

COMPORTAMENT RESISTENT DELS REVESTIMENTS DE TÚNEL REALITZATS AMB DOVELLES PREFABRICADES DE FORMIGÓ

Oriol Arnau¹ i Climent Molins¹

¹Departament d'Enginyeria de la Construcció. oriol.arnau@upc.edu climent.molins@upc.edu

Paraules Clau: Túnel, assaig in situ, anàlisi estructural, simulació numèrica.

Resum: *La present ponència mostra l'activitat investigadora duta a terme en l'àmbit de la resposta resistent dels revestiments de túnels realitzats a base d'anells de dovelles prefabricades de formigó. L'activitat s'inicià amb la realització d'una prova de càrrega in situ sobre un tram experimental ubicat dins la línia 9 del metro de Barcelona. Les conclusions obtingudes sobre el seu comportament van permetre desenvolupar models de simulació numèrica tant 2D com 3D ben contrastats amb els resultats experimentals de l'assaig. Aquesta recerca també inclou l'estudi del comportament longitudinal del revestiment, on es determina fins a quin punt la compressió longitudinal inicialment introduïda per la tuneladora es va dissipant en el temps per efecte de la fluència del revestiment, fet que condiciona la capacitat d'interacció longitudinal entre anells successius.*

1. INTRODUCCIÓ

La utilització de màquines tuneladores per a la construcció de túnels s'ha incrementat de forma notable al llarg dels últims anys degut als nombrosos avantatges que presenta davant dels mètodes tradicionals de perforació. Aquest sistema permet la construcció de túnels sota grans pressions de terres i aigua, les quals han de ser resistides pel revestiment estructural després del pas de la tuneladora. Aquest nou escenari amb major sol·licitacions estructurals converteix al disseny del revestiment en un dels punts clau en tot projecte de túnel.

Per tal de procedir de la forma més segura possible en la contenció de les terres i l'aigua, el revestiment es va construir a l'interior de la tuneladora a mida que aquesta avança. El revestiment del túnel es descompon en diverses peces de formigó prefabricades que conformen un anell, el muntatge successiu dels quals acaba formant la totalitat del revestiment (Fig. 1).

Aquesta particular configuració genera una resposta estructural condicionada per múltiples fenòmens complexos com ara el comportament dels junts, dels materials de contacte disposats en ells o de la interacció terreny-estructura. La bibliografia presenta significatives llacunes de coneixement al respecte, dotant a aquest àmbit un fort interès per al desenvolupament de recerca ja que la millora del coneixement de la resposta estructural dels revestiments permetrà optimitzar els processos de disseny i oferir un producte més segur a un cost més reduït.

Un ambiciós pla de recerca va ser plantejat a fi d'incrementar el coneixement sobre la resposta estructural dels revestiments de túnels realitzats a base de dovelles prefabricades. Inicialment es va dissenyar un assaig innovador que permetés obtenir de forma realista la resposta estructural d'aquesta tipologia de revestiment. En base als coneixements obtinguts en l'assaig, es van desenvolupar tècniques de modelització numèrica destinades a reproduir de forma fidel els principals fenòmens que influeixen en la resposta estructural dels revestiments.

L'adequació dels models plantejats es va contrastar mitjançant la simulació numèrica de l'assaig, obtenint un excel·lent nivell d'adequació vers els resultats experimentals.

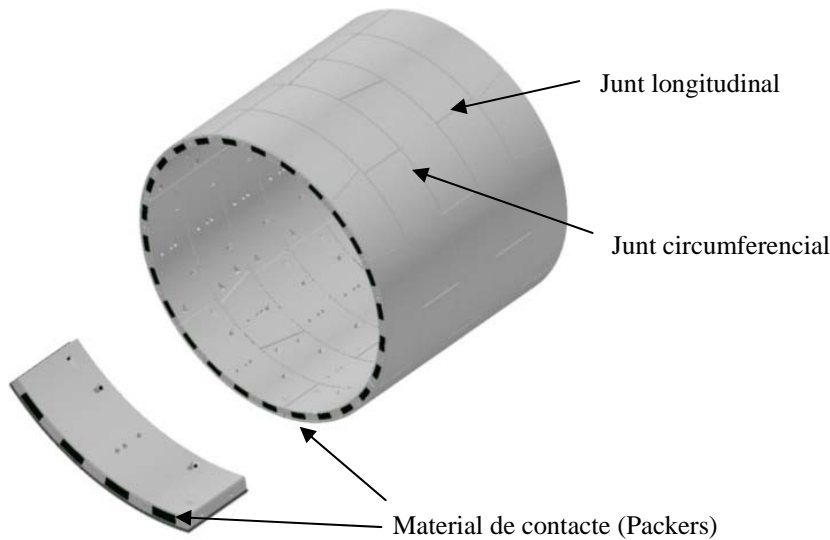


Figura 1. Revestiment de túnel a base de dovelles prefabricades de formigó.

Un segon bloc de recerca s'ha focalitzat en la determinació de la resposta tridimensional del revestiment. Degut a la particular configuració dels junts entre anells (junts circumferencials), el nivell de la força longitudinal que roman al túnel condiona el nivell d'interacció entre anells adjacents i per tant, la capacitat de repartiment longitudinal o, el que és el mateix, el grau de tridimensionalitat de la resposta. L'estudi dels mecanismes longitudinals de transmissió de forces ha permès determinar els fenòmens que condionen la seva evolució i, en base a aquests, proposar formulacions que permetin predir la reducció que experimenta la força longitudinal al llarg del temps.

2. ASSAIG *IN SITU* LINEA 9

A fi de poder obtenir evidències experimentals clares de la resposta estructural real presentada pels revestiments de túnels, es va dur a terme un assaig *in situ* sobre un tram experimental de la Línea 9 del metro de Barcelona [1]. La particularitat principal de l'assaig és que es va dur a terme sobre un anell ubicat en la seva posició definitiva dins del túnel, salvant d'aquesta forma la limitació principal de les experiències prèvies realitzades, que no podien considerar la interacció terreny-estructura real en realitzar-se dins de laboratoris.

El tram experimental estava constituït per 15 anells de dovelles de formigó, les quals estaven exclusivament reforçades mitjançant l'ús de fibres metàl·liques (sense barres d'armadura convencionals). L'assaig presentava tres objectius principals: 1) desenvolupar i aplicar una nova tècnica per assajar revestiments de túnels tenint en compte tots els seus condicionants, 2) obtenir evidència experimental de la resposta estructural dels revestiments en les condicions de roca dura presentades, i 3) determinar la viabilitat de la utilització de les fibres d'acer com a únic reforç per al formigó de les dovelles.

La configuració de l'assaig es basava en l'aplicació de tres carregues puntuals en la zona de clau d'un anell, les quals es generaven mitjançant tres gats hidràulics plans col·locats a l'extradós de les dovelles durant el procés de prefabricació. La càrrega màxima finalment aplicada va ser de 3000kN, suficients per a generar una significativa fissuració del formigó en la zona carregada.

Es va disposar d'una gran quantitat d'instrumentació interna i externa tant en l'anell carregat com en els adjacents, permetent enregistrar amb un gran nivell de detall la resposta presentada per l'estructura.

L'anàlisi dels resultats va permetre obtenir conclusions significatives sobre la resposta estructural dels revestiments de túnels realitzats a base de dovelles prefabricades de formigó i dels principals fenòmens involucrats. A més, es van poder contrastar les diferents hipòtesis i valors correntment emprats en la fase de disseny per a la interacció terreny-estructura.

3. MODELS D'ANÀLISI RESISTENT

L'optimització del procés de disseny estructural requereix disposar d'eines que permetin predir la resposta estructural que un determinat revestiment presenta davant de les seves particulars càrregues i condicions de contorn. Els múltiples paràmetres que l'afecten juntament amb la complexitat pròpia de cadascun d'ells genera que aquesta tasca sigui pràcticament inabordable mitjançant models analítics simplificats, requerint la utilització de models de simulació numèrica.

La realització de l'assaig *in situ* va permetre identificar els fenòmens que determinen la resposta estructural del revestiment i que, per tant, havien de ser inclosos de forma molt exacta. L'estratègia adoptada es va basar en l'estudi d'aquelles tècniques de modelització que permetessin reproduir de forma acurada cada un d'aquests fenòmens, de forma aïllada, per finalment integrar-los en un únic model del revestiment.

D'aquesta forma es van desenvolupar dos models de túnel per a reproduir l'assaig *in situ*, un 2D de tensió plana i un 3D de elements finits làmina que integressin les tècniques adequades per a reproduir: 1) el comportament post-fissuració del formigó reforçat amb fibres d'acer, 2) la resposta rotacional no lineal dels junts, 3) el comportament no lineal amb deformacions romanents presentat pel material de contacte dels junts entre dovelles i 4) la interacció terreny estructura [2].

La contrastació dels resultats numèrics amb les mesures experimentals va demostrar la capacitat d'ambdós models per reproduir la resposta real. La precisió en la predicció dels desplaçaments del túnel i en les obertures dels junts al llarg dels diferents estadis de càrrega va avalar la validesa de la filosofia, les hipòtesis i les tècniques de modelització adoptades. Les similituds entre els patrons de fissuració numèric i real corroboraren que el model material adoptat per incorporar la contribució de les fibres d'acer en el formigó era adequat.

4. COMPORTAMENT LONGITUDINAL DIFERIT DELS REVESTIMENTS

El nivell de tridimensionalitat que la resposta estructural d'un revestiment a base de dovelles de formigó presenta depèn de la capacitat de transmissió de forces tangencials entre els seus anells.

La majoria dels revestiments de túnel construïts a la península ibèrica presenten una configuració plana en les seves juntes entre anells. Això suposa que la transferència de forces es produeix a través dels elements de contacte (packers) tot sol·licitant-los a tall i fricció. En conseqüència, la seva capacitat de transmissió de força tangencial dependrà de la força longitudinal existent en els junts entre anells.

El particular procés constructiu que fan servir les tuneladores produeix una força longitudinal permanent sobre el revestiment per tal d'impulsar-se i avançar, a la vegada que es conté la pressió de terres i aigua del front d'excavació. De forma general, en la bibliografia es considera que aquesta força roman permanentment en el revestiment. No obstant, si es tenen en compte les deformacions diferides que, ben segur, experimenta el formigó, aquesta

hipòtesi pot resultar poc realista. Per aquesta raó, s'ha desenvolupat un estudi detallat del procés constructiu dels revestiments així com dels diferents mecanismes que podien causar la transmissió de forces del revestiment cap al terreny [3] que demostra la dependència de la tensió de compressió romanent amb la fluència longitudinal experimentada per el revestiment. L'estructura comprimida per l'acció de la tuneladora experimenta un procés de relaxació que origina la progressiva pèrdua de la força longitudinal a mida que passa el temps. L'anàlisi d'aquest mecanisme ha permès determinar una formulació analítica per a la predicció de la tensió de compressió romanent en base al coeficient de fluència longitudinal del revestiment. Un model numèric d'anàlisi evolutiva ha permès realitzar la contrastació de la formulació proposada, obtenint un excel·lent nivell d'adequació entre ambdós resultats.

A més, també s'ha estudiat la influència que les deformacions diferides experimentades pel material de contacte dels junts (packers) podia presentar. S'ha dut a terme un assaig específic de laboratori per a determinar la fluència d'aquests materials i s'ha proposat una formulació per al coeficient global de fluència del revestiment a fi de unificar les deformacions diferides del formigó i del packer.

5. CONCLUSIONS

La investigació desenvolupada ha suposat una contribució directe en el coneixement de la resposta resistent dels revestiments de túnel realitzats a base de dovelles prefabricades de formigó. La realització d'un innovador assaig *in situ* ha permès desgranar els principals fenòmens que governen el comportament d'aquesta tipologia de revestiments.

Això ha permès desenvolupar tècniques de simulació numèrica basades en la reproducció acurada de tots els fenòmens un a un i la seva posterior integració en un únic model de túnel. Els excel·lents resultats obtinguts en la simulació de l'assaig *in situ* han validat el model, el qual ha sigut satisfactoriament usat per analitzar situacions particulars en diferents túnels.

L'anàlisi dels mecanismes longitudinals de transmissió de forces ha permès determinar l'abast de la pèrdua de compressió longitudinal en el temps a causa de la fluència del revestiment. Aquest fet condiciona la capacitat d'interacció longitudinal, que disminueix amb l'edat de túnel.

AGRAIMENTS

Els autors volen mostrar el seu agraïment a GISA i a l'empresa FCC Construcción S.A. per tot el suport donat a la investigació de la resposta estructural dels revestiments de túnel.

REFERÈNCIES

- [1] Molins, C., Arnau, O. *Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution.* Tunnelling and Underground Space Technology. (2011), doi:10.1016/j.tust.2011.05.002.
- [2] Arnau, O., Molins, C. *Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation.* Tunnelling and Underground Space Technology. (2011), doi:10.1016/j.tust.2011.04.005.
- [3] Arnau, O., Molins, C., Blom, C.B.M., Walraven, J.C. *Longitudinal Time-Dependent response of segmental tunnel linings.* Enviat a Tunnelling and Underground Space Technology.