

Diseño de dovelas en túneles TBM con hormigón reforzado con fibras de acero en el metro de Sídney

TBM tunnel segmental lining design with steel fibre reinforced concrete on the Sydney Metro Project

Javier Vaquero Molina, Xavier Torelló Ciriano, Emiliano Gómez García, Adrián Salas Calvo, Ángel Denia Berrocoso^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. jvaquero@typsa.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. xtorello@typsa.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. egomez@typsa.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. asalas@typsa.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. adenia@typsa.es

RESUMEN

El proyecto de construcción del tramo central del metro de Sídney oeste, con una longitud de 11km de doble túnel construidos mediante tuneladoras (TBM), se ha empleado una solución de anillo de dovelas de hormigón reforzado con fibras de acero, recurriéndose únicamente a dovelas armadas en las aberturas de las galerías transversales. Con un diámetro interior de 6.17 m y un espesor de 0.26 m, para el diseño se han realizado cálculos detallados con modelos no lineales para evaluar el comportamiento del hormigón armado con fibras de acero. Además, se han llevado a cabo ensayos a escala reducida para validar el comportamiento de los modelos de hormigón con fibras en las juntas entre dovelas.

ABSTRACT

The Central Tunneling Project of Sydney Metro West includes the construction of 11 km of double tunnels and main tunnels have been constructed by tunnel boring machines (TBM). For the ring design, a typology of steel fibre reinforced concrete has been chosen, using only reinforced segments in the openings of the cross passages. With an internal diameter of 6.17 m and a thickness of 0.26 m, detailed calculations were carried out using non-linear models to evaluate the behaviour of the steel fibre reinforced concrete. In addition, small-scale tests were carried out to validate the behaviour of the fibre-reinforced concrete models in the longitudinal joints between segments.

PALABRAS CLAVE: Metro de Sídney, túnel de dovelas, hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA), comportamiento No-Lineal.

KEYWORDS: Sydney Metro, tunnel segmental lining, steel fibre reinforced concrete (SFRC), non-Linear behavior.

1. Descripción del proyecto

El proyecto del tramo central del Metro Oeste de Sídney o “Central Tunneling Package” (CTP) consiste en la construcción de 11km de túneles

gemelos desde la estación “The Bays” hasta la estación de “Sydney Olympic Park”, en el extremo más occidental. Además de estas dos estaciones

se han previsto otras 3 estaciones intermedias. Forma parte de un proyecto ambicioso de ampliación de la red de metro de la ciudad de Sídney en el estado Nueva Gales del Sur. Así, el tramo central o CTP conectará al este con el tramo “City & Southwest”, y en el oeste con el “Western Tunnelling Package” (WTP), a lo largo de un total de 24 km de metro, conectando y duplicando la capacidad ferroviaria desde y hacia el distrito central y financiero de Sídney.

El proyecto del tramo central de Sídney Oeste contempla la construcción de aproximadamente 11 km de túneles, de los cuales corresponden aproximadamente 10.2 km mediante túnel construido con tuneladoras TBM y el resto mediante excavación en mina. El pozo de lanzamiento se encuentra en la estación “The Bays”, en su extremo más oriental, mientras que el pozo de desmontaje de las tuneladoras está en el otro extremo, en la estación de “Sydney Olympic Park”.

La distancia “tipo” entre los dos túneles es de 14.04 m, que define a su vez la longitud de las galerías transversales. Estas están separadas a una distancia máxima de 240 m, completando un total de 41 galerías transversales en los 11 kilómetros, 4 de los cuales incluyen un pozo de drenaje.

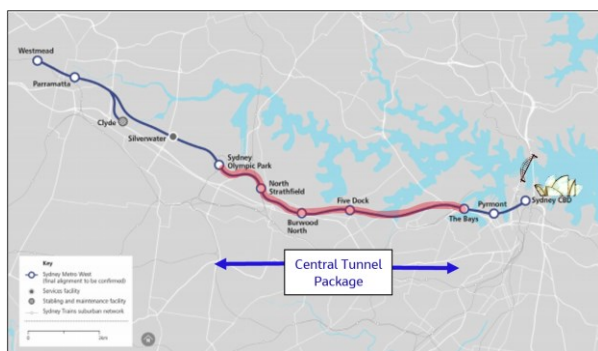


Figura 1. Planta de ubicación del proyecto Metro de Sídney oeste, tramo central.

A fecha 1 de octubre de 2024, y después algo menos de un año y medio, la excavación de los túneles con tuneladora ha concluido.

2. Características de la solución de anillos empleada

Los túneles excavados con TBM se han realizado con una tuneladora de doble escudo que permite la instalación segura de un anillo de revestimiento de diámetro interior 6.17 m y espesor de anillo de 0.26 m, lo que representa una esbeltez de 23.7

El diámetro interior del anillo es el resultante de considerar un diámetro libre interior de 6.0 m más unas tolerancias durante la ejecución del túnel de 85 mm, medido sobre radio. A su vez, el diámetro de excavación es 7.01 m quedando una corona de relleno en el trasdós del anillo de 0.16 m.

La longitud de los anillos es de 1.70 m, sobre los que se ha definido una conicidad de 30 mm, lo que permite adaptarse al radio mínimo del trazado con márgenes adicionales. El radio mínimo teórico gracias a la conicidad dada es de 350 metros. Además, se han definido anillos de compensación de 1,60 m de longitud e idéntica conicidad, lo que permite ajustar el calado de los anillos en las llegadas a las estaciones, y para el posicionamiento de las galerías transversales, llegar con una secuencia de anillos coincidentes en ambos tubos limitando el esviaje en los conexiones entre los túneles.

El anillo de revestimiento es de tipo universal formado por 6+0 dovelas prefabricadas. La dovela clave tiene 58° de desarrollo medio, mientras que la contraclave tiene 62° y a su vez, a las dovelas intermedias se les asignan ángulos de 59-61°. Todas las juntas longitudinales presentan ángulo con respecto al eje longitudinal del túnel, resultando de este modo dovelas trapezoidales y romboidales.

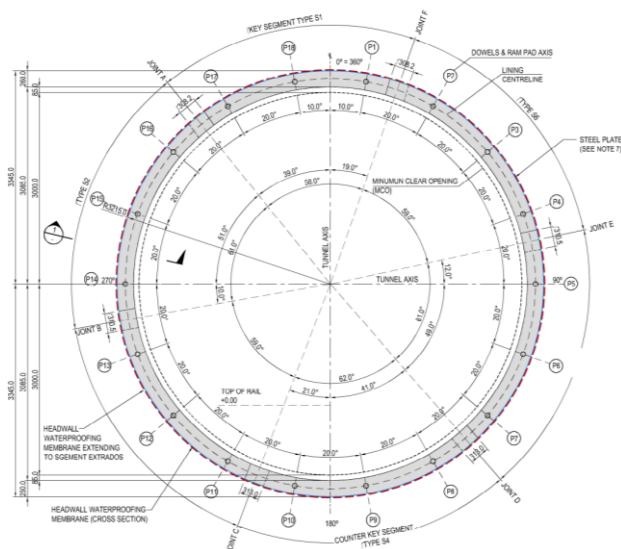


Figura 2. Anillo de dovelas. Geometría general.

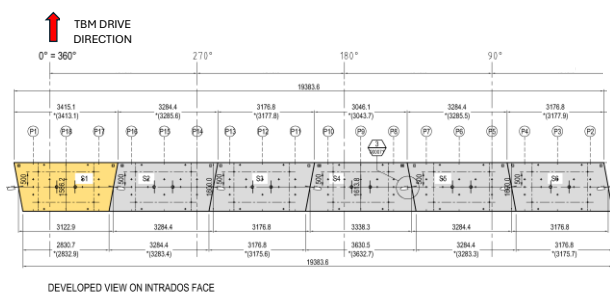


Figura 3. Desarrollo interior del anillo de dovelas

2.1 Materiales empleados

Los anillos del revestimiento son de hormigón reforzado con fibras de acero. Se definen también anillos reforzados con armadura convencional, que únicamente se emplean en las aberturas de conexión con las galerías transversales.

La resistencia a compresión del hormigón empleado en el revestimiento del anillo es de 66 MPa.

El comportamiento residual a flexotracción queda definido mediante las resistencias características $f_{R1,k}$ y $f_{R3,k}$, para los que se ha diseñado con valores mínimos de 4.0 y 3.5 MPa, que según la clasificación del MC2010 sería un FRC 4.0c

Para conseguir dichas prestaciones en el hormigón de fibras se emplearon dos tipos de mezclas con contenidos de cementos y adiciones

de 240+170 y 225+220, y con una relación agua cemento en ambas de 0.33.

En cuanto a las propiedades de las fibras metálicas, éstas eran de altas prestaciones con un límite elástico de 2200 MPa, longitud de fibra 60 mm y relación $L/D=80$. Se llevaron a cabo diversas pruebas y ensayos con cuantías de fibras comprendidas entre 30 y 40 kg/m³, con el objetivo de alcanzar el valor de resistencia post-crítica especificado en el diseño.

Además de incorporar fibras de acero, se añadieron fibras de polipropileno al hormigón de las dovelas de los anillos para mejorar su resistencia al fuego. Para este propósito, también se realizaron ensayos con cuantías que oscilaron entre 1.0 y 2.0 kg/m³.

2.2 Elementos auxiliares del anillo

Las juntas longitudinales entre dovelas llevan un único tornillo centrado en la línea media del anillo y a ambos lados del cual se disponen elementos de guiado “*guidance rod*” de un diámetro reducido. Con ello se consigue no reducir significativamente la capacidad de las juntas cuyo nivel de axil es elevado. Los tornillos se retiran una vez la inyección de mortero de trasdós del anillo ha endurecido y se garantiza que la junta y el gasket se encuentra comprimido.

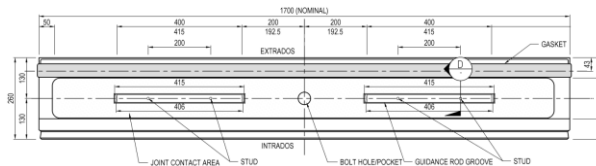


Figura 4. Detalle de junta longitudinal.

Para las juntas circunferenciales se emplean elementos tipo “biblock®” que proporcionan tanto resistencia a tracción como a cortante en las juntas. Uno de sus lados conectado por rosca, mientras que el otro es de conexión tipo “clip” a presión. El material exterior es poliamida y alojan en su núcleo una barra de acero de métrica 16 y calidad 8.8, proporcionando una capacidad a cortante superior a 200 kN y una resistencia a tracción

superior a 90 kN. Dichos elementos se disponen cada 20°, lo que supone que todas las dovelas tienen 3 pasadores y 18 en total, que justifica las 18 posiciones del anillo del túnel.

El perfil de EPDM empleado en las juntas entre dovelas o “gasket” es del tipo anclado, lo que le ha permitido a la constructora simplificar las tareas de manipulación de las dovelas dentro del túnel. El parámetro fundamental para su diseño, la presión de agua tiene un valor máximo de 78.5 m medido sobre base inferior del anillo, que coincide con el punto más bajo del trazado del túnel. Además, por especificaciones del contrato del cliente, la relajación máxima permitida en los 120 años de vida útil del proyecto no debía superar el 65% y se consideró un factor de mayoración de la presión de agua de 1.20.

Aunque de manera general el contacto en las juntas circunferenciales era contacto directo entre hormigones, para aquellos casos de falta de regularidad de la superficie de apoyo en dichas juntas, se ha previsto el empleo de almohadillas bituminosas reforzadas con fibras de poliéster, en un espesor de hasta 2.5 mm.

3. Diseño del anillo

3.1 Fases de producción de las dovelas

Las fases de producción de las dovelas cobran una especial importancia en los casos de túneles de hormigón reforzados con fibras, pues estos estados tempranos de carga en flexión simple suelen resultar críticos.

En coordinación con la constructora y su planta de prefabricación, se analizaron todas las situaciones y fases durante la producción de las dovelas, desmoldeo, acopio, transporte, manipulación con el objetivo de optimizar los procesos y evitar fisuras indeseables en estas edades tempranas en las que el hormigón no ha alcanzado sus propiedades características.

Para el análisis de las fases de producción se ha recurrido, en general a modelos de cálculo tipo

viga; sí bien para las comprobaciones locales de apoyo en la manipulación en acopios o en el sistema de descarga rápida de dovelas en la TBM se emplea un modelo de elementos finitos.

Un dato relevante es que el desmoldeo se llevaba a cabo aproximadamente 5 horas y 30 minutos después de la colocación del hormigón. Por su parte, el acopio en planta de un anillo completo se realizaba tras un tiempo de 33 horas. Finalmente, el acopio definitivo, ya con las resistencias características de diseño alcanzadas, permitía apilar hasta 2.5 anillos.

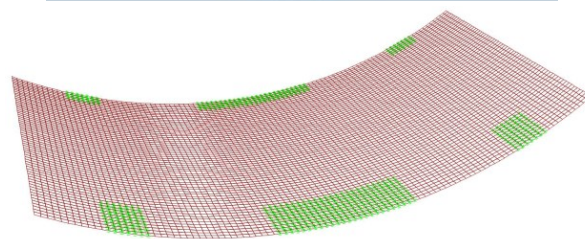
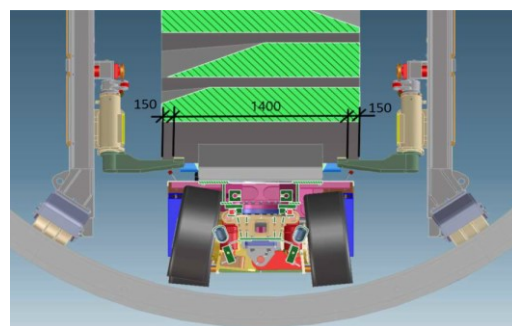


Figura 5. Modelo de elementos finitos para comprobaciones locales de apoyo de las dovelas.

La caracterización del comportamiento post-fisuración hormigón con fibras se lleva a cabo empleando el modelo lineal – del tipo “softening”- en función de la abertura de fisura, de acuerdo con el MC-2010, Volumen 1 [4].

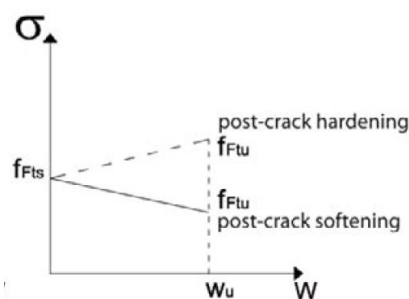


Figura 6. Modelo de comportamiento post-fisuración para las fases de producción de las dovelas, según MC-2010.

Se comprueban tanto los estados en servicio, con un control de la fisuración, como del agotamiento de las distintas secciones de comprobación, estableciendo las resistencias características mínimas del comportamiento post-fisuración del hormigón necesarias en cada una de las etapas.

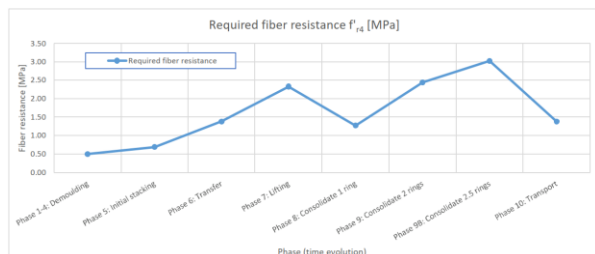


Figura 7. Línea de tiempo-resistencia mínima tracción post-fisuración requerida para hormigón.

3.2 Fases constructivas

Para las comprobaciones de empuje de gatos para avance de la tuneladora se partió del dato del empuje máximo de la tuneladora en condiciones normales de operación. Este valor, no obstante, se mayoró para tener en cuenta una distribución no uniforme entre los distintos gatos de la TBM. La excentricidad con la que se aplicaba esta carga en las dovelas dependía tanto de la posición de los propios gatos respecto del anillo como de las tolerancias de construcción del propio anillo; de este modo se hicieron distintas hipótesis con las envolventes mínimas y máximas de las excentricidades posibles, y sobre estas se comprobó un adecuado comportamiento. Los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios, con aberturas de fisuras muy reducidos y siempre por debajo de 0.1 mm, lo que confirmó el correcto comportamiento del hormigón reforzado con fibras. Además, este hecho se ha podido contrastar posteriormente en las fases de ejecución.

Para llevar a cabo este análisis se recurrió a la utilización de modelos de elementos finitos bidimensionales, además de otros métodos más sencillos como el empleo de diagramas que son de gran utilidad al menos en las fases iniciales. El

empleo de este tipo de diagramas, aunque no tiene en cuenta la no linealidad del material y no tiene en cuenta la difusión de la carga tanto en el espesor de la dovela como en la anchura de la misma, se propone de forma general, en muchas de las normas internacionales.

Para la modelización de elementos finitos empleada, el comportamiento no lineal post-fisurado del hormigón con fibras se lleva a cabo a partir de las relaciones tensión-deformación que se proponen en el MC-2010 Volumen 1 [4], con una rama tipo “softening”.

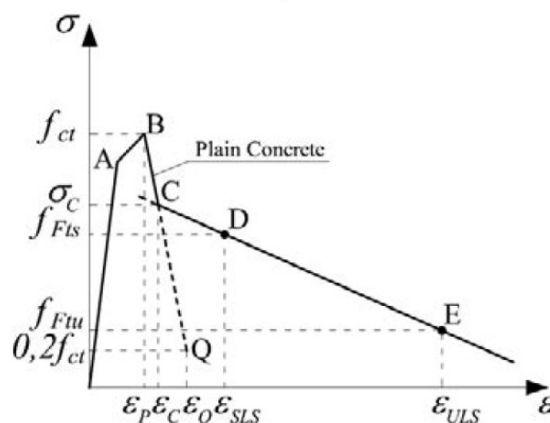


Figura 8. Modelo de comportamiento post-fisuración para modelos no lineales en fases constructivas, según MC-2010.

Se muestran algunas imágenes de los resultados obtenidos, tanto de la difusión de la carga en el espesor de la dovela como en su anchura.

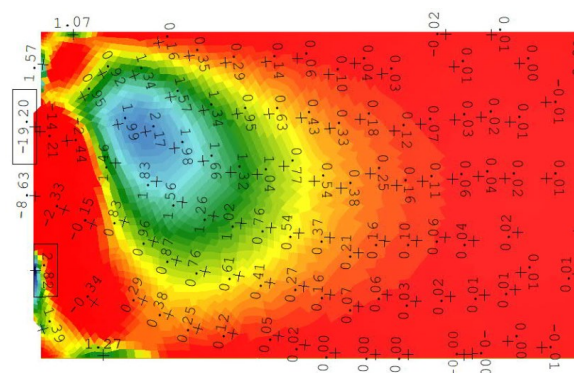


Figura 9. Tensiones horizontales en SLS bajo valor característico de la carga de aplicación de gatos de empuje de la tuneladora en el espesor de la dovela.

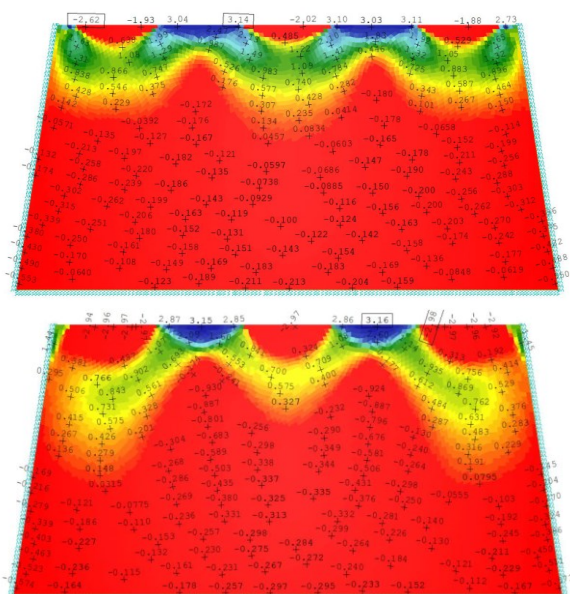


Figura 10. Tensiones horizontales en SLS bajo la carga de aplicación de gatos en la cara interna y externa de la dovela.

Se realiza también una comprobación bajo una carga de empuje de los gatos excepcional, correspondiente a una situación hipotética de atrapamiento de la tuneladora. Dicho empuje es el de la capacidad total de la TBM y aunque frente a dicha hipótesis se puede asumir unas condiciones de fisuración en las dovelas más solicitadas, se pudieron verificar valores de aberturas de fisura inferiores a 0.3 mm.

Como parte de las verificaciones de las fases de construcción, se incluyó el apoyo de la rueda de la rezaga ("backup") de la tuneladora sobre el anillo completo, a pesar de que solo habían transcurrido unas pocas horas desde la ejecución del relleno de trasdós. Esto implicó considerar la secuencia de relleno asociada al proceso constructivo. Para garantizar la viabilidad de este apoyo, fue necesario ensayar y determinar la curva de endurecimiento del relleno de trasdós, con el fin de establecer condiciones mínimas de rigidez en función del tiempo transcurrido desde su inyección. Estos requisitos se verificaron y coordinaron en consonancia con los rendimientos de avance de la tuneladora.

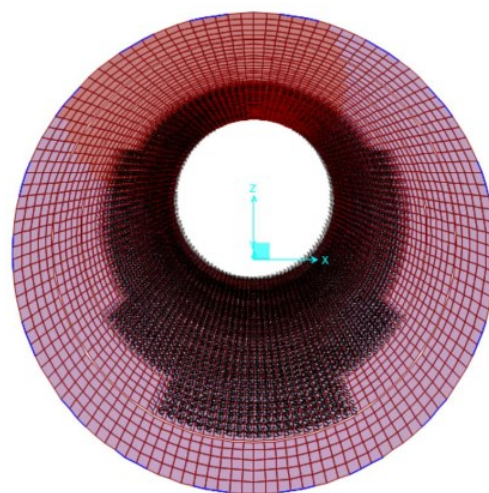


Figura 11. Condiciones de apoyo de los distintos anillos según avance y montaje de los mismos en la TBM.

La modelización realizada debe considerar las condiciones de apoyo de los distintos anillos, con diferentes edades de endurecimiento, el comportamiento de las juntas longitudinales entre dovelas y el comportamiento de las juntas circunferenciales, con una superficie de contacto hormigón-hormigón comprimida entre anillos conectados por medio de los pasadores de cortante, cuya curva fuerza-desplazamiento es conocida.

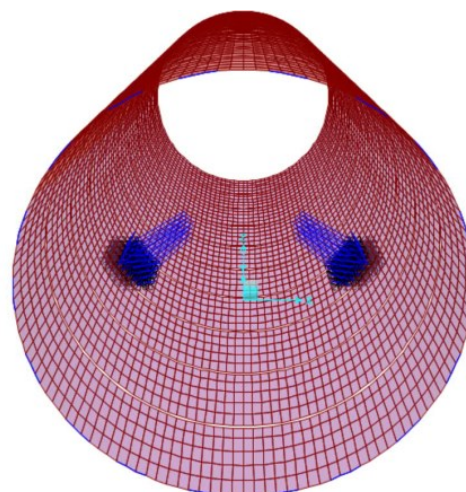


Figura 12. Apoyo del primer eje del backup de la tuneladora sobre el anillo.

La modelización realizada es no lineal y con ella se verifica tanto las rigideces mínimas exigibles en el paso del primer eje del backup de la tuneladora, como las capacidades de los pasadores de conexión entre anillos, fuerza

mínima de empuje en gatos durante esta fase constructiva.

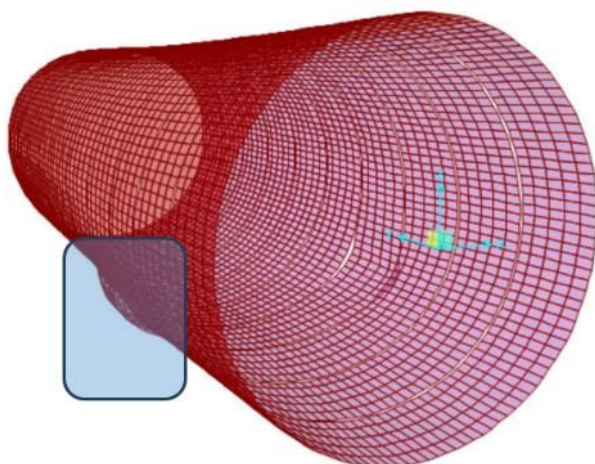


Figura 13. Resultados de las deformaciones.

Durante estas fases constructivas, los anillos tienen que comprobarse además frente a elevadas presiones localizadas de la inyección secundaria, eventualmente necesarias para el relleno de huecos. Para estas comprobaciones, siguiendo las recomendaciones de ITA WG2 [3], y en coordinación con el equipo de construcción de la constructora, se emplearon valores de presiones máximo de 100 kPa sobre una anchura de media dovela.

3.3 Fases en servicio

En función del tipo de proyecto y, específicamente, en el ámbito de metros urbanos, las fases de operación y servicio no suelen ser determinantes para el diseño del revestimiento final de este tipo de túneles. Sin embargo, en el tramo central del metro de Sídney Oeste, debido a la elevada carga de agua presente bajo la bahía de Sídney, fue necesario realizar comprobaciones significativas para validar el diseño final.

El elevado nivel de compresiones en algunas secciones de túnel por el posible desarrollo de una elevada carga hidrostática a medio plazo, unido a un área de contacto reducida en las juntas longitudinales entre dovelas resultó parte esencial del diseño.

Ese nivel de compresiones elevadas en las fases de servicio entra en combinación con las

excentricidades máximas que se dan del cálculo general en las secciones del anillo en servicio, que se suman a otros efectos adicionales como son el resalto “*lip*” considerado entre dovelas de un mismo anillo y el considerado por la propia distorsión del anillo durante el montaje.

Para realizar las verificaciones del diseño se emplearon modelos con la no-linealidad del material y el efecto favorable de confinamiento por compresiones transversales en el hormigón. Dicho efecto de confinamiento se consideró conservadoramente, limitando la tensión de confinamiento en el hormigón al valor característico de la resistencia residual del hormigón con fibras f_{R1k} o f_{R4k} , según las expresiones de tensión-deformación para hormigón confinado que se dan en el MC-2010, Volumen 2 [5], como se muestran en la imagen inferior

$$\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} = 1 + 3.5 \left(\frac{\sigma_2}{f_{ck}} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (7.2-19)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left[1 + 5 \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} - 1 \right) \right] \quad (7.2-20)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0.2 \sigma_2 / f_{ck} \quad (7.2-21)$$

Figura 14. Relación tensión-deformación del hormigón confinado. Código Modelo volumen 2 [2].

Con todo este análisis se pudo verificar un comportamiento satisfactorio de las juntas frente a las tensiones de estallido o “*bursting*” y la capacidad del hormigón reforzado con fibras frente a las tensiones internas de tracción o “*splitting*”, tanto en verificaciones correspondientes a los estados límites de servicio como últimos.

Se muestran algunos de los resultados obtenidos de las modelizaciones de las juntas longitudinales bajo las combinaciones pésimas comprobadas.

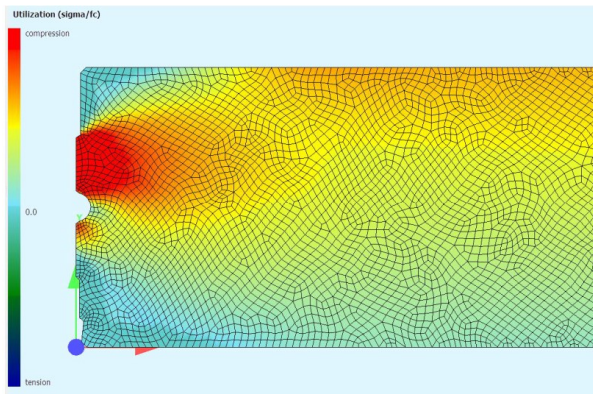


Figura 15. Modelo no lineal de junta longitudinal

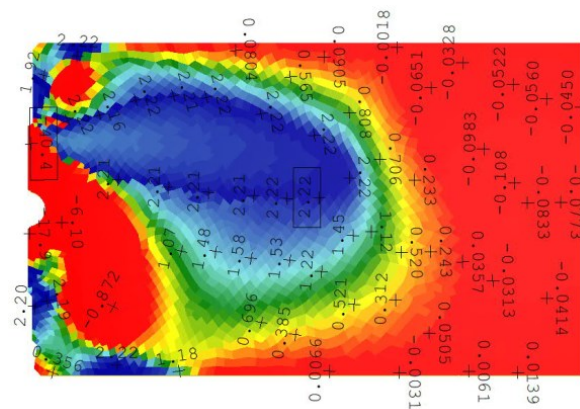


Figura 16. Tensiones verticales en junta bajo ULS.

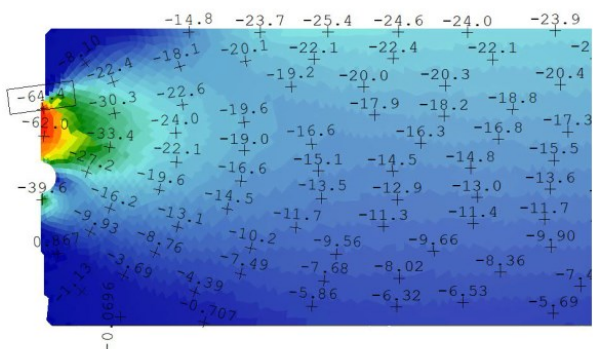


Figura 17. Tensiones horizontales en junta bajo ULS.

3.3.1. Ensayos a escala real

Para verificar los resultados del comportamiento no lineal del hormigón reforzado con fibras obtenidos mediante los modelos numéricos se llevaron a cabo ensayos a escala real.

La geometría de las juntas entre dovelas tenía una superficie de contacto de 100 mm una vez descontado el espacio en el queda alojado el elemento de guiado o “guide rod”.

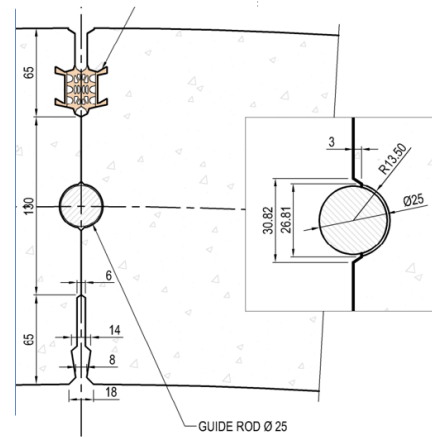


Figura 18. Geometría de la junta entre dovelas.

Teniendo en cuenta las distintas excentricidades, tanto debidas a imperfecciones de montaje del anillo como de las propias acciones externas, la metodología más sencilla para la realización de los ensayos, a la vez que muy similar con las condiciones de carga reales, era aplicar una carga uniforme sobre una de las dos mitades del área de contacto de la junta, es decir en 50 mm de anchura, lo que equivale a una excentricidad total de 40 mm.

En los ensayos [6] pudo medirse la deformación transversal del canto de la pieza a distintas profundidades de la misma, comprobándose que deformaciones horizontales por debajo de 0.03 mm eran propias de un estado anterior a la propia fisuración, y a partir de dicho límite se alcanzaba el “splitting” y un estado post-fisuración de la pieza.

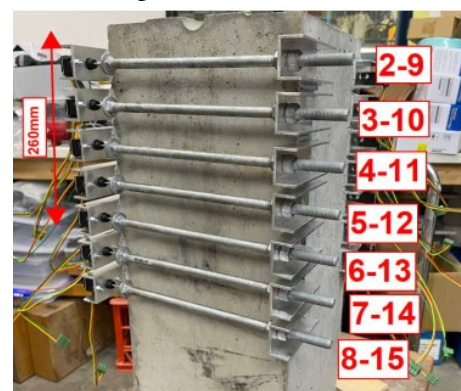


Figura 19. Medida de las deformaciones transversales de la junta a diferentes profundidades.

Pudo verificarse que los resultados obtenidos con los modelos no lineales empleados en el diseño eran satisfactorios.

4. Consideraciones finales del diseño de anillos reforzados con fibras

El empleo de hormigón reforzado con fibras de acero, como las utilizadas en este proyecto (tipo Bekaert Dramix 4D 80/60 BG), constituye una alternativa estructural al refuerzo convencional que debe ser objeto de un análisis integral desde una perspectiva económica y ambiental en el diseño del revestimiento de túneles de dovelas. Dicho análisis debe abordarse de manera holística, considerando no solo la comparación de costos económicos y el impacto ambiental entre soluciones de refuerzo, sino también su influencia en el espesor de las dovelas y en el volumen total de excavación requerido. Asimismo, este estudio debe ajustarse a las particularidades de cada proyecto, teniendo en cuenta las solicitaciones específicas del mismo y las variables económicas propias de cada contexto geográfico, con el fin de determinar la opción más eficiente y sostenible en términos técnicos, ambientales y financieros.

Agradecimientos

Los autores de la presente comunicación quieren agradecer su esfuerzo y apoyo a los diferentes participantes en el proyecto. El equipo de diseño del departamento de estructuras de TYPSA, el contratista UTE formada por Acciona-Ferrovial, el cliente final Metro Sydney, y a los demás intervinientes de un proyecto tan completo y excepcional como este.

Referencias

- [1] Eurocódigo (2004), *EN 1992-1-2:2004*, Norma Europea.
- [2] Boletín 83 del Código Modelo (2010), *Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete*.
- [3] ACI Comitte 544 (2016) *ACI 544.7R-16 Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Precast Concrete Tunnel Segments*, Farmington Hills, American Concrete Institute, ACI.
- [4] Special Activity Group 5, New Model Code, (2012) *Bulletin 65, Model Code 2010 Volume 1*, Laussane, International Federation for Structural Concrete, fib.
- [5] Special Activity Group 5, New Model Code, (2012) *Bulletin 66, Model Code 2010 Volume 2*, Laussane, International Federation for Structural Concrete, fib.
- [6] D. A. F. Oliveira (2024). *High-performance fibres in concrete: Australian experience in FRS and segmental linings*.