo para predecir el comportamiento de otras secciones no instrumentadas, ubicadas en subtramos cuyo perfil litológico corresponda con alguno de los estudiados.

Así es posible determinar las deformaciones del perfil transversal del terreno al paso de túneles gemelos sin tener que realizar una cuantiosa inversión en instrumentación.

En el caso de la sección III se pudo determinar que el proceso de inyección previa del suelo, antes del paso del segundo túnel, contribuyó ligeramente a disminuir el asentamiento superficial en la calzada, pues de un valor esperado de 3.5 cm se logró bajar a 2.0 cm.