

*Caracas, 6 a 9 Noviembre 2008*  
Conferencia 50 Aniversario Sociedad Venezolana de Geotecnia  
“Estado de la Práctica” en Honor a Gustavo Luís Pérez Guerra

## **Estaciones Subterráneas del Metro de Caracas y del Metro de Valencia Construidas con Método Invertido**

Gianfranco Perri y Salvador Safina

Geomecánica C.A.

Emails: [gianfrancoperri@gmail.com](mailto:gianfrancoperri@gmail.com) [safinasal@cantv.net](mailto:safinasal@cantv.net)

### **RESUMEN**

Se describe el denominado “*Método Constructivo Invertido*” según aplicado en sus varias versiones para la construcción de una numerosa serie de estaciones subterráneas pertenecientes al Metro de Caracas y al Metro de Valencia. Se comentan las más representativas peculiaridades y dificultades del sistema, bien sea desde el punto de vista de la construcción y bien sea desde el punto de vista del diseño estructural.

Se describen algunas de las más típicas soluciones implementadas y se reportan algunos de los más típicos detalles estructurales aplicados, así como los esquemas que representan las principales fases constructivas del método aplicado.

Seis estaciones del Metro de Valencia han sido recientemente construidas con el método invertido, otras cinco se encuentran en construcción y tres estaciones de la Línea 3 del Metro de Caracas, están siendo completadas bajo las más complejas de las circunstancias descritas, esto es: con los trenes en operación.

### **INTRODUCCION**

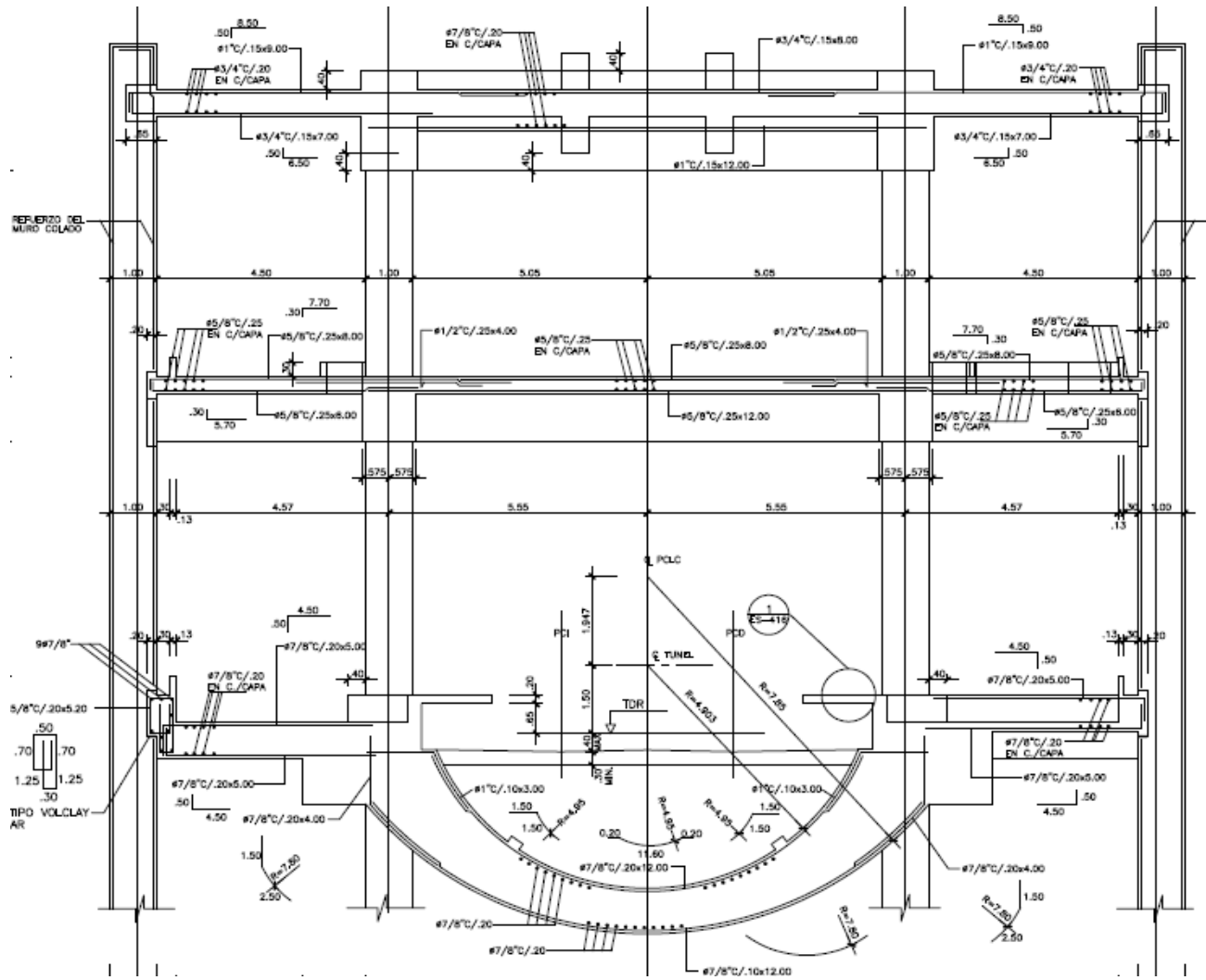
Por “*Construcción con Método Invertido*” para una estación subterránea de transporte masivo, se refiere aquel procedimiento constructivo según el cual los muros perimetrales y demás elementos estructurales portantes principales (columnas) de la estación, se ejecutan todos desde la superficie en la primera etapa de la construcción.

Luego, la segunda etapa constructiva prevé la construcción del techo de la estación y sucesivamente se procede, desde el subterráneo, a excavar y construir todas las demás estructuras internas, esencialmente las losas de mezanina y de andén y/o losa de fondo, junto con todos los otros elementos estructurales accesorios, como escaleras, pasillos de comunicación, etc.

Con tal procedimiento constructivo se libera el área de superficie al tránsito y demás actividades en tiempos muy breves, ya que la mayor parte de las etapas constructivas de la estación se llevan finalmente a cabo desde el subterráneo.

Este método constructivo sin em bargo, además de caracterizarse por una gran cantidad de implicaciones sea técnicas y sea tecnológicas directamente relacionadas con las secuencias constructivas, requiere de una especial elaboración de proyecto, la cual parte de la previa adaptación arquitectónica y funcional de la estación al concepto del ciertamente limitante método constructivo invertido, y continúa con la modelación numérica integral y de detalle, simulando con aquella cada fase constructiva para permitir el análisis y luego el diseño estructural de todos los elementos, bien sea para condiciones de trabajo o de servicio (las de largo plazo) cuando la estructura esté completada, y bien sea para las condiciones de trabajo temporales cuando la estructura esté aún incompleta.

Inclusive, en la mayor parte de los casos, las condiciones de trabajo temporales son las más exigentes desde el punto de vista estructural y las mismas obligan a la elaboración de análisis sucesivos para la verificación de los elementos estructurales en condiciones correspondientes a también específicos breves momentos de su vida.



**Figura 1** Típica sección transversal de una estación del Metro de Valencia

Finalmente, cuando además de construir la estación siguiendo el antes descrito método constructivo invertido, se debe prever la posibilidad de que los túneles se deban excavar con anterioridad a la estación misma y deban ser luego removidos, con la eventual condicionante adicional de mantener en operación alguno de aquellos durante todas las etapas constructivas de la misma estación, las complicaciones constructivas y en consecuencia del análisis y del diseño estructural aumentan aún más, debido a las consecuentes interacciones adicionales entre exigencias constructivas, exigencias estructurales y exigencias operacionales.

En Venezuela, después de una primera experiencia en la Estación Sabana Grande de la Línea 1 del Metro de Caracas ejecutada a comienzo de los años 80, más recientemente seis estaciones de la Línea 1 del Metro de Valencia (Fig.1) han sido construidas con el método invertido y otras cinco estaciones están ahora en construcción, mientras tres estaciones de la Línea 3 del Metro de Caracas están siendo construidas bajo las más complejas de las circunstancias descritas, esto es con los trenes en ejercicio dentro de los túneles excavados previamente a las estaciones y a ser luego desmontados para ser sustituidos por las estructuras de las mismas estaciones en curso de ejecución.

En este artículo se presentan los esquemas más representativos que ilustran el procedimiento constructivo en cuestión, referidos algunos a una estación típica del Metro de Valencia, cuyas vías férreas están alojadas dentro de un túnel de doble vía con aproximadamente 9 metros de diámetro, y referidos otros a una estación típica del Metro de Caracas, cuyas vías férreas están alojadas dentro de túneles gemelos con aproximadamente 6 metros de diámetro cada uno.

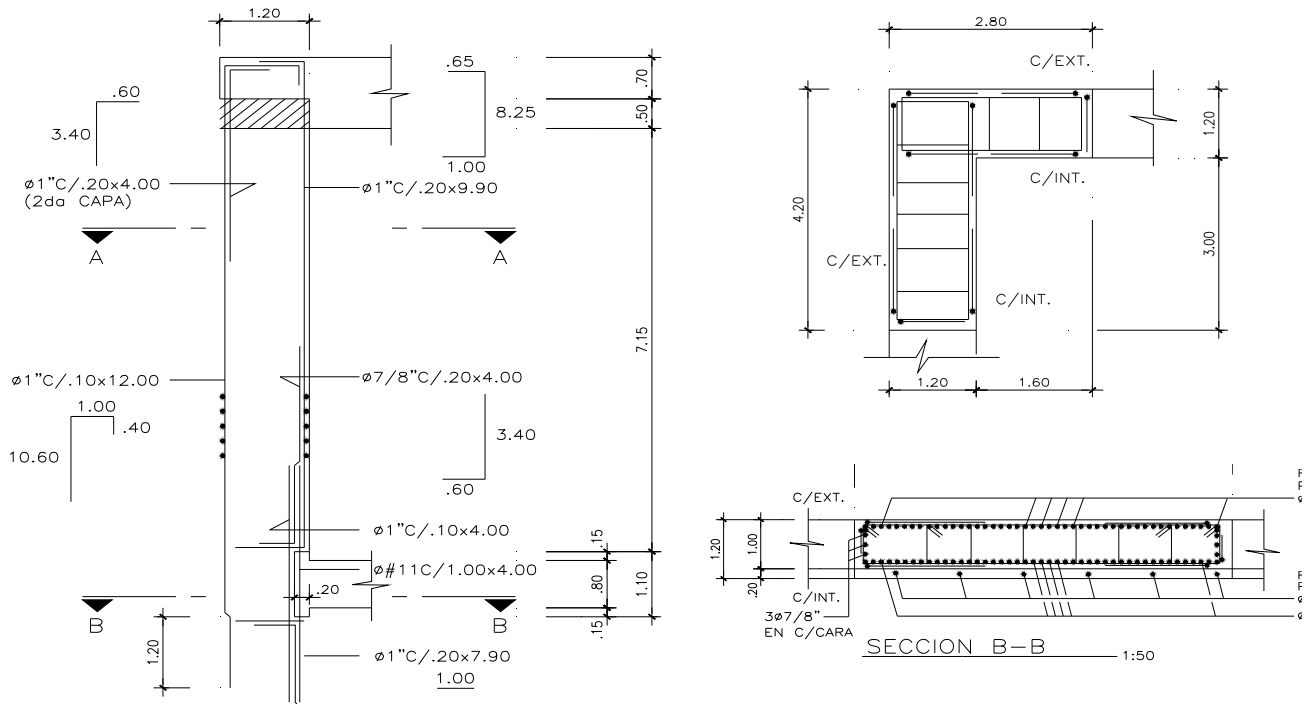
## **PRINCIPALES PECULIARIDADES**

Quizás el detalle constructivo más importante y más recurrente que requiere el procedimiento invertido, es el que se refiere a las reservas que, dentro del cuerpo de los muros colados perimetrales (Fig.2) y de los eventuales (Fig.3) barrotes (columnas) de la estación, deben ser previstas para el adecuado y fundamental empotramiento que dentro de tales reservas debe ser realizado en todos los casos para las losas de mezanine y de andén o losa de fondo estación, y también para las losas de techo estación en aquellos casos en que resulte necesario (Fig.2) a causa de la profundidad de las mismas y de la proximidad de edificaciones o servicios a preservar. (En Fig.4 un caso sin recesos en correspondencia del techo estación).

Estas reservas, o recesos, se realizan aplicando específicos espesores (generalmente de madera) al extradós de las armaduras de los paneles de muros colados perimetrales (Fig.2) y de los barrotes (Fig.3), para con ello impedir la penetración del concreto colado dentro de aquellos espacios destinados al sucesivo referido empotramiento de las losas y, para el caso de los muros colados perimetrales, manteniendo al mismo tiempo también la presencia de una armadura relevante dentro del más profundo espesor del mismo receso.

Naturalmente entre los aspectos fundamentales de este problema está el geométrico, en el sentido de la precisión con la cual tales recesos deben ser previstos y conformados a los diferentes niveles de profundidad para los diferentes barrotes y los diferentes paneles involucrados en cada caso.





**Figura 4** Muros colados perimetrales sin recesos en el techo

Vale la pena señalar que especial atención debe ser prestada al referido detalle del empotramiento estructural de las losas a los muros perimetrales cuando se trata de losas de l techo de la estación, debido a las grandes cargas verticales de tierra y de tránsito de superficie que generalmente deben ser soportadas y transmitidas por estas losas a nivel de techo estación.

En estos casos las reservas, o recesos, dentro del cuerpo de los paneles colados deben ser más profundos (Fig.3) y las conexiones muros-losas deben ser estructuralmente mucho más eficientes.

También reviste cierta peculiaridad y delicadeza estructural del método constructivo invertido, la manera en que se deben transmitir las cargas de superficie, techo y mezanine al terreno de fundación durante las etapas temporales iniciales del proceso constructivo, hasta tanto no sea construida por completo la losa de fondo estación, la cual en definitiva transmitirá permanentemente la mayor parte de las cargas de toda la estructura al terreno de fundación.

Mientras tanto serán los muros colados perimetrales que a través de su necesario y adecuado empotramiento deben funcionar como elementos de fundación profunda, conjuntamente con los barros que, cuando previstos, deben ser igualmente adecuadamente y suficientemente empotrados para trabajar temporalmente como fundaciones profundas (pilotes) y no solamente como columnas.

Finalmente, las losas de techo y de mezanine deben prever la presencia de importantes aperturas temporales, estratégicamente ubicadas dentro del área de la estación en función de las previstas

operaciones de desescombro de los terrenos que, siendo excavados desde el subterráneo, deben ser eficientemente evacuados hasta la superficie.

Estas aperturas tem porales de dimensiones relativamente importantes, obligan a prever la existencia de situaciones estructuralmente muy exigentes para las losas de techo y de mezanine, y a prever al mismo tiempo, adecuados y eficientes detalles estructurales para su posterior cierre, o eventualmente para su posterior redimensionado para los casos de su posible coincidencia con alguna de las aperturas funcionales permanentes presentes en la estación.

### **PECULIARIDADES ESPECIALES**

En la introducción se ha anticipado como las dificultades ligadas al procedimiento constructivo invertido de las estaciones se incrementan cuando se pretende construir el túnel, o los túneles gemelos, antes de construir las estaciones mismas, y como se incrementan aún más cuando, en el caso de túneles gemelos, se pretende además mantener en ejercicio el tránsito de los trenes durante todas las fases constructivas de las estaciones mismas, en por lo menos uno de los dos túneles.

Lo anterior generalmente puede ocurrir por preconcebidas exigencias programáticas o de inversión, mientras en otros casos y quizás con más frecuencia, puede ocurrir para compensar demoras programáticas de varias procedencias.

Es deseable en todos estos casos, que por lo menos se puedan construir (vaciar) los muros colados correspondientes a los cabezales de las estaciones antes del paso de los túneles, de manera tal que tal paso se produzca perforando los muros y evitando en consecuencia las grandes dificultades que se deberían en cambio enfrentar al tener que construir los mismos muros alrededor de los túneles eventualmente ya excavados.

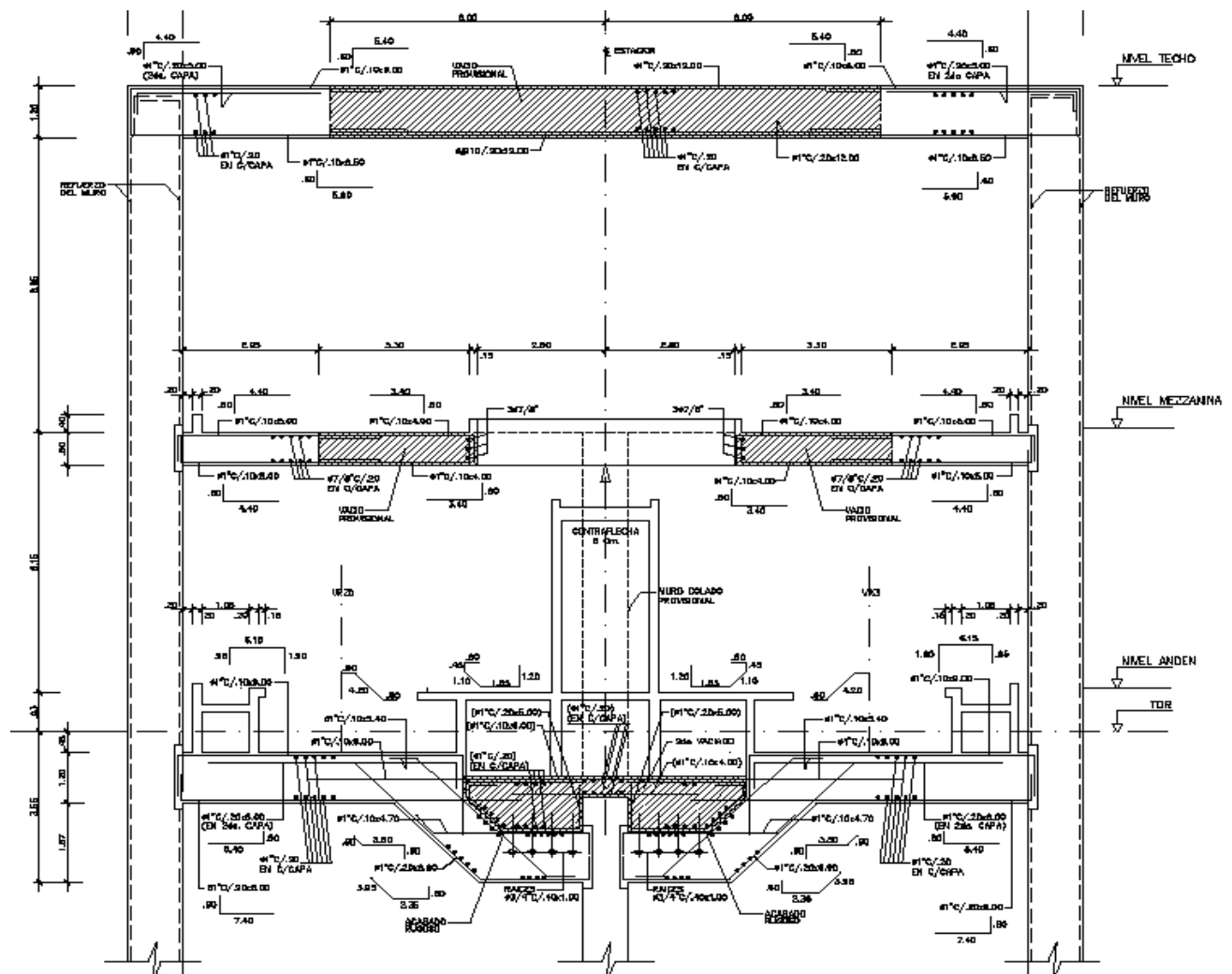
Las problemáticas ligadas a la construcción de los muros longitudinales de las estaciones, paralelos a los túneles ya excavados, son por otro lado relativamente sencillas, ya que en principio se limitan a la necesaria precisión con que se debe respetar el replanteo geométrico de los muros y la estricta verticalidad de su excavación, toda vez que se pueda prever un retiro mínimo suficiente entre los muros y los túneles, el cual puede ser del orden del metro y, cuando necesario, también algo inferior.

En el caso específico de las referidas tres estaciones de la Línea 3 del Metro de Caracas (Jardines - Coche y Mercado), para poder mantener en ejercicio los trenes dentro de los túneles construidos previamente, se ha construido desde la superficie un tercer muro colado longitudinal temporal a todo lo largo del eje de la estación, suficientemente empotrado debajo de la cota de fondo andén y vaciado solamente hasta la cota de mezanine.

Este muro cumple inicialmente la función de elemento de contención, cuando en una de las vías aún está transitando el tren dentro del túnel mientras en la otra se está desmontando el túnel y se están construyendo la losa de fondo estación con el andén y todos los demás elementos de la vía férrea, y cumple luego la función de simple separación física, cuando el tren transita en la vía de la estación primeramente completada mientras se está desmontando el segundo túnel y se están construyendo la losa de fondo estación con el andén y todos los demás elementos de la segunda vía férrea de la estación.

Contemporáneamente, la porción empotrada del mismo muro colado dispuesto longitudinalmente a todo lo largo del eje de la estación, cumple con la fundamental y muy delicada función estructural de apoyo y de ancla para ambas mitades de la losa de fondo estación, sujetas a la acción del tránsito del tren y a la contemporánea fuerte sub-presión hidráulica.

Tal función temporal se prolonga durante todo el lapso de tiempo comprendido entre el momento del vaciado de cada una de las mitades de la losa de fondo estación y el momento en que se puede finalmente completar la conexión y la continuidad estructural entre ambas porciones, lo cual ocurre solamente al final del procedimiento, cuando se haya vaciado por completo la segunda media losa y se haya procedido a la demolición de la porción no empotrada del muro colado separador (ver la Fig.5).



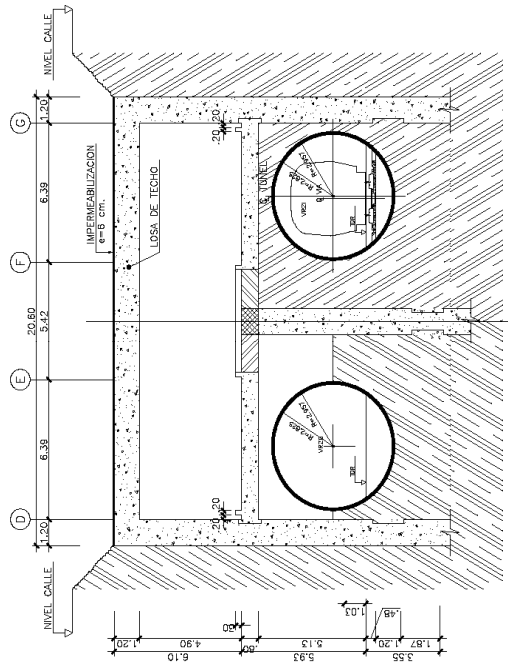
**Figura 5** Muro colado temporal para ancla de las losas de fondo estación Metro de Caracas

Las cuatro figuras (6 - 7 - 8 y 9) que siguen, ilustran finalmente las principales etapas del proceso constructivo seguido para las estaciones Jardines , Coche y Mercado de la Línea 3 del Metro de Caracas, permitiendo el ejercicio de los trenes durante el proceso constructivo.

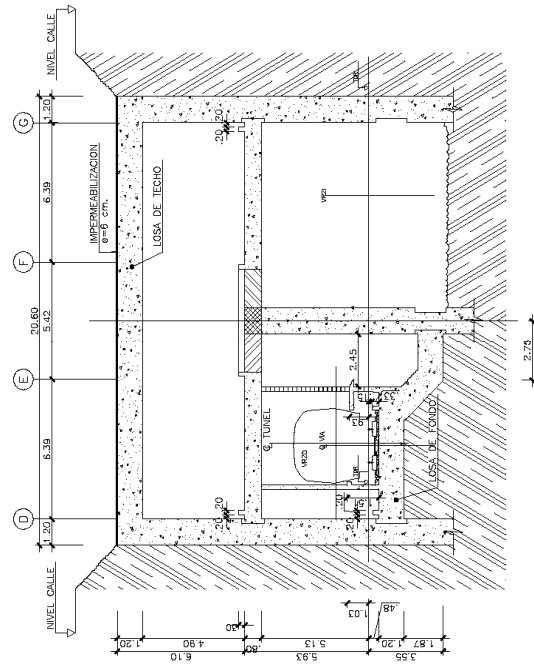




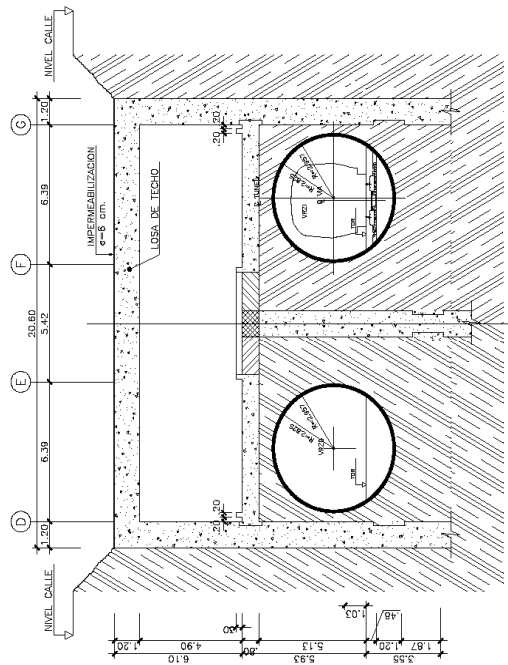




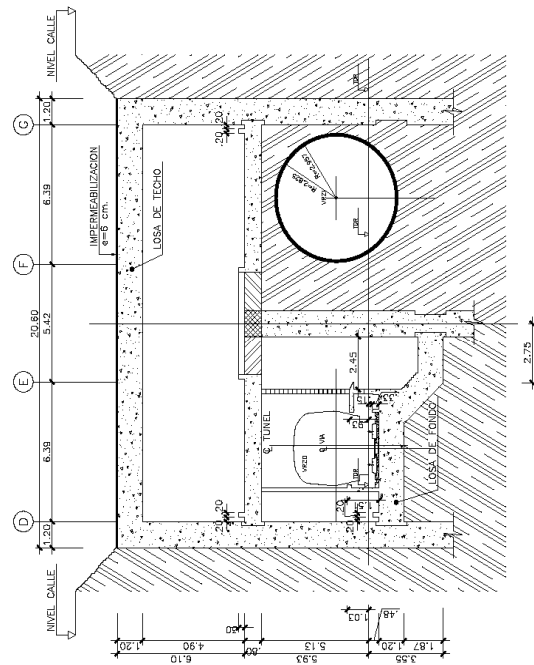
FASE 4.1 LOSA DE MEZZANINA (ESTACION LOS JARDINES) Esc./mbo  
 4.1-EXCAVACION SECORORIZADA Y DEMOLICION DE LOS SEGMENTOS DE ANILLO.



FASE 6.1 VIA VRZL (ESTACION LOS JARDINES) Esc./mbo  
 6.1-EXCAVACION DE LA VIA IZQUIERDA.



FASE 4.2 LOSA DE MEZZANINA (ESTACION LOS JARDINES) Esc./mbo  
 4.1-IMPENIBILIZAR TECHO DE LA ESTACION.  
 4.2-RELLENAR HASTA 1m. SOBRE LA LOSA DE TECHO.  
 3.4-MACAR LA LOSA DE MEZZANINA.



FASE 5.1 VIA VRZD (ESTACION LOS JARDINES) Esc./mbo  
 5.1-EXCAVACION DE LA VIA DERECHA.  
 5.2-ACCAR LOSA DE FONDO.  
 5.3-CONSTRUIR VIA Y PARTE DE ANDEN DERECHA.  
 5.4-CONSTRUIR EL TABIQUE DE PROTECCION PARA LA EXCAVACION DE LA VIA IZQUIERDA.  
 5.5-PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE LA VIA DERECHA.

Figura 8 Fases constructivas (9 a 12) estaciones Jardines Coche y Mercado-Metro de Caracas



## CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO ESTRUCTURAL

Para el diseño del cuerpo principal de la estación, la estructura se divide en pórticos planos de ancho unitario equivalente que representan las diferentes secciones de la estación. Cada pórtico es analizado considerando diferentes fases de diseño (las constructivas y la permanente), para finalmente obtener las envolventes que resumen en cada elemento los valores de combinaciones de cargas que condicionan su diseño estructural.

Para cada fase, el modelo de elementos finitos reconoce la evolución del proceso constructivo incorporando los muros y losas existentes, las condiciones particulares de vinculación entre muros-lasas y barroses-vigas y la interacción de los muros y barroses con el terreno circundante, incorporando apropiadamente las propiedades geomecánicas de los estratos existentes. Cuando sea aplicable, el modelo aprovecha la simetría de la estación y de las cargas actuantes.

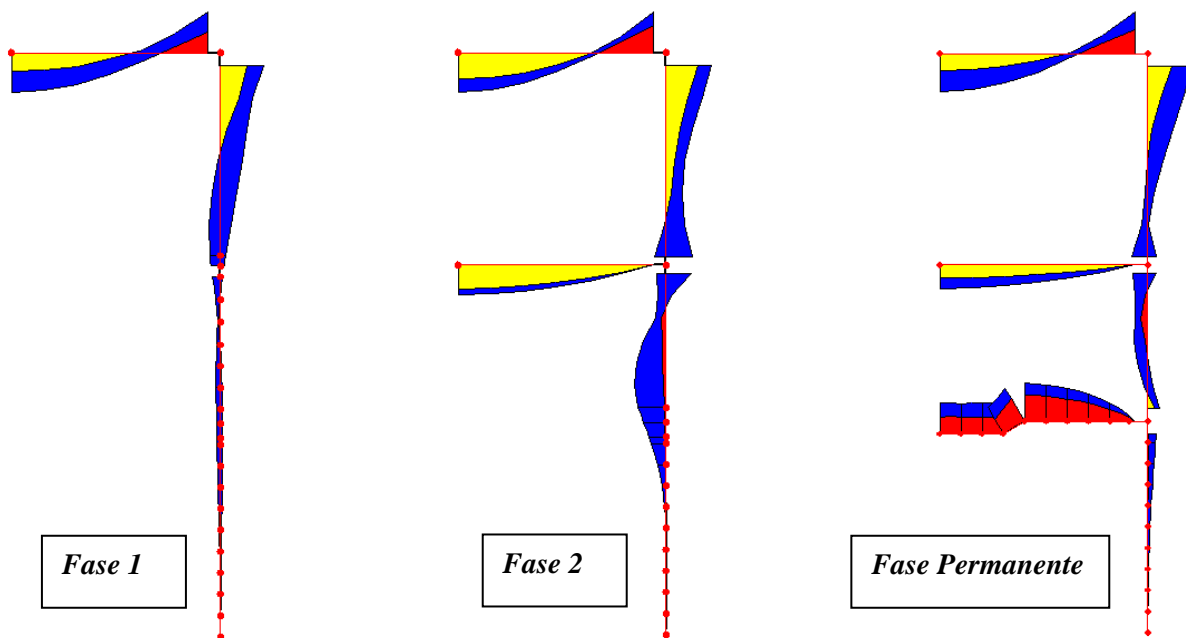
La Fase Constructiva 1, representa la condición en la cual los muros están empotrados en el terreno por debajo del primer nivel de la excavación y el techo está vaciado monolíticamente en su nivel superior. Las cargas de diseño son el peso propio del techo, el relleno (parcial) de tierra sobre el techo, la sobrecarga provisional de uso, los empujes laterales del terreno, los empujes debidos a la sobrecarga en superficie y los empujes hidrostáticos debidos al nivel freático. Aunque el relleno no será colocado totalmente en esta fase, se contempla la posibilidad que el techo de la estación sea utilizado como área disponible al contratista para depósito de los materiales de la construcción, entre otros.

La Fase Constructiva 2, considera la losa de mezzanina vaciada y la extensión de la excavación hasta el nivel inferior de la losa de fondo (andén). Las cargas de diseño para esta fase son además de las cargas gravitacionales antes citadas, el peso propio y sobrecarga de uso de la mezzanina y los empujes laterales del terreno, sobrecarga en superficie y los debidos al nivel freático, extendidos hasta el fondo de la excavación. Esta situación representa la condición crítica para la verificación de la capacidad de los barroses como fundación.

La condición definitiva designa la Fase Constructiva 3 o permanente, en la cual se ha vaciado la losa de fondo y todas las estructuras complementarias internas de la estación. Esta representa la condición de trabajo permanente de la estación donde se espera a largo plazo que la función de soporte de los muros y barroses se vea disminuida por la incorporación de la losa de fondo como losa de fundación. Las cargas de diseño para la fase permanente son el peso de la estructura y acabados, el relleno de tierra sobre el techo para restitución de vialidad, la sobrecarga de superficie, las cargas de uso estipuladas por la norma de diseño para la estación, la carga del andén y de vías férreas conjuntamente con los empujes laterales del terreno, sobrecarga de superficie y los empujes hidrostáticos debidos al nivel freático.

En cada fase, las cargas actuantes son apropiadamente mayoradas y combinadas para garantizar los factores de seguridad requeridos. Una verificación de flotabilidad es necesaria inmediatamente al vaciar la losa de fondo, cuando el nivel freático es importante. La figura 10, muestra la envolvente típica de momentos flectores en cada una de las fases de diseño.

Para la determinación de los empujes laterales sobre los muros, durante las fases constructivas se emplea el coeficiente del empuje activo del terreno y se reconoce la eventual cohesión del material por constituir esta una condición temporal, provisional o transitoria, mientras que para la fase definitiva o permanente se emplea el coeficiente del empuje de reposo, despreciándose completamente la cohesión del material.



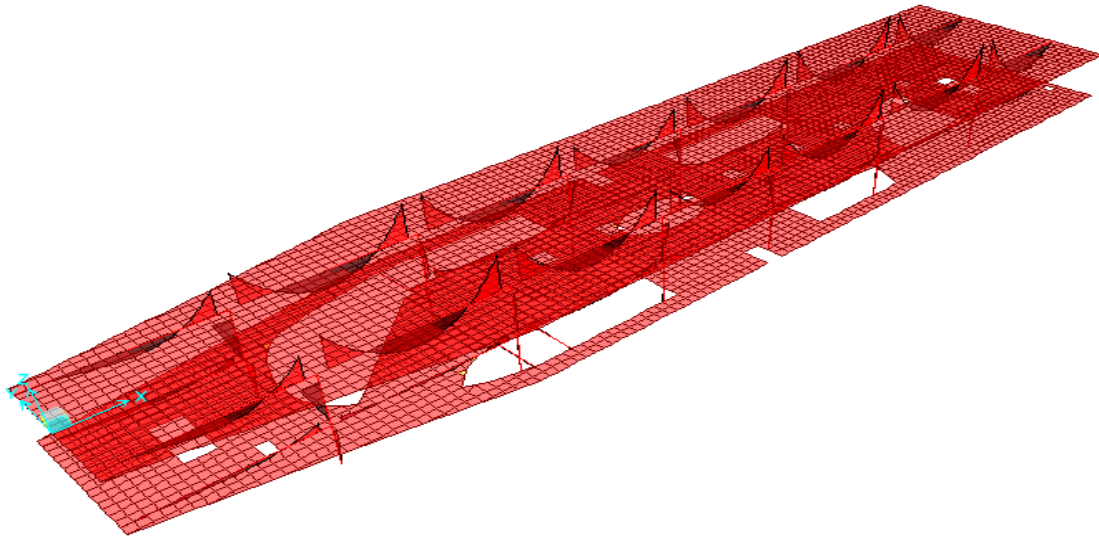
**Figura 10** Envolvente típica de momentos flectores en diferentes fases de diseño

Cuando la estación contemple la existencia de vigas longitudinales y barroses intermedios, se requiere emplear un modelo de pórtico plano soportado a las cargas gravitacionales transferidas por las losas en las diferentes fases de diseño. Para el diseño de los barroses, durante las fases constructivas debe verificarse su capacidad como fundación y su capacidad resistente como columna, tanto en la sección neta como en la sección reducida (recesos). Durante la condición permanente de trabajo debe verificarse su capacidad resistente como columna para la totalidad de las cargas actuantes.

Para el diseño de las vigas de techo se consideran las cargas debidas al peso propio, la cubierta de tierra y la sobrecarga de uso en superficie. Para estas vigas, debido a la considerable rigidez impuesta por la barreta en el plano de carga, el modelo reconoce una junta rígida equivalente al semi-ancho de los barroses, excepto en los extremos de la viga sobre los muros donde se considera un apoyo simple en vista que el aporte de rigidez del muro fuera de su plano es relativamente menor.

Para el diseño de las vigas de la mezzanina se consideran las cargas actuantes debidas al peso propio, acabados y la sobrecarga de uso en mezzanina. Para estas vigas y para las vigas de andén, debido a la particular conexión con los barroses existentes, el modelo de análisis supone un apoyo simple sobre el eje de cada barreta con una extensión de zona rígida equivalente al semi-ancho de los mismos.

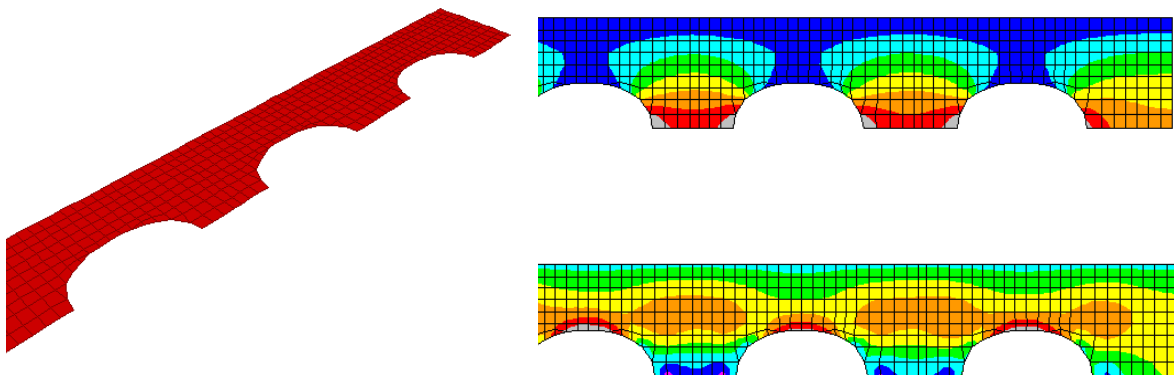
Para los extremos de las vigas sobre los muros, se considera un apoyo simple debido a que dicha conexión será de corte. La figura 11 muestra una vista 3D del modelo de la estación destacando la envolvente de momentos flectores para cargas gravitacionales en las vigas longitudinales y barrotes.



**Figura 11** Vista 3D modelo estación con envolvente de momentos flectores en vigas y barrotes

Adicionalmente, la existencia de vacíos importantes en el nivel mezzanina adosados a los muros laterales (para alojamiento de escalera interiores, etc), requiere proveer sendas vigas a nivel de la losa de mezzanina que proporcionen un apropiado soporte lateral a los muros. Dichas vigas deben soportar los empujes transmitidos por los muros en el plano horizontal. Adicionalmente, para verificar la influencia de las aberturas provisionales o permanentes a nivel de mezzanina o de techo se emplea un modelo bidimensional a base de elementos finitos planos adaptado a la geometría y condiciones de apoyo, el cual permite estudiar los efectos de concentración de solicitaciones inducidos por las aberturas de las losas (Fig. 12).

Cuando la estación contemple salidas laterales, deben proveerse a nivel de techo, vigas de transferencia en el plano de los muros que soporten la losa de techo al efectuarse la demolición de la porción del muro comprendida entre el techo y la mezzanina.



**Figura 12** Modelo mezzanina con envolvente de momentos flectores en cada dirección

## CONSIDERACIONES CONCLUSIVAS

El método invertido empleado para construir estaciones subterráneas de sistemas urbanos de transporte masivo representa ciertamente una formidable y desafiante solución técnica, permitiendo resolver exitosamente problemáticas complejas y casi imposibles de ser eficientemente enfrentadas de otra manera.

Sin embargo, un empleo rutinario de la metodología descrita no pareciera poder competir con el más tradicional procedimiento del clásico *cut and cover* debido, por un lado a los aspectos económicos comparativos para los cuales en cada caso específico pueden obtenerse resultados diferentes y no siempre relativamente similares, y por otro lado debido a las indudables y objetivas dificultades técnicas, de diseño y construcción, que para ser superadas requieren siempre de un especial esmero y de una indispensable amplia experiencia.

Puede por lo tanto afirmarse que solamente cuando, o las circunstancias operativas y programáticas sean tales que puedan efectivamente permitir de aprovechar las peculiaridades del método invertido en relación con las efectivas necesidad y posibilidad de poder liberar rápidamente la superficie, o el desarrollo del entero sistema de transporte justifique o requiera que las estaciones inicien a operar mucho tiempo después que las vías en túnel, entonces se justificará plenamente la adopción del método invertido.

En todos los otros casos deberá en cambio evaluarse muy cuidadosamente la eventual conveniencia de recurrir a tal procedimiento constructivo en alternativa al método clásico y más ampliamente comprobado de construir de manera convencional las estructuras de la estación a cielo abierto, aunque dentro de una excavación profunda oportunamente y temporalmente estabilizada.