

DISEÑO DEL ANILLO PREFABRICADO PARA EL REVESTIMIENTO DEL METRO DE MADRID

Carlos Oteo Mazo.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Prof. Universidad de Granada.

Felipe Mendaña Saavedra.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Asesor de la Comunidad de Madrid.

RESUMEN

La Comunidad de Madrid ha diseñado un anillo universal de dovelas prefabricadas para los cerca de veinticinco kilómetros de túnel de ϕ 9,40m que está construyendo, dentro de la actual Ampliación del Metro de Madrid. Aquí se presentan los criterios de diseño utilizados, las hipótesis de cálculo, los esfuerzos previstos, etc.

ABSTRACT

A universal ring of precast segments was adopted by the regional authorities in Madrid for nearly 25 km of 9.4 m. diameter tunnel under construction for the prolongation of the underground railway. Details are given here of the design, the methods of calculation, the assumed bending moments, etc.

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de las tuneladoras de suelos o rocas blandas, es decir, de los "escudos", conlleva la incorporación al proceso de excavación mecánica de un sistema de sostenimiento, con el fin de afrontar el problema de la inestabilidad del terreno. Los revestimientos prefabricados son los sistemas que se aplican hoy en día, con carácter prácticamente universal, a las tuneladoras. Y el revestimiento más empleado actualmente es el constituido por anillos prefabricados de hormigón armado atornillados entre sí y formados, a su vez, por piezas (llamadas "dovelas") igualmente atornilladas.

Esta es la tipología que la COMUNIDAD DE MADRID propuso en los proyectos base, y que adoptaron todas las ofertas presentadas para la construcción con tuneladora de las obras de la Ampliación del Metro de esta ciudad. Ahora bien, antes de orientar en este sentido los proyectos base para la posterior licitación de las obras de Ampliación del Metro, la COMUNIDAD DE MADRID conoció en detalle el "estado del arte" de la diversa tipología de revestimientos utilizada actualmente, tipología que se estudió también para poder evaluar debidamente cualesquiera soluciones que, más tarde, se pudieran presentar a los concursos de construcción de las obras.

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de enero de 1998.

Y dentro de dicha tipología, hemos de referirnos brevemente a una alternativa excluida en nuestro caso, pese a su ambicioso objetivo técnico. Son los sistemas de “hormigonado in situ del revestimiento”, a la vez que la tuneladora avanza: la idea básica es que un revestimiento de hormigón “in situ” es la solución ideal para lograr un buen contacto “revestimiento/terreno”, resolviendo el problema de los asentamientos del terreno mejor que con los anillos prefabricados.

Pues bien, los intentos de desarrollo de esta técnica vienen haciéndose desde 1965-70, con presupuestos muy importantes de los programas de investigación. En general, se incorpora al diseño de la TBM el de un pesado encofrado, que suple la serie de anillos contra los que empujan los gatos del escudo.

Algunos sistemas, como el llamado “hormigón extrusionado”, inicialmente de patente alemana y actualmente con versiones japonesas, se siguen aplicando en algunos proyectos, si bien, hasta ahora ninguno ha logrado la continuidad deseable, ni ritmos que se aproximen a los de los revestimientos prefabricados, de forma que esa inseguridad del proceso añade un riesgo adicional de inestabilidad, convirtiendo lo que debía ser solución en causa agravante del problema. Es posible que, como en muchos casos, el esfuerzo reiterado llegue a dar frutos, pero, en todo caso, todavía faltan unos años para ello.

2. ANILLOS METÁLICOS ATORNILLADOS

El anillo metálico atornillado es, históricamente, el elemento básico de las primeras realizaciones prácticas de los revestimientos prefabricados de túnel. Hace más de 100 años que se plantearon a los ingenieros los problemas de los túneles en terrenos blandos y era el comportamiento esperable del terreno lo que permitía decidir entre las dos opciones posibles: “revestimiento manual” de ladrillos y mampuestos o “anillos de hie-

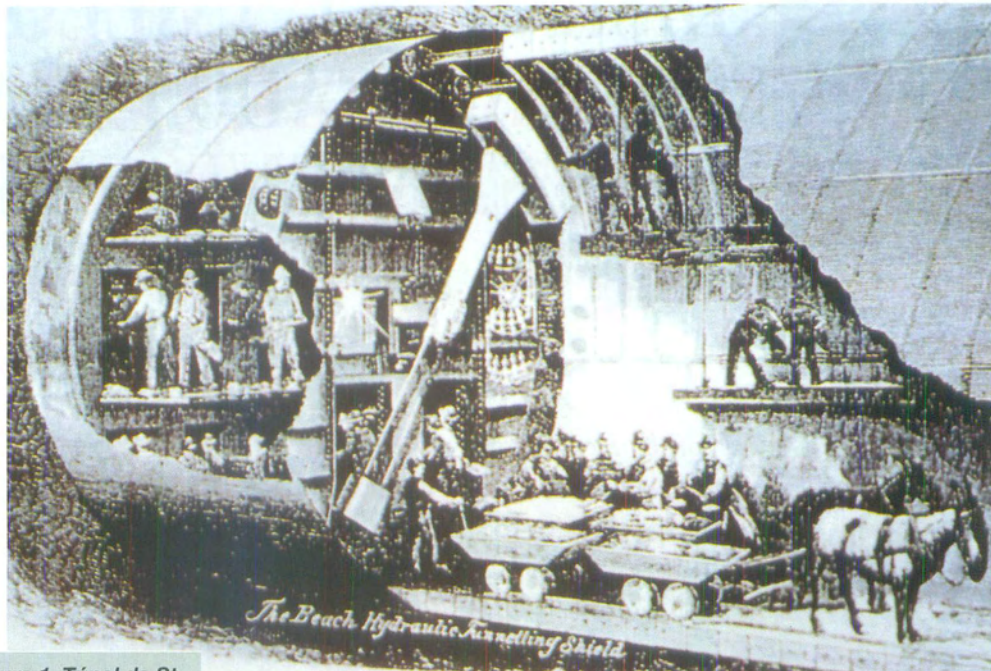


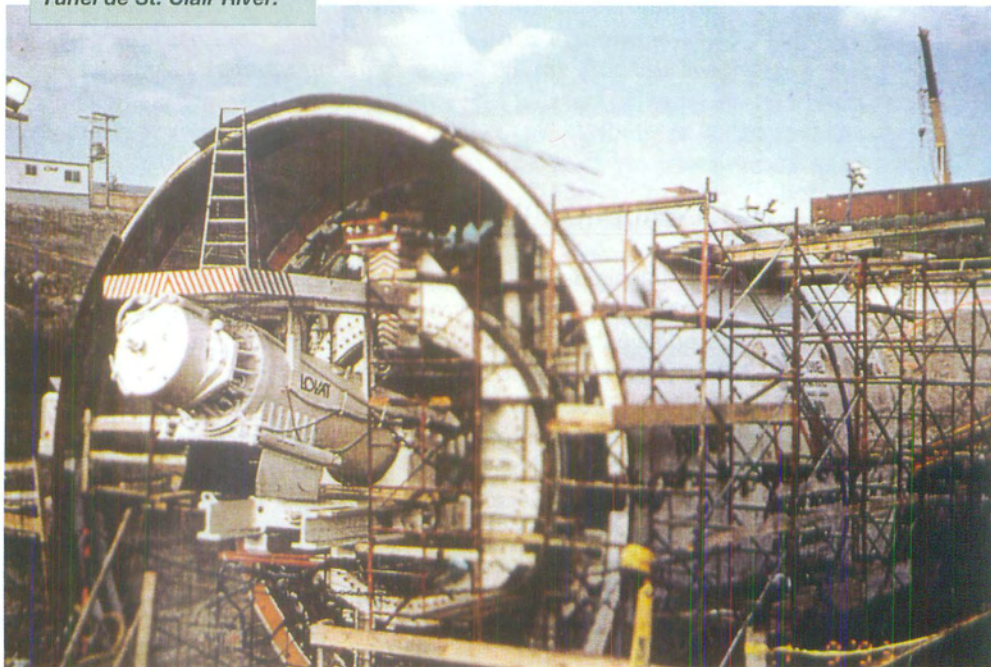
Figura 1. Túnel de St. Clair River (1890).

rro atornillados”, por ser éste el único material de la época que permitía tal aplicación.

Durante muchos años, y hasta que la calidad del hormigón hizo posible su empleo como solución alternativa, los anillos metálicos atornillados fueron la única solución posible en los casos de inestabilidad, bien fuera debida a la presencia de agua o a las propias condiciones del terreno.

La referencia más antigua de un escudo con pleno éxito es la de la máquina de Greathead (1869), con la que se

Figura 2. EPBM del nuevo Túnel de St. Clair River.



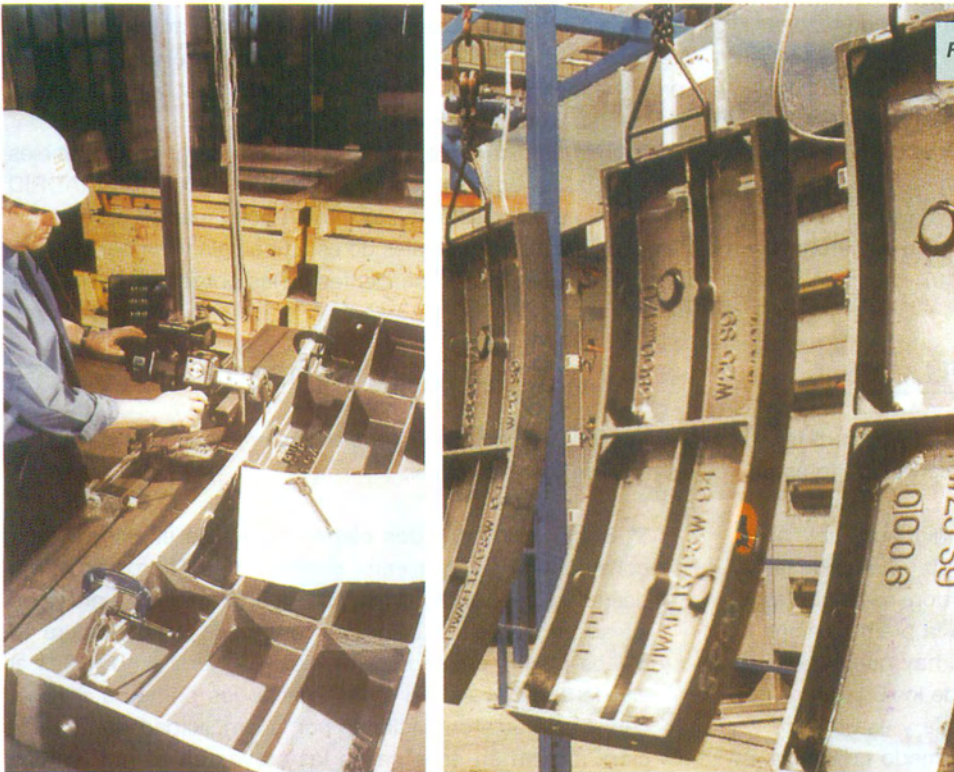


Figura 3. Anillos ligeros nervados de fundición

▼ Anillos metálicos ligeros (diseño de dovelas nervadas, construidas con fundiciones especiales o con palastros de acero laminado, y espesores no mayores de 10 mm) con una reducción notable de peso.

En cuanto a la tipología primera, aparte de su valor histórico, es importante señalar que, como la fundición no se oxida, es muy notable el perfecto estado en que se encuentran la mayoría de los revestimientos de fundición maleable, algunos de los cuales tienen 125 años de edad. Por lo que se refiere a los actuales anillos nervados metálicos ligeros, sus aplicaciones son frecuentes, sea para resolver tramos de túnel en terreno de muy alta inestabilidad, sea como complemento de los prefabricados no atornillados de hormigón.

En cualquier caso, dado que en Madrid no estamos en el primer supuesto y que, por otras razones, como veremos, se decidió no aplicar prefabricados de hormigón no atornillados, los anillos metálicos no fueron adoptados en contrato alguno de la Ampliación de nuestra red de Metro.

construyó un túnel bajo el Támesis, con anillos de fundición, de dovelas atornilladas. Las referencias británicas (preferentemente del área de Londres) de anillos metálicos atornillados, desde mediados del siglo pasado hasta la primera mitad del presente, son abundantes. Con cierto retraso, les siguieron las de otros países europeos y norteamericanos.

La Figura 1 reproduce el grabado de uno de los dos escudos diseñados por Hobson, con los que construyó el primer túnel de St. Clair River, para el enlace ferroviario entre Canadá y Estados Unidos (1890). Se trabajó con presurización integral del túnel a 2 Bar y el revestimiento se hizo con pesados anillos metálicos de fundición, al amparo de los que se atravesaron los depósitos glaciares de limos y gravas bajo el río St. Lawrence, frontera de ambos países entre los lagos Hurón y Erie. Un nuevo túnel paralelo, de mayor capacidad de tráfico, acaba de ser construido en 1994 con un escudo LOVAT, EPB, de 9,52m de diámetro de excavación, con revestimiento de anillos atornillados de hormigón armado de 0,40 m de espesor. El moderno escudo de St. Clair (Figura 2) debidamente adaptado, fue propuesto para su empleo en las obras de Madrid.

La tipología del anillo metálico ha conservado siempre los tornillos de unión entre dovelas (y entre anillos sucesivos) como carácter distintivo. Es el tipo de material metálico lo que ha variado a lo largo de la historia, pudiendo decir que se usaron:

▼ Anillos de fundición maleable, muy pesados primero y aligerados después (dovelas conformadas en casetones) y, finalmente

2.1. ANILLOS NERVADOS LIGEROS DE FUNDICIONES ESPECIALES

El material siderúrgico que se emplea es una fundición maleable al grafito ("Spheroidal Grafite Iron" o "SGI"), versión moderna de mayor calidad que las viejas fundiciones, pero que, como aquéllas, no se oxida, característica muy a tener en cuenta en los revestimientos de túneles. Ver Figura 3.

No procede entrar en más detalles técnicos que pueden verse en la Referencia bibliográfica no 7 y sólo añadiremos que este tipo de anillos se fabrica en muchos países y se emplea con frecuencia en obras relacionadas con la tecnología británica. Así, podemos citar las referencias recientes de varios tramos de la Prolongación de la JUBILEE LINE del Metro de Londres, como complemento de los prefabricados de hormigón, tanto en los túneles principales como en pozos y túneles auxiliares.

2.2. ANILLOS METALICOS LIGEROS DE PALASTRO

Tienen las mismas aplicaciones que los anteriores y, en general, es la solución que se adopta cuando los pedidos no al-

canzan el número mínimo necesario para mantener un razonable coste del proceso de fundición.

La dificultad mayor es que el palastro se oxida con el tiempo y, por ello, las frecuentes referencias, sobre todo de obras americanas, señalan un revestimiento adicional de hormigón, sea funcional, sea de simple protección. Por nuestra parte, podemos aportar la de los Tramos 4 y 5 del nuevo Metro de Toulouse, en los que los utilizamos para el paso bajo el Garonnette y bajo el Canal du Midi.

3. ANILLOS DE HORMIGÓN NO ATORNILLADOS

Los primeros intentos de sustituir las dovelas de acero fundido por piezas prefabricadas de hormigón son posteriores a la Segunda Guerra mundial.

Aunque la calidad de ciertos tipos de hormigones había alcanzado ya niveles importantes en los años 30, el área de las estructuras de Ingeniería civil todavía estaba dominada por las concepciones metálicas y, si nos referimos a la prefabricación de elementos con alta capacidad resistente, hay que esperar bastantes años más, bien entrada la década de los 60.

Y cuando se alcanza una calidad razonable y esa transferencia del campo metálico al del hormigón armado comienza, en el caso concreto de los revestimientos de túneles aparece una dificultad adicional para sustituir a los anillos metálicos atornillados: las múltiples roturas que se producen alrededor de los orificios practicados en las piezas para las uniones entre dovelas o entre anillos.

Por ello, no es de extrañar que el desarrollo de los anillos de hormigón se orientase preferentemente a soluciones de revestimientos no atornillados, que se pueden emplear solamente en escudos abiertos o que trabajan sin presión en el frente.

Se desarrollaron soluciones que cabe clasificar en dos grandes grupos: "anillos de dovelas apoyadas" (con inyección posterior de su trasdós) y "anillos de dovelas expandidas".

En las máquinas no presurizadas que se utilizaron en la construcción de algunos tramos del Metro madrileño en los años 70, se emplearon anillos del primer grupo citado.

En cuanto a las dovelas expandidas, típicas de la tecnología británica, siguen empleándose con frecuencia, sobre todo en el Reino Unido, cuando el terreno es básicamente de matriz altamente arcillosa (algunos tramos de la JUBILEE LINE, o el Proyecto Water Ring de Londres son referencias recientes)

4. ANILLOS DE HORMIGÓN ATORNILLADOS

El revestimiento mas empleado hoy día por las tuneladoras, es el de anillos de hormigón armado atornillados entre

sí y con dovelas también atornilladas, versión actual de los revestimientos primitivos de anillos pesados de fundición, imprescindibles para los túneles bajo freáticos o con problemas de inestabilidad del terreno.

Ya hemos dicho que, después de considerar otras posibles alternativas, el equipo técnico de la COMUNIDAD DE MADRID se decidió a favor de esta solución. A continuación resumimos las características generales de esta tipología y las particulares adoptadas para los revestimientos de las obras de Madrid.

4.1 CONCEPCIÓN DEL ANILLO Y SU DESPIECE

Las ideas básicas sobre los anillos prefabricados de hormigón pueden resumirse así:

▼ Si cortamos por dos planos verticales el cilindro que constituye el revestimiento, el tronco de cilindro resultante define "el anillo", cuyas "caras" -que forman las juntas con los anillos contiguos- coinciden con dichos planos. Figura 4.

▼ Los planos pueden ser paralelos entre si y normales al eje del túnel (4 A). Así se han hecho los primeros despieces, y se siguieron haciendo por la simplicidad de fabricación, si bien en esos casos las curvas en planta han de construirse poniendo calzos en las juntas de uno u otro lado de cada anillo.

▼ Mas adelante, para evitar los calzos y mejorar el contacto entre juntas de anillo, los planos de junta se dispusieron oblicuos, con el ángulo preciso para

Figura 4. Esquema de tipos de anillos.

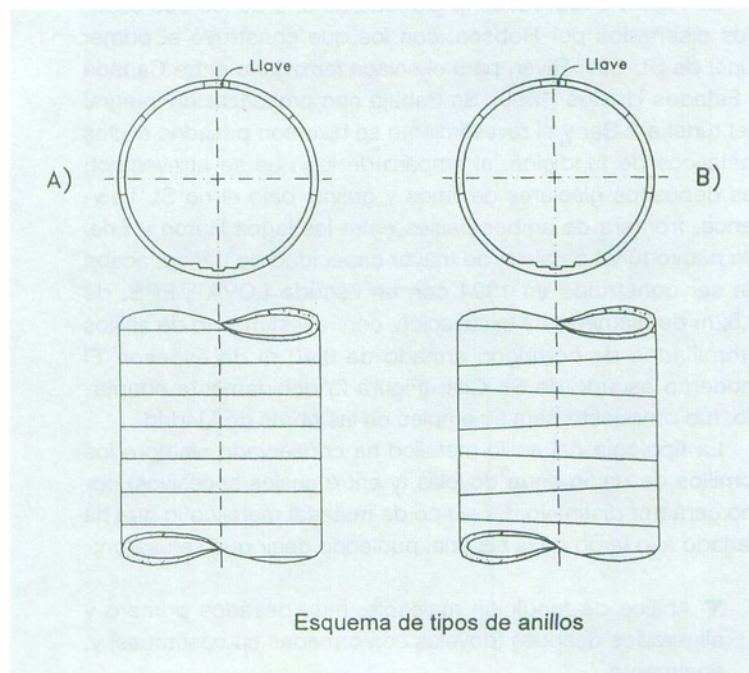




Figura 5. Túnel de simple vía de la Línea 10.

hacer la poligonal del radio mínimo del proyecto (4B). Los tramos rectos, obviamente, se logran alternando la oblicuidad de los anillos consecutivos, lo que se realiza a partir la pieza de solera que se coloca girada 180° respecto de la precedente.

Si es posible reestudiar el trazado para ajustarlo utilizando solo 2 o 3 radios tipo para las curvas en planta, ya se comprende que se puede trabajar con un único anillo tipo. Las curvas así definidas se construyen con poligonales no regulares formadas por series de "curva - recta - curva..."

Ahora bien, en nuestro caso, hay que señalar otros aspectos importantes:

▼ Cuantas menos piezas haya (cuanto mayores sean las dovelas) el riesgo de "ovalización" del anillo en su colocación es menor.

▼ La impermeabilidad es condición a exigir del anillo atornillado por lo que no se deben admitir calzos como solución sistemática para construir las curvas.

A partir de lo anterior, se aceptaron dos posibles modalidades, ambas empleadas en las obras del Metro de Madrid.

▼ a) *Anillo no universal*. La tipología es la ya descrita, por supuesto sin calzos, es decir, anillo con los planos de sus caras oblicuos; despiece de dovelas diferentes entre si y colocadas siempre en la misma posición.

Esta modalidad se ha empleado con éxito en la obra ya terminada de los túneles de simple vía de la Línea 10 (Figura 5), y se sigue utilizando en uno de los dos túneles paralelos de la Línea a Feriales por ser la más adecuada a la máquina utilizada en ella, escudo de presión de tierra, construido para otra obra de Madrid.

Las juntas anillo / dovelas son siempre en cruz (+), solución que se considera menos segura ante las filtraciones. No obstante, por debajo de los 2 Bar el riesgo es mínimo, como se ha demostrado en las obras citadas, pese a que la línea 10 hubo de pasar bajo el río Manzanares, a través de arenas saturadas.

▼ b) *Anillo universal*. Se parte también de un anillo en tronco de cilindro, con las caras oblicuas para describir las curvas.

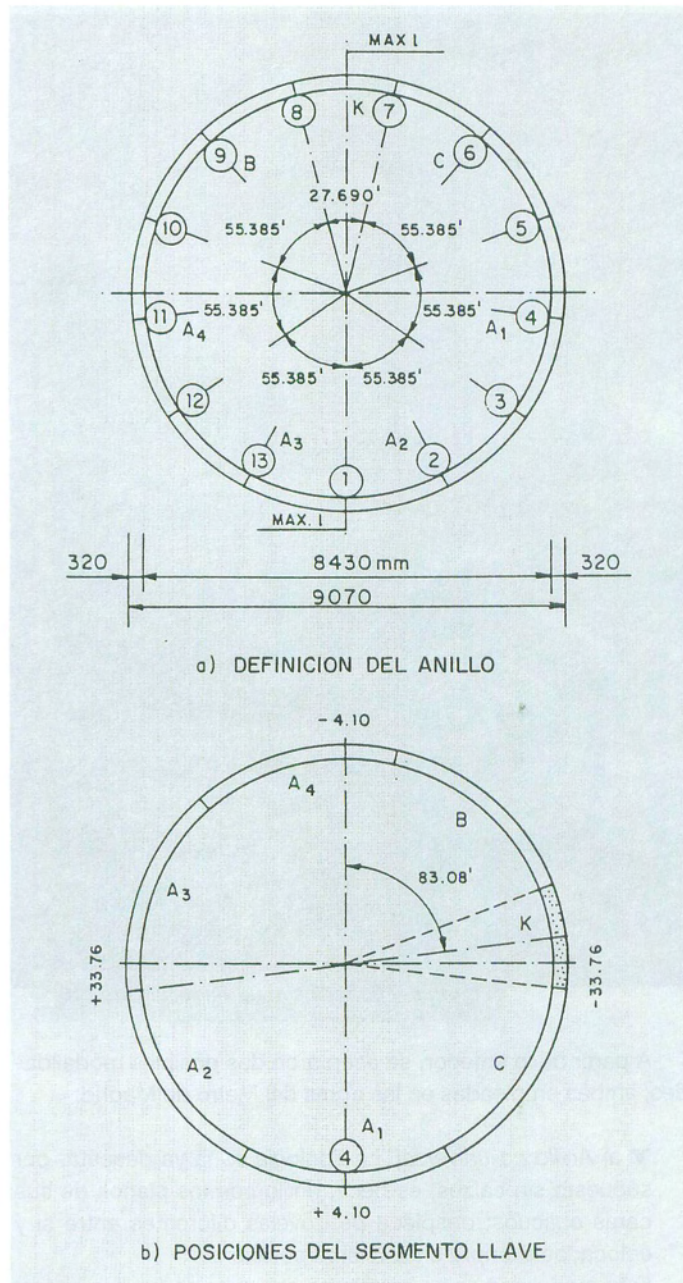


Figura 6. Anillo universal "Madrid".

vas de radio mínimo (en el caso de Madrid, $R_{\min} = 200$ metros).

La idea básica es que con un solo tipo de anillo, se puedan dar todas las curvas que tengan radios superiores al mínimo, en planta o en alzado, haciendo girar parcialmente el conjunto de las dovelas de un anillo respecto de las del contiguo.

(Es claro que la continuidad no es perfecta, pues las curvas de los bordes de las caras del anillo no son circunferencias, si-

no elipses, pero de ejes tan próximos que el error, en la práctica, es despreciable, para las dimensiones usuales -anillos de $\varnothing_{\text{medio}}$ de 6 a 12 metros y longitud del orden de 1,5 metros-).

Para ello, la anchura media de todas las dovelas debe ser la misma, por lo que, una vez fijado el número de dovelas, sólo falta decidir las dimensiones de la pieza llave, que es simétrica respecto de la directriz más corta del anillo. A este respecto:

▼ En pura teoría, esa dimensión y el giro sucesivo correspondiente podrían ser cualesquiera, pero hay que buscar soluciones que mantengan también fijo el número y disposición de los tornillos de unión entre anillos: de ahí que usualmente la anchura media de la llave es $1/n$ de la de la dovela, centrando la decisión en fijar n .

▼ En resumen, y refiriéndonos a nuestro caso, para los túneles de doble vía de la Ampliación del Metro, el equipo técnico de la COMUNIDAD DE MADRID fijó un anillo de 6 dovelas más una llave de anchura $1/2$ de la de la dovela tipo (Figura 6), de forma que se den giros de múltiplos de $360^\circ / 13$, según lo pida el guiado de la máquina y procurando juntas en T (I) aunque alguna vez no haya más remedio que aceptar juntas en cruz (+).

4.2. CRITERIOS DE DISEÑO DEL ANILLO

Los primeros aspectos que se consideraron para el diseño fueron:

▼ Los espesores tenían que ser mucho mayores que en los anillos no atornillados. Los criterios empíricos recomiendan cifras entre $1/30$ a $1/25$ del diámetro, lo que lleva, en el caso de Madrid, a valores entre 30 y 37,5cm.

▼ Las calidades del hormigón y acero de armaduras debían de ser las usuales en las piezas prefabricadas de alta calidad. (Hormigón H400 y acero AEH-500), sin llegar a la de los hormigones de altas prestaciones (H-800).

▼ Por supuesto, aunque se parta de la aplicación de criterios empíricos para un primer dimensionamiento, hay que abordar un cálculo de detalle, introduciendo las hipótesis esperables de empuje del terreno, tanto generales como aquellas que, aún siendo extraordinarias, pudieran presentarse.

▼ Y también, como es lógico, hay que estudiar los problemas de detalles diversos, como el tratamiento de esquinas, tornillos, manejo, etc.

No procede ir más allá en estas generalidades, por lo que el apartado siguiente se dedica a exponer un caso concreto, para que pueda servir de pauta: el Cálculo del anillo definido para todas las obras de doble vía ("Anillo unificado") de la Ampliación del Metro de Madrid: el "Anillo Madrid".



Figura 7. Dovelas del Anillo "Madrid" y pieza auxiliar para la vía de trenes de obra.

Especificaciones diversas:

- ▼ Hormigón H-400 (con tamaño máximo del árido de 20 mm) y acero AEH-500.
- ▼ Tratamiento de las esquinas: Refuerzo de armadura (se analizó la posibilidad de utilizar fibras metálicas, pero encaecía claramente el diseño).
- ▼ Sellado de impermeabilización: Bandas de neopreno de 30 x 10 mm.
- ▼ Tornillos de unión de dovelas y anillos: Tirafondos rectos en taco de PVC.
- ▼ Modulación de tornillos: a 1/13 de la circunferencia

5. CALCULO DEL ANILLO UNIFICADO O "ANILLO MADRID"

5.1 CONDICIONANTES DE PARTIDA Y PRIMERA SERIE DE CÁLCULOS

Las hipótesis o condiciones básicas, definidas por la COMUNIDAD DE MADRID, para el cálculo y consiguiente dimensionamiento del anillo a utilizar en todos los túneles de doble vía de la Ampliación del Metro de Madrid, fueron los siguientes:

Dimensiones:

▼ Diámetro interior	8,43 m
▼ Longitud media del anillo	1,50 m
▼ Espesor	0,32 m
▼ Radio mínimo	200,00 m

Tipología:

- ▼ Anillo universal, es decir, de caras no paralelas que, girando la posición de la dovela clave, puede adaptarse a rectas y curvas, sin cambiar de diseño.
- ▼ Número de dovelas: seis mas la llave. Pieza llave equivalente a un segmento de ángulo mitad del de las dovelas tipo.
- ▼ Juntas: La pieza llave irá girando su posición dentro del cilindro del anillo, para lograr juntas en forma de T (-) evitando las posiciones en cruz (+), con el fin de mejorar la impermeabilidad.
- ▼ "Gap" total (entre anillo y terreno): entre 30 y 35 cm.

Hipótesis complementarias para el cálculo:

- ▼ Coeficientes de minoración (control intenso):

a) Hormigón :	1,4
b) Acero :	1,1

- ▼ Coeficiente de mayoración (acciones) : 1,5
- ▼ Coeficiente de empuje de gatos: 1,1 (sobre 8.000 T de valor nominal).

El diseño, bajo la dirección de la COMUNIDAD DE MADRID, se encargó, inicialmente, a las empresas Dragados y FCC, primeras adjudicatarias de obras con tuneladoras. Posteriormente se introdujo la colaboración de IBERINSA para finalizar el diseño completo. Por último, las empresas en UTE, CMZ-Ferrovial y Entrecanales-OCP se adherieron a lo concluido por los anteriores, aportando detalles complementarios de diseño para poder utilizar erectores de agarre por ventosas.

5.2. CONDICIONES DEL TERRENO

La primera serie de cálculos, que hemos mencionado, iba dirigida a establecer con carácter definitivo el espesor del anillo. Para ello se fijaron, en principio, unas condiciones geotécnicas básicas, a fin de introducirlas en el cálculo que, mas adelante, se debería desarrollar con detalle. A este efecto se consideró que:

- ▼ La profundidad del túnel, referida a su eje (H) podía variar desde unos 10 m, como mínimo, a unos 40 m.

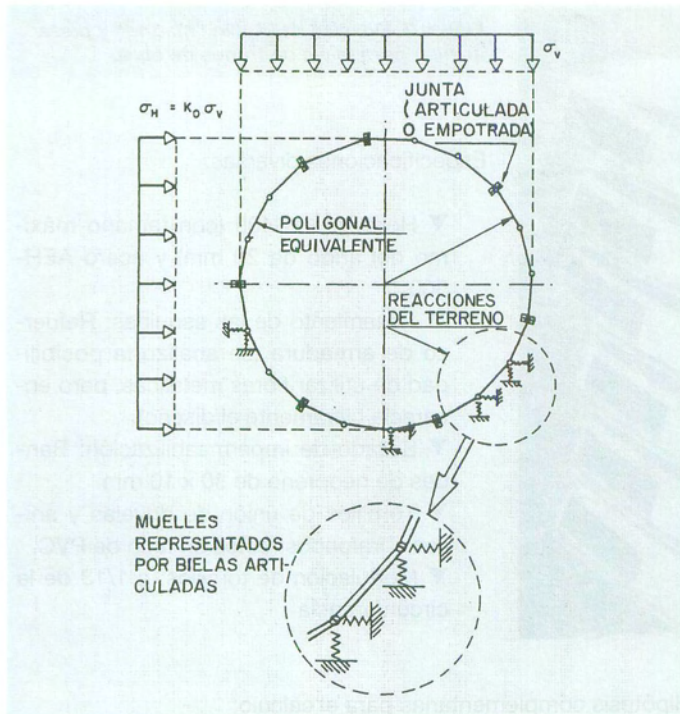


Figura 8. Modelo de cálculo del anillo "Madrid".

- ▼ El peso específico aparente del terreno (γ_{ap}) podía tomarse con un valor medio de 2 T/m^3 .
- ▼ La presión vertical máxima sobre el revestimiento podía ser igual a $\gamma_{ap} \times H$. En el caso de excavar en terrenos terciarios y con una cobertura en ese material superior a un valor de 2,5 veces el diámetro del túnel, las presiones máximas podían disminuir a un 40-50% de ese valor. Pero, (Por dos razones: Postura conservadora y existir en la mayoría de los casos una cobertura de sólo un diámetro o diámetro y medio, de la cuál parte es relleno) se decidió considerar la presión geostática máxima.
- ▼ El coeficiente de empuje al reposo (K_0) podía variar considerablemente. Así, en suelos arenosos cuaternarios, rellenos, etc. podía ser del orden de 0,5 a 0,6 y, sin embargo, en suelos del Plioceno (tipo "tosco") o del Mioceno (tipo "peñuela") podía llegar a cifras del orden de 0,8 a 1,0.

Con estas hipótesis, y tomando las dos más desfavorables, se hicieron -con un programa de cálculo de estructuras en el que las dovelas se representaban mediante poligonales- una serie de cálculos con espesores de 28, 30, 32, 34 y 36 cm, dado que Dragados había propuesto en su oferta un espesor de 28 cm, basándolo en criterios semiempíricos, y FCC, en la suya, había propuesto 34 cm. En todos los casos se hizo la doble hipótesis de articulación y empotramiento en el contacto entre dovelas (Figura 8).

Analizados los resultados (en cuanto a máximos esfuerzos, armadura necesaria, etc.) se decidió seleccionar un espesor definitivo de 32 cm, claramente inferior al que se estaba usando en ese momento en el Metro de Lisboa (36 cm), de diámetro similar, así como en el Bulevar periférico de Lyon (40 cm), si bien el diámetro de este último es mayor (9,78 m) porque tiene tramos a presión hiperbárica bajo el río Saonne (hasta 6 Bares).

Fijado el espesor, el cálculo inicial de las dovelas fue desarrollado, independientemente, por las dos empresas ya citadas, bajo la dirección de la COMUNIDAD DE MADRID, considerando las siguientes hipótesis:

Esfuerzos durante el manejo de cada dovela:

- ▼ Esfuerzos durante la fase de apilamiento (con la condición de almacenar las dovelas de un anillo en un solo paquete o pila).
- ▼ Esfuerzos en posición definitiva, una vez formado el anillo y realizada la inyección del hueco que le rodea, o sea, recibiendo los empujes del terreno.

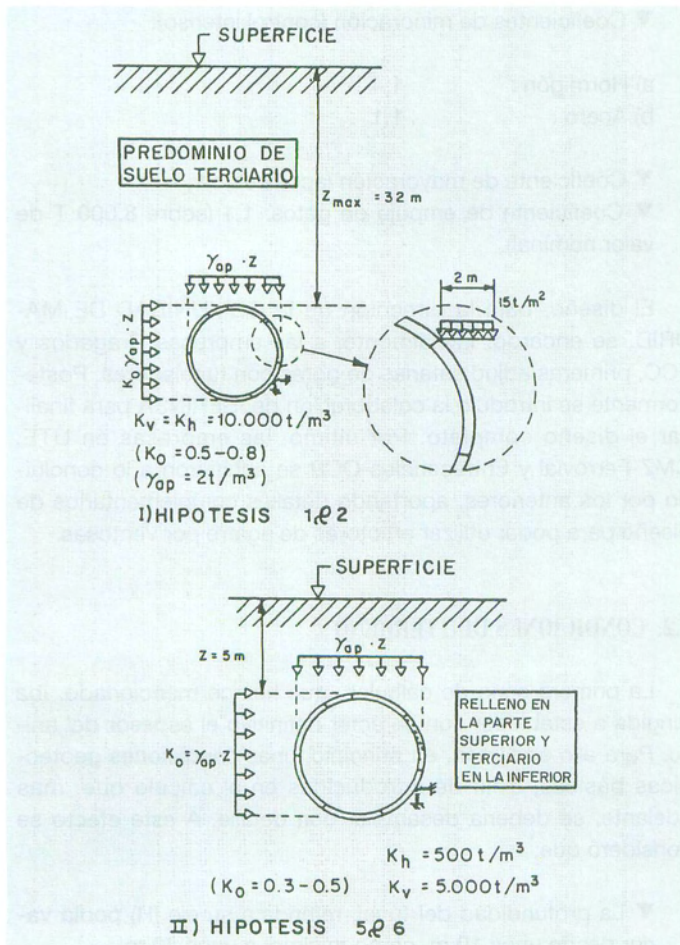


Figura 9. Hipótesis sobre empujes del terreno y deformabilidad.

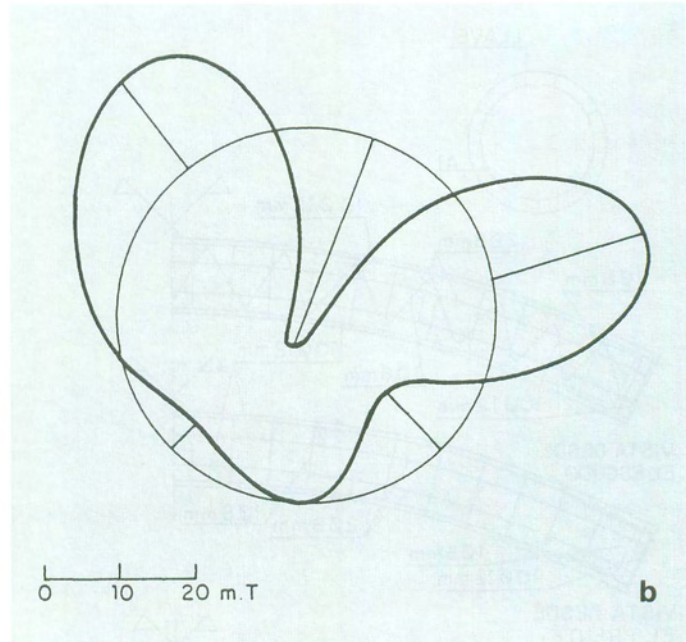
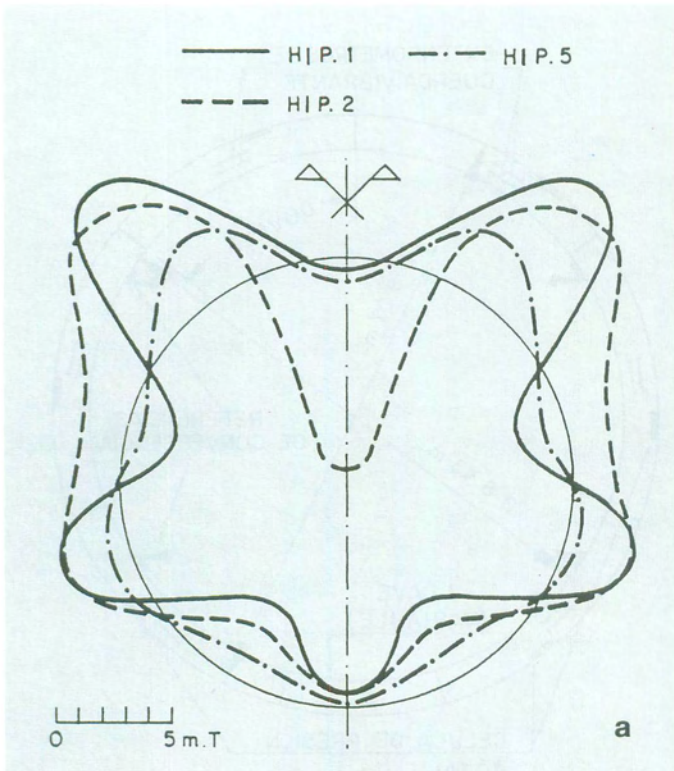


Figura 10. a) Momentos flectores obtenidos a partir de varias hipótesis simétricas. b) Momentos flectores obtenidos a partir de hipótesis asimétrica.

▼ Como condición complementaria a las comprobaciones anteriores (o sea, supuesto que los esfuerzos fueran resistidos por el hormigón y el acero con los coeficientes de seguridad ya indicados) se estableció que la deformación diametral del anillo debía de ser inferior al 1%, límite habitualmente admitido.

En cuanto a los esfuerzos debidos al empuje de tierras se consideraron los siguientes cuatro grandes hipótesis (Figura 9):

▼ A) Un valor máximo de 32 m de recubrimiento sobre clave, con presión vertical uniforme sobre la misma de 64 T/m^2 . Presión horizontal: 50% de la presión vertical. Coeficientes de balasto horizontal y vertical equivalentes a 10.000 T/m^3 (suponiendo efecto de sobreexcavación, inyección defectuosa, etc.)

▼ B) Igual que en la hipótesis A), pero añadiendo una presión excéntrica radial de 15 T/m^2 , actuando en 2 m de anchura, entre clave y riñones, para simular el efecto de una posible inyección (de refuerzo, compensación, etc.) o de una zapata próxima al túnel.

▼ C) Sólo 5 m de recubrimiento sobre clave con presión vertical uniforme sobre la misma de 10 T/m^2 y presión horizontal del 30% de la presión vertical, lo que viene a simular la presencia de un relleno poco consolidado. El coeficiente de balasto horizontal -en este caso y por análogas

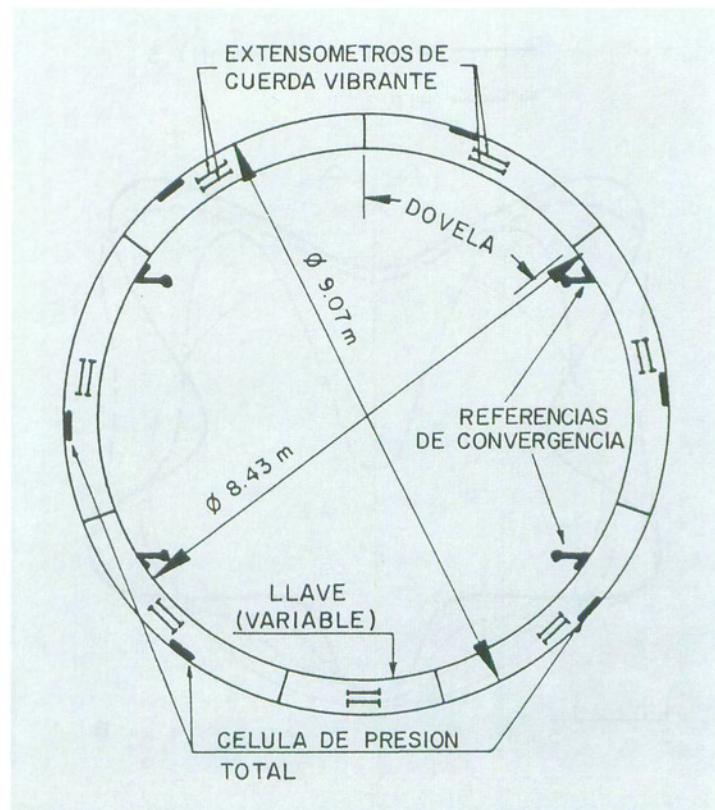
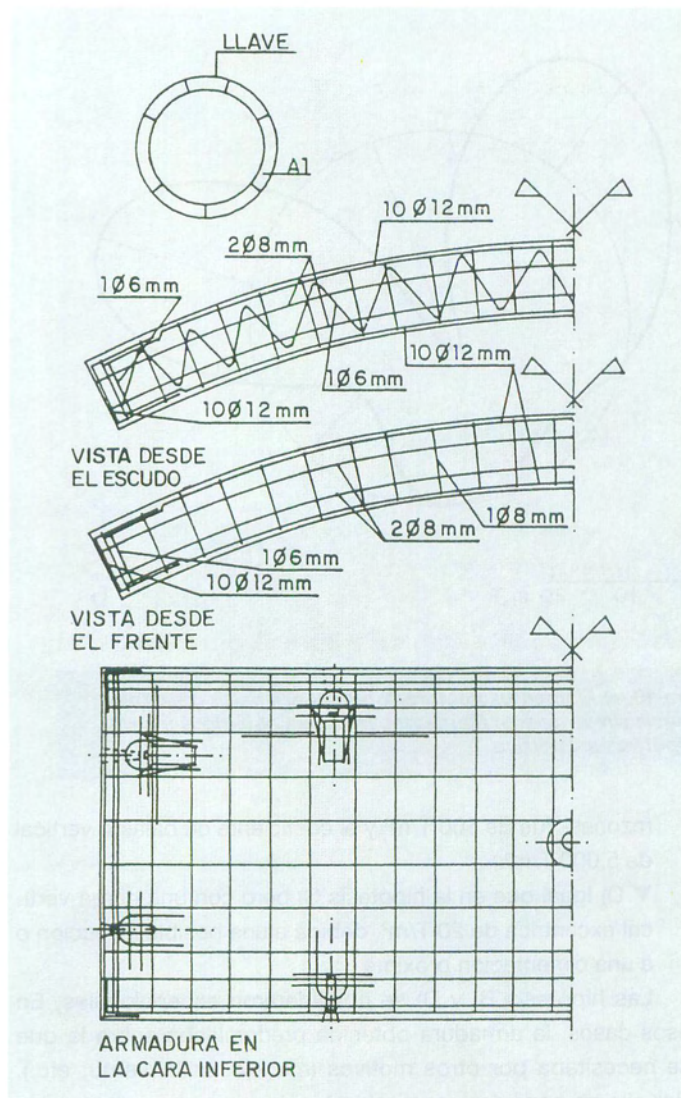
razones- fue de 500 T/m^2 y el coeficiente de balasto vertical de 5.000 T/m^3 .

▼ D) Igual que en la hipótesis C) pero con una carga vertical excéntrica de 20 T/m^2 , debida a una posible inyección o a una cimentación próxima.

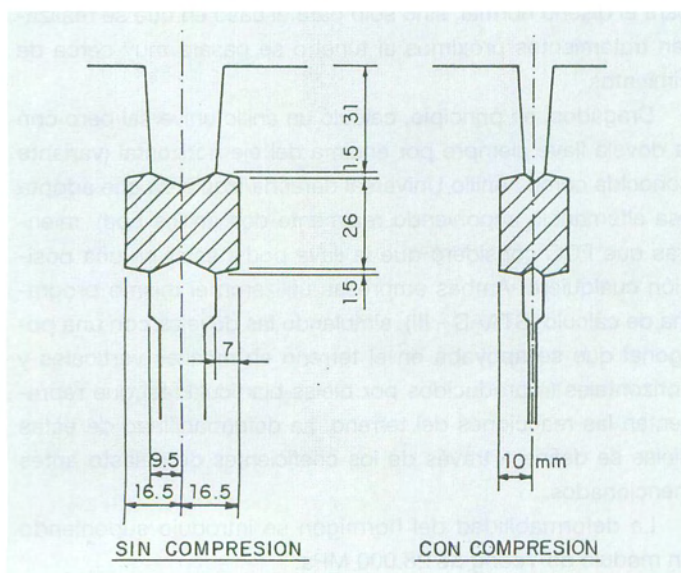
Las hipótesis B) y D) se consideraron excepcionales. En esos casos, la armadura obtenida predominaba sobre la que se necesitaba por otros motivos (manejo, apilamiento, etc.). Por ello se consideró que estas hipótesis no eran adecuadas para el diseño normal, sino sólo para el caso en que se realizaran tratamientos próximos al túnel o se pasara muy cerca de cimientos

Dragados, en principio, calculó un anillo universal pero con la dovela llave siempre por encima del eje horizontal (variante conocida como "Anillo Universal derecha/izquierda que adopta esa alternancia imponiendo realmente dos anillos tipo), mientras que FCC consideró que la llave podía estar en una posición cualquiera. Ambas empresas utilizaron el mismo programa de cálculo (STAAD - III), simulando las dovelas con una poligonal que se apoyaba en el terreno en muelles verticales y horizontales (reproducidos por bielas biarticuladas) que representan las reacciones del terreno. La deformabilidad de estas bielas se define a través de los coeficientes de balasto antes mencionados.

La deformabilidad del hormigón se introdujo suponiendo un módulo de Young de 28.000 MPa .



Arriba a la izquierda, figura 11. Dovela A1: Armadura, debajo, figura 12. Juntas circunferenciales y sobre estas líneas, figura 13. Instrumentación del anillo "Madrid".



El número de gatos considerados para todo el anillo fue de 26 en los dos casos y se tomó una magnitud entre 3 y 5 cm para tener en cuenta la excentricidad de gatos.

Los resultados, en cuanto a lo que se refiere a momentos flectores, pueden verse en la Fig.10, en que quedan reflejadas la influencia de la excentricidad y de la posición de la dovela llave.

Ambas empresas llegaron a armaduras muy similares, a pesar de considerar la llave en distintas posiciones: armadura principal arriba y abajo de 10 a 12 ϕ 12, mas, cercos ϕ 8 / 20 cm. y refuerzos de ϕ 6.

En las hipótesis A) y C) (las extremas de acciones del terreno, pero sin inyección próxima) acaba predominando la armadura necesaria por condiciones de manejo y almacenamiento. En las hipótesis B) y D), como ya se ha indicado, predominan las acciones de la posible inyección, razón por la que se han dejado estas hipótesis para casos especiales.

Finalmente, se adoptó la armadura menor de las dos propuestas (10 ϕ 12 arriba y abajo) en base a la comparación realizada respecto a otros casos de dovelas que se están instalando en Europa. En la Fig.11 puede verse el esquema de una dovela tipo, con la armadura correspondiente.

En cuanto a las juntas circunferenciales, la Fig.12 muestra un esquema de su diseño.

Por lo que se refiere a los tornillos de unión entre dovelas y anillos, dadas las discrepancias surgidas entre los contratistas, hipótesis de cálculo a considerar, etc. se dejó libertad para que cada uno adoptase los criterios de diseño, asumiendo cada empresa la responsabilidad de su funcionamiento, para evitar que se provocase una situación de monopolio o definición de marca comercial.

Para comprobar las hipótesis realizadas en todas las nuevas líneas de construcción, se han instrumentado varios anillos, según el esquema de la Fig.13.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) GEOTECHNIQUE ("The circular tunnel in elastic ground"). Muir-Wood A.M. (1975).
- (2) ANALYSIS OF LINING FOR SHIELDDRIVEN TUNNELS. A.A. Balkema. Rotterdam, 1985.
- (3) REVETEMENTS EN VOUSOIRS PREFABRIQUES. AF-TES (1988).
- (4) ELSEVIER APPLIED SCIENCE. London, 1991.
 - "THE CHANNEL TUNNEL. DESIGN, FABRICATION AND ERECTION OF PRECAST CONCRETE LINING". Curtis, D.J.
- "DESIGNING THE EFFLUENT OUTFALL TUNNEL FOR THE BOSTO HARBOUR PROJECT". Schmidt, B.
- (5) TUNNELING'94. London, 1994.
 - "PLANNING AND DESIGN, DEVELOPMENT, TESTING AND MANUFACTURE FOR THE LONDON WATER RING MAIN". Farrow J.P. et alt.
 - "DEVELOPMENTS IN PRECAST CONCRETE TUNNEL LININGS IN THE UNITED KINGDOM". Winterton, T.R.
- (6) RAPID EXCAVATION AND TUNNELELLING CONFERENCE. San Francisco, 1995.
 - "TUNNEL DESIGN OF MUNI METRO TURNBACK PROJECT". Sutter D.A. et alt.
- (7) JORNADAS TÉCNICAS SOBRE LA AMPLIACIÓN DEL METRO DE MADRID. COMUNIDAD DE MADRID. Junio 1997.
 - "DISEÑO DEL REVESTIMIENTO PREFABRICADO". C. Oteo y F. Mendaña
- (8) TUNNELLING'97. London, 1997
 - "INFLUENCE OF JOINTS ON TUNNEL LINING BEHAVIOUR". P.S. Jovanovic et alt.
 - "DEVELOPMENT OF AN EXTRUDED CONCRETE LINING (E.C.L.)" S. Kumagai et alt.
- (9) RAPID EXCAVATION AND TUNNELLING CONFERENCE. Las Vegas, 1997.
 - "STRESS ANALYSIS AND DESIGN OF TUNNELS LININGS" C.L. Wu at alt. ●



ESPECIALIZACIÓN:

REALIZACIÓN DE SANEAMIENTO EN GENERAL, EXCAVACIONES EN MINA, BATACHES, GALERÍAS VISITABLES, POZOS, COLOCACIÓN DE BORDILLOS, TUBERÍA...

PROYECTO DEL METRO DE MADRID:

- UTE FCC, S.A., Y FCC CONSTRUCCIÓN, S.A. METRO LINEA 7 DE MADRID. TRAMO III. MONFORTE DE LEMOS, VEREDA DE GANAPANES, ANTONIO MACHADO, PITIS, LA BAÑEZA, VALDEREY, VALDERODRIGO (REALIZACIÓN DE DESVÍOS COLECTORES Y POZOS DE VENTILACIÓN).
- UTE PALOMA 7 CUBIERTAS Y MZOV, S.A. Y FERROVIAL, S.A. AMPLIACIÓN DE LA LINEA 7 DE METRO AVDA. DE AMÉRICA-VIRGEN DE LA PALOMA (REALIZACIÓN DE DESVÍOS COLECTORES Y POZOS DE VENTILACIÓN).
- UTE NECSO ENTRECANALES CUBIERTAS, S.A., Y OCP CONSTRUCCIONES, S.A. LINEA 9 DE METRO (REALIZACIÓN DE POZO GALERÍA CANAL).
- DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES AMPLIACIÓN DE LA LINEA 4 DE METRO DE MADRID (REALIZACIÓN DE POZO DE VENTILACIÓN).
- UTE FCC, S.A. Y FCC CONSTRUCCIÓN S.A. CONEXIÓN LÍNEAS 8 Y 10 DEL METRO DE MADRID (DESVÍO DE LOS COLECTORES DE SANEAMIENTO Y POZOS DE BOMBEO).



Pozo de ventilación. Metro Línea 7. Tramo 3.