

JIFI2018
JORNADAS DE INVESTIGACIÓN
ENCUENTRO ACADÉMICO INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍA UCV

EARTH PRESSURE BALANCE EL ARTE DE LA TECNOLOGÍA EN LAS EXCAVACIONES SUBTERRANEAS

Neomar González.¹

¹ *Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería.*

¹ neomar8522@gmail.com

RESUMEN

Para 1998, el estado venezolano oferta la licitación internacional, para la construcción de las obras civiles Línea IV del Metro de Caracas. Las obras son iniciadas por el Consorcio ganador de la oferta, el 16 de noviembre del 2000. Esta obra localizada en el Valle de Caracas, atraviesa suelos heterogéneos, constituidos por varios tipos de sedimentos: coluvionales, aluvionales, arcillosos y arenosos; en algunos casos se interceptan esquistos meteorizados e importantes cursos de aguas. Para poder enfrentar, 7332 m en túneles gemelos de excavación, de alta complejidad, se recurre a la última tecnología en el mercado mundial, como lo es el Sistema de Excavación Mecánica de Túneles en Terrenos Blandos, específicamente: **TBM_sEPB_m (Tunnel Boring Machine Shield Earth Pressure Balance Model)**, con la cual se garantizaría la ejecución de la obra, dentro de los estándares de calidad internacional, así como tiempo y costos óptimos en comparación con otros métodos convencionales. Con esta investigación, pretendemos demostrar las bondades del sistema tecnológico empleado, en particular para el suelo presente en el Valle de Caracas, así como incentivar en nuestros jóvenes profesionales identificados con las obras subterráneas, el conocer, comprender y aplicar dicha tecnología, a los proyectos que se puedan presentar en el futuro en nuestro país.

Palabras Clave: Túneles Gemelos, Excavación Mecanizada, Escudo Presurizado, Escudo TBM, Equilibrio de Presión de Tierra.

ABSTRACT

For 1998, the Venezuelan state offers the international tender for the construction of civil works Line IV of the Caracas Metro. The consortium winner of the offer initiates the works, on November 16, 2000. This work located in the Valley of Caracas, crosses heterogeneous soils, constituted by several types of sediments: colluvial, alluvial, clayey and sandy; in some cases, weathered shale and important water courses are intercepted. In order to face, 7332 m in twin excavation tunnels, of high complexity, we use the latest technology in the world market, such as the Tunnel Mechanical Excavation System in Soft Terrains, specifically: **TBM_sEPB_m (Tunnel Boring Machine Shield Earth Pressure Balance Model)**, which would guarantee the execution of the work, within the international quality standards, as well as optimal time and costs in comparison with other conventional methods. With this research, we intend to demonstrate the benefits of the technological system used, in particular for the soil present in the Caracas Valley, as well as to encourage our young professionals identified with underground works to know, understand and apply said technology to projects that may arise in the future in our country.

Keywords: Twin Tunnels, Mechanized Excavation, Pressurized Shield, TBM Shield, Earth Pressure Balance.

SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación. Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

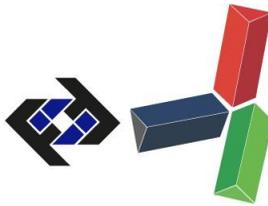
INTRODUCCIÓN

En el año 2003, el presidente de la ITA (International Tunnelling Association), [1] Andre P, Assis en un artículo escrito expresó, “Las obras subterráneas necesitan adecuarse y perfeccionar los métodos constructivos”. Este comentario encierra y expresa el espíritu que se desarrolló para enfrentar, el material heterogéneo que se encuentra en el subsuelo de la Línea IV del Metro, en el Valle de Caracas y ejecutar la excavación de los túneles gemelos a baja cobertura, en una zona altamente edificada, con una alta densidad de servicios públicos subterráneos y superficiales, por lo que se optó por la adquisición por parte del Consorcio que ejecutaba la obra, de dos escudos. La **TBM-186 (Tunnel Boring Machine-186)** y la **TBM-187 (Tunnel Boring Machine)**, figura 3, convertibles ambas al tipo **EPBm (Earth Pressure Balance Model)** de 5,86 metros de diámetro cada una, fabricadas en Alemania por la Empresa *Herrenknecht*, bajo nos parámetro de selección, figuras 1 y 2. Los primeros 600 metros aproximadamente, figura 10, la primera tuneladora, la TBM-186 que comenzó a excavar tuvo un buen desempeño, con rendimientos superiores a los esperados por la curva de aprendizaje planeada ya que la zona a excavar, tenía un alto contenido de arena y las presiones del nivel freáticos eran bajas, próximas a los 0,7 bars. El sistema EPBm, figura 6, está diseñado para reducir al mínimo la pérdida de presión en el frente de excavación, así como en el área perimetral de los tres cuerpos articulados de la maquina escudo y en la cola del mismo para así garantizar principalmente que los asentamientos figura 8 y elevaciones superficiales, figura 9, junto con los movimientos laterales, en donde se confluye el conjunto, “tuneladoras acción de excavar “se mantengan dentro de los límites de tolerancia. Es de suma importancia que se mantenga el control del volumen excavado que pasa, a la cámara de excavación, originándose entre las partículas del suelo, en presencia de agua, vacíos y acondicionantes para el suelo, una presión que se suma a la generada por la cabeza de corte en el frente de excavación, para así garantizar el éxito de la operación *EPBm*. Esta fuerza total se equilibra con la resultante de la presión columna de tierra a excavar y la hidrostática que se encuentra en el frente de excavación, figura 6. Las Normas Venezolanas, Covenin 2247-91, *Requisitos de Seguridad* y el control de calidad operativo en la excavación, nos proporciona el no permitir daños a edificaciones, servicios públicos y privados en superficie, salvaguardando de esta manera vidas humanas. El avance de la maquina tuneladora, activa una fuerza adicional llamada de Empuje, que en conjunto con el equilibrio de presiones antes mencionadas permite el llamado “Sistema de Sellado”, lo cual impide el ingreso de agua, suelo y rocas, material excavado hacia el interior de la máquina, garantizando así un ambiente seguro para los trabajadores en el interior de la tuneladora. Durante la excavación del tramo entre la subestación Parque Los Caobos y antes de llegar a las edificaciones del Parque Central, hubo un aumento en el Empuje total de la tuneladora, TBM-186 en el túnel *CVD (Capuchinos/Plaza Venezuela/Derecho)*, lo que permitió identificar un excesivo desgaste en las herramientas de la cabeza de corte debido al alto grado de abrasividad, de las rocas encontradas, durante la excavación. Los discos de corte dotados con la maquina original en Alemania no lograban romper los peñones de roca dura, ubicados en la matriz coluvial y como la apertura existente en la rueda de corte era pequeña en comparación al tamaño de las rocas, los mismos no podían ser extraídos por el tornillo sin fin, lo que originaba que el material rocoso quedase rodando y girando en frente de la máquina, desgastando progresivamente la cabeza de corte. A medida que avanzaba la máquina, la misma entraba en una zona con mayor densidad de rocas y de piedras, las cuales a su vez tenían un alto grado de abrasividad, generaron un excesivo

desgaste, no solo en las herramientas de corte, sino en las bases donde se colocaban las herramientas y la superficie de la rueda de corte. El aumento de las presiones, sumadas a la pequeña cantidad de finos y a la alta permeabilidad de los materiales, no permitieron un buen acondicionamiento, figura7, con aditivos para el amasado del suelo, trayendo como consecuencia que la maquina no trabajara como sistema *EPBm*. Además debido a las constantes perdidas de presión que se generaban, durante la abertura del tornillo sin fin y la cantidad de finos extraídos por la máquina, que eran transportados dentro de la correa transportadora conjuntamente con agua, produjo como consecuencia la perdida de cimentación en el frente de excavación, por lo cual la máquina realizaba una excavación en roca y piedra suelta produciendo un incremento mayor de desgaste en todos los diferentes niveles de superficie en la cabeza de corte. Para continuar con la excavación y con la producción industrializada que se había logrado en el túnel que se venía excavando, se decidió realizar una intervención en la rueda de corte, es decir, la maquina *TBM-186*, la cual ya estaba retrasada según el cronograma de planificación de la obra y para acceder a la misma, de manera segura y efectiva, se procedió a la realización de un pozo vertical (*Shaft*) con la ayuda de una cortina de pilotes secantes. Dentro de las alteraciones mecánicas principales que se realizaron en las herramientas de corte, fue el cambio de todos los discos de corte por los llamados discos tipo cónicos con el fin de aumentar la tensión de corte, así como la reconstrucción y reforzamiento de las bases en toda la superficie y corona de la rueda de corte. Además, se instaló una cámara hiperbárica dentro del equipo, para poder realizar intervenciones a futuro dentro del mismo frente de excavación, controladas con aire comprimido y personal especializado en esta labor, con lo cual se mejoró el desempeño y rendimiento de producción de la maquina tuneladora. En la *TBM-187*, que escavaría en el túnel *CVI* (Capuchinos/Plaza Venezuela/Izquierdo), se tomaron las previsiones realizando todas las modificaciones apropiadas que se había ya hecho en la *TBM-186*, antes de iniciar la excavación. Otro de los retos a solventar en los túneles gemelos a excavar, fue la alteración en el alineamiento vertical, para poder pasar por debajo de las fundaciones de un sistema complejo de puentes, figura 13, que son parte de un distribuidor vial de la autopista Francisco Fajardo (Distribuidor Mohedano), lo que se logró profundizando más la excavación de los túneles haciendo que aumentara la presión hidrostática, figura 14. Las maquinas debido a los cambios previos, hechos en su sistema, lograron solventar la excavación hasta el final de la línea. Algunos inconvenientes que se presentaron antes de llegar a la Estación Capuchinos, que afectaban el avance de excavación, fueron de índole de mantenimiento preventivo, como el cambio de herramientas de cortes etc, y tipo correctivos inherentes a las maquinas. Otras paralizaciones en el avance en las *TBM-186* y *TBM-187*, fueron por causa de recalce de fundaciones, tratamiento de *Jet Grouting* en edificaciones adyacentes o colineales con el alineamiento de los túneles. Basándonos en lo anteriormente descrito, hemos demostrado una vez más el criterio técnico que prevaleció para la escogencia de las maquinas tuneladoras, [2] **Babendererde, L.H., (1999), “Criterio para la Selección de TBM”.**

METODOLOGÍA

En el avance con la *TBM*s*EPBm*, en el caso de la Línea IV del Metro de Caracas, se generó una excavación de longitud 1,40 metros, en un diámetro de 5,86 metros y que al finalizar el mismo se comienza con el ciclo de la instalación de las llamadas dovelas, (segmentos), figura4, de concreto armado de una resistencia mínima de 450 kg/cm², para conformar luego lo que se denomina el



armado del anillo universal liso que será el revestimiento. Ese izamiento de las dovelas, figura 5, se logra a través de un equipo rotatorio elevador de carga llamado, erector, para posicionar estos segmentos. Los cilindros de empuje de la *TBM*, se apoyan en el revestimiento instalado, procediendo al nuevo avance de excavación. Al mismo tiempo se bombea *grouting* a través de unos conductores de inyección insertados en la lámina metálica de la cola o parte trasera del escudo, para rellenar el vacío o espacio anular, dejado entre el perímetro de excavación y el perímetro externo del anillo, para conformar lo que se denomina *cimiento del anillo*. Cuadros representativos para la Selección de la Maquina *TBM*sEPBm

Figura 1. Criterio de Selección *TBM* [2].

Figura 2. Distribución granulométrica ideales Para la tecnología EPB [2].

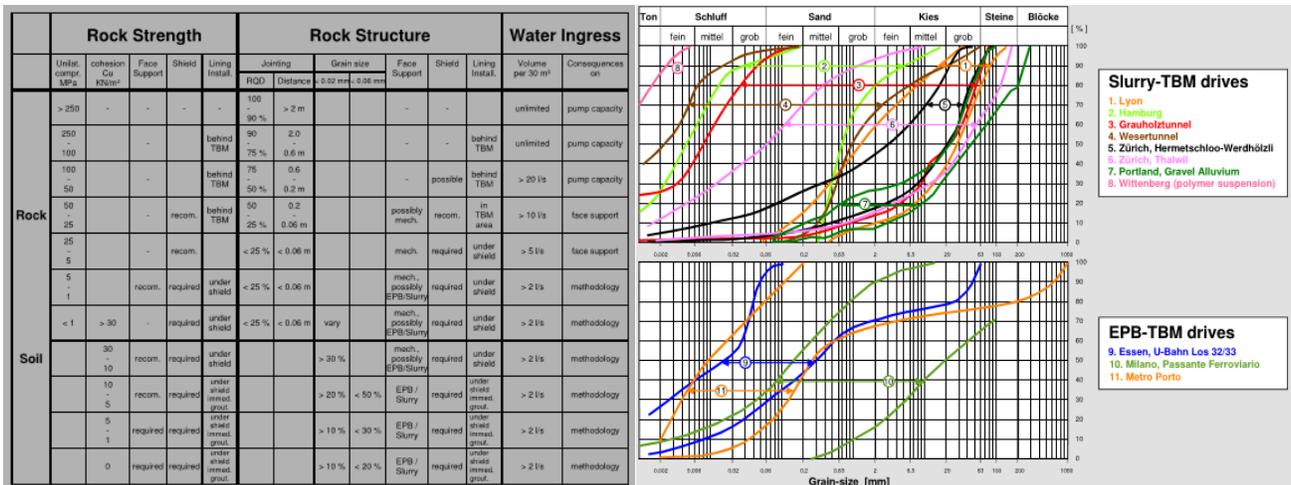


Figura 3. Plano de la Tuneladora *TBM*s-186 [3].

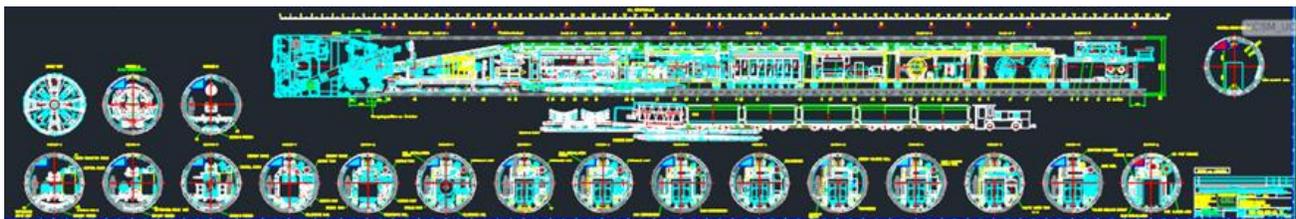
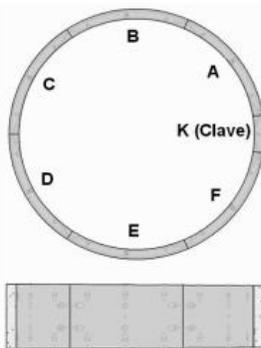


Figura 4. Secuencia de ensamble de un anillo universal Liso. [4].



Espesor del anillo:	22 cm;
Longitud:	1,40 m;
Tipo:	Universal liso
Composición del anillo:	06 segmentos mas la clave
Resistencia del concreto:	450 kg/cm ²
Diámetro Interno:	5,16 m
Diámetro Externo:	5,60 m

Figura 5. Manipulación con Erector. [3].



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Figura 6. Presiones en el frente de excavación [5].

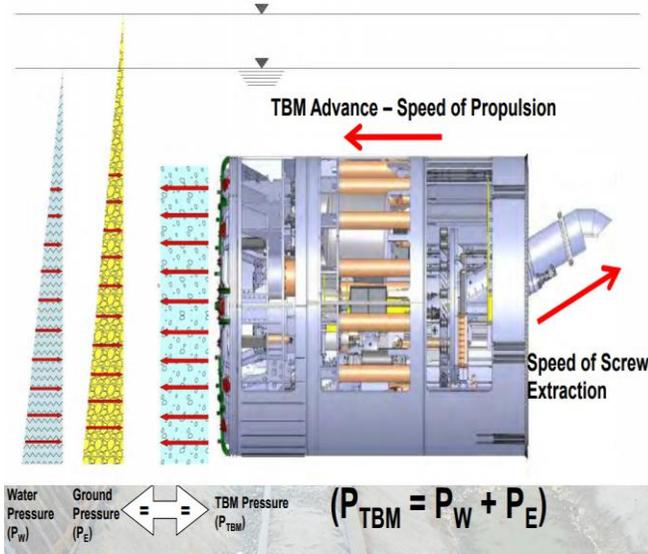


Figura 7. Efecto de presión en con acondicionantes. [7].

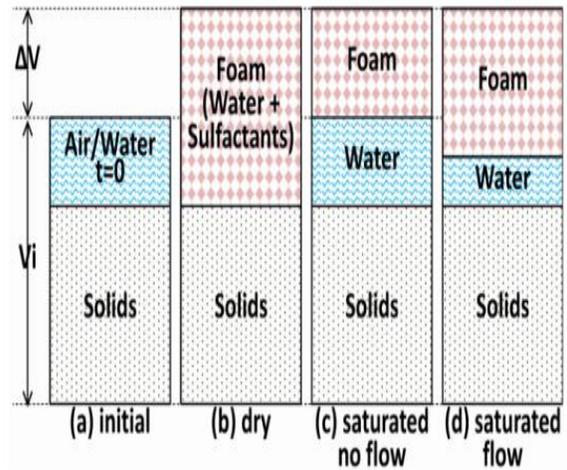


Figura 8. Asentamientos Superficiales [6].

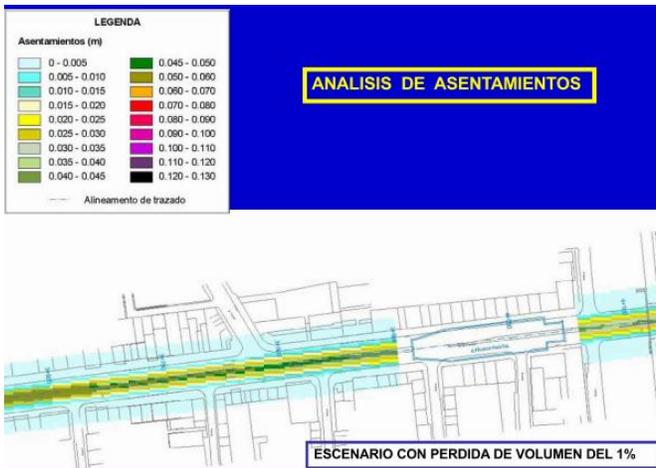


Figura 9. Influencia de la TBM [3].

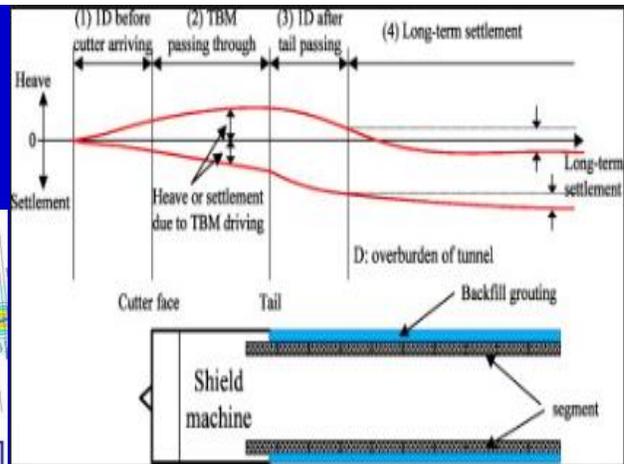


Figura 10. Progreso excavación de la *TBM-186* y *TBM-187*, por el Distribuidor Mohedano [3].

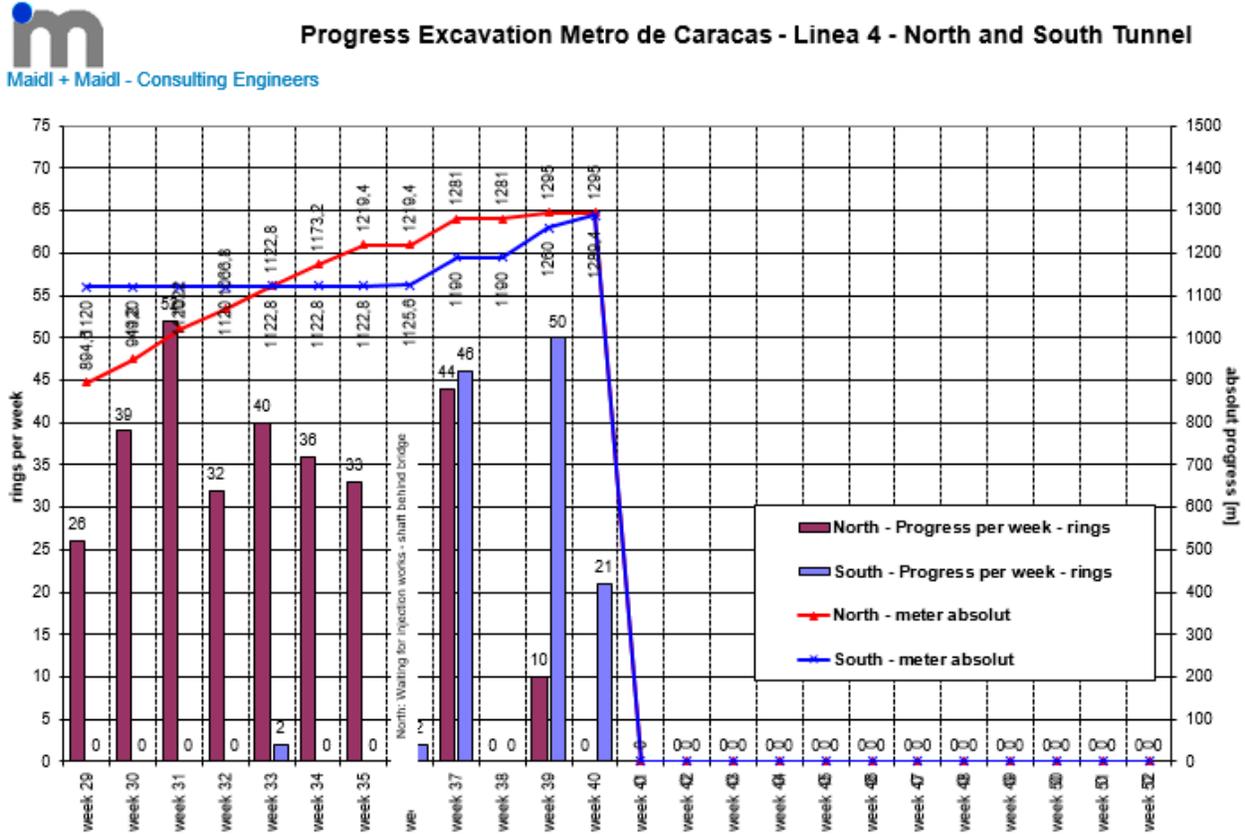


Figura 11. Presión de Tierra *TBM-187* [3].

Figura 12. Presión de Tierra *TBM-186* [3].

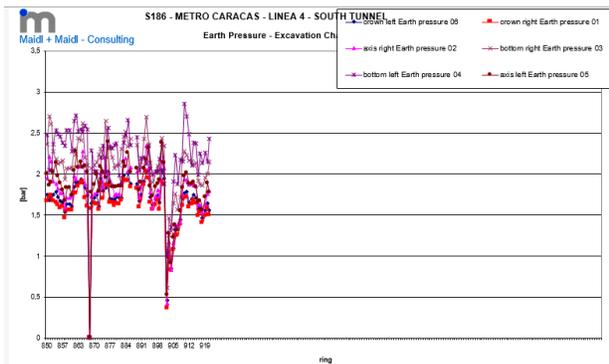
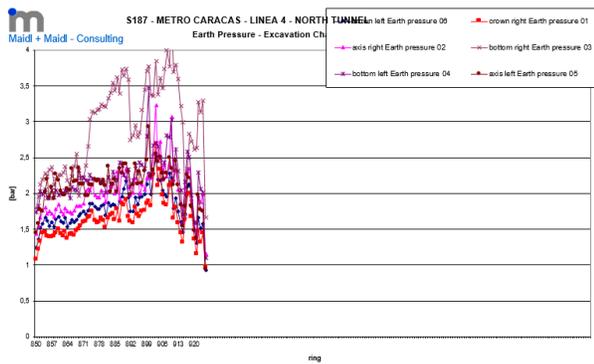


Figura 13. Malla del Método de Elemento Finito, TBM-187 paso del Distribuidor Mohedano. [3].

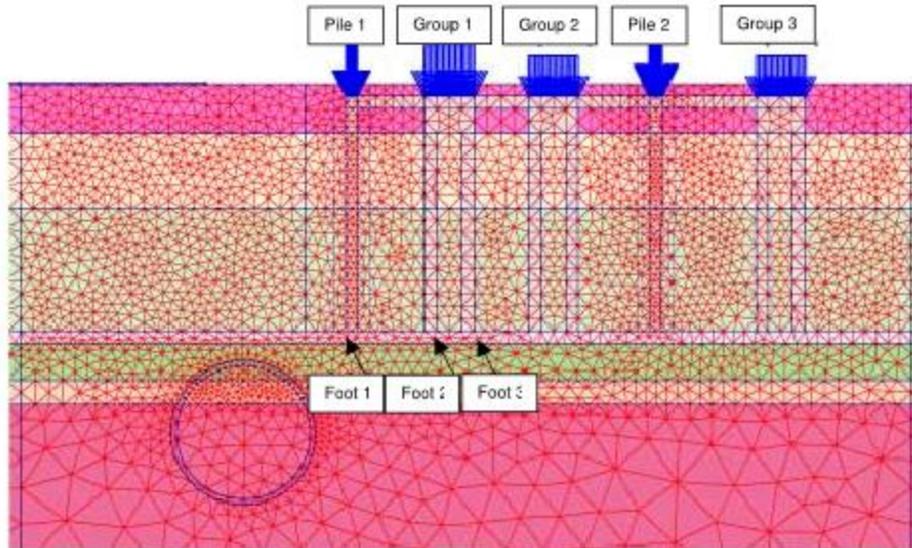
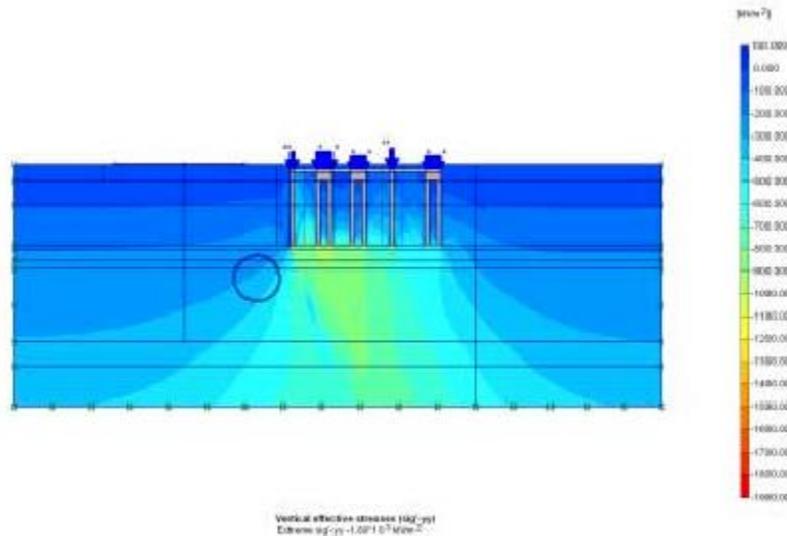


Figura 14. Diagrama de esfuerzos verticales principales. [3].



CONCLUSIONES

La Tecnología *TBM* actualmente, como pudimos observar, constituye una base sólida para la construcción de túneles a través de procesos altamente confiables y eficientes. Por lo tanto, es importante tener un conocimiento, como profesionales del área, amplio de todas las condiciones de un proyecto de una obra subterránea. Desde su etapa conceptual y de planificación, así como llevar un acompañamiento durante su ejecución y puesta en servicio. Nos percatamos, que la



información geológica es de particular interés debido a que el diseño de la maquina se adaptara a las condiciones geológicas existentes en el alineamiento de los túneles. Pudimos concientizar que los requisitos de seguridad y de gestión integral de riesgo, jugaron un papel cada vez más importante, para todas las partes involucradas en el diseño y construcción de túneles en zonas altamente pobladas, es decir, garantizar asentamientos dentro de las tolerancias, subsidencias mínimas y sobre todo seguridad a las personas involucradas directa o indirectamente en el proyecto en plena ejecución. Podemos afirmar que solo los conceptos y el personal calificado que posean credibilidad y confiabilidad técnica probadas, tendrán la oportunidad de ser los que superen el reto en el futuro inmediato, como es concluir la Línea 5 y el Metro Caracas-Guatire, las cuales hoy en día se encuentran paralizadas. Así como enfrentar, cualquier desarrollo de la Ingeniería de transporte macizo subterráneo, tan necesario en nuestra ciudad capital.

REFERENCIAS

- [1] André. P, Assis (2003). «Soluciones subterráneas para problemas urbanos».
- [2] Babendererde. L, H (1999). « TBM drives in Soft Ground- weak points in process engineering and their consequences» In Proc. of the World Tunnel Congress 99, Oslo, Norway.
- [3] Consorcio Línea IV, C.A. «Sala Técnica», (2004).
- [4] Consorcio Línea IV, C.A. «Línea 4 del Metro de Caracas. Desafíos y soluciones de ingeniería en una obra de transformación urbana», (2006).
- [5] Earth Pressure Balance TBM, Benny, L, (2017).
- [6] Gianfranco, P. (2008). III Seminario Andino de Túneles. (2008), «Construcción Mecanizada de Túneles Urbanos mediante “TBM”».
- [7] TBM Pressure Models-Observation, Theory and Practice, Tiago, D. Adam, B, (2015).

