

La Moderna Tecnología “EPBS” en la Construcción de los Túneles de gran diámetro de la Línea 1 del “Metro de Valencia”

Gianfranco Perri - Profesor de Proyecto de Túneles Universidad Central de Venezuela - Ingeniero Consultor

INTRODUCCIÓN

Los túneles de la Línea 1 del Metro de Valencia, actualmente en construcción, se están excavando con una maquina TBM (*Túnel Boring Machine*) escudada de gran diámetro (9.5 metros), en terrenos constituidos por suelos arcillosos y arenosos, bajo nivel freático y bajo coberturas que varían dentro de un rango aproximado de 7 a 20 metros.

Tal obra se está excavando, aceleradamente (rendimientos de hasta 20 anillos por día: 30 m/d) con seguridad para el personal técnico y obrero y para las infraestructuras adyacentes sub-superficiales y en superficie, gracias al empleo de la mas avanzada tecnología actualmente disponible para la excavación mecanizada de túneles de gran diámetro en ambiente urbano y en condiciones geotécnicas difíciles: EPBS (*Earth Pressure Balanced Shield*).

El proyecto de los túneles del Metro de Valencia ha sido elaborado por el autor con la asesoría de la sociedad *GEOmecDATA Ingeniería de Túneles* y la construcción está a cargo de la empresa venezolana *Ghella-Sogene* para la Alcaldía de la ciudad de Valencia.

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, de allí se extiende a lo largo de la Avenida Bolívar hasta la estación Miranda, con un recorrido de doble vía de aproximadamente 5 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, está siendo construida en subterráneo, mediante el uso de una máquina de excavación integral escudada, tipo EPBS, con diámetro de excavación de 9.519 metros.

Entre las estaciones Las Ferias y Miranda, del tramo en construcción, están previstas 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, hasta Guaparo (figura 1).

EL SUBSUELO

La ciudad de Valencia se desarrolla en la llanura del lago que lleva su mismo nombre y en general, los terrenos interceptados por la excavación del 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 a 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 a lo largo de los tramos de línea en construcción .

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 según lo que se ilustra en la figura 2.

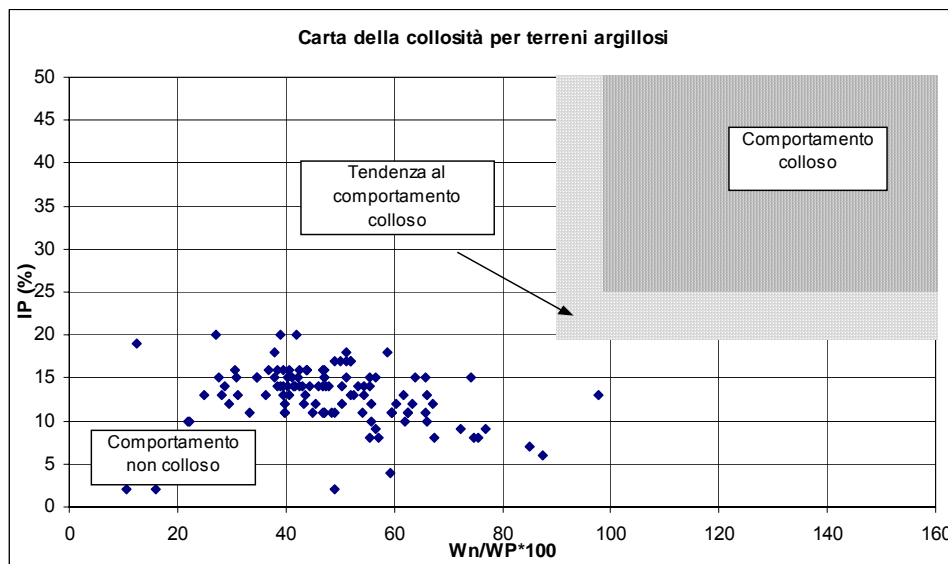


Figura 2: Carta del comportamiento stickyness de lo terrenos a ser afectados por el trazado

EL TÚNEL

El túnel de 4221 mm de radio interno neto (figura 2) está siendo construido de manera totalmente mecanizada, mediante el uso de una maquina TBM de fabricación LOVAT, escudada y con la posibilidad de controlar las presiones en el frente de excavación mediante la adecuada aplicación de presiones de estabilización y control (EPBS).

El túnel esta siendo soportado y revestido mediante secuencia única integrada a la excavación, con anillos prefabricados en concreto armado largos 1.5 m, compuestos de 7 (6+1 clave) elementos de espesor igual a 40 cm y diámetro interno igual a 8.442 m.

El confinamiento del terreno circundante la excavación está garantizado en general por el escudo de acero de la TBM, luego al frente por la presión ejercida por la cabeza de la TBM en presión (EPB) 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 se garantiza 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.

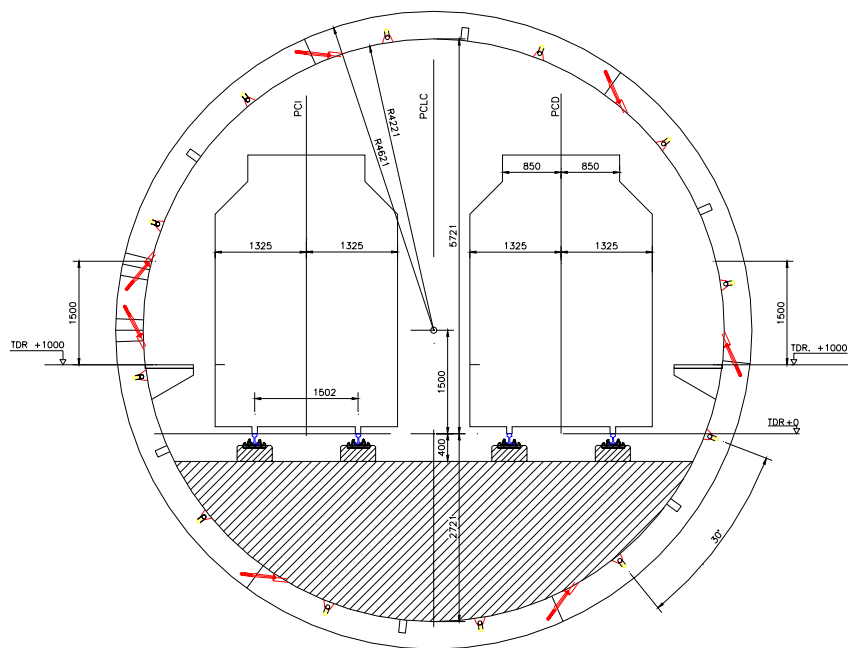


Figura 3: Datos geométricos básicos de la sección del túnel

LA TECNOLOGÍA EPBS

La tecnología EPBS permite además que mantener la estabilidad del frente de excavación, minimizar los asentamientos que se pueden producir en superficie durante la excavación con escudos a cabeza rotante, estabilizando el frente por 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, solo en la misma cantidad que se excava, manteniendo dentro de la cámara de tierra al frente un volumen prácticamente constante.

Para evitar los asentamientos en la cola del escudo, esta tecnología está además 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 misma del escudo.

Si en el frente de excavación está presente un terreno que contiene un porcentaje mayor o igual a aproximadamente un 30% de “finos” (pasantes al tamiz 200), es suficiente añadir solo la cantidad de aguas, si hiciera falta, necesaria para obtener una mezcla de suelo excavado que sea: suficientemente impermeable y suficientemente viscosa, y por ende capaz de 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.

En la práctica siempre se utilizan aditivos para acondicionamiento y para así corregir los cambios en la humedad y en la granulometría del terreno excavado en el frente y a tales efectos, se utilizan espumas para sustituir los finos faltantes y el agua intersticial, mientras que, en los casos de frentes con predominio absoluta de arenas y/o gravas, se añadirán polímeros para aumentar la viscosidad del agua intersticial y así disminuir la permeabilidad en el frente y en la cámara.

Durante cada avance del escudo, se deben inyectar al frente y en la cámara los aditivos necesarios para: mantener estable la presión de equilibrio y minimizar el torque en la cabeza de corte y en el sinfín, ya que el terreno acondicionado correctamente deberá ser lo suficiente fluido con escasa resistencia a la mezclanza y a la extracción.

El control de los dos parámetros (torque y presión) permite excavar con correcto balance. El operador debe para esto modificar oportunamente la velocidad de avance de los cilindros de empuje y el flujo y la dosificación de los aditivos inyectados.

Por ejemplo, si el torque en la cabeza aumenta manteniéndose la presión en la cámara y el torque en el sinfín se debe aumentar la inyección en el frente. Si al contrario, con un bajo torque en la cabeza disminuye la presión en la cámara, se deberá aumentar la velocidad de avance y/o disminuir la rotación del sinfín de extracción y viceversa, aumentando la presión en la cámara se deberá disminuir la velocidad de avance.

Para una correcta operación con el sistema EPBS, en principio se deberá poder controlar, durante la excavación:

La presión de tierra en el frente de excavación (arriba, al centro y abajo), adecuadamente señalada por celdas instaladas en la cámara de presión - El torque en la rueda de corte - El torque en el sinfín - La dosificación y el flujo de los aditivos inyectados al frente - La velocidad de penetración del escudo y el flujo teórico de extracción de tierra el cual se compara con el volumen realmente extraído (numero de vagonetas) - La presión de inyección en el trasdós del revestimiento y la cantidad inyectada del relleno en la cola del escudo.

Finalmente, para la instalación del anillo, se deberá controlar la posición del escudo respecto al anterior anillo instalado y por ende cual secuencia de instalación de las dovelas se debe implementar para corregir las eventuales distorsiones angulares entre ejes del anillo y escudo.

CARACTERÍSTICAS DE LA TBM

La máquina excavadora (TBM) de escudo completo Lovat, utilizada para el proyecto, tiene un diseño de su cabeza cortadora (figura 4) para trabajar con frente cerrado y está equipada para la extracción del material mediante un tornillo sin fin, ubicado en posición baja dentro de la sección para permitir la excavación en modo de presión balanceada en el frente (EPB).

La estructura básica de la cabeza cortante prevé aberturas que son capaces de cerrarse a través de una válvula que controla las puertas de entrada permitiéndose al operador ajustar la cantidad de abertura de la cabeza cortadora dependiendo de las condiciones del terreno: en arenas bajo el nivel freático, las aberturas pueden ser reducidas para controlar el flujo entrante del terreno, mientras que en arcillas las aberturas pueden ser agrandadas para facilitar la entrada libre de material dentro de la cámara de la cabeza cortadora.

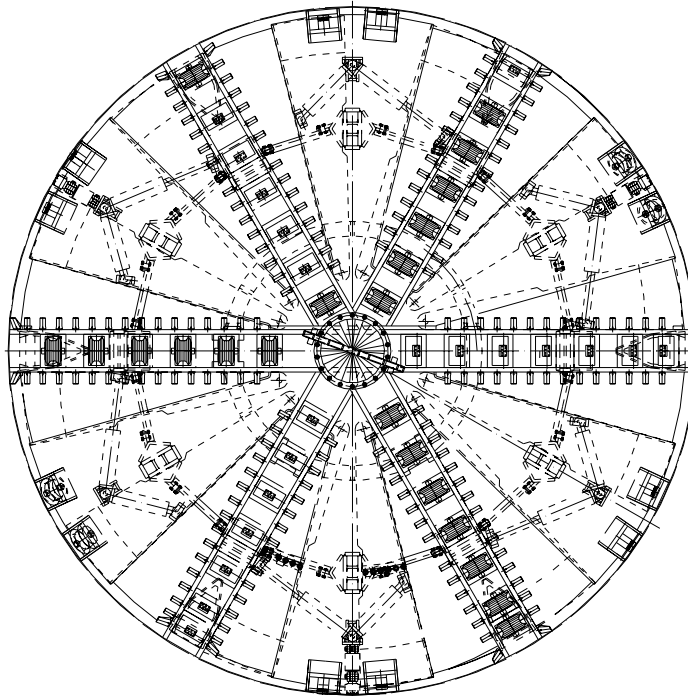


Figura 4: Cabeza cortadora de la TBM - EPBS

Dentro del perímetro cortante están alojadas las diferentes herramientas cortantes, distribuidas para maximizar la efectividad de excavación: 228 dientes de rastrillos y 88 escarificadores.

Adicionalmente a los dientes de rastrillos y a los dientes escarificadores se pueden alojar discos cortadores intercambiables que pueden ser instalados en las mismas aberturas que se usan para los dientes escarificadores. Estos discos serían usados para romper los eventuales cantos (no previstos a ser encontrados en esta obra) hasta dimensiones que puedan ser “digeridos” por el tornillo sin fin.

Tan importante como las herramientas que cortan el terreno, son los agentes acondicionadores que son agregados al terreno en la cámara del frente para aplicar y mantener la presión necesaria y para ello es fundamental la presencia y el buen funcionamiento de la junta para el fluido de rotación cuya función es transferir este fluido desde el escudo fijo a la cabeza cortadora rotante.

El operador puede inyectar a presión y dosificar: espuma, polímeros, agua, o cualquier combinación de acondicionadores del terreno, a cualquiera o todos los puertos de inyección.

El adecuado uso del acondicionamiento del terreno es la llave al éxito de la operación de EPB en la TBM ya que mediante la regulación de la inyección de los agentes acondicionadores del terreno en el frente, el operador puede mantener un mayor tiempo de mezclado el cual asegurará que habrá una buena distribución de los agentes a través de la masa terrosa recién excavada. También se puede acondicionar el terreno a lo largo de la longitud del sinfín.

Otra fundamental variable de control de la operación de la TBM es la velocidad de rotación (de 0,0 rpm a 2,07 rpm). El torque de la cabeza cortadora es constante para velocidades desde 0,0 rpm a 1,03 rpm a una rata de 2542 toneladas metro. El torque a la velocidad máxima de la cabeza cortadora de 2,07 rpm es 1271 toneladas metro. Se puede obtener un pico máximo de torque inicial de 3050 toneladas metro.

Un centro de control automático (PLC) de las operaciones de la TBM está localizado dentro del equipo, próximo a la cabeza rotante. Monitorea y suministra toda la información relativa a la mecánica hidráulica y electricidad del equipo y a la geometría y volumetría de la excavación, en tiempo real y gravando de manera digitalizada para conformar un detallado registro histórico de todo el proceso.

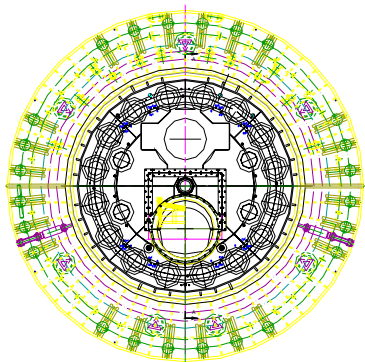
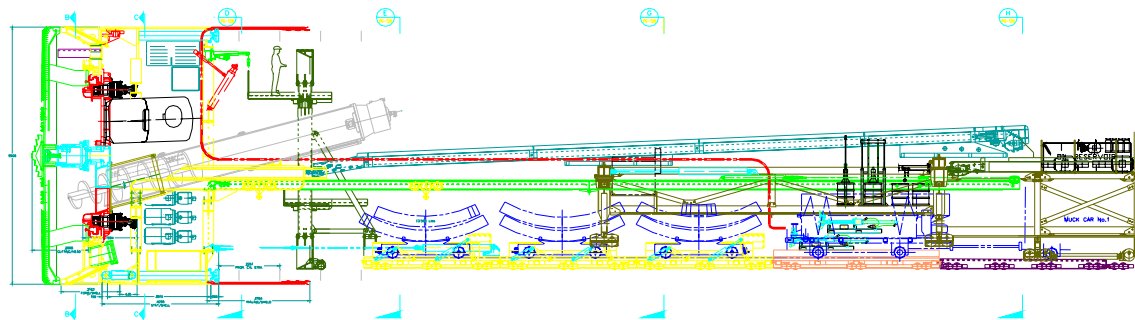
Todos los datos monitoreados están disponibles a la vista del operador el cual, coadyuvado por todo un sistema de señalizaciones de umbrales y de alarmas, puede intervenir instantáneamente en el control de las operaciones y del proceso mismo.

El operador está asistido por otros pocos técnicos (3 a 4) que intervienen esencialmente durante las etapas del montaje de los segmentos del anillo de revestimiento (unos 20 minutos a cada ciclo de aproximadamente 1 hora), esencialmente para el izado e impernado temporal de los 7 elementos de concreto armado que conforman cada anillo.

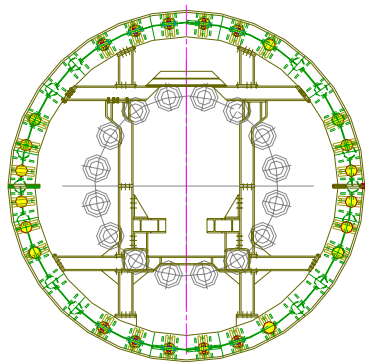
Se reporta una tabla algunas de las especificaciones básicas mas características de la TBM y la figura 5, muestra la sección longitudinal del conjunto: Cabeza-escudo-Backup de la TBM.

Especificaciones Básicas de la TBM LOVAT (EPBS)

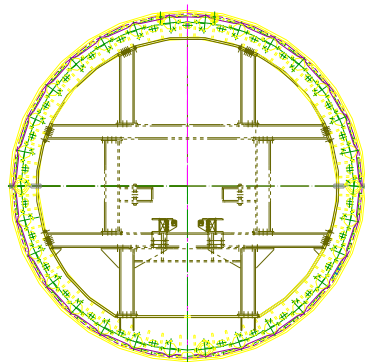
Diámetro excavación	9.519m
Longitud del escudo + Backup	180 m
Peso de la TBM + Backup	990 ton est.
Velocidad de avance de diseño	8 cm/min
Mínimo radio de curvatura	300 m
Conicidad del escudo	13mm
Potencia total instalada	5 100 kw
Torque de la cabeza cortadora	1 022 t.m @ 1,97 rpm
Máximo torque de la cabeza cortadora	2 043 t.m @ 0,98 rpm
Torque pico de la cabeza cortadora	2 452 t.m
Presión de diseño sello estático	8 Kg/cm ²
Potencia de la cabeza cortadora	2 700 kw
Diámetro de tornillo sin fin	1,1 m
Potencia del tornillo sin fin	300 kw
Numero gatos de empuje	30
Empuje por gato a 340 Kg/cm ²	180 t/gato
Empuje máximo total a 340 Kg/cm ²	5400 t
Empuje por gato a 408 Kg/cm ²	215 t/gato
Empuje máximo total a 408 Kg/cm ²	6450 t
Carrera de los gatos	2.250 m
Dimensiones zapatas de empuje	813 mm * 311 mm
Area zapatas de empuje	2445 cm ²
Radio cilindro de empuje	4437 mm



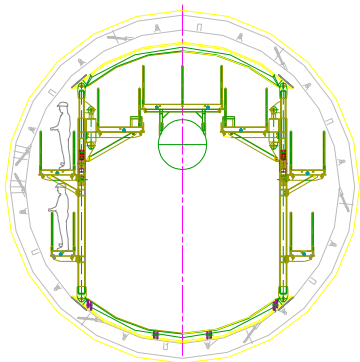
SECCION B-B 1:500



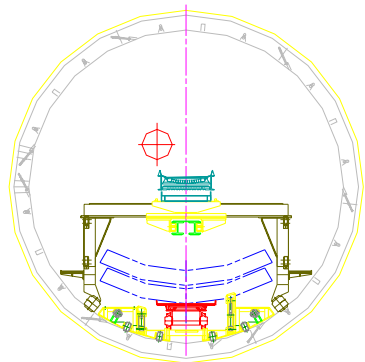
SECCION C-C 1:500



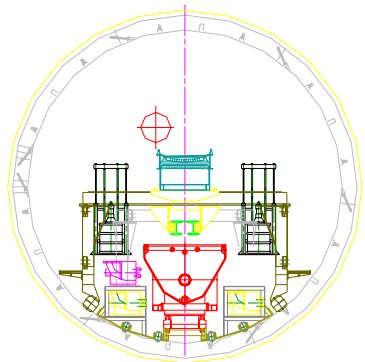
SECCION D-D 1:500



SECCION F-F 1:500



SECCION G-G 1:500



SECCION H-H 1:500

Figura 5: Cabeza – Escudo – Backup (parcial) de la TBM EPBS LOVAT

EL REVESTIMIENTO

El revestimiento del túnel del Metro de Valencia 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.

Ya que la TBM avanza y excava apoyándose en la secuencia de anillo ya montada, el dimensionado y la verificación de los segmentos que conforman los anillos, dependen en gran parte de las condiciones de interacción con el sistema de empuje de la máquina (gatos).

El anillo diseñado 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 efectos, 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 (figura 6).

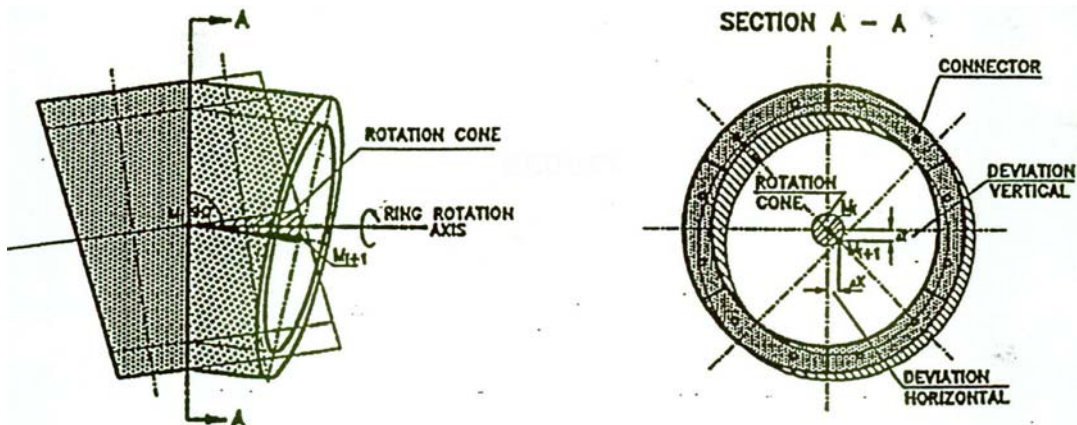


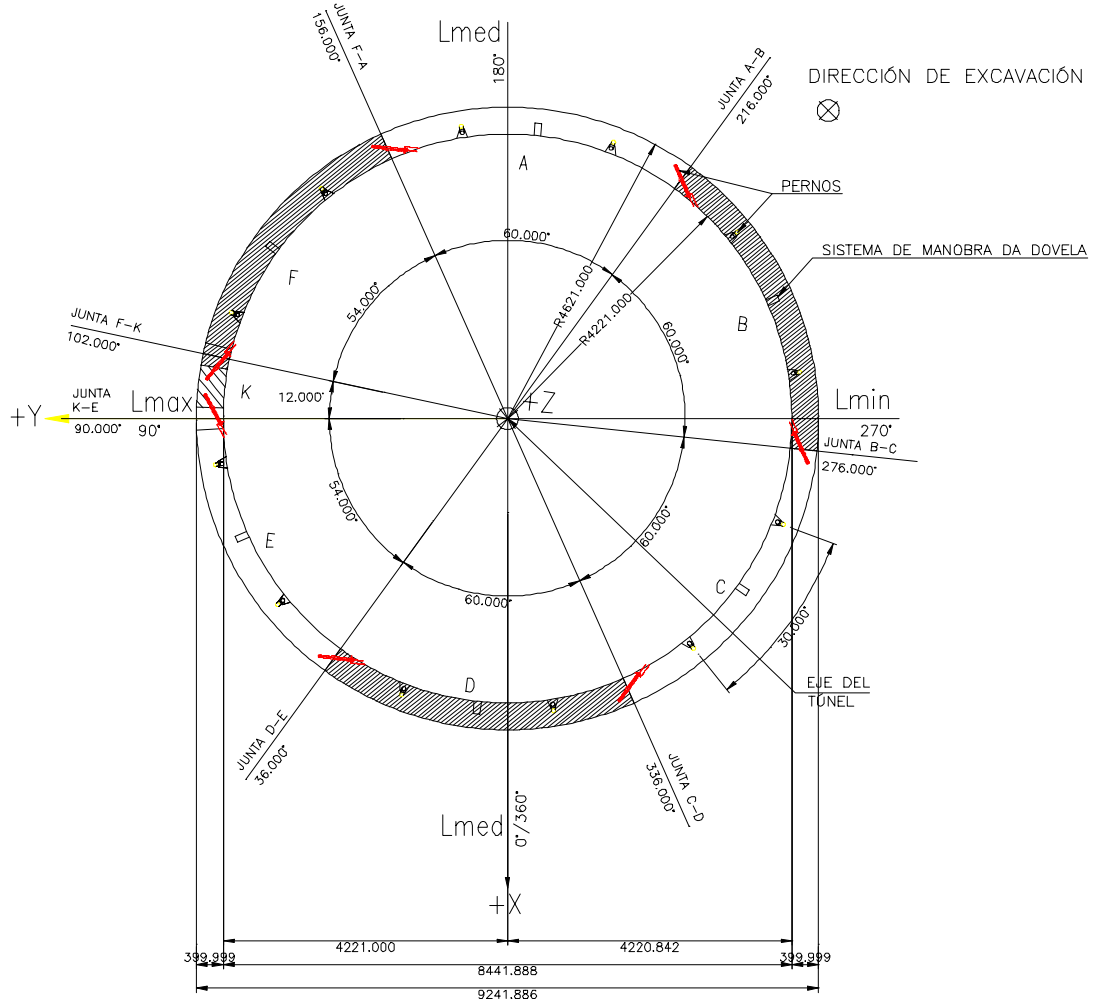
Figura 6: Esquema conceptual del anillo universal

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 una rotación permitida para obviar tal inconveniencia.

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 mínima (figura 7).

SECCION A-A - ESCALA 1:50



VISTA EXTERIOR SUPERIOR - ESCALA 1:50

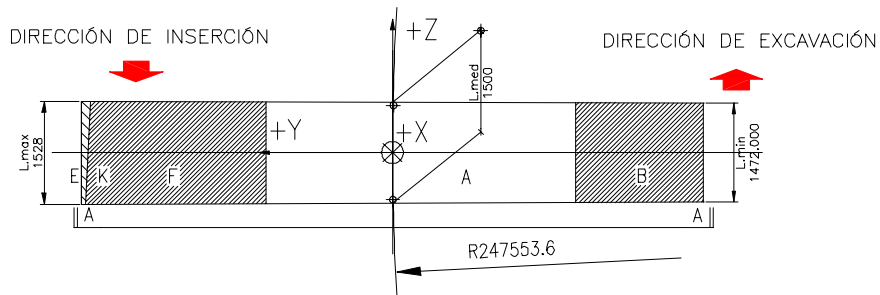


Figura 7: Características geométricas del anillo universal

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 (figura 8).



Figura 8: Esquema la secuencia de anillos universales en curva de radio mínimo ($R=300m$)

Tal secuencia es teórica porque asegura exclusivamente que el anillo proyectado estará en grado de seguir el trazado con la precisión requerida. No obstante, durante la fase de instalación en obra la secuencia podrá ser diversa en función de las exigencias ligadas al avance real de la máquina de excavación.

Los datos de ingreso requeridos y que definen la geometría del anillo universal, al igual que las reglas para su posicionamiento en secuencia, son: radio interno del anillo (4221 mm); radio externo del anillo (4621 mm); longitud media del anillo (1500 mm); diferencia entre la longitud media y la longitud mínima o máxima del anillo igual a 56 mm. Los datos de egreso están constituidos por la secuencia teórica de los anillos que permiten seguir la curva indicada y de la distancia entre el eje teórico y aquel real para cada nuevo anillo instalado y los valores máximos, medio y mínimo de tal distancia a lo largo de toda la curva definida.

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.

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.

La curva estará teóricamente mantenida con la precisión definida por los siguientes parámetros estadísticos del alejamiento del eje real del teórico: Valor máximo < 12.6 mm; Valor mínimo < 0.96 mm; Valore medio ≈ 5.5 mm. Los valores reales del desplazamiento dependerán de la secuencia real de los anillos rotados que será aplicada en función de las exigencias de avance de la máquina.

LOS ASENTAMIENTOS EN SUPERFICIE

Cuando se excava en ambiente urbano con bajas coberturas y con grandes diámetros, uno de los problemas técnicos más importante 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 (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 relleno 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.

El primer tramo excavado (entre Las Ferias y Palotal) ha representado de alguna manera la ocasión para calibrar los procesos de definición y control de presión EPB en el frente y de presión de inyección en la cola del escudo, de manera que los resultados logrados en términos de control de las deformaciones, no han podido 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.

También 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 EPB y de un mas deficiente control en la cola mediante las inyecciones del relleno anular.

En todos los casos sin embargo, los asentamientos registrados en correspondencia de los dos puntos extremos de las secciones monitoreadas en superficie (ubicados aproximadamente a unos 15 metros desde el eje del túnel), nunca han superado los 2-3 mm.

A partir del segundo tramo excavado (entre Palotal y Santa Rosa), los resultados logrados han mejorados decididamente, registrándose, mediante el sistemático monitoreo superficial, asentamientos máximos del orden de los 3 cm, con valores más frecuentes inferiores al centímetro, en correspondencia del eje del túnel.

Finalmente, en correspondencia del los primeros dos tramos, ninguna estructura superficial o sub-superficial ha sufrido daño alguno, incluyendo un tubo enterrado de gas-ducto, 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 los 3 metros.