

“TUNNELLING” EN VENEZUELA: PASADO PRESENTE Y FUTURO

Gianfranco Perri ()*

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de túneles y más en general de obras subterráneas en Venezuela, es prácticamente inevitable tomar como referencia general el Metro de Caracas y en consecuencia, se entenderá por “*Pasado del tunneling*” todo hecho transcurrido hasta finales de los años 80, cuando se completó la construcción de las Líneas 1 y 2 del Metro de Caracas; diferenciando un *pasado remoto* hasta la primera mitad del siglo XX, luego un *pasado próximo* a partir del post segunda guerra mundial y finalmente, un *pasado reciente* después de la mitad de los años 70, cuando se dio inicio a la construcción de los túneles del Metro de Caracas.

Por “*Presente del tunneling*” se entenderá luego todo hecho relativo a los túneles actualmente en construcción, para la Línea 4 del Metro de Caracas; para la Línea 1 del Metro de Valencia, recién completados y aún no en servicio; pasando por los túneles del Ferrocarril Caracas-Cúa y por los del Metro de Los Teques, que están en las etapas finales de su construcción y terminando con los primeros túneles del Ferrocarril Puerto Cabello-La Encrucijada, que se encuentran en plena construcción.

En cuanto al “*Futuro del tunneling*” finalmente, se hará referencia a los proyectos y a las obras aún por iniciarse como, entre otros, los largos túneles ferrocarrileros que sin solución temporal de continuidad con los ya construidos se excavarán para el Ferrocarril Puerto Cabello-La Encrucijada, o los túneles de la prolongación de la Línea 3 del Metro de Caracas que llevarán a interconectar próximamente el Sistema Metro con el Sistema Ferrocarril y también se mencionarán algunos proyectos viales previstos para ser ejecutados en el mediano plazo.

Finalmente, debe precisarse que a continuación se hará referencia esencialmente a los túneles ferrocarrileros y a los túneles viales, mientras los túneles hidráulicos venezolanos si bien numerosos y largos, se omitirán, sin dejar sin embargo de hacer aquí la debida mención al internacionalmente famoso túnel de Yacambú, para el cual por cierto, bien podrían aplicarse indistintamente todas las tres colocaciones temporales de “*Pasado - Presente y Futuro*”.

(*) *Profesor de Proyecto de Túneles en la Universidad Central de Venezuela - Ingeniero Consultor - gperri@cantv.net*

PASADO

Los ferrocarriles con trenes traccionados por locomotoras de vapor construidos en Venezuela entre finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX, representaron la inevitable y primera buena ocasión para la construcción de numerosos túneles a lo largo y ancho de variados sectores del territorio nacional, la mayoría próximos a la región capital aunque algunos, también importantes, más alejados hacia en la región andina.

Se trató en todos los numerosísimos casos, de túneles de dimensiones modestas, sea por sección (generalmente en herradura recta, con anchos de 3 a 4 metros y altos de 4 a 5 metros) que por longitud (generalmente de pocas decenas de metros).

Los ferrocarriles: Caracas-La Guaira, el primero de Venezuela inaugurado en 1883; Valencia-Puerto Cabello, inaugurado en 1888; Caracas-Los Teques, abierto en 1891 como primera etapa del *Gran Ferrocarril de Venezuela* entre Caracas-Valencia-Puerto Cabello y completado en 1894; Caracas-Petare-Santa Lucia, el *Ferrocarril Central de Venezuela*, completado por etapas entre 1888 y 1916; eran todos ferrocarriles de montaña, ya que salvaban los importantes desniveles que separan las ciudades de Caracas y Valencia de sus respectivos puertos (casi 800 metros en un caso y aproximadamente 500 metros en el otro), así como Caracas de Los Teques (aproximadamente +200 metros) con el “*tren del encanto*” y Petare de Santa Lucia, tramo en el cual se construyeron 14 túneles.

El ambiente geo-litológico dentro del cual se excavaron todos estos túneles, es el que corresponde a las formaciones metamórficas de la Cordillera de la Costa Central de Venezuela, constituidas en el caso de La Guaira y Petare-Santa Lucia por esquistos calcáreos y filitas cuarzo-micáceas y constituidas por esquistos cuarzo-micáceos, gneises y filitas, para el caso de Los Teques y finalmente constituidas por gneises granitos y anfibolitas, para el caso Valencia-Puerto Cabello.

Las condiciones físicas de los macizos rocosos excavados eran las típicas correspondientes a rocas meteorizadas, debido a la general baja cobertura de los túneles casi siempre parietales, lo cual sin embargo, no evitó que se hiciera amplio uso de explosivos para las excavaciones y lo cual tampoco generó condiciones de particular precariedad en cuanto a la estabilidad de las excavaciones que en la mayoría de los casos resultaron ser totalmente auto-estables.

Muchos de estos túneles, prácticamente todos aún abiertos y en algunos casos aún visitables, se han mantenido estables sin soporte alguno y solamente pocos fueron revestidos con concreto masivo, casi siempre por tramos y principalmente en coincidencias con los sectores de los portales.

Al mismo contexto histórico geológico y tecnológico puede ser adscrito el *Túnel El Calvario*, el más antiguo de los presentes en la ciudad de Caracas, ubicado en la vecindad de la central Plaza El Silencio, fue construido antes de 1896 para comunicar el Ferrocarril Central con la Estación Caño Amarillo del Ferrocarril Caracas-La Guaira, pasando debajo del cerro El Calvario. El túnel tiene una longitud de 100 metros aproximadamente, bajo una cobertura máxima del orden de los 20 metros y actualmente aún alberga un canal amplio de tránsito vehicular. Otro y más largo túnel de 250 metros debajo de El Calvario, para conectar el Gran Ferrocarril de Venezuela con la misma Estación Caño Amarillo del Ferrocarril Caracas-La Guaira, fue planificado pero nunca construido. En el Plano de Caracas del ingeniero R. Razetti de 1919, se le puede adivinar el trazado, punteado.



**F.A. TARGET
CONTRATISTA
1890**



Ferrocarril Caracas-Los Teques: Un Túnel del “Tren del encanto”

Otro muy antiguo túnel aún presente en la ciudad de Caracas, es el *Túnel El Portachuelo* el cual fue excavado en 1902 para el paso del, desde hace ya muchos años desaparecido, tranvía que cubría la ruta extra urbana El Valle-El Cementerio y en la actualidad sirve como paso peatonal. El túnel fue excavado en las colinas de Roca Tarpeya, inmediatamente al sur del Río Guaire, en un macizo rocoso muy fracturado de esquistos calcáreos duros, con una sección ovoidea y fue revestido en concreto.

Cerrado el *pasado remoto* de los túneles venezolanos con el cierre del capítulo de los túneles ferrocarrileros, el cual en la Venezuela moderna ha permanecido totalmente cerrado hasta la era del Metro de Caracas, se debe pasar al *pasado próximo* de los túneles venezolanos y con ello, a los túneles viales construidos en las autopistas urbanas de Caracas y en las autopistas extra-urbanas venezolanas a partir del segundo post guerra mundial.

A lo largo de las autopistas de Caracas, construidas entre 1950 y 1975, se han excavado varios importantes túneles, todos gemelos y caracterizados por la misma sección geométrica de herradura recta con aproximadamente 10 metros de ancho.

Los *Túneles La Planicie*, terminales de hecho de la Autopista La Guaira- Caracas y paso obligado de entrada y salida para Caracas, desde y hacia el puerto y el aeropuerto, fueron construidos entre Catia y San Martín en 1959.

Los *Túneles El Valle* y los *Túneles El Paraíso*, fueron construidos en la Autopista Francisco Fajardo, la principal de Caracas, entre 1967 y 1968.

Los *Túneles La Trinidad*, al final de la Autopista Prados del Este, comunican el valle de Caracas con la ciudad satélite Baruta y fueron construidos entre 1972 y 1974.

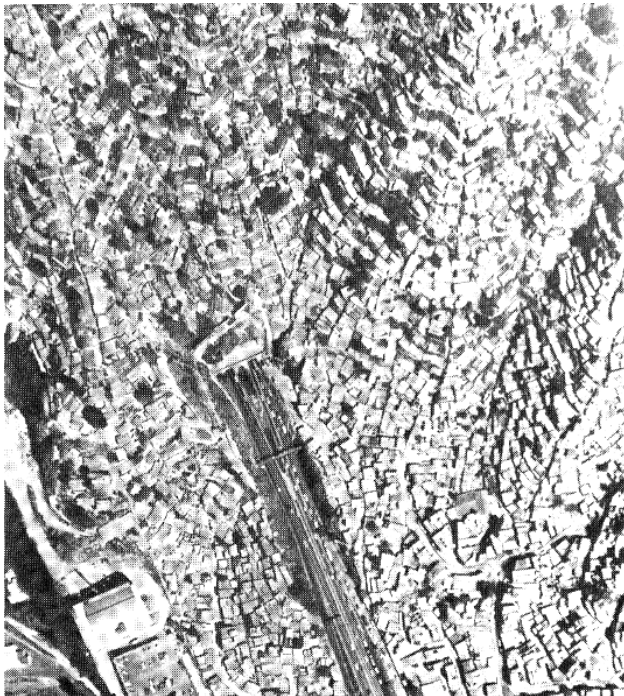


Túnel El Paraíso - Portal El Paraíso

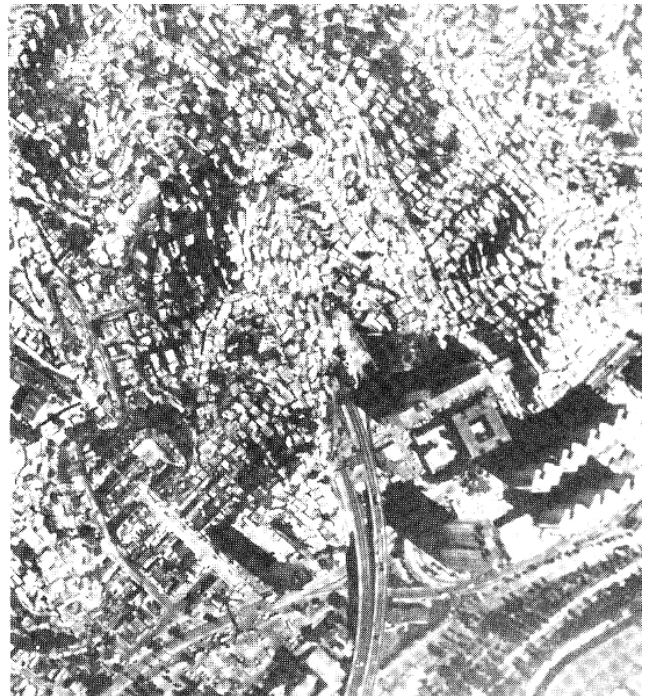


Túnel La Trinidad

Comenta el ingeniero Roberto Centeno, “... se trataba de un época para la cual era una aventura muy arriesgada el construir túneles para tres canales de 3.60 metros cada uno, pues se trataba de excavaciones cuyo frente supera los 105 metros a ser realizadas en rocas blandas, muy fisuradas, con numerosos planos de debilidad y en las que generalmente hay filtraciones de aguas. La presencia de populosas barriadas de viviendas humildes (ranchos) que recubren las colinas que rodean al Valle de Caracas introduce un factor de riesgo adicional, pues por no tener las viviendas servicios de cloacas, todas las aguas servidas son dispuestas en sumideros construidos en forma rústica en la superficie del terreno y hasta profundidades de dos a dos y medio metros. Los constructores de los ranchos no conocen nada de geología, como es obvio pensar, pero sí saben que el agua se infiltra rápidamente por el fondo de los sumideros y que ello les resuelve el problema de la disposición de sus aguas negras o servidas, pues como ellos mismos lo expresan, ‘el suelo cuela bien el agua, y por ello el terreno es bueno para construir el rancho’. En tales condiciones, la gran mayoría de los expertos en túneles, quienes intervinieron en el proyecto de las autopistas de la ciudad de Caracas, consideraron que las características geomecánicas desfavorables de las rocas blandas de las unidades litológicas de la ciudad, en la mayor parte de los casos desmejoradas por la presencia de las filtraciones de aguas servidas de los ranchos, hacían extremadamente riesgoso y demasiado costoso el diseño y la construcción de una sección de túnel que pudiera alojar tres canales de circulación vehicular. Por este motivo, principalmente, los túneles de la ciudad solo permiten el paso de dos canales de tránsito vehicular...”.



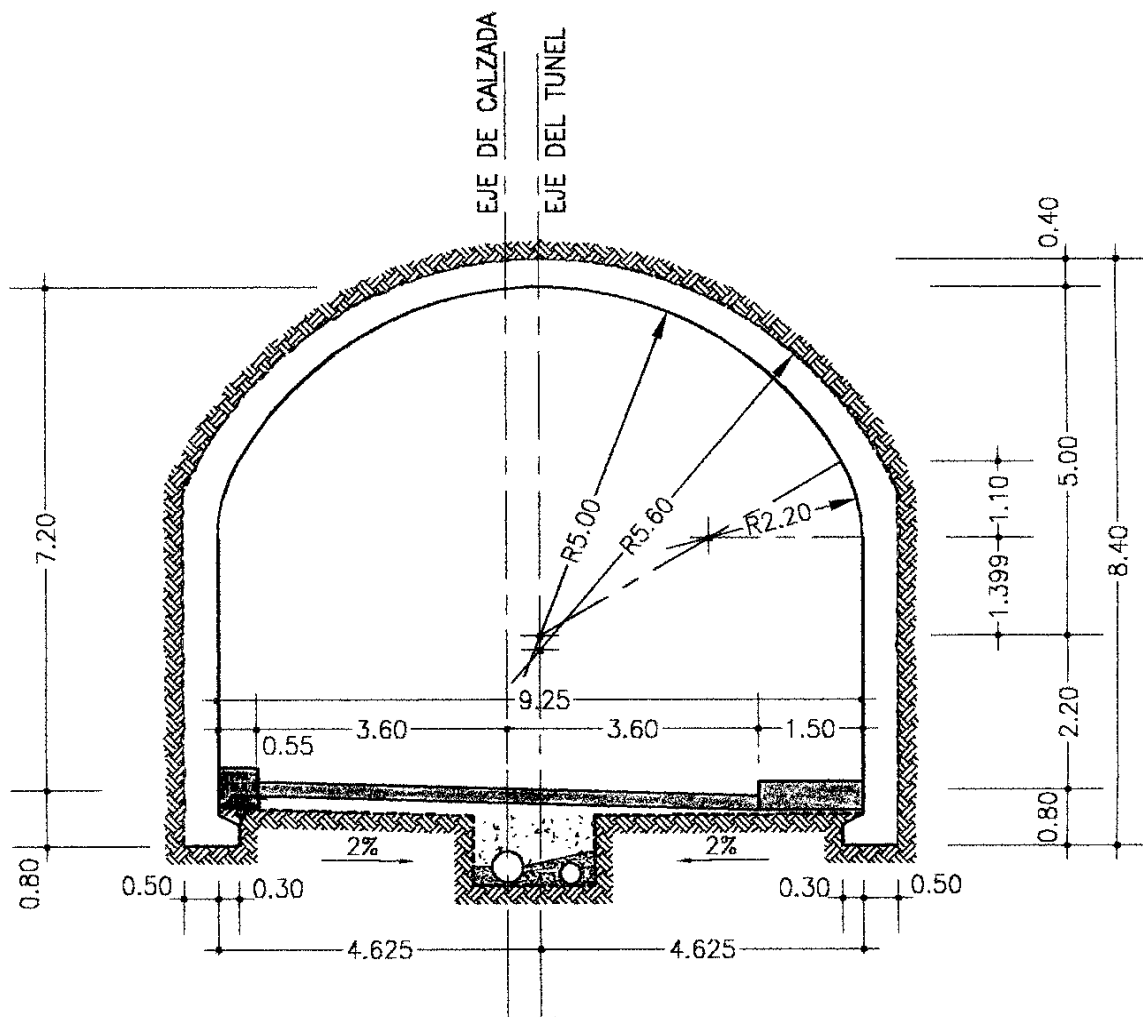
Túnel La Planicie - Portal San Martín



Túnel El Valle - Portal El Valle

En efectos, la sección transversal de todos estos túneles de las autopistas urbanas de Caracas, y también de los de las autopistas extra urbanas que se citan más adelante, construidos hasta el 1975, fue rigurosamente estandarizada por el Ministerio de Obras Públicas. Cada uno de los dos tubos siempre presentes, tiene un ancho neto de 9,25 metros, con dos canales de transito vehicular de 3,60 metros y dos aceras de ancho asimétrico con 1,50 y 0,55 metros; el arco de calota tiene un radio neto de 5 metros y la altura libre al centro del arco es de 7,20 metros.

El arco del revestimiento de calota y hastiales es en concreto de 40 a 60 centímetros de espesor y el pavimento no integra estructuralmente el revestimiento. El drenaje ha sido originalmente confiado únicamente a un subdren longitudinal central que corre inmediatamente debajo del pavimento pero, algunos de estos túneles, específicamente los de La Planicie y los de El Valle, han presentado muy graves problemas de filtraciones que han requeridos de sucesivos trabajos de captación y evacuación de las aguas de percolación (las ya citadas por el ingeniero R. Centeno) por medio de varias series de geo-drenes sub-horizontales colocados transversalmente en los hastiales, con lo cual sin embargo, los problemas han sido controlados y resueltos solo parcialmente y solo temporalmente.



Sección típica de cada tubo de los túneles gemelos de autopista, construidos entre 1950 y 1975

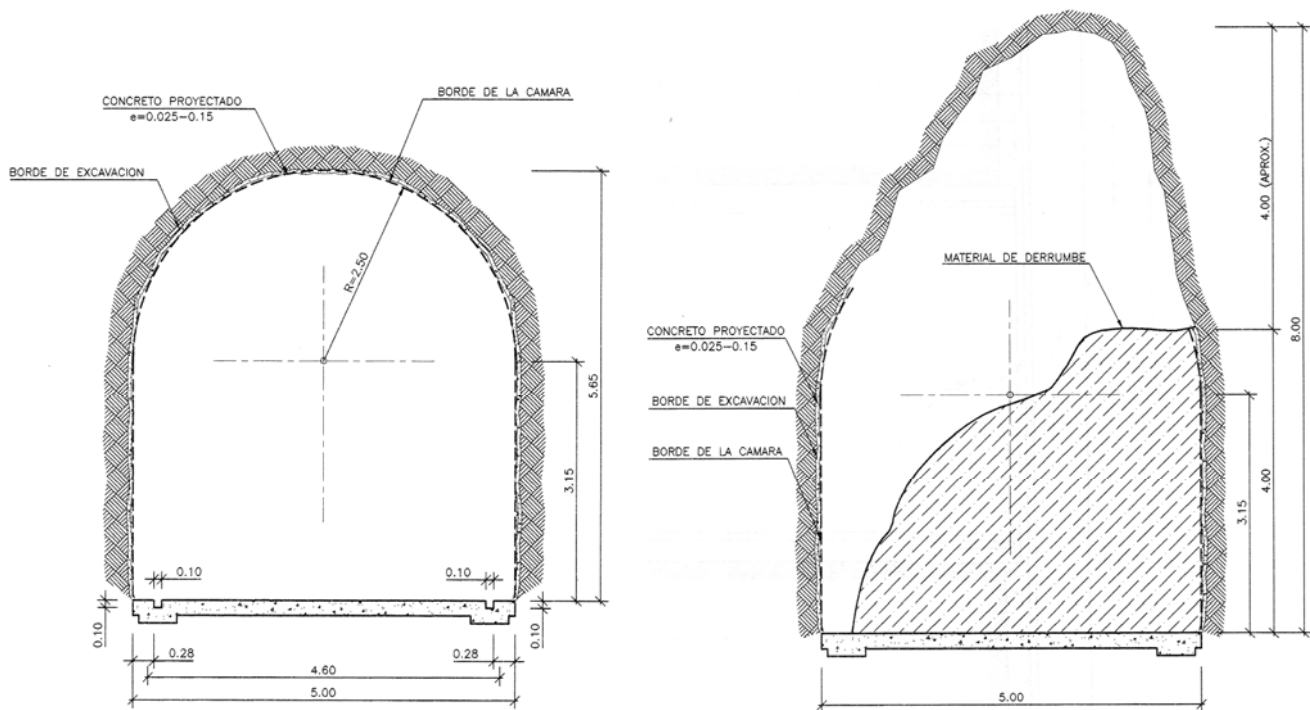
Los túneles El Valle, ubicados entre la urbanización del mismo nombre y la barriada El Cementerio, con una longitud media aproximada de 1.200 metros, dibujan un alineamiento en forma de “S” atravesando casi perpendicularmente una fila de cota máxima 1075 m.s.n.m. y alcanzándose allí una cobertura del orden de los 155 metros.

El macizo rocoso excavado se compone de esquistos cuarzo-grafíticos calcáreos y calizas lenticulares en condiciones físicas de rocas meteorizadas a frescas fracturadas y muy fracturadas, con frecuentes presencias de aguas de precolación.

Existen tres cámaras transversales que conectan los túneles gemelos, cada una larga unos 30 metros en sección de herradura recta de 4,50 metros de ancho y 5,60 metros de alto, las cuales fueron originalmente soportadas de forma muy deficiente, con un mínimo espesor de concreto proyectado y revestidas con concreto solo en algunos sectores de los hastiales, lo cual dio lugar a incipientes y recurrentes fenómenos de inestabilidad en todas las tres cámaras, durante los varios años de operación.

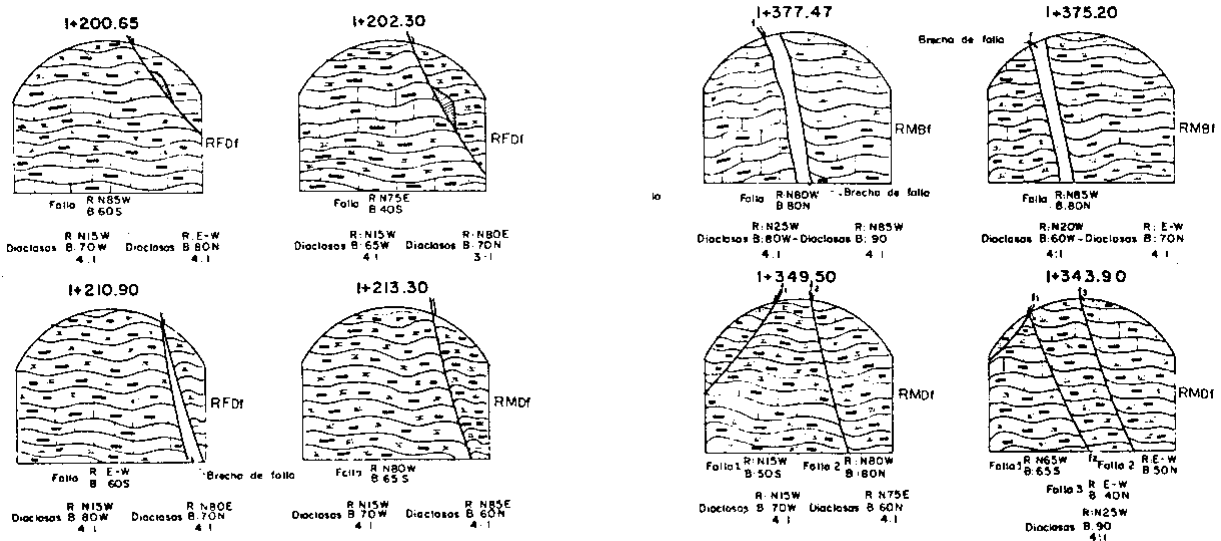
Finalmente, hacia el año 1995 en la cámara N.1, del lado El Cementerio donde opera una subestación de transformación, se produjo una importante chimenea derrumbándose unos 150 m³ de rocas lo cual obligó a ejecutar una estabilización radical llevada a cabo en muy difíciles condiciones ambientales, sin que se interrumpiera el tránsito vehicular diurno dentro de los túneles.

Para ello los operadores del concreto proyectado y de las perforadoras para los pernos, elementos con lo cual se estabilizó la cámara, tuvieron que trabajar con máscaras y bombonas de oxígeno, de las utilizadas por los buzos.



Cámaras de comunicación N.1 de los Túneles El Valle – Sección original y chimenea

La excavación de los túneles El Paraíso, ubicados entre la urbanización del mismo nombre y la barriada de El Cementerio, fue sistemáticamente seguida por geólogos muy detallistas, quienes levantaron cuidadosamente el frente de excavación y una muestra de aquello se reporta a continuación.



Túnel El Paraíso - Levantamiento geológico del frente

Durante la excavación de los túneles La Trinidad, de casi 200 metros lineales de longitud, que se realizó toda en un macizo rocoso de esquistos cuarzo micáceos bastante alterados, se presentó un problema de inestabilidad de cierta magnitud en proximidad del portal La Trinidad, produciéndose un macro-deslizamiento, cuyo control inclusive obligó a modificar el proceso constructivo previsto.



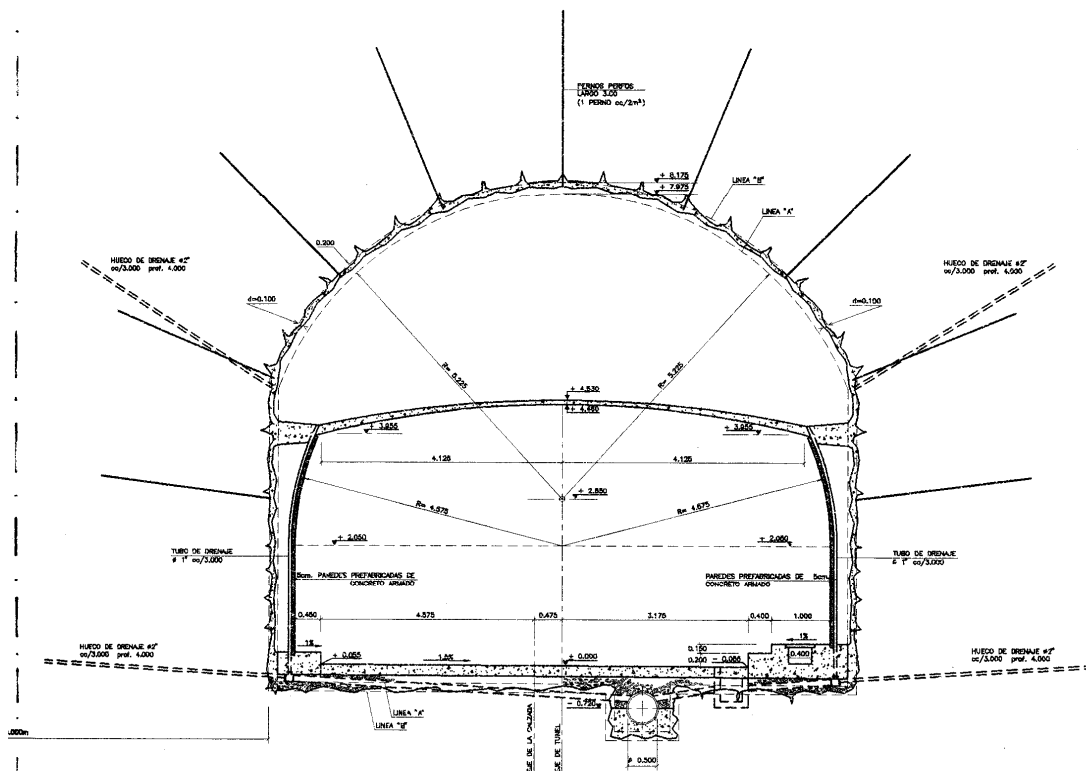
Túnel La Trinidad – Portal La Trinidad – Deslizamientos en superficie durante la construcción

En cuanto a los túneles viales de las autopistas extra-urbanas venezolanas, construidos entre los años 50 y la mitad de los 70, al igual de los de Caracas son todos gemelos y con sección geométrica a herradura recta: los *Túneles Boquerón 1 y Boquerón 2* en la Autopista Caracas-La Guaira construidos en 1953, los *Túneles Los Ocumitos* de la Autopista Caracas-Maracay construidos en 1959 y finalmente los *Túneles La Cabrera* en la Autopista Maracay-Valencia, también construidos en 1959.

Los túneles Boquerón 1 son aún hoy en día los más largos viales de Venezuela, con aproximadamente 1.800 metros lineales, mientras los Boquerón 2 son largos aproximadamente 500 metros lineales. Las coberturas máximas alcanzan los 200 metros. Ambos túneles, en realidad los 4, fueron ventilados con un sistema forzado de vanguardia para la época de su construcción, con los ductos de aire en calota y, los largos de Boquerón 1, con además una potente estación de ventilación intermedia.

Los túneles Los Ocumitos, dentro del parque homónimo ubicado próximo a la salida occidental de Caracas hacia Maracay, son relativamente cortos, casi 400 metros lineales, y están excavados bajo coberturas máximas que no alcanzan los 100 metros.

Los túneles La Cabrera están ubicados más hacia occidente, en la Autopista Caracas-Valencia, entre Maracay y Valencia; están constituidos por dos tubos, cada uno de cerca de 520 m de longitud, aproximadamente 10 metros de ancho y 8 metros de altura máxima, hastiales verticales, techo abovedado circularmente ($R=5,225m$) y solera plana, con separación entre tubos de aproximadamente 9 metros pared a pared; la cobertura es gradualmente variable hasta 140 metros hacia el sector central del desarrollo longitudinal.



Túneles La Cabrera – Sección típica de cada uno de los dos tubos

Fueron construidos alrededor del año 1955 siguiendo el, para la época muy novedoso, NATM (Nuevo Método Austriaco para Túneles) que preveía estabilizar las excavaciones esencialmente con el uso combinado de concreto proyectado y pernos metálicos. La sección típica estuvo estabilizada con un recubrimiento de medianamente 5 cm de concreto proyectado en hastiales y bóveda, más 9 pernos de 1" de diámetro y 3 metros de largo colocados en el tope de los hastiales y bóveda, con 2 metros de separación transversal y a cada metro de separación longitudinal.

Para conformar un tubo de ventilación forzada con la bóveda, en cada túnel se construyó una concha curva (falso techo) con placas de unos 50 cm de flecha negativa, en concreto armado de medianamente 10 cm de espesor y empotradas de manera continua al recubrimiento de concreto proyectado en la intersección de la bóveda con los hastiales, a una altura desde el piso de aproximadamente 4 metros.

Los túneles fueron excavados en un macizo rocoso constituido por esquistos cuarzo-grafíticos y esquistos cuarzo-calcáreos, con frecuentes lentes de calcita cristalina o mármol. El rumbo general de la foliación es casi paralelo al eje de los túneles y el buzamiento es muy elevado hasta pseudo vertical, debiéndose además señalar la presencia de procesos tectónicos de cierta relevancia ya que el área de emplazamiento de los túneles está comprendida entre la gran Falla de La Victoria, que pasa al Sur, y la Falla de La Cabrera, que pasa al Norte, ambas con rumbo pseudo paralelo con el de los túneles.

Existen varios documentos profesionales los cuales muestran que después de pocos años de haber entrado en funcionamiento los túneles, se comenzaron a manifestar claros y numerosos indicios de inestabilidades, con fisuras en el concreto proyectado del soporte, especialmente hacia los sectores centrales del tubo norte, bajo las mayores coberturas. Adicionalmente, importantes deformaciones en el pavimento de concreto habían ocasionado que vehículos pesados chocaran repetidamente con sus abundantes cargas en el falso techo, dañándolo seriamente principalmente en coincidencia con los sectores sujetos al agrietamiento del concreto proyectado del revestimiento estructural.

Existen también varios indicios que hacen presumir que a la situación ilustrada concurren probablemente un conjunto de numerosos factores, incluyendo algunos de índole político-administrativa debido a los cuales es posible que un revestimiento definitivo complementario, de alguna manera previsto por el proyecto, no fue luego completamente aplicado. También es probable que a tal hecho hayan concurrido falsos entusiasmos y falsas expectativas ligadas al aún demasiado novedoso método constructivo, cuya cautivante filosofía se basaba en la utilización de la resistencia del terreno para formar con este una estructura anular en buena parte autoportante alrededor del túnel, y el soporte era por lo tanto aplicado solamente para facilitar y permitir tal formación.

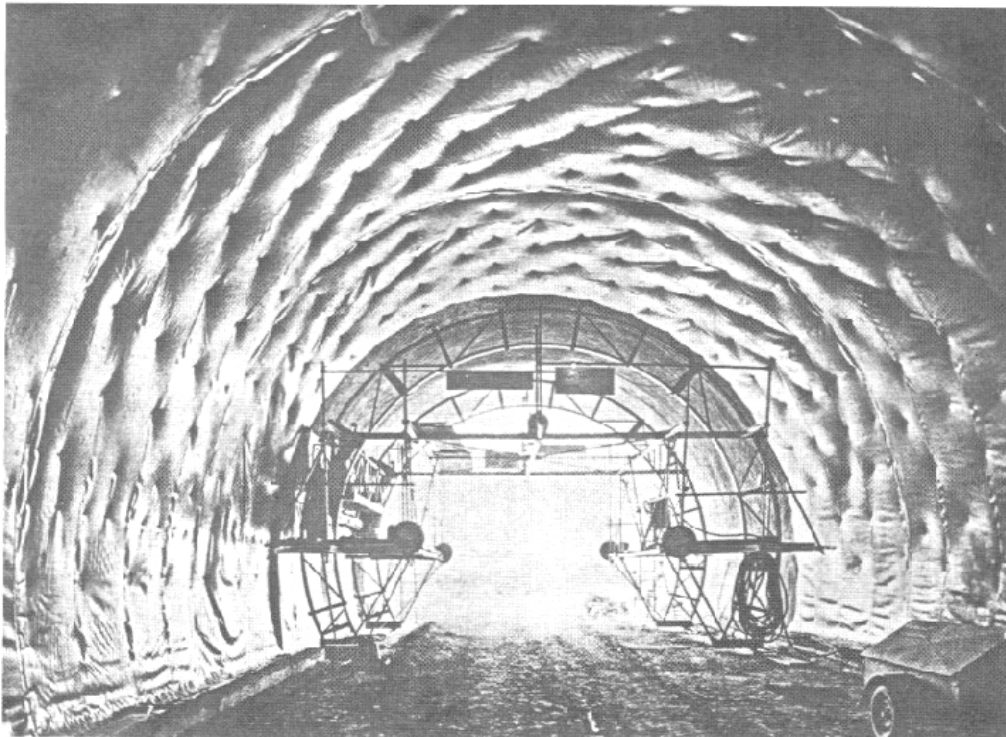
Totalmente cierto es en todo caso, que los túneles entraron en servicio con una clara insuficiencia estructural y finalmente, hacia mitad de los años 90 se encomendó la reparación y refuerzo estructural de los túneles y los trabajos, ejecutados lentamente y penosamente durante las horas nocturnas para no interrumpir el tránsito vehicular, se prolongaron a lo largo de casi una década. Estos trabajos de reparación consistieron acertadamente en el refuerzo del pilar central, mediante la aplicación de anclajes post-tensados pasantes, al igual que de las paredes de los hastiales externos. También se aumentó sustancialmente el espesor del concreto proyectado de todos los hastiales mientras, en cuanto a la bóveda, una infeliz mal concebida y peor aún realizada solución, llevó a la construcción de una nueva bóveda absolutamente ineficaz, implicando además la eliminación del falso techo original y por consecuencia desmantelando por completo el sistema original de ventilación forzada.

Finalmente, un proyecto de drástico y definitivo refuerzo estructural integral, diseñado para las secciones centrales más afectadas por las inestabilidades y consistente en la construcción de un nuevo revestimiento integrado a un arco de contra-bóveda, no fue ejecutado por razones económicas y por no enfrentar las inevitables e impopulares interrupciones temporales del tránsito vehicular.

A partir de la segunda mitad de los años 70, se inicia la construcción de los túneles de la Línea 1 del Metro de Caracas, entrando con ello en el *pasado reciente* de los túneles venezolanos y revolucionando para siempre la ingeniería de túneles en Venezuela, pero paralelamente continúa extendiéndose la red vial de autopistas extra-urbanas y se construyen nuevos túneles gemelos, ahora con una más amplia sección de herradura curva con capacidad para tres canales y con aproximadamente 13 metros de ancho.

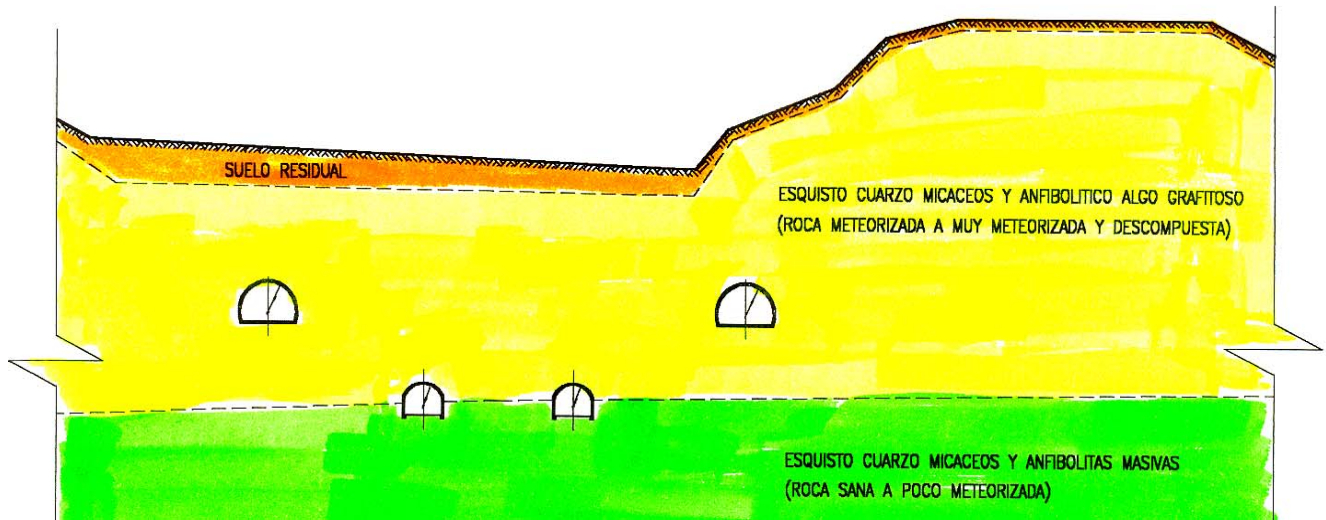
Los *Túneles Los Totumos* en la Autopista Caracas-Guarenas en 1976, los *Nuevos Túneles La Planicie* en 1981 en Caracas, y los *Túneles La Vuelta Grande* en la Autopista Guarena-Barcelona en 1987.

Los primeros de estos túneles gemelos, Los Totumos, se construyeron con éxito en rocas blandas esquistas muy fisuradas, empleando un revestimiento provisional constituido por concreto proyectado y un sistema de impermeabilización muy novedoso para la época, con el empleo de láminas continuas de PVC conectadas mediante soldadura al calor, a unas arandelas de PVC sostenidas por clavos de aceros fijados al concreto proyectado; como paso final se construye el revestimiento definitivo de concreto armado el cual queda protegido por la lámina impermeabilizante continua contra las filtraciones del agua proveniente de la masa de roca blanda. Las aguas retenidas por la membrana son evacuadas a través de sub-drenajes ubicados al pie de los hastiales.



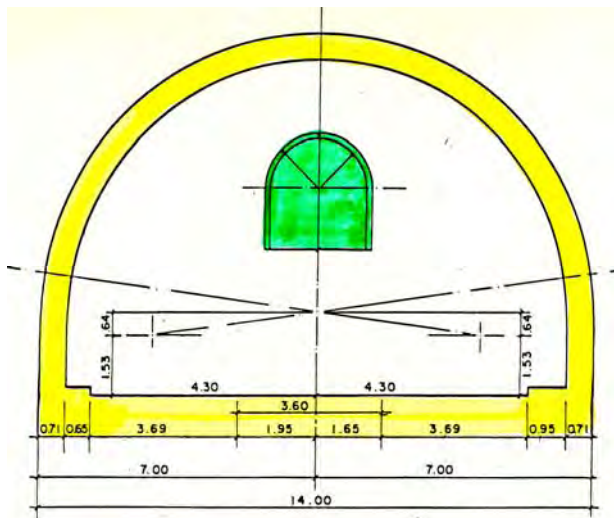
Túneles Los Totumos - Impermeabilización

Los dos túneles nuevos La Planicie, se construyeron empleando el método Bernold el cual, como una especie de variante del NATM, se caracteriza por recurrir al uso de chapas metálicas flexibles a manera de entibado entre costillas. En la construcción de estos túneles, se quiso emplear una rozadora a objeto de evitar las molestias de las voladuras a las densas pobladas que cubrían el cerro de La Planicie: el intento funcionó solamente a mitad ya que finalmente, frente a la presencia de sectores muy competentes de un macizo rocoso anfibólico, se tuvo que hacer abundante uso de explosivos.



Nuevos Túneles La Planicie - Geología y ubicación relativa a los túneles viejos

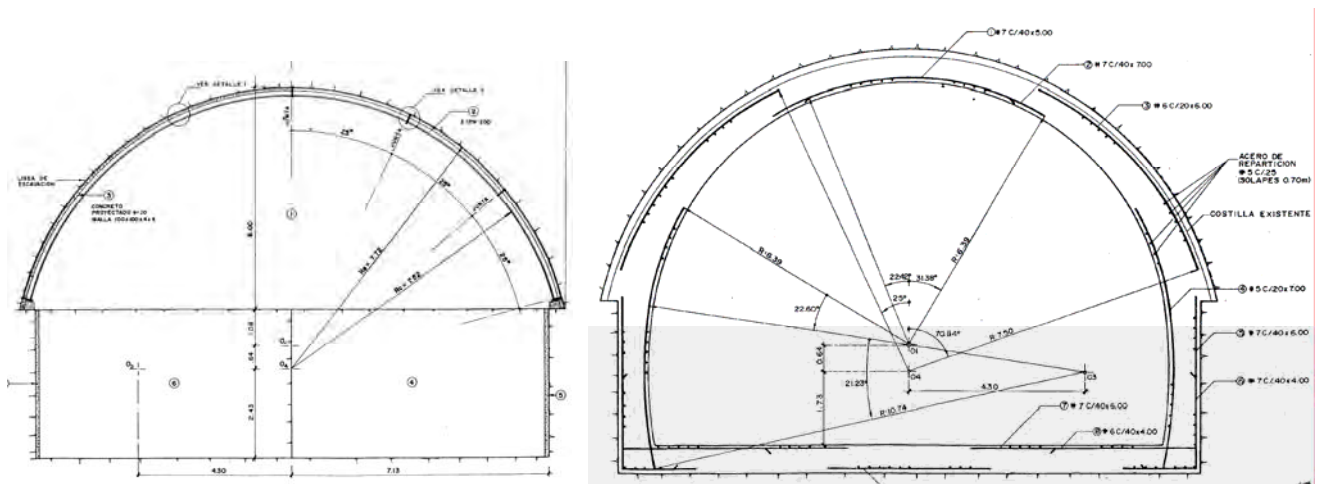
Para el proyecto de estos importantes túneles, de aproximadamente 1 Km de longitud y hasta unos 200 metros de cobertura, por primera vez se investigó integralmente el subsuelo mediante la construcción de dos túneles exploratorios de 2,40 x 2,70 metros a todo lo largo del trazado previsto, se ejecutaron perfiles geo-sísmicos, perforaciones exploratorias y ensayos de caracterización en laboratorio.



Nuevos Túneles La Planicie - Sección principal y galerías exploratorias

Los túneles La Vuelta Grande finalmente, también gemelos y con aproximadamente 350 metros de longitud, fueron construidos bajo una cobertura máxima del orden de los 120 metros, con una sección de casi 13 metros de ancho neto definitivamente revestida en concreto armado, incluido la solera completamente plana.

Fueron excavados con avance a media sección en un macizo rocoso metamórfico de rocas esquistosas en condiciones físicas medianamente meteorizadas y el soporte primario previó el uso de costillas metálicas y concreto proyectado para el arco de bóveda, mientras los hastiales, durante la fase de excavación del banco, fueron temporalmente soportados con solamente una capa de concreto proyectado.



Túneles La Vuelta Grande - Soporte primario y revestimiento definitivo

Adicionalmente y para completar el cuadro actual de los túneles viales existentes en todo el territorio de Venezuela, debe mencionarse que en la región andina se construyó, entre 1981 y 1991 en la autopista Mérida-El Vigía, una serie de cuatro túneles: Estanques – Cañabrava – Mocotíes – Santa Teresa, agrupando luego con el revestimiento definitivo los últimos dos en uno solo, mediante la construcción de un falso túnel que cubrió la marcada incisión topográfica natural que los separaba.

El túnel Estanques, con un ancho neto de 9,4 metros, es largo 1.484 metros y se excavó dentro de un macizo sedimentario constituido por la clásica alternancia de areniscas y lutitas, con predominio de las primeras. El túnel Cañabrava, con 14,2 metros de ancho (dos canales en subida y uno en bajada, para salvar una muy fuerte pendiente del orden del 8%), es largo 538 metros y los túneles Mocotíes-Santa Teresa, con 1.662 y 1.548 metros de longitud, nuevamente son anchos 9,4 metros.

El proyecto vial de la autopista preveía en cada caso la construcción de tubos de tres canales de tránsito, pero luego del inicio de la excavación del túnel Estanques, se optó por reducir la sección a dos canales, conservando el esquema original solamente para el túnel Cañabrava.

El macizo rocoso en que se excavaron los dos túneles centrales son graníticos poco fracturados y, bajo las coberturas extremadamente elevadas en las se excavaron, la resistencia del material rocoso alcanzaba picos de hasta 2.000 Kg/cm². La porción media final del Santa Tera, nuevamente se excavó en la formación sedimentaria, pero esta vez con franco predominio de las lutitas sobre las areniscas.

En 1978 se iniciaron finalmente, después de años de planificación y proyectos, las obras subterráneas de la Línea 1 del Metro de Caracas en el Oeste de la ciudad y desde entonces el avance no se ha prácticamente detenido hasta todo el 1994: El 2 de enero 1983 se inauguró el (primer) tramo Pro Patria-La Hoyada y en marzo del mismo año el (segundo) tramo La Hoyada-Chacaito de la Línea 1. Para 1988 se completaron las Líneas 1 y Línea 2 y el 18 de diciembre de 1994 se inauguró el tramo Plaza Venezuela-El Valle de la Línea 3. Todo, para un total de 45 kilómetros de línea y 40 estaciones, en un lapso de aproximadamente 15 años.

Los túneles excavados y en operación suman 15 Kilómetros y sobre aquellos, sobre su proyecto y su construcción, ciertamente se pueden escribir libros enteros: sobre los record de producción, las dificultades, los inconvenientes, los fracasos y las mil maneras exitosas de cómo aquellos se enfrentaron y resolvieron.

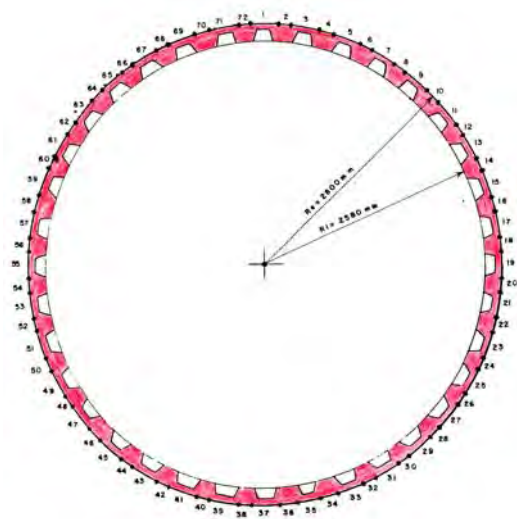
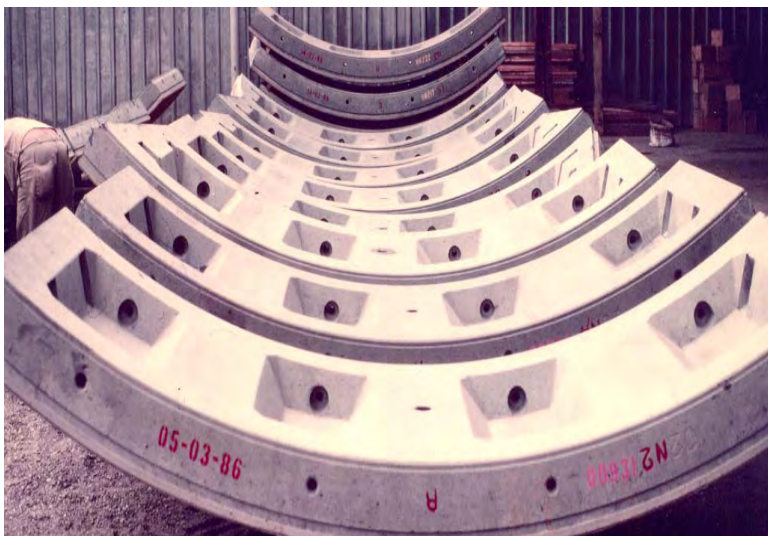


Metro de Caracas – Túnel gemelo estándar – Líneas 1 - 2 -3

LÍNEA	1	2	3	TOTAL
LONGITUD EN OPERACION (Km).	20,9	18,4	5,2	44,5
ESTACIONES (Un).	22	13	5	40
TUNELES CON TOPO (Km).	10,1	1,6	3,2	14,9
TUNELES MINEROS (Km).	1,3	1,7	--	3,0
TRINCHERAS (Km).	4,3	5,3	1,2	10,8
VIAS A NIVEL (Km).	1,0	4,9	--	5,9
VIAS ELEVADAS (Km).	0,3	2,8	--	3,1
MATERIAL EXCAVADO (m ³).	3.0009.400	1.719.300	1.051.800	5.780.500
CONCRETO VACIADO (m ³).	669.700	379.900	257.400	1.307.000
ACERO EN CONCREDO (Ton).	77.900	45.900	27.500	151.300
ESCALERAS MECANICAS (Un).	173	68	35	276
VAGONES (Un).	308	136	35	479
PASAJEROS (promedio día laboral).	769.663	144.616	51.615	965.894

Metro de Caracas – Estadísticas de las obras y Operaciones para el año 1995

Los túneles excavados con escudos de varias generaciones, de frente abierto semiabierto y cerrado, han sido los más numerosos y representativos de todos, constituyendo aún hoy en día un icono del Metro de Caracas: con sus anillos de revestimiento prefabricados de (6+1) segmentos en concreto armado envigado de altísima resistencia, de 5,16 metros de diámetro interno, 22 cm de espesor y largos inicialmente 0,80 metros y luego también 1,20 metros.



Metro de Caracas – Anillo estándar – Líneas 1 - 2 -3



Metro de Caracas – Entrada y salida de los túnel gemelos estándar



THE CARACAS VALLEY AND ITS GEOLOGY

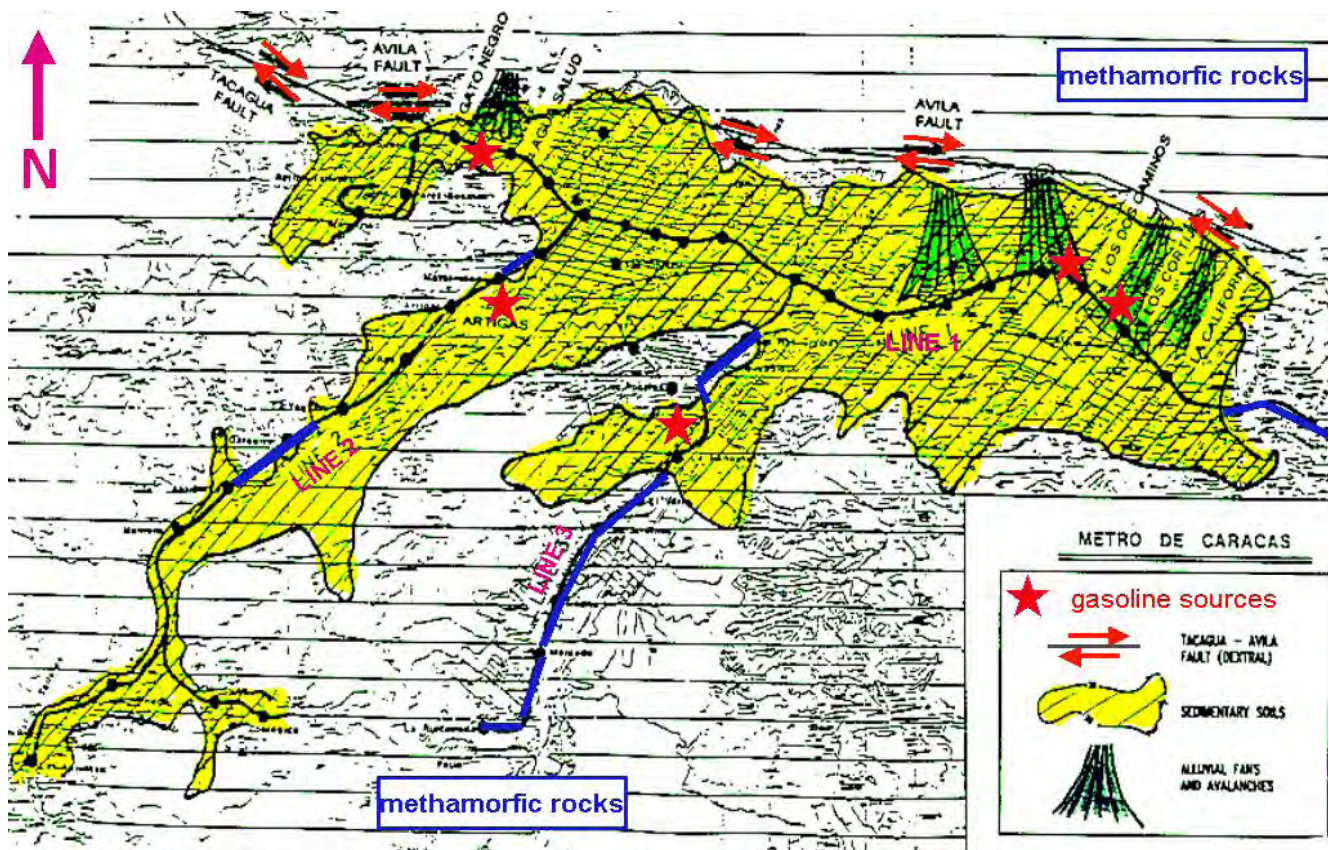
Caracas is located in the homonymous valley, constituted by a long and narrow depression crossed from West to East by the Guaire River. Both extremes, Petare at the East and Catia at the West, are about 25 Km far from each other, its maximum width reaches scarcely 4 Km from North to South, and the average height of the valley is about 900 m above the sea level. The sea is at the North and it is separated from the valley by the imposing but narrow mountain chain called "Sierra del Avila", which elevates at 2640 m above sea level.

The valley was probably originated as an indirect consequence of an important fault system located, from East to West, in all the South side of the Avila. From it, a great number of seasonal torrents, that there are many alluvial furrows, come down towards the South. Besides, there are many alluvial cones at the bottom of the mountain; some of them reach the valley mixing up gradually with the alluvial deposits of the Guaire. At the South, the valley's delimitation is less clear. There is a minor relief, from which sides affluents that cut their own alluvial sediments, drop towards the Guaire.

The rocks that constitute the reliefs of the region are pretertiary. They are expose to an intensive thermodynamic metamorphism and transformed into micaceous, calcareous and graphitic schists and sometimes they are changed in gneiss and amphibolites. All the superficial and subsuperficial horizons show an intense influence of atmospheric phenomena on the soil, which frequently causes the transformation of the original rock in a residual soil.

The mantle of lands that cover the valley is mainly originates from adjacent reliefs and in less degree from the alluvial sedimentation that comes from the Guaire and its affluents. They are lenticular dimension of the components which can reach, in isolation, the decimeter dimensions. This is a direct consequence of the differences that exist in the transportation characteristics: length, load and pendent of the affluents.

In relation to the underground water, the general gradient follows the valley's pendent: West to East. But locally, it is capriciously modified by many circumstantial factors that go from the mountain, to the existence of natural underground and impermeable soils. There are underground waters rarely more than 10m deep, and variables with the season's water.



La presencia de gasolina en el subsuelo durante las exploraciones y luego las excavaciones con escudo, fue un hecho imprevisto y luego recurrente y tal circunstancia estimuló interesantes estudios, investigaciones y soluciones ingeniosas con las cuales se pudo finalmente reducir y controlar una problemática potencialmente en extremo grave.

La gasolina en el subsuelo del Metro de Caracas ha sido detectada esencialmente a todo lo largo de la Línea 1. Durante las investigaciones del subsuelo en la fosa de la Estación California donde se manifestaron emanaciones gaseosas e incendios, luego durante las excavaciones subterráneas se midieron hasta 28.000 ppm y finalmente, durante las operaciones en proximidad de las Estaciones Parque del Este y Gato Negro. En las Líneas 2 y 3 se manifestaron presencias gaseosas únicamente durante las exploraciones del subsuelo, en coincidencia con la ejecución de perforaciones y de la instalación de piezómetros. En la Línea 3 se midieron en una ocasión hasta 6.000 ppm.

Pero las innovaciones tecnológicas no se limitaron a las sofisticadas maquinas de excavación integral (TBM) empleadas, sino se extendieron por ejemplo a la preservación de los servicios, edificaciones y estructuras en general, presente en superficie y en el subsuelo en proximidad de las excavaciones.

La cuadra histórica en pleno centro de Caracas, también fue escenario para las excavaciones subterráneas de un túnel especial de gran diámetro construido, entre las estaciones La Hoyada y Capitolio, por etapas con dos galerías mineras para alojar el pie de los hastiales primero y luego con un amplio semi-escudo abierto, bajo coberturas limitadas a muy pocos metros.

Se protegieron con éxito las edificaciones coloniales de la iglesia de San Francisco, de la Universidad y de la Corte Suprema y para ello se construyó una pantalla enterrada de micropilotes para cuyo proyecto se empleó la novedosa metodología de los elementos finitos (FEM).

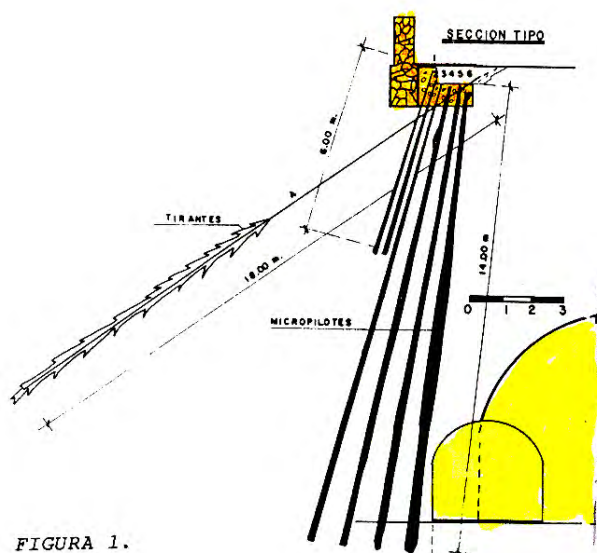


FIGURA 1.

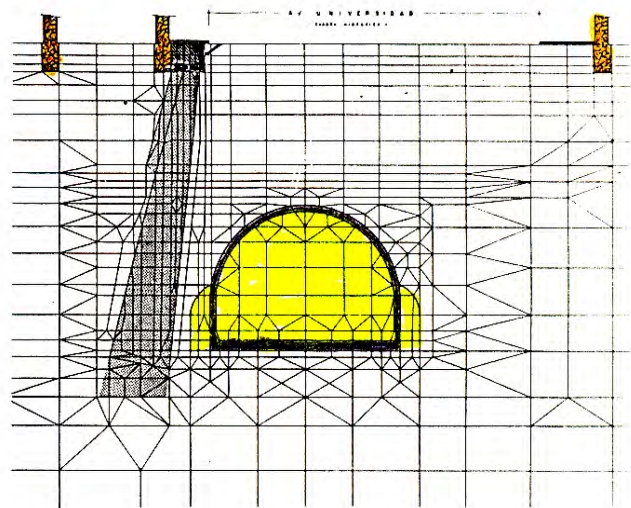
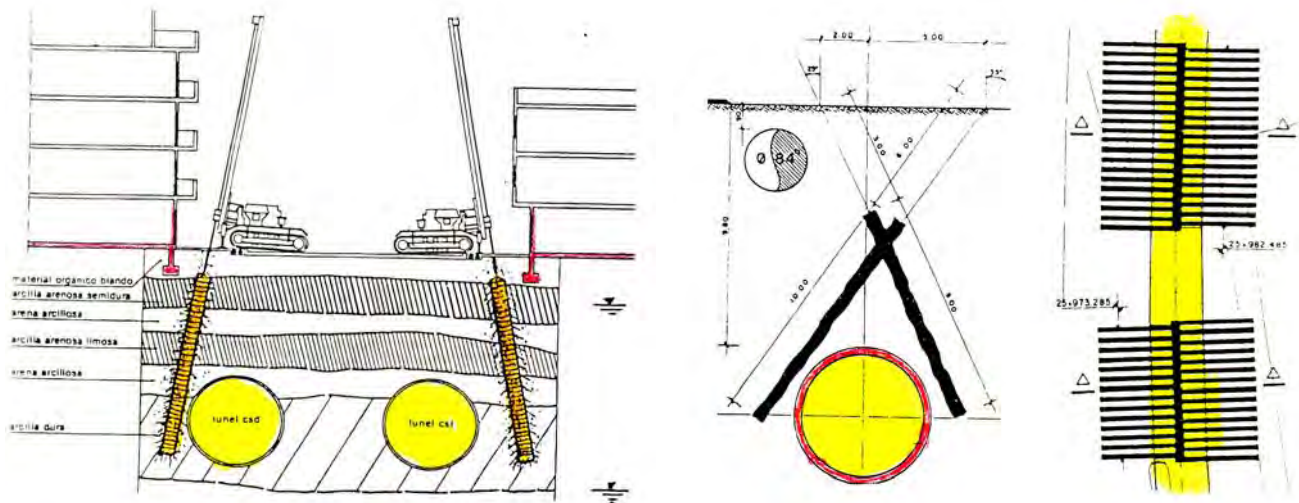


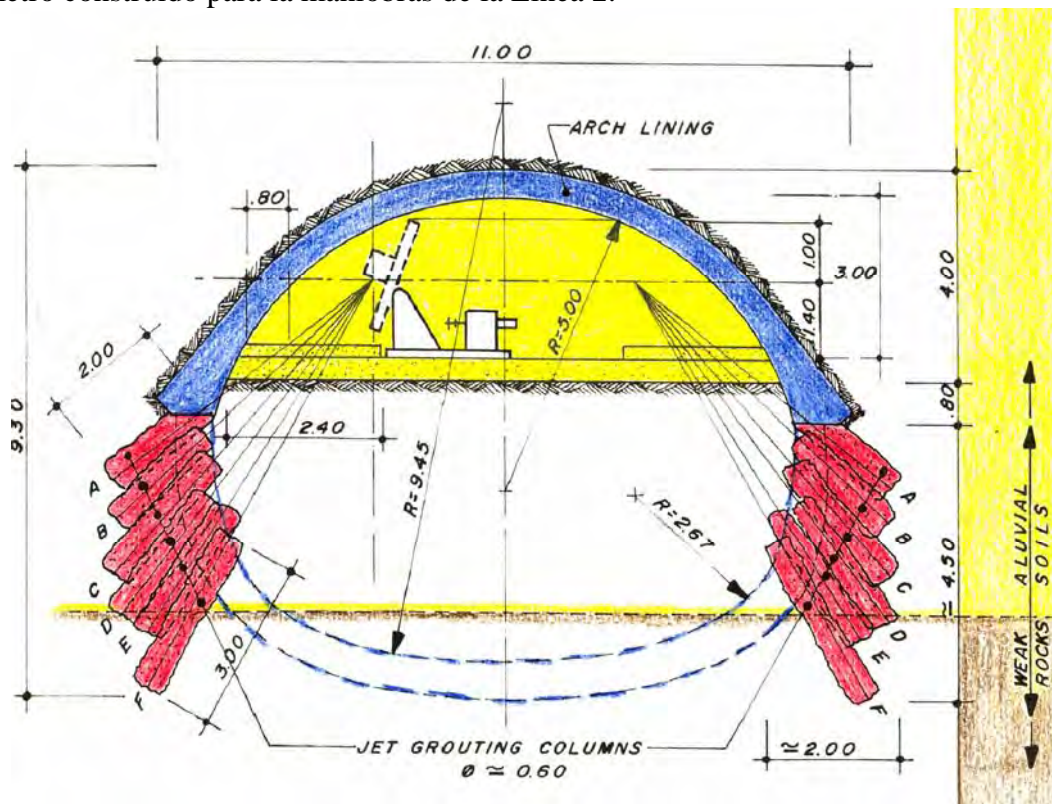
FIGURA 2.

Metro de Caracas - Línea 1 - Túnel Cuadra Histórica - Protección con pantalla de micropilotes



Metro de Caracas - Línea 1 – Ejemplos de empleo de la tecnología jet grouting

Se experimentó con éxito y luego se hizo casi rutina la tecnología del “jet grouting”, desde el mismo comienzo de las labores subterráneas en el Oeste de la Línea 1, y luego en el Este y luego en la Línea 2 y en la 3. Para controlar los asentamientos en superficie, para controlar el frente de introducción del topo en el fondo de las estaciones una vez abatido el diafragma de muros colados soporte de las profundas excavaciones a cielo abierto, para recalzar estructuras de varia naturaleza y, hasta desde el mismo subterráneo, para controlar la estabilidad durante la excavación del banco del túnel minero de gran diámetro construido para la maniobras de la Línea 2.



Metro de Caracas - Línea 2 - Túnel de Maniobras - Consolidación de los hastiales con jet grouting

También hubo fracasos: Para excavar el ya mencionado túnel minero de gran diámetro de la Línea 2, se compraron dos máquinas cortadoras de sierra y una rozadora, las cuales no pudieron excavar sino pocos metros cada cuna, debido a la presencia de cantos rodados duros dentro del terreno.



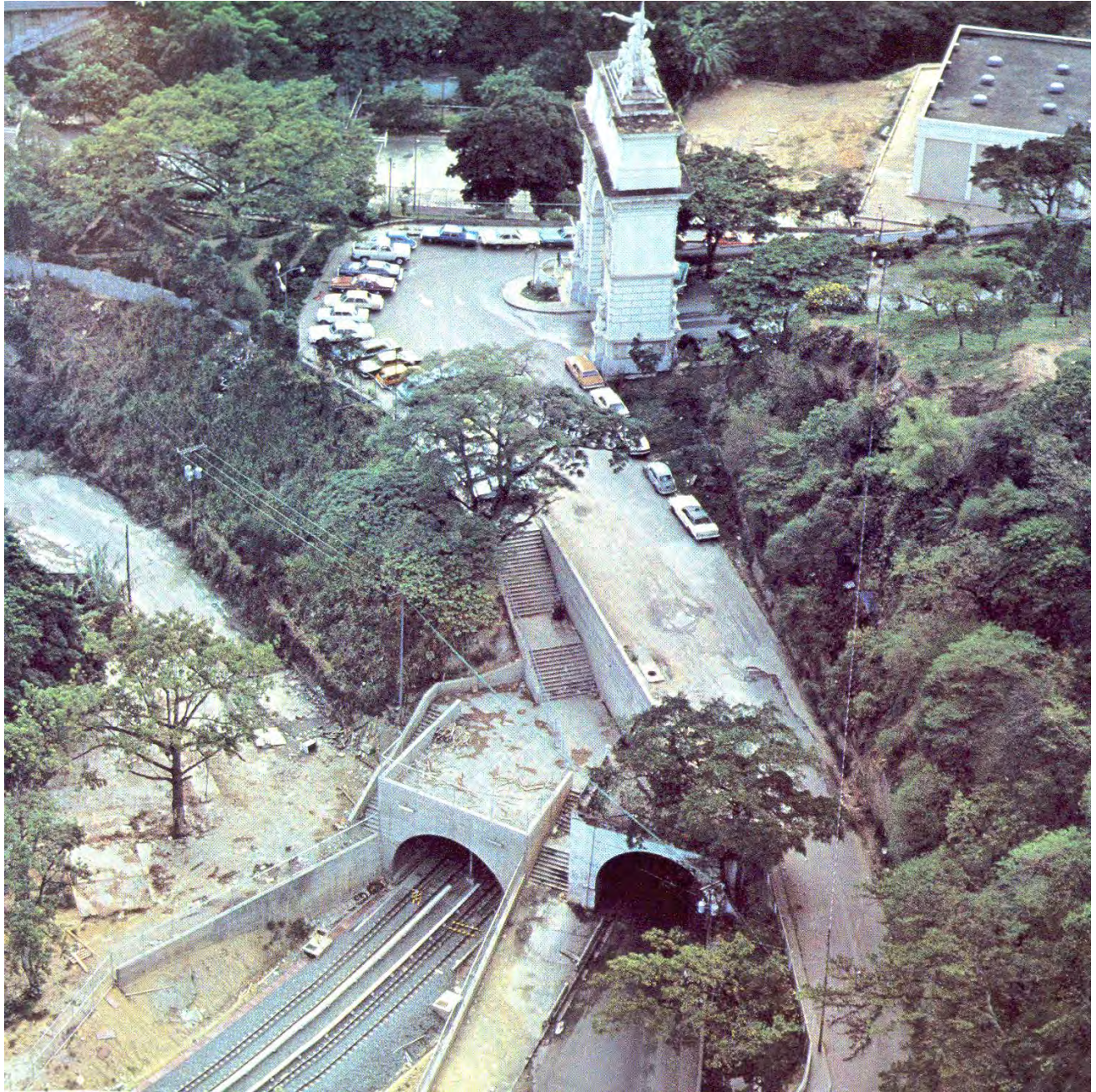
Metro de Caracas - Línea 2 - Túnel Minero: Equipos Sierra y Rozadora

Se abrieron algunas chimeneas importantes en el frente y en la cola de los escudos y, aunque solo localmente, los problemas serios alcanzaron también la superficie, obligando al desalojo y demolición de algunas edificaciones humildes, ubicadas adyacentes a los túneles más al Sur en la misma Línea 2. También ocurrió un episodio similar hacia el extremo Este de la Línea 1, pero esta vez en coincidencia con el inicio de la excavación de un túnel minero de doble vías, en proximidad de Palo Verde.



Metro de Caracas - Saneamiento de chimeneas hasta la superficie

Pero el Metro de Caracas había restablecido la continuidad con el pasado remoto de la ingeniería de túneles en Venezuela y había llegado para quedarse y para mantener la continuidad con el futuro: con las nuevas líneas del mismo Metro de Caracas, con el Metro de Valencia, con el Metro de Los Teques, con el Ferrocarril Caracas-Valencia-Puerto Cabello, etc., etc..



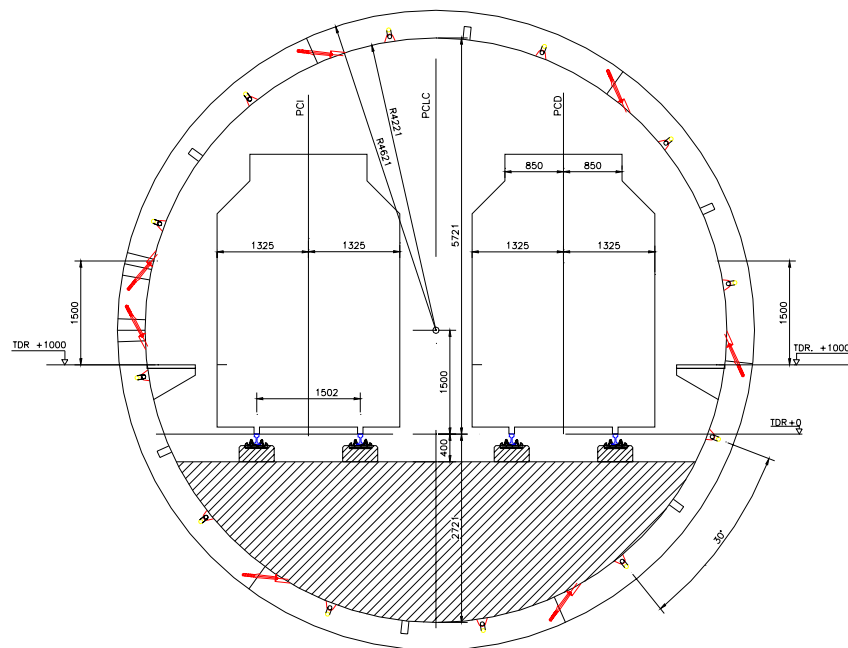
Pasado Remoto y Pasado Reciente: Túneles del Calvario y del Metro de Caracas en Caño Amarillo

PRESENTE

El Metro de Valencia

La Línea 1 del Metro de Valencia, en su primer tramo actualmente en construcción, se inicia al Sur con la estación Monumental y se extiende hacia el Norte a lo largo de la Avenida Bolívar hasta la estación Miranda, con un recorrido de aproximadamente 6 km de longitud. El tramo entre las estaciones Monumental y Las Ferias está construido en trinchera cubierta y la parte restante, a partir del portal Norte de estación Las Ferias, ha sido construida en subterráneo, mediante el uso de una máquina de excavación integral escudada, tipo EPBS, con diámetro de excavación de 9,519 metros, para el tránsito de trenes en doble vía férrea. Entre las estaciones Las Ferias y Miranda, están presentes otras 5 estaciones (Palotal – Santa Rosa – Michelena – Lara – Cedeño), las cuales han sido construidas previamente a la excavación del túnel, con el sistema “Cut and Cover” invertido. La Línea 1 se completará en segunda etapa con otras 5 estaciones, hacia el Norte hasta la ciudad satélite Guaparo, sede de la Universidad de Carabobo.

Debido a que la ciudad de Valencia se desarrolla en la llanura del lago que lleva su mismo nombre, los terrenos interceptados por la excavación de los túnel están constituidos por sedimentos cuaternarios de granulometría media-fina, compuestos por intercalaciones de arcillas, arcillas limosas, arenas de arcillosas a limosas, con esporádicos niveles de arenas limpias. Los niveles arcillo-limosos son los más representativos a lo largo del trazado, mientras que las otras unidades están presentes en geometría de lentes. El nivel freático de los acuíferos superficiales presentes en los depósitos cuaternarios a lo largo del alineamiento, es recargado en parte por las lluvias y en parte por los cursos de agua presentes en el área y los datos deducidos de piezómetros instalados a lo largo del trazado muestran que la tabla de agua se encuentra a una profundidad entre 2 y 10 m.



Metro de Valencia - Datos geométricos básicos de la sección del túnel

Dentro del marco geotécnico descrito, ha sido bastante natural seleccionar la metodología de excavación mecanizada según el método EPBS el cual efectivamente posee el principal campo de aplicación en terrenos de limitada a ninguna capacidad de auto-soporte, con granulometrías típicas de limos y arcillas con arenas, iguales a los que caracterizaban al subsuelo a excavar. Por otro lado, problemas geotécnicos (contraindicaciones) que se podían presentar durante la fase de excavación con EPBS estaban los ligados a una eventual tendencia al comportamiento viscoso “sticky behaviour” y en este caso, los terrenos no presentaban tendencia a la viscosidad.



Metro de Valencia – Maquina EBBS de aproximadamente 10 metros de diámetro

El túnel de 4.221 mm de radio interno neto, ha sido construido de manera totalmente mecanizada mediante el uso de una maquina TBM escudada con la posibilidad de controlar las presiones en el frente de excavación mediante la adecuada aplicación de presiones de estabilización y control (EPBS) y ha sido soportado y revestido mediante secuencia única integrada a la excavación, con anillos prefabricados en concreto armado largos 1,5 metros y compuestos de 7 elementos de espesor igual a 40 cm y diámetro interno igual a 8,442 metros.

El confinamiento del terreno circundante la excavación ha sido garantizado por el escudo de acero de la TBM, luego al frente por la presión ejercida por la cabeza de la TBM en presión (EPBS) y en la cola, a través de una inyección a presión de mezcla de cemento que se ejecuta contemporáneamente con el avance de la máquina a la salida de cada anillo con el propósito de garantizar el llenado del vacío anular existente entre la parte externa del anillo de revestimiento y el perfil de excavación logrando al mismo tiempo el confinamiento total del anillo de revestimiento. La impermeabilidad del revestimiento ha sido garantizada mediante sellos plásticos ubicados en los alojamientos dispuestos para este fin sobre el contorno, en proximidad de la cara externa, de cada elemento de los anillos.

La tecnología EPBS, además de mantener la estabilidad del frente de excavación, permite minimizar los asentamientos que se pueden producir en superficie durante la excavación, estabilizando el frente con la contrapresión transmitida por parte de la tierra ya excavada previamente acondicionada y mezclada en el mismo frente de la excavación en una cámara de presión desde la cual se va evacuando, por medio de un tornillo sin fin, en la misma cantidad que se excava, manteniendo así dentro de la cámara de tierra al frente un volumen constante.

En cuanto al referido acondicionamiento de la tierra, si el terreno contiene un porcentaje mayor o igual a aproximadamente un 30% de “finos”, es suficiente añadir solo la cantidad de aguas, si hiciera falta, necesaria para obtener una mezcla de suelo excavado que sea suficientemente impermeable y viscosa para transmitir la presión al frente sin pérdidas por excesiva penetración en los estratos más permeables y, o, por filtración de agua en presión hacia el tornillo sin fin de la salida. Alternativamente se utilizan aditivos (espumas) para corregir las deficiencias en la humedad y en la granulometría del terreno excavado. Finalmente, en los casos de frentes con predominio absoluto de arenas y, o, gravas, se añaden polímeros para aumentar la viscosidad del agua intersticial y así disminuir la permeabilidad en el frente y en la cámara.

Para evitar los asentamientos en la cola del escudo, la tecnología EPBS es complementada con un sistema continuo de inyección a presión del espacio anular que se forma durante el avance, entre la excavación y el revestimiento prefabricado instalado en la cola del escudo.

El revestimiento del túnel está constituido por un anillo de concreto armado de espesor igual a 40 cm, compuesto por 7 elementos prefabricados (segmentos, o dovelas) ensamblados para configurar anillos de longitud 1,5 metros.



Metro de Valencia – Segmentos de los anillos de revestimiento prefabricados

El anillo es de tipo universal, es decir idóneo ya sea para seguir el curso de las curvas verticales y horizontales eventualmente presentes a lo largo del trazado (hasta con un $R_{min} = 300$ m), ya sea para continuar la excavación en línea recta, con la posibilidad también de corregir eventuales desviaciones propias de la máquina de excavación.

Una secuencia de anillos universales, en efecto, cada uno de los cuales rotado oportunamente en torno al propio eje respecto al anillo precedente ya instalado y sin incluir ningún anillo especial, permite seguir cualquier trazado manteniendo sobre una única superficie plana la zona de contacto entre anillos sucesivos.

Es necesario también tener presente que no se puede instalar una secuencia indefinida de anillos con juntas longitudinales alineadas porque se debilitaría estructuralmente el revestimiento en dirección longitudinal y por tal motivo hay siempre una rotación prevista para obviar tal inconveniente.

La característica geométrica fundamental de un anillo universal se basa en el hecho que las dos secciones terminales del mismo no son paralelas; en consecuencia los segmentos que componen el anillo tienen longitudes diferentes entre ellos, variables a lo largo del perímetro. La propiedad geométrica es su conicidad, o sea la diferencia entre su longitud máxima y su longitud nominal.



Metro de Valencia – Túnel revestido con anillos prefabricados universales

La definición de tales medidas deriva de la exigencia de minimizar en cada sección, el alejamiento que se crea durante la construcción entre el eje teórico y el eje real del túnel correspondiente a la secuencia de los ejes de los anillos instalados en modo tal que garanticen el respeto del galibo límite con referencia al eje teórico del túnel.

La selección de la rotación adecuada, que un anillo debe tener respecto al precedente, resulta de la simulación de todas las posibles rotaciones de los tres anillos sucesivos (una simulación de previsión). Se selecciona como rotación aquella que minimiza el máximo valor de desplazamiento de los tres anillos hipotéticamente instalados y tal proceso permite elegir no sólo sobre la base del desplazamiento entre eje teórico y eje real con la instalación de un anillo, sino también en base a la influencia que tal elección tendrá en la sección sucesiva, reduciendo así los desplazamientos a lo largo de toda la curva y por lo tanto garantizando con mayor seguridad el respeto de la línea límite.

Cuando se excava en ambiente urbano con bajas coberturas y con grandes diámetros, uno de los problemas técnicos más importantes a tratar y resolver en el proyecto y construcción del túnel, es ciertamente el del control de las deformaciones del terreno alrededor de la excavación y en especial del control de los asentamientos en superficie.

Las deformaciones del terreno están principalmente ligadas a la descompresión en el frente de excavación y al cierre del espacio anular que en la cola del escudo se forma al momento de la extrusión de cada anillo de revestimiento: espacio anular ocupado por el espesor del escudo mismo (de 15 cm en este caso).

La tecnología EPBS constituye un gran apoyo para el control del primer componente, mientras el control del segundo de los componentes de las deformaciones del terreno se apoya en el adecuado e inmediato llenado del espacio anular, mediante las inyecciones de mortero que, con aceleradores de fraguado, se ejecutan con continuidad durante todas las fases del proceso de avance de la excavación y montaje de los anillos.

Los resultados específicos logrados en el Metro de Valencia en términos de control de las deformaciones, inicialmente (en correspondencia con el primer tramo excavado) no pudieron ser considerados totalmente satisfactorios, habiéndose registrado en superficie asentamientos máximos localizados del orden de los 10 cm y en general del orden de los 5 cm en correspondencia del eje del túnel, al mismo tiempo en que se pudo observarse que los asentamientos iniciaban a producirse en coincidencia con el paso del frente de excavación (no antes) incrementándose luego durante los 2-3 días inmediatamente siguientes al paso del frente y manteniéndose luego estabilizados, pareciendo lo anterior una clara señal de un buen control del frente mediante la presión del EPBS y de un más deficiente control en la cola mediante las inyecciones del relleno anular.

Sucesivamente los resultados fueron decididamente satisfactorios ya que, una vez ajustados los parámetros de las inyecciones, todos los asentamientos registrados entre los dos puntos externos de las secciones monitoreadas en superficie (ubicados aproximadamente a unos 15 metros a cada lado del eje del túnel), raramente han superado los 3 cm y demás, ninguna estructura superficial o sub-superficial ha sufrido daño alguno, incluyendo un tubo enterrado de gasducto, de 30 cm de diámetro, interceptado pseudo-transversalmente por la excavación del túnel con una distancia entre la clave del túnel y la base del tubo del orden de solamente 3 metros.

El Metro de Los Teques

Este proyecto metropolitano de transporte masivo interurbano, de aproximadamente unos 9,5 km de longitud entre las ciudades de Caracas y Los Teques, bien podría ser utilizado a manera de eslogan publicitario para los túneles, ya que ilustra con mucha contundencia las grandes ventajas que ofrece un recorrido subterráneo en comparación con un recorrido superficial, especialmente cuando el territorio a atravesar está densamente poblado y o, cuando el ambiente geológico y geomorfológico determina un marco decididamente vulnerable.

Efectivamente, este proyecto elaborado alrededor del año 1985, fue concebido esencialmente con características de ferrocarril superficial, previendo la construcción de un total de 7 túneles relativamente cortos, para un total de recorrido subterráneo de casi 2.500 metros, mientras los restantes aproximadamente 7.000 metros discurrían en superficie, con una plataforma en terraplén o en corte y con la construcción de una docena de puentes, necesarios para sortear los repetidos atravesamientos del río San Pedro, paralelamente al cual se diseñó el alineamiento del Metro.

Naturalmente las líneas guías que orientaron al proyectista fueron las de evitar a toda costa el subterráneo en un ilusorio intento de aminorar el costo de las obras con lo cual, en consideración de la abrupta topografía y morfología de la franja de territorio que salvaba el importante desnivel de aproximadamente 200 metros existente entre las estaciones Las Adjuntas en Caracas y El Tambor en Los Teques, el inevitable resultado fue un trazado sinuoso de media ladera bordeando el cauce del río y atravesando los remanentes espolones montañosos con una larga serie de túneles muy parietales.

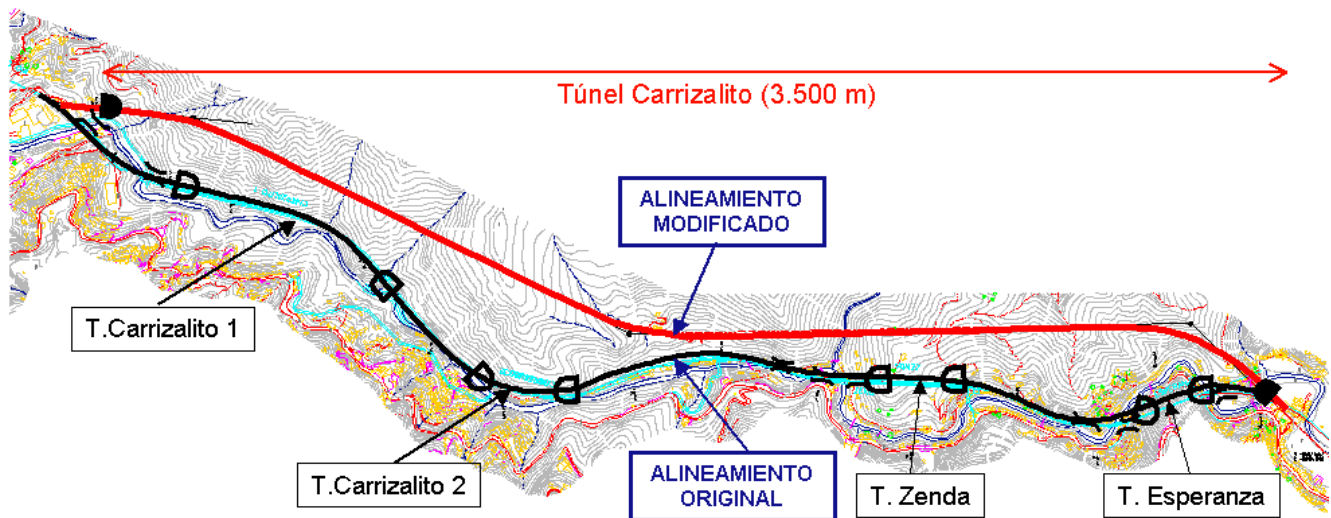
METRO LOS TEQUES (Las Adjuntas - El Tambor) L= 9.000 m			
PROYECTO ORIGINAL		PROYECTO MODIFICADO	
Túneles	<i>Longitud</i>	Túneles	<i>Longitud</i>
CORRAL DE PIEDRAS	635 m	CORRAL DE PIEDRAS	1.147 m
		CALIFORNIA 1	265 m
		CALIFORNIA 2	470 m
LA LINEA	224 m	LA LINEA	224 m
RIO CRISTAL	169 m	RIO CRISTAL	169 m
CARRIZALITO 1	735 m	CARRIZALITO	3.560 m
CARRIZALITO 2	118 m		
ZENDA	334 m		
LA ESPERANZA	200 m		
TOTAL Túneles	2.416 m	TOTAL Túneles	5.835 m

Cuando casi 20 años después de haberse elaborado el proyecto se inició la construcción, todas las contradicciones y casi absurdidades técnicas del trazado quedaron evidenciadas y resaltadas, también a consecuencia del intenso proceso de urbanización masiva al que había estado sometido el territorio a lo largo de aquellos últimos 20 años.

El trazado original implicaba la ejecución de numerosos y extensos cortes extremadamente altos, hasta más que 30 metros, a ser excavados en unos macizos meteorizados de rocas esquistosas filíticas y gneissicas, foliadas y fracturadas, implicando todo lo anterior la necesidad de construir muy lentamente, enormes, impactantes y costosas estructuras de estabilización.

También era necesario construir igualmente impactantes obras hidráulicas, para rectificar el cauce del río San Pedro y atravesarlo con numerosos puentes y finalmente, los túneles previstos poseían características absolutamente precarias de estabilidad, debido a su extrema parietalidad lo cual, además de todo, implicaba la excavación de largos y altos cortes para la conformación de los portales.

Dentro del crítico marco ilustrado se inició a evaluar y a proyectar alternativas que eliminaran o cuanto menos redujeran los numerosos elementos negativos que caracterizaban al proyecto y que amenazaban con imposibilitar su misma realización y, por etapas sucesivas y prácticamente durante el curso de las obras, las cuales nunca fueron interrumpidas como consecuencia de los cambios introducidos, se logró formular y ejecutar un proyecto decididamente próximo a lo óptimo, sea desde el punto de vista del impacto socio-ambiental, sea de la seguridad de las obras y de las futuras operaciones, sea también del punto de vista de los tiempos de realización.

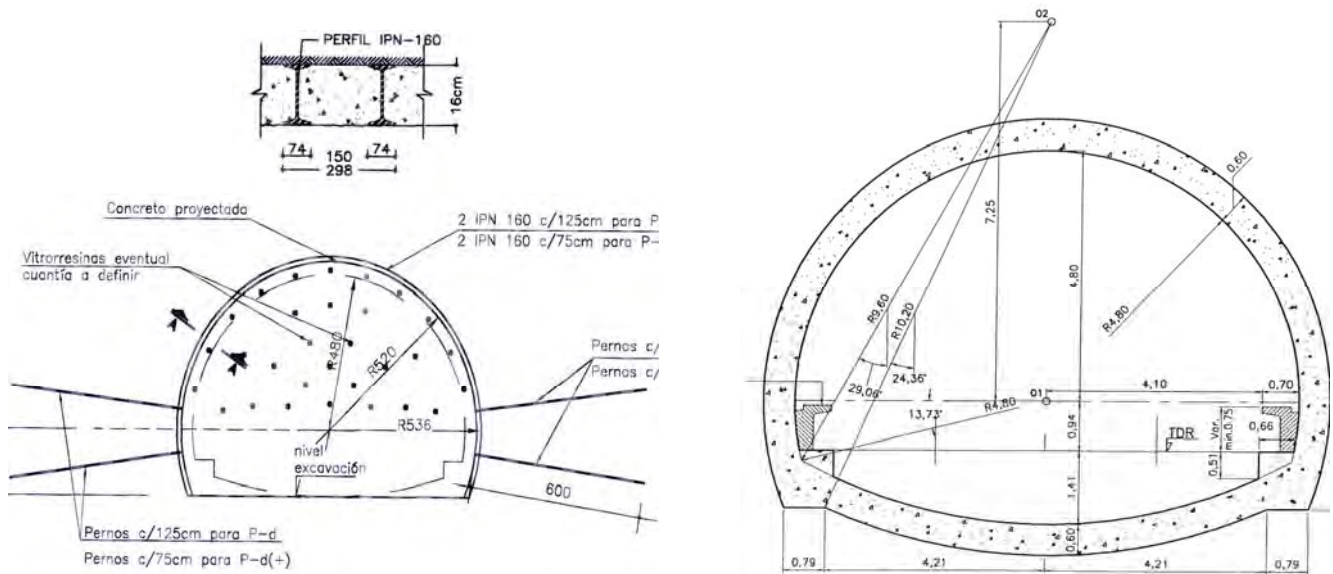


Metro de Los Teques – Modificación del trazado en el tramo central

Naturalmente el precio a pagar ha sido el de un mayor costo de la inversión constructiva, con un incremento relativo importante respecto al costo originalmente previsto al momento de la contratación de las obras. El valor de tal incremento del costo sin embargo, si computado con relación a lo que hubiese finalmente alcanzado efectivamente el costo de realización del proyecto original, con sus obras de estabilización, con las inevitables demoras, con las innumerables expropiaciones, se reduciría drásticamente e inclusive podría hasta revertirse.

Sin embargo, sería ciertamente muy limitante reducir el problema a una simple comparación de costos directos e indirectos entre dos alternativas de obras, ya que a favor de una respecto a la otra, pesan factores tan contundentes como son la calidad técnica global del producto, el control del impacto social y ambiental, la seguridad de las operaciones, entre otros y cuyos costos, aunque difíciles de cuantificar, evidentemente tienen una altísima valoración.

El proyecto en ejecución prevé la construcción de 6 túneles de radio interno neto de 4,80 metros revestidos en concreto armado de 40 y 60 cm de espesor y arco invertido de radio 2R y 3R en función de las condiciones geo-estáticas de cada sector. La excavaciones se ejecutan a sección completa soportadas temporalmente siempre por concreto proyectado, con además pernos y costillas metálicas 2IPN160, cuando las condiciones geomecánicas lo requieren.



Metro de Los Teques – Soporte primario y revestimiento de los túneles

La longitud total de túneles suma casi 6 Km, prácticamente dos terceras partes del recorrido total, siendo el más largo el *Túnel Carrizalito* el cual con sus más de 3.500 metros de longitud permitió salvar el tramo central y más problemático de todo el alineamiento, sustituyendo 4 túneles cortos parietales 5 puentes y varias rectificaciones del río, además de extensas y pesadas obras de estabilización de los cortes originalmente previstos a ejecutar.



Metro de Los Teques – Portales de entrada y de salida del Túnel Carrizalito

Con este largo túnel, también fue necesario cruzar dos importantes obstáculos: el primero, con unos cuatro metros de cobertura, era un importante curso de aguas, el río Carrizal, para lo cual se recurrió a

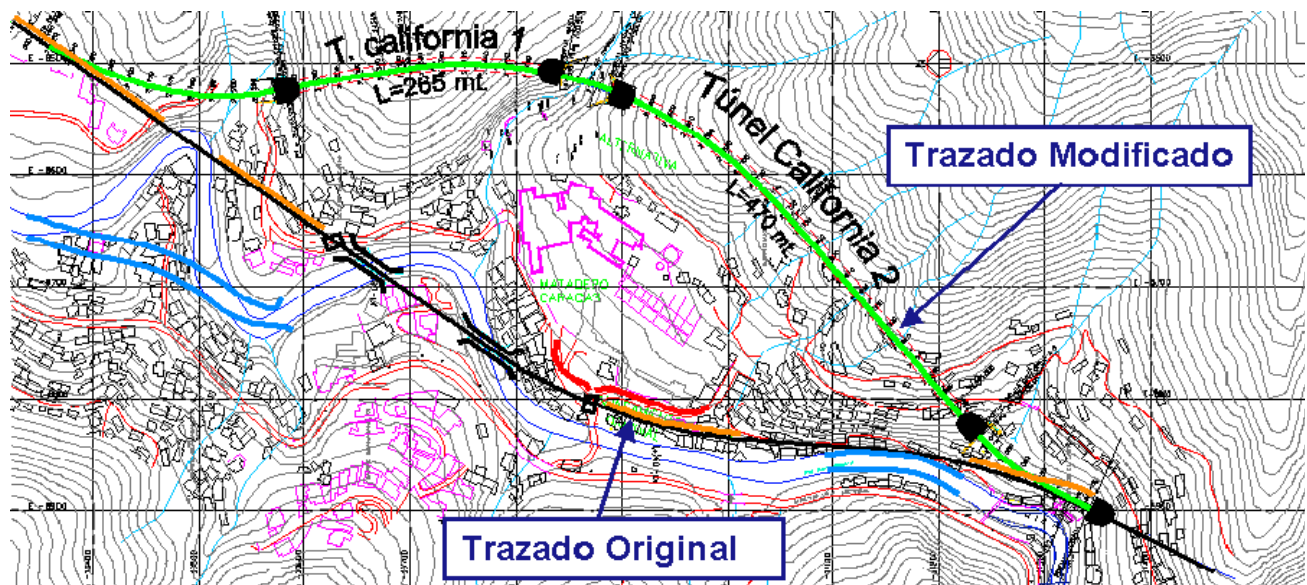
construir un pre-soporte mediante arcos tronco-cónicos de micropilotes y el segundo, con un escaso metro de cobertura, nada menos que un túnel del viejo ferrocarril, para lo cual se construyó en este viejo túnel, ancho 3,42 metros y alto 4,45 metros, una solera plana en concreto armada de 60 cm de espesor a lo largo de aproximadamente 25 metros en correspondencia de la intersección.

Para garantizar la seguridad en el ejercicio, el túnel Carrizalito finalmente está complementado con 2 galerías peatonales transversales, cada una de algo menos que 200 metros de longitud con sección reducida a 4x5 metros aproximadamente y por una ventana vehicular igualmente transversal al alineamiento del túnel larga unos 85 metros, construida con la misma sección del túnel principal.



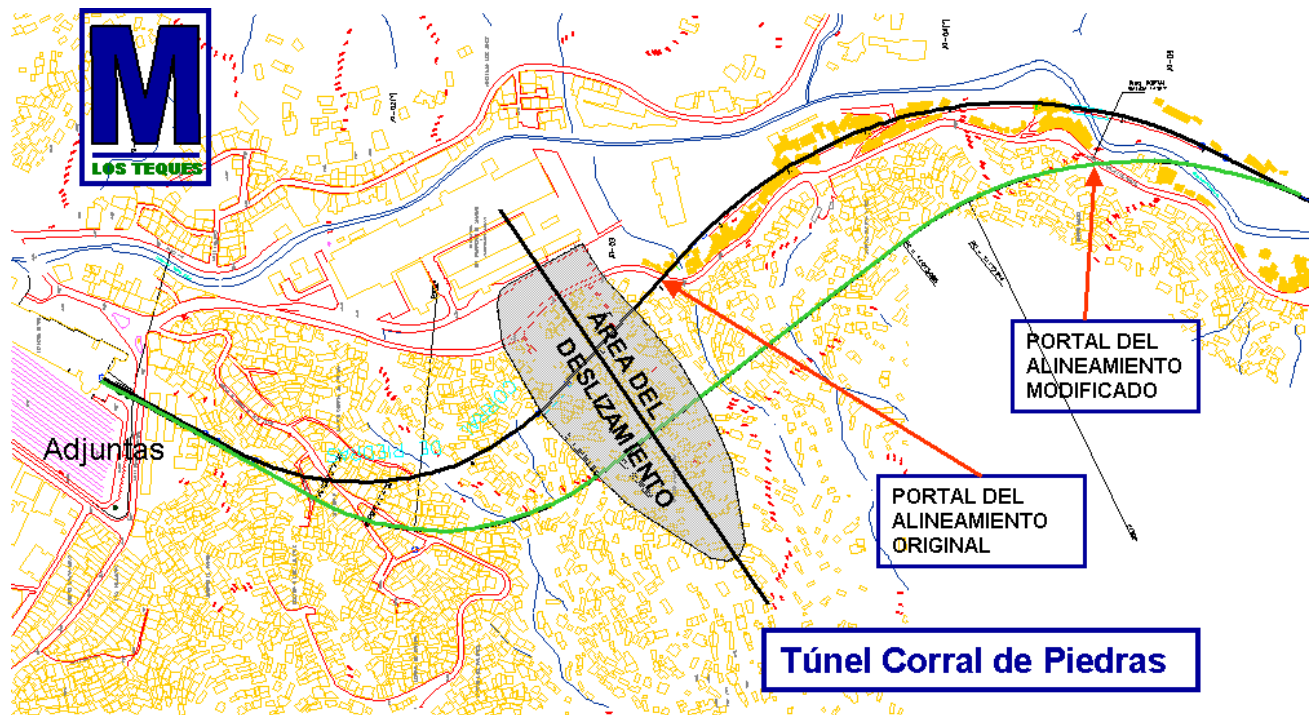
Metro de Los Teques – Portales externo e interno y de la Ventana vehicular Carrizalito

Los Túneles California 1 y 2, permiten sustituir un tramo muy problemático en cuanto a sus interferencias con el río San Pedro y finalmente, los Túneles La Línea y Río Cristal fueron los únicos que se mantuvieron invariados desde el proyecto original.

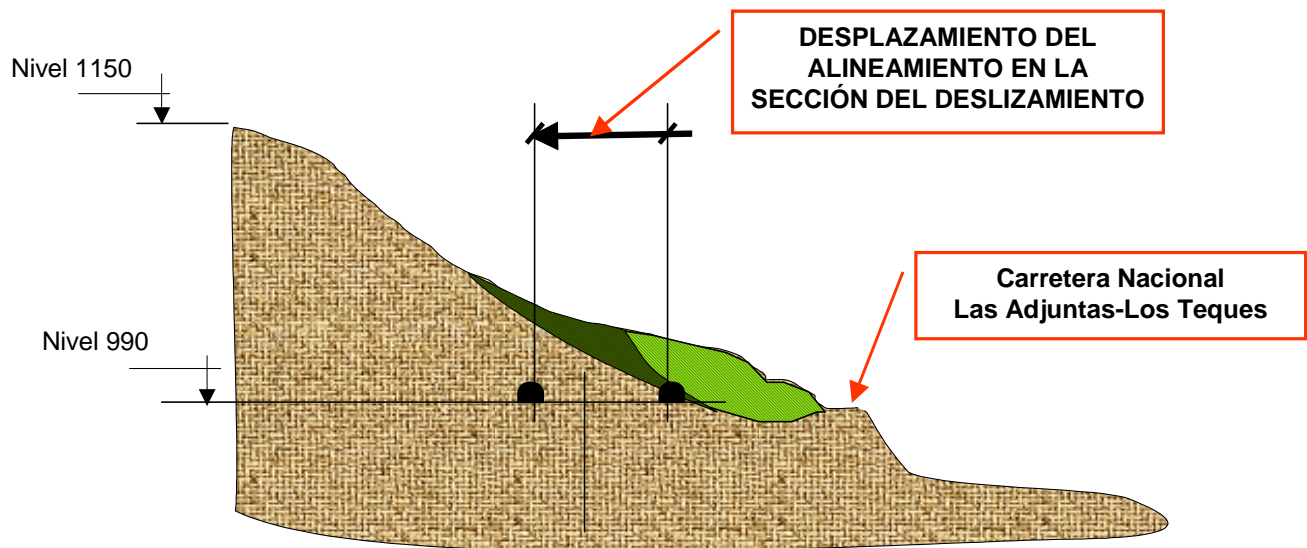


Metro de Los Teques – Túneles California en alternativa al trazado superficial original

El *Túnel Corral De Piedras* tuvo que ser alargado a casi el doble de su longitud original, debido a la proximidad de la intersección del trazado con un antiguo e importante movimientos de masas. El nuevo trazado permite la profundización del túnel con lo cual la sección de excavación se aleja prudencialmente de la base del deslizamiento activo.



Metro de Los Teques – Modificación del alineamiento del Túnel Corral De Piedras



Metro de Los Teques – Túnel Corral De Piedras en la sección del movimiento de masas

El Ferrocarril Caracas-Cúa

El punto de origen de este enlace ferrocarrilero de Caracas con los Valles del Tuy y luego con Valencia y Puerto Cabello, se encuentra en La Rinconada, en el Suroeste de Caracas donde se construirá el Multiterminal Metropolitano, el cual, además de albergar la estación del ferrocarril, incluirá la estación La Rinconada de la Línea 3 del Metro de Caracas, próxima a construir.

La topografía de montaña del primer tramo del trayecto, entre Caracas y Charallave, impone grandes retos para la construcción, ya que de los 22 km de longitud que tiene este tramo, 18 Km están repartidos en 19 túneles y 3 Km en varios viaductos. La segunda parte del enlace ferrocarrilero, que une a Charallave con Cúa con una longitud de 18 km, se desarrolla en una topografía menos abrupta en la cual se prevé la construcción de casi 3 km repartidos en 5 túneles y de otros 5 km de viaductos.

Los 24 túneles, son todos de doble vía con sección en forma de herradura curva con radio interno neto de 4,80 metros y arco de solera con distintos radios, generalmente de aproximadamente 8 metros. Poseen longitudes y coberturas distintas, desde los valores máximos correspondientes al *Túnel Tazón* largo 6.765 metros bajo casi 600 m de máxima cobertura, hasta el *Túnel 0* con 55 metros de longitud y menos de 5 metros de cobertura máxima.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Sección final de los túneles

Todos los túneles, con excepción de los últimos dos llegando a Cúa, que son el *Túnel Pitahaya* y el *Túnel Mume*, están ubicados en un ambiente geológico cuyo subsuelo lo conforman rocas metamórficas que incluyen principalmente esquistos y filitas y en menor proporción cuarcitas y mármoles. Los esquistos son cuarzo-micáceos y grafitosos calcáreos y no, las filitas son cuarzo-grafitosas y a veces cuarzo-sericíticas, las cuarcitas son micáceas y los mármoles son laminados.

TÚNEL	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	LONGITUD (m)
TRINCHERA LA RINCONADA	0+241 y 0+690	0+472 y 0+861	231+169
TÚNEL LA RINCONADA	0+472	0+690	218
TÚNEL LAS MAYAS	0+861	1+429	568
TÚNEL TAZON	1+080	7+845	6765
TUNEL 0	8+400	8+455	55
TÚNEL 1	8+738	8+965	227
TÚNEL 2	9+296	9+452	156
CANOAS 1	9+575	10+815	1240
CANOAS 2	10+958	12+596	1638
LA LOMA	12+694	12+805	111
YAGUARAMAL	12+934	14+554	1620
PALMARITO	14+671	14+741	70
PALMAR	14+956	15+301	345
SABANETA	15+613	17+042	1429
PEÑON	17+420	18+158	738
MELERO	18+859	19+763	904
ALTO MONTE	20+121	20+404	283
TÚNEL 12 NORTE	20+690	20+793	103
TÚNEL 12 SUR	20+814	20+943	127
CORUMA	21+530	22+500	970
ALVARENGA 0	24+619	24+801	182
ALVARENGA 1	24+868	25+234	366
ALVARENGA 2	25+327	26+496	1169
PITAHAYA	31+890	32+455	565
MUME	34+280	34+500	220

Ferrocarril Caracas-Cúa – 24 Túneles para un total de más de 21 Kilómetros lineales

Las condiciones físicas de los macizos rocosos excavados, van de roca muy meteorizada o moderadamente meteorizada en superficie y en correspondencia de las coberturas menores (hasta 30 – 100 metros) a roca poco meteorizada o fresca bajo las coberturas superiores a los 100 metros, dependiendo también del litotipo dominante. Los macizos se encuentran siempre fracturados y muy plegados, con frecuente presencia de planos de fallas acompañados a veces con brechas de algunos, generalmente pocos y máximo unos 5, metros de espesor.

Las condiciones hidrológicas del subsuelo excavado, han sido variables pero siempre sin la existencia de una falda constante. Más comúnmente se han encontrado aguas de precolación las cuales muy puntualmente se han hecho abundantes y persistente, requiriendo de su captación permanente.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Excavación con avance a sección completa

Los túneles Pitahaya y Mume, que se ubican entre Charallave y Cúa, han sido en cambio excavados en un ambiente geológico cuyo subsuelo lo conforman predominantemente los terrenos arcillo-arenosos de la denominada Formación Tuy con horizontes limo-gravosos y niveles de arcilla con moderado potencial expansivo.

Las condiciones de excavación de algunos de los túneles han presentado cierto grado de dificultad debido a las características geomecánicas frecuentemente desfavorables de los macizos rocosos encontrados. El tipo de avance ha variado en función de las condiciones de la roca y de las soluciones tecnológicas adoptadas: desde avance a sección completa con voladuras o demolición mecánica con martillos hidráulicos, hasta avance a media sección con la consolidación del frente mediante elementos horizontales de vidriorosina coaxiales con el eje del túnel y la utilización de arcos troncocónicos de pre-soporte, formados por micropilotes sub-horizontales.

La metodología de excavación empleada en todos los túneles es de tipo convencional, utilizándose los martillos demoledores hasta tanto la resistencia a la compresión uniaxial de las rocas no supera límites del orden de los 300 a 400 Kg/cm² y luego haciendo recurso a las voladuras de las rocas.

El soporte primario está constituido por costillas metálicas IPN300, IPN200, IPN160 e IPN140, colocadas generalmente en pares, separadas de un mínimo de 60 cm a un máximo de 175 cm y siempre integradas a una capa de concreto proyectado de espesor variable entre 10 y 30 cm, el todo dependiendo de la clase de comportamiento de la excavación.

El revestimiento definitivo, siempre colocado después de completar la excavación de cada túnel, se ejecuta en concreto armado vaciado en sitio mediante el uso de un especial encofrado deslizante de 12 metros de largo, el cual corre sobre rieles temporales oportunamente fijados al murete previamente vaciado en concreto armado, junto o antes del arco invertido de la solera del túnel.

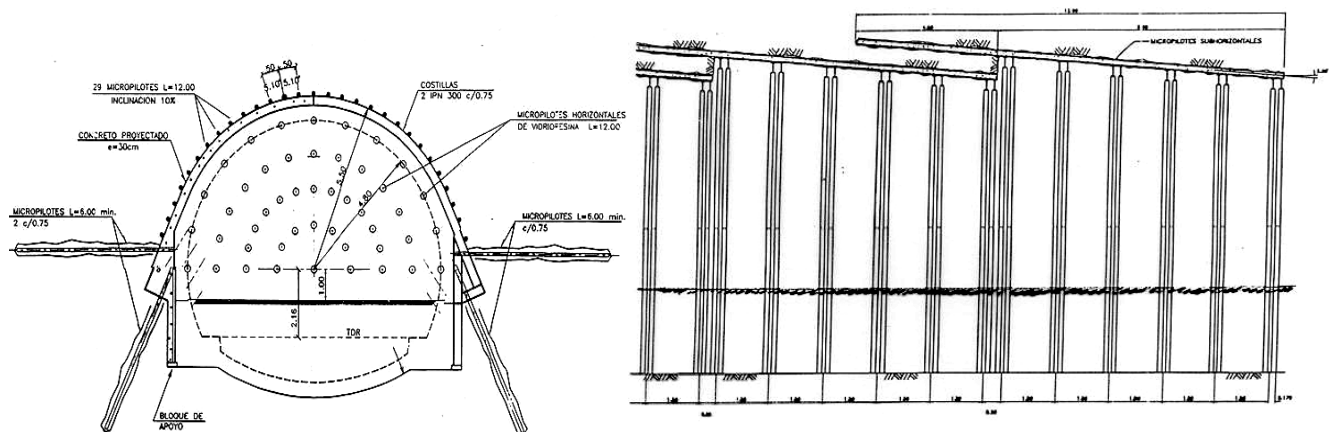


Ferrocarril Caracas-Cúa – Encofrado deslizante para el vaciado del revestimiento

Para las clases de comportamiento más críticas en relación con la estabilidad, la excavación procede a sección parcial en calota, con ancho total (aprox. 11 m) y alto de aprox. 6,5 m, haciendo recurso al pre-soporte constituido por el arco troncocónico de micropilotes de 12 m de largo, eventualmente integrado con elementos (micropilotes) longitudinales de vidrioresina de igual longitud en el núcleo a excavar y micropilotes laterales al pie del arco de las costillas de media sección largos 6 m.

La cuantía de los elementos de pre-soporte (micropilotes sub-horizontales dispuestos en arco troncocónico) y de los de pre-consolidación (elementos longitudinales horizontales de vidrioresina en el frente) así como de los complementarios (micropilotes laterales sub-horizontales y sub-verticales), es variable dependiendo de las condiciones geomecánicas específicas de cada situación.

Los micropilotes sub-horizontales de 12 m de longitud dispuestos en arco troncocónico, se colocan con separación entre sí que va de un mínimo de 30 cm hasta un máximo de 60 cm, a veces variable para una misma sección entre centro de bóveda y periferia de la misma, determinando una cantidad de elementos de entre 25 y 45 según el caso, para cada sección de intervención. Los elementos longitudinales de vidrioresina de 12 m de longitud, se colocan con separación entre sí que va de un mínimo (cuando necesario) de 1 m hasta un máximo de 2 m, en función de la presión de estabilización requerida en el frente. Los micropilotes laterales sub-horizontales y sub-verticales de 6 m de longitud, se colocan en cantidad de mínimo 1 en cada pie de par de costillas, hasta un máximo de 3.



Finalmente cada ciclo de avance, con sección de calota variable para garantizar en cada caso el contacto directo entre el arco de costillas y el arco troncocónico de los micropilotes, se extiende por 8 metros antes de iniciar con un nuevo ciclo, manteniendo de tal forma en todo frente, un pre-soporte y una pre-consolidación que afectan un mínimo de 4 metros (12 m menos 8 m) de longitud por excavar.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Esquema y equipo para arco del pre-soporte de micropilotes



Ferrocarril Caracas-Cúa – Perforación del arco de micropilotes y elementos de vidrioresina



Los túneles Pitahaya y Mume, de aproximadamente 500 m y 200 m de longitud respectivamente y coberturas máximas del orden de los 50 m, se ubican entre Charallave y Cúa, en un ambiente geológico cuyo subsuelo lo conforman los suelos arcillo-arenosos de la Formación Tuy con horizontes limo-gravosos y niveles de arcilla con moderado potencial expansivo. La geometría de su sección de excavación y las estructuras de soporte aplicadas, son algo diferente a las adoptadas en los otros túneles, siendo la diferencia principal, además del constante uso del arco troncocónico de pre-soporte y de los elementos de vidrioresina para la consolidación del núcleo del frente, un menor radio de curvatura del arco invertido de la solera que confiere a la sección de excavación una geometría casi circular, soportado estructuralmente también en la etapa de soporte primario, y el mayor espesor (medianamente 80 cm contra los 40 cm de los otros túneles) del revestimiento de concreto armado.



Ferrocarril Caracas-Cúa –Excavación con demolidor de un frente reforzado con vidrio-resinas



Ferrocarril Caracas-Cúa – Avance a media sección con arco troncocónico de pre-soporte

La construcción de los portales de los túneles, generalmente conformados mediante pantallas ancladas en concreto proyectado, en varias ocasiones ha representado ciertas dificultades esencialmente ligadas a condiciones topográficas adversas las cuales implican portales fuertemente asimétricos y entradas en subterráneo en condiciones de extrema parietalidad.

También en estas circunstancias, ha sido útil y exitoso el recurso a la conformación de un arco de pre-soporte troncocónico de micropilotes sub-horizontales, siguiendo la tecnología y procedimiento constructivo ya aplicado en algunos tramos especialmente problemáticos del subterráneo.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Pre-soporte troncocónico de micropilotes en portal asimétrico

Numerosas soluciones especiales y puntuales han sido aplicadas en condiciones atípicas, tal como ocurrió en uno de los portales del *Túnel Sabaneta* cuando la parietalidad extrema obligó a conformar con micropilotes transversales al eje del túnel, una losa plana de pre-soporte del techo en roca armada (la armadura la constituyen los micropilotes perforados y colocados en capas, así como ocurre en una losa plana de concreto armado) complementada con un muro de gravedad, de contención y al mismo tiempo de soporte vertical y de empotramiento para la referida losa de pre-soporte, luego en el otro extremo, oportunamente empotrada en el macizo rocoso.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Solución para un portal parietal en extremos



El monitoreo ha sido también factor constante y fundamental en el seguimiento, control y adaptación del proyecto de los túneles en el curso de la construcción, midiéndose convergencias, presiones y deformaciones, con métodos mecánicos ópticos y electro-magnéticos, según cada circunstancia.

Las convergencias se han medido de manera absolutamente sistemática, desde el frente y hasta la completa estabilización de la cavidad, mientras las presiones, deformaciones y demás elementos de control y retroalimentación del proyecto, se han medido en estaciones especiales de monitoreo, estratégicamente ubicadas a lo largo de los túneles, de acuerdo con las circunstancias propias del proyecto y del comportamiento efectivo de la cavidad.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Instrumentación del frente con extensómetro incremental

A lo largo de tan extensos tramos subterráneos, naturalmente han sido encontradas y sorteadas también otras situaciones atípicas, las cuales han requerido de la aplicación de soluciones igualmente atípicas. Es por ejemplo el caso que se ha repetido en por lo menos dos de los túneles (Sabaneta y Túnel 2) en donde en correspondencia de un sector muy puntual, largo pocos metros lineales de túnel, la cobertura natural se reducía drásticamente hasta inclusive desaparecer.

La solución eficientemente y exitosamente adoptada consistió en construir desde la superficie, previamente al paso de la excavación, una pre-bóveda en concreto armado, conformada con suficiente precisión geométrica para coincidir en el subterráneo con el perfil de excavación de la bóveda del túnel. Durante la excavación se colocan en el avance las costillas metálicas del soporte primario sobre las cuales se apoya para ser soportada la pre-bóveda ya construida.



Ferrocarril Caracas-Cúa – Pre-bóveda para una sección sin cobertura

También se han encontrado y oportunamente superado dificultades extremas. Es el caso de algunas pocas chimeneas accidentalmente ocurridas en coincidencia con importantes brechas de falla en materiales grafitosos en presencia de aguas abundantes en el túnel Tazón y es el caso de las considerables convergencias de origen tectónico, ocurridas en un tramo del túnel Sabaneta, las cuales implicaron el re-perfilado parcial de la sección de excavación y que pudieron ser adecuadamente controladas mediante la aplicación de anclajes pre-tensados de gran longitud en correspondencia de los hastiales, previamente a la construcción del revestimiento definitivo en concreto armado.

En el *Túnel Canoas I* se produjeron a lo largo de un extenso tramo, las más grandes convergencias de la sección de excavación, las cuales alcanzaron radialmente el metro a consecuencia del desarrollo de improvisos fenómenos de “squeezing” y obligaron a intervenciones urgentes y extensas de re-perfilado de la sección y de construcción anticipada del arco invertido del revestimiento, reforzado estructuralmente y modificado geoméricamente para contrastar las elevadas e imprevistas presiones.

Pero todo lo relativo a las obras subterráneas del proyecto, ha resultado finalmente y globalmente en un inobjetable éxito técnico, económico y programático, pudiéndose finalmente contemplar la colocación de los rieles dentro de los túneles y, próximamente el correr de los trenes dentro de aquellos más de 21 kilómetros subterráneos (justo prácticamente la mitad de los 40 Kilómetros lineales del tramo Caracas- Cúa).



Ferrocarril Caracas-Cúa –Re-perfilado para convergencias atípicas de squeezing



Ferrocarril Caracas-Cúa – Construcción del arco invertido del revestimiento

El Ferrocarril Puerto Cabello-La Encrucijada

De los aproximadamente 110 Kilómetros de extensión que posee el ramal ferrocarrilero entre Puerto Cabello (el más grande y central del Venezuela) y La Encrucijada-Cagua (el más importante y estratégico nudo vial de la región centro occidental del país), el primer tramo de aproximadamente 30 Km de longitud, se desarrolla en un ambiente geomorfológico absolutamente montañoso (Cordillera de la Costa Central) salvando los aproximadamente 500 metros de altura que separan al mar de la ciudad de Valencia, mientras los remanentes 80 Km de la proyectada vía férrea se desarrollan en un ambiente geomorfológico prácticamente plano, discurriendo inicialmente por los valles de los ríos Retobo, Cabriales, San Diego, Los Guayos y Guacara y finalmente por la llanura de agradación del Lago de Valencia, en donde los afloramientos rocosos son escasos poco profundos y en general limitados a los cauces de los cursos de agua más importantes.

La Cordillera de la Costa en este sector central de la geografía venezolana, está dominada por una serie de amplios pliegues abiertos, constituyendo una gran estructura anticlinal en cuyo núcleo aparece expuesto el granito de Guaremal y la cual termina bruscamente al Norte contra la falla del Caribe y al Sur contra la falla de La Victoria. El subsuelo sub-superficial, en los valles fluviales y en la llanura de agradación del Lago de Valencia, está constituido por sedimentos aluviales alternamente finos de arcillas poco sobre-consolidada y de arenas finas limosas poco densas, con niveles freáticos bastante superficiales, desde casi aflorantes hasta profundos una decena de metros.

En los 30 Km del tramo definido montañoso, acompañan al núcleo granítico central en sucesión bastante concordante, rocas metamórficas gneisicas y esquistas, con muy abundante presencia de rocas anfibolicas en todo el sector Norte. Mientras, en los 80 Km del tramo definido plano, el ferrocarril, alternando con la citada sucesión de valles fluviales, discurre por tramos limitados en el piedemonte occidental y suroccidental del relieve local y luego en la llanura de agradación del Lago de Valencia donde, con excepción de aisladas zonas en las que el trazado afecta a áreas topográficamente elevadas, discurre nuevamente sobre los suelos aluviales, por una superficie semi-plana con ligera pendiente al Sur y Suroeste con cotas de poco metros superiores a los 400 m.s.n.m.

De los 14 túneles presentes en el proyecto (todos de doble vía y con un galibo de 5 metros de radio para el revestimiento en concreto armado), 8 están ubicados en el tramo montañoso y 6 en el plano, pero en cuanto a longitudes, solo 4.743 metros pertenecen al tramo plano mientras todos los remanentes, más de 28 Kilómetros, pertenecen al tramo montañoso, distribuidos con importantes longitudes para cada túnel, de hasta 5 - 6 y casi 8 Km con el más largo: el *Túnel Bárbula*.

Los túneles se están excavando de manera convencional y con muy extenso y sistemático empleo de voladuras para los del tramo montañoso, abiertos en macizos rocosos muy competentes constituidos por rocas gneisicas y anfibolicas muy duras y abrasivas, con un comportamiento geo-estático muy satisfactorio que requiere en general de un mínimo soporte de seguridad conformado por una delgada capa de concreto proyectado y pernos eventuales. Para el caso de los túneles del tramo plano en cambio, abiertos bajo coberturas limitadas en macizos rocosos incompetentes de rocas esquistas y filíticas meteorizadas, el avance convencional se realiza en general demoliendo la roca con martillos hidráulicos y recurriendo en ocasiones a la consolidación del frente mediante vidrioresinas, para de tal manera poder mantener el avance a sección completa, a pesar de la relativa precariedad de las condiciones geomecánicas presentes, sostenida con costillas metálicas pernos y concreto proyectado.

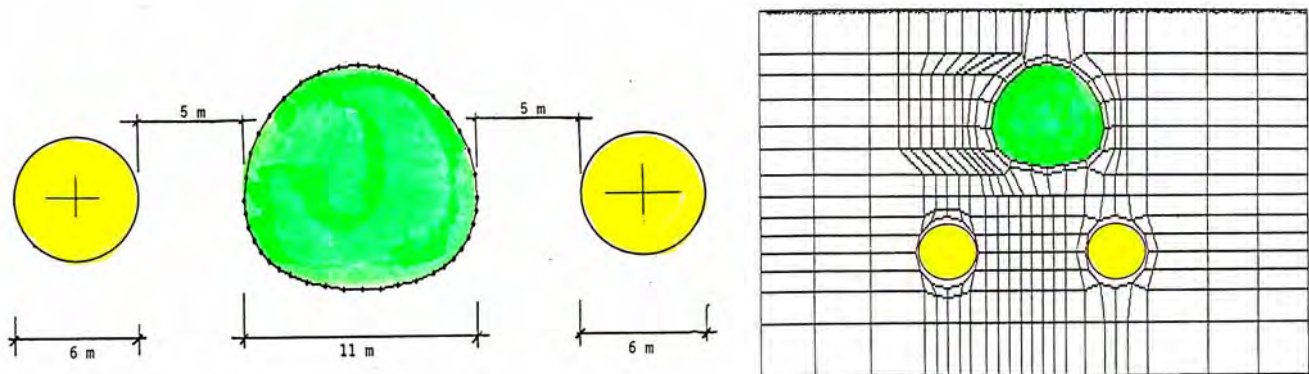
TÚNEL	PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	LONGITUD (m)
Túnel Marroncito	1+463,202	3+732,754	2269
Túnel Sanchón	4+209,392	6+873,920	2664
Túnel Pequeño	7+254,947	7+607,127	352
Túnel Pastora	7+951,850	8+865,141	913
Túnel Corona	9+061,432.	14+140,100	5078
Túnel San Pablo	14+397,406	20+590,000	6192
Túnel Guaremal	20+853,000	23+836,880	2983
Túnel Bárbula	24+094,436	31+890,000	7795
Túnel Montaserino	36+263,404	37+545,000	1281
Túnel San Diego	49+315,649	49+619,871	304
Túnel Guacara	55+640,000	56+284,000	644
Túnel San Joaquín	70+057,000	70+592,124	535
Túnel Cabrera	84+125,000	84+978,170	853
Túnel Tapatapa	86+546,000	87+677,180	1131

Ferrocarril Puerto Cabello-La Encrucijada – 23 Túneles para un total de más de 33 Kilómetros

La Línea 4 del Metro de Caracas

Esta nueva porción del Metro de Caracas, inicialmente concebida como extensión Sur de la Línea 2, o también como ramal de duplicación al Sur del tramo central de la Línea 1, ha sido luego finalmente denominada Línea 4, en vista también de su futura importante extensión prevista hacia el Este. El tramo actualmente en construcción, de aproximadamente unos 5 Kilómetros y medio de extensión, entre la Estación Capuchinos de la Línea 2 y la Estación Plaza Venezuela de las Líneas 1 y 3, comprende cuatro nuevas estaciones (Teatro - Nuevo Circo - Parque Central y Zona Rental).

Se inicia al extremo Oeste con un interesante reto ingenieril: los túneles gemelos, excavados con escudos EPBS, por un breve tramo saliendo de la Estación Capuchinos corren paralelos a ambos lados del túnel de gran diámetro preexistente dentro del cual sigue operando en sentido Norte-Sur la Línea 2 y luego se profundizan para dar una curva de aproximadamente 90° con 250 metros de radio para alinearse en sentido Oeste-Este, con lo cual uno de los túneles gemelos pasará debajo del túnel preexistente. Las separaciones entre los nuevos túneles y el preexistente se reducen al orden de los 5 metros, sea lateralmente y sea verticalmente. Todas las situaciones descritas han sido oportunamente analizadas y, en las etapas del proyecto, adecuadamente y detalladamente modeladas.

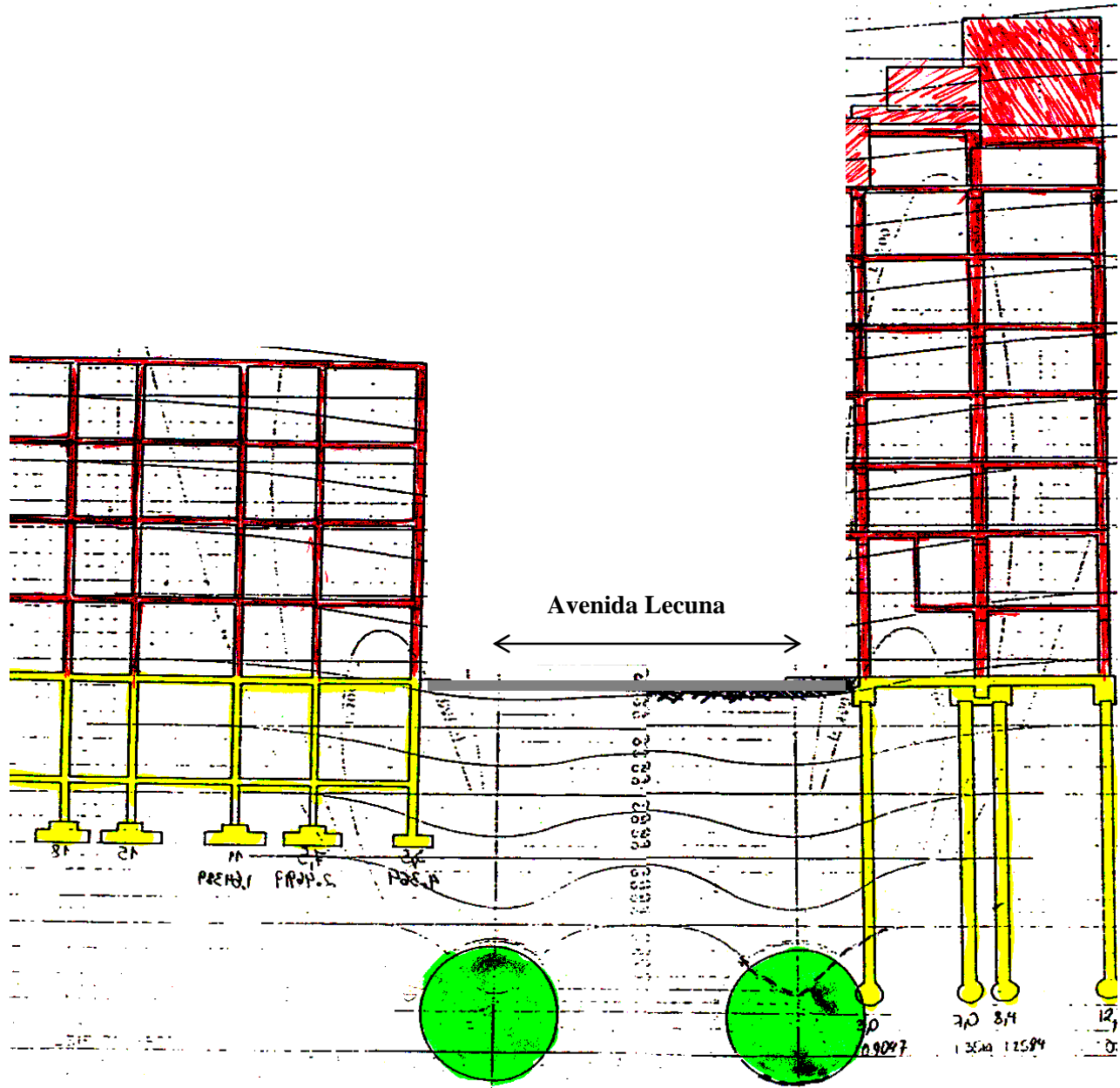


Metro de Caracas - Túneles gemelos de la Línea 4 y Túnel pre-existente de la Línea 2

El subsuelo del sector involucrado se caracteriza por un manto de suelos de origen coluvio-aluvial, de carácter predominantemente granular y de compacidad media a densa que descansa sobre los estratos rocosos presentes en sitio caracterizados como esquistos cuarzo-micáceos meteorizados. El contacto entre los suelos y el basamento rocoso se presenta a lo largo del sector en forma errática por lo cual los túneles, atraviesan de manera alternada estas dos formaciones geológicas, constituyendo tales circunstancias un elemento adicional de complicación a enfrentar.

Luego, todo el sector intermedio y principal del desarrollo en túneles, corre a lo largo de la central Avenida Lecuna la cual se caracteriza por ser muy estrecha y por estar densamente edificada con sistemática presencia a ambos lados de importantes edificios comerciales y de viviendas.

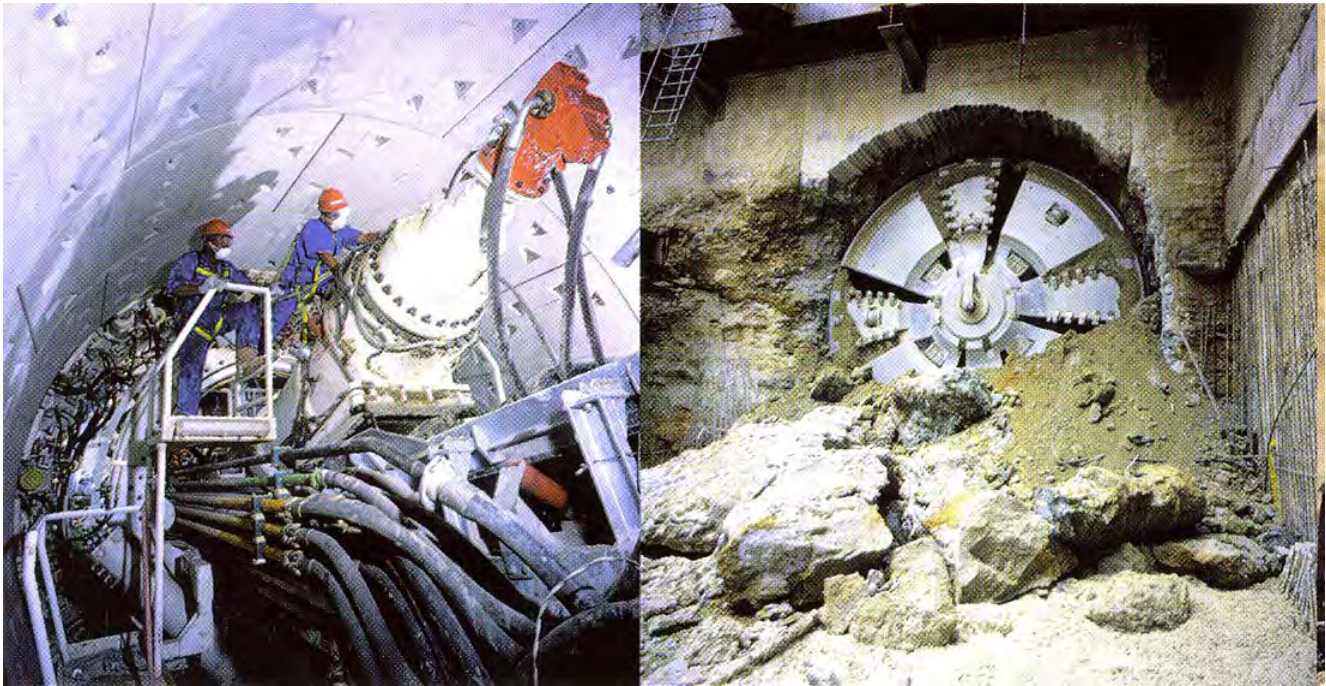
Estas circunstancias implican que los túneles gemelos se alinean ajustadamente dentro del ancho de la avenida y sus paredes externas resultan muy a menudo prácticamente tangentes a las fachadas de los edificios, acercándose dramáticamente a sus fundaciones, directas sobre zapatas aisladas en unos casos y profundas sobre pilotes en otros.



Metro de Caracas – Túneles gemelos en la Línea 4

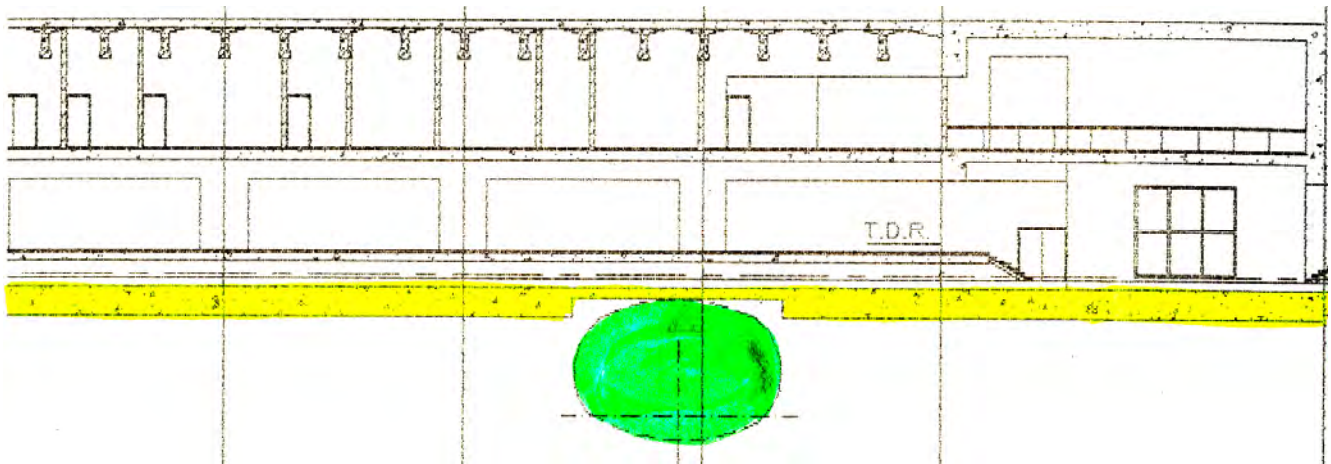
Afortunadamente las modernas tecnologías de las excavadoras TBM, permiten mantener las deformaciones alrededor de la excavación dentro de límites verdaderamente controlados, tal como por ejemplo ocurre con los escudos EPBS de última generación, que efectivamente se están empleando en la Línea 4 y que poseen características similares, aunque con menor diámetro, a las antes descritas para el escudo con el que se escava el Metro de Valencia.

Los anillos del revestimiento de la Línea 4, para el momento de la coconstrucción han cambiado, modernizándose respecto a los tradicionalmente denominados como estándar del Metro de Caracas. Ahora son del ventajoso tipo universal antes descrito, aún conservando el mismo espesor original de 22 cm, pero con una sección estructural maciza de espesor uniforme.



Metro de Caracas – Topa de tecnología EPBS para excavar los túneles gemelos de la Línea 4

En el otro extremo de la Línea 4 en construcción, finalmente, la última estación prevista prácticamente se apoya sobre el túnel de servicio preexistente que conecta las Líneas 1 y 3, denominado Túnel 1-3, lo cual nuevamente ha obligado durante las etapas del proyecto, a la propuesta de una interesante solución ingenieril.



Metro de Caracas – Estación Terminal de la Línea 4 y Túnel pre-existente de la Línea de servicio 2-3

FUTURO

<ul style="list-style-type: none">• 33 Kilómetros en 23 Túneles con excavación convencional, para el Ferrocarril Puerto Cabello – La Encrucijada <i>(construcción ya iniciada)</i>
<ul style="list-style-type: none">• 5 kilómetros de túneles gemelos con excavación mecanizada con EPBS entre Capuchinos y Parque Central, para la Línea 4 del Metro de Caracas <i>(construcción ya iniciada)</i>
<ul style="list-style-type: none">• 5 kilómetros de túneles gemelos con excavación mecanizada con escudos entre La Rinconada y El Valle, para la Línea 3 del Metro de Caracas <i>(construcción próxima por iniciar)</i>
<ul style="list-style-type: none">• 2 Kilómetros en 3 túneles con excavación convencional, para el Metro de Los Teques <i>(construcción próxima por iniciar)</i>
<ul style="list-style-type: none">• 5 Kilómetros de túnel de gran diámetro con excavación mecanizada con EPBS entre Cedeño y Guaparo, para el Metro de Valencia <i>(construcción por iniciar)</i>
<ul style="list-style-type: none">• Varios Kilómetros de túneles de autopistas en la región andina, en la región capital y en la oriental: Palo Grande-La Tinta-Fila de Caraballo-Mochima - <i>(construcción por decidir)</i>
<ul style="list-style-type: none">•

BIBLIOGRAFÍA

1. R. CENTENO W. "*Problemas relativos a la filtración de aguas en los revestimientos de los túneles urbanos de Caracas*". Primer Congreso Latinoamericano de Obras Subterráneas, Caracas- Venezuela, 1984.
2. G. PERRI A. "*Análisis numérico de pantalla de micropilotes anclada para la contra-cimentación de estructuras adyacentes al túnel del Metro de Caracas*". Primer Congreso Latinoamericano de Obras Subterráneas, Caracas- Venezuela, 1984.
3. G. PERRI A. "*Análisis Numérico de Interacción. Metro de Caracas*". (En colaboración con R. Centeno). VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 16 al 21 Agosto 1987, Cartagena - Colombia.
4. G. PERRI A. "*La tecnología CCP en el Metro de Caracas*". VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, 16 al 21 Agosto 1987, Cartagena - Colombia.
5. G. PERRI A. "*Interazione Terreno-Struttura nelle gallerie della Metropolitana di Caracas*". Congreso Internazionale di Geingegneria, del 27 al 30 Septiembre 1989, Torino - Italia.
6. G. PERRI A. "*Jet Grouting in Tunnelling: Consolidation in the "El Silencio" manouvering section of the second line. Caracas Subway*". Internacional Congress on Tunnel and Underground Works, del 3 al 7 de Septiembre 1990, Chengdu - China.
7. G. PERRI A. "*Inyecciones tipo 'Jet Groutin' en túneles: Consolidación en la sección de maniobras 'El Silencio' de la segunda línea del Metro de Caracas*". (En colaboración con H. Araya). 3er. Congreso Suramericano de Mecánica de rocas, 16 al 20 Octubre 1990, Caracas- Venezuela.
8. G. PERRI A. "*Análisis Numérico de un Túnel Urbano de Caracas*". IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, del 26 al 30 Agosto 1991, Viña del Mar - Chile.
9. G. PERRI A. "*Análisis Numérico para los túneles gemelos de La Bandera en la Línea 3 del Metro de Caracas*". Congreso Internacional Hacia Nuevos Mundos en Túneles, 16 al 20 mayo 1992, Acapulco - México.
10. G. PERRI A. "*Evolución de los Criterios y Métodos para el Análisis y Diseño Geotécnico Estructural de los Túneles Estándar del Metro de Caracas*". XII Seminario Venezolano de Geotecnia, del 3 al 7 Noviembre 1992, Caracas- Venezuela.
11. G. PERRI A. "*La problemática Geotécnica del Metro de Caracas presente en importantes Foros Internacionales*". XII Seminario Venezolano de Geotecnia, del 3 al 7 Noviembre 1992, Caracas - Venezuela.
12. G. PERRI A. "*Analysis and Prevention of the Damages that could be caused by the future Excavation of hydraulic tunnel very close to Caracas subway twin tunnels*". ISRM, International Symposium EUROCK 93, del 21 al 24 Junio 1993, Lisboa - Portugal.
13. G. PERRI A. "*Analysis of the effects of the two new twin tunnels excavation very close to a big diameter tunnel of Caracas subway*". International Congress on Tunnelling and Ground Conditions, del 3 al 4 Abril 1994, El Cairo - Egypt,.

14. G. PERRI A. "*Interacción entre dos nuevos túneles gemelos y un túnel de gran diámetro preexistente excavados en rocas descompuestas para el Metro de Caracas*". IV Congreso Suramericano de Mecánica de rocas, del 10 al 14 Mayo 1994, Santiago - Chile.
15. G. PERRI A. "*Construir el Metro de Caracas: el precio de lo bello*". (En colaboración con R. Alvarez). Caracas: memorias para el futuro. Gangemi Editore, 1995, Roma - Italia 1995.
16. G. PERRI A. "*Umbrella Arch: En el Ferrocarril Caracas – Cúa un método constructivo para túneles en terrenos difíciles basado en la versión moderna de la técnica del Marchavanti*". Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia, N°74, Junio 1998, Caracas- Venezuela.
17. G. PERRI A. "*Underground works and tunneling*". XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Agosto 1999, Iguazú - Brazil.
18. G. PERRI A. "*Actividades antropicas y estabilidad geotécnica a largo plazo del Ferrocarril Caracas-Cúa*". XVI Seminario Venezolano de Geotecnia, Noviembre 2000, Caracas - Venezuela.
19. G. PERRI A. "*Proyecto de túneles: Criterios de diseño*". Boletín de la Sociedad Venezolana de Geotecnia, N. 81, Enero 2002, Caracas - Venezuela.
20. G. PERRI A. "*La moderna tecnología 'EPBS' en la construcción de los túneles de gran diámetro de la Línea I del Metro de Valencia*". XVII Seminario Venezolano de Geotecnia, Noviembre 2002, Caracas - Venezuela.