

Los Ángeles Effluent Outfall: Primer túnel con dovelas prefabricadas pretensadas en Estados Unidos.

Los Angeles Effluent Outfall: America's first post tensioned pre-cast segmental tunnel liner.

Antonio Vázquez Salgueiro^a, Alejandro Sanz Garrote^b, Alfonso Navarro Lérda^c,
Susana López Manzano^d & Conchita Lucas Serrano^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS S.A. Dirección Técnica. Jefe servicio Procesos Constructivos y Trabajos Temporales. avazquez@dragados.com

^b Ingeniero Industrial. DRAGADOS S.A. Dirección Técnica. Jefe Servicio Obras Subterráneas. asanzga@dragados.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SENER MOBILITY S.A. Ingeniero de túneles. alfonso.navarro@mobility.sener

^d Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS S.A. Dirección Técnica. Procesos Constructivos y Trabajos Temporales. slopezm@dragados.com

^e Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. DRAGADOS S.A. Dirección Técnica. Jefa Departamento Puentes, Estructuras, Obras Marítimas y Geotecnia. clucass@dragados.com

RESUMEN

El túnel “Los Ángeles Effluent Outfall”, incluido en el plan de tratamiento de aguas residuales del Distrito Sanitario de los Ángeles, es el primer túnel en Estados Unidos en incorporar dovelas prefabricadas postensadas donde el recubrimiento y las cargas de agua externas no compensan las presiones internas a las que entrará el túnel una vez puesto en servicio, permitiendo asegurar una estanqueidad suficiente para evitar la posible filtración de agua tratada. El túnel se está excavando con una tuneladora tipo Hido Slurry, instalando un revestimiento de 5.5 m de diámetro interior, compuesto por 6 dovelas de hormigón de 0.305 m de espesor, ejecutándose el postensado de los anillos de forma simultánea a la excavación.

ABSTRACT

The Los Angeles Effluent Outfall Tunnel, designed to transport treated water from the Joint Water Pollution Control Plant (JWPCP) in Carson near Los Angeles, is the first tunnel in the United States to incorporate post-tensioning into the precast segmental lining. This post-tensioning will counter act high internal pressures and guarantee there are enough hoop forces in the segments to remain compressed under peak flows, preventing leakage. The tunnel is being excavated with a slurry TBM, installing precast concrete segmental rings comprised of 6 concrete segments, 5.5 m internal diameter and 0.305 m thick, with post-tensioning applied concurrently with the TBM excavation.

PALABRAS CLAVE: dovelas prefabricadas postensadas, túnel, presiones internas, excavación con TBM.

KEYWORDS: post-tensioned pre-cast segmental tunnel liner, high internal pressures, TBM excavation.

1. Origen de los túneles con pretensado postesado.

El desarrollo de las grandes obras hidroeléctricas de los años 70 en Centroeuropa propició la construcción de potentes saltos de agua, con elevadas presiones en sus conducciones

excavadas. Aunque en muchos casos la potencia y calidad de la roca permitía un revestimiento simple de hormigón armado, en otros se requería de unas medidas adicionales para evitar la

Figure 1 consists of four parts: (a) A plan view of a circular concrete segment showing various prestressing steel types (K-Type, N-Type, A-Type, B-Type) and components like Darter-Holed-Jack, Rev Chair, and X-Anchor. (b) A photograph of a large circular concrete segment being lifted by a crane. (c) A photograph of a stack of precast concrete segments. (d) A plan view of a segment with anchorage showing a Sheath, X Anchor, and Notched Portion.

En el caso de Estados Unidos no se conocen experiencias previas de pretensado de anillos de dovelas de túneles, hasta el proyecto Clearwater, destacando además la extensión de aplicación del sistema y su ejecución de forma simultánea a la excavación de la tuneladora o TBM por sus siglas en inglés (*Tunnel Boring Machine*).

[illegible]

Vázquez, A., Sanz, A., Navarro, A., López, S. & Lucas, C./ IX CONGRESO ACHE – GRANADA 2025 2

2. LA Effluent Outfall túnel.

El Proyecto Clearwater es un plan de tratamiento de aguas residuales del Distrito Sanitario de Los Ángeles (Estados Unidos) para proveer de capacidad suficiente a la ciudad, aliviando y complementando a los colectores existentes que datan de los años 1930 y 1950. En la actualidad, el agua tratada en Carson se conduce a Royal Palms Beach a través de dos túneles donde se sitúa la toma de emisarios.

Debido a su uso constante, los túneles existentes no pueden ser visitados, siendo sus condiciones actuales desconocidas. En 1995 una avenida llevó al límite de diseño el sistema al completo, y puso de manifiesto la necesidad de un nuevo túnel que, además de aumentar la capacidad de tratamiento, permitiera baipasear los túneles existentes para realizar el mantenimiento necesario.

2.1 Descripción proyecto

El nuevo túnel, “Los Ángeles Effluent Outfall” que está actualmente en construcción por Dragados USA (Flatiron Dragados desde 2025), tiene un diámetro interior de 5.5 m, una longitud de 11.25 km, siendo considerablemente más largo que los túneles existentes debido a su trazado sinuoso que sigue la alineación de calles y zonas públicas.

El nuevo túnel atraviesa distintos tipos de terreno en su recorrido, dividido en 6 zonas

de propiedades geomecánicas similares. La primera mitad (zonas 1 a 3) consiste mayoritariamente en suelos aluviales de carácter principalmente arenoso, mientras que la segunda mitad atraviesa rocas sedimentarias, mayoritariamente limolitas, argilitas, dolomías y basaltos. Además, el túnel atraviesa la zona de falla de Palos Verdes, activa sísmicamente y de 2.3 km de anchura. (tramo transición, zonas 3 y 4). En cuanto al recubrimiento del túnel, en la primera mitad del recorrido con terrenos aluviales, 5.8 km, el recubrimiento se sitúa entre los 18-21 m, destacando la segunda mitad excavada en roca, con recubrimientos que ascienden hasta los 140 m. El nivel freático se sitúa, en todo el recorrido, por encima de la bóveda del túnel, lo que implica que éste estará sometido a presiones hidrostáticas.

El túnel se está excavando con una tuneladora tipo hidroescudo, capaz de trabajar con una presión de confinamiento de hasta 10 bar, y dotada de una capacidad de empuje de 158.250 kN, cifra excepcionalmente alta, del orden de 3 veces superior a la de tuneladoras de características y tamaño similar. Esta extraordinaria capacidad de empuje tiene el objetivo de dotar a la tuneladora de mecanismos para avanzar en los tramos de roca con un potencial de fluencia extremadamente alto, que podrían generar elevadas presiones del terreno sobre los escudos de la tuneladora, llegando a atraparla.

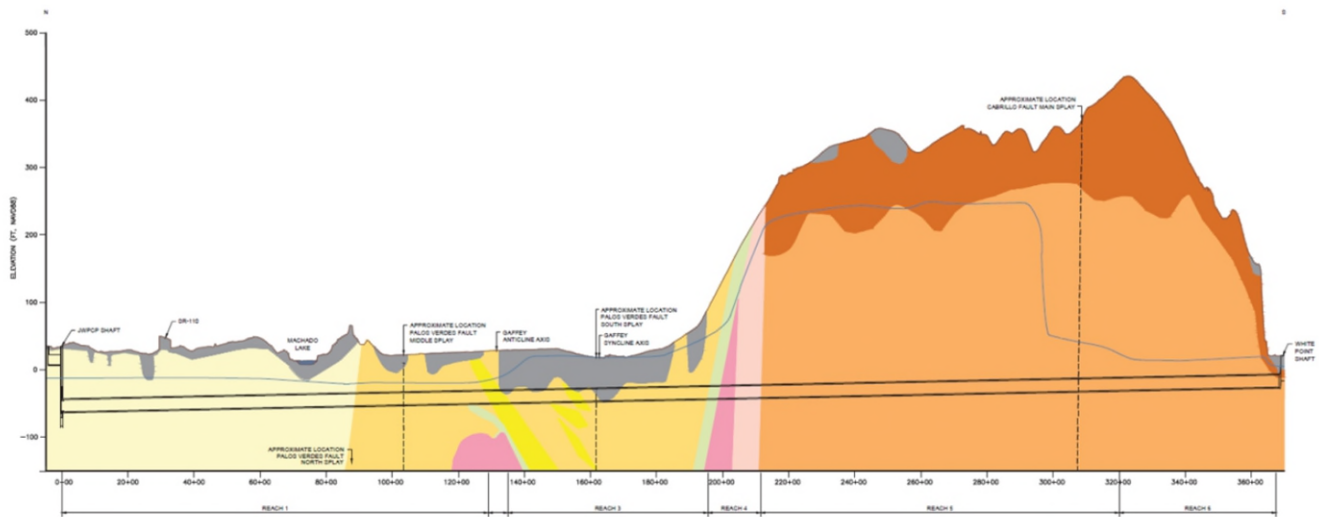


Figura 3. Perfil geológico de Los Ángeles Effluent Outfall tunnel

El proyecto referencial contemplaba 2 revestimientos diferentes del túnel mediante dovelas de hormigón de 30.48 cm de espesor, denominadas tipo I y tipo II [1]. Las que se denominaban tipo I consistían en dovelas de hormigón armado de 41.4 MPa a las que se añaden 2 tendones de pretensado circulares. Estas dovelas eran necesarias en 6560 m del túnel, comprendiendo los tramos 1 y 3, así como algunas secciones en los tramos 4 y 6. El pretensado indicado en el interior de estas dovelas de revestimiento era necesario para contrarrestar las altas presiones internas que se producían cuando el colector entraba en carga, puesto que las cargas internas llegaban a ser superiores que las cargas externas del terreno, asegurando así que las juntas de estanqueidad del anillo estuviesen en todo momento suficientemente comprimidas, y evitando así que se produjeran fugas de aguas tratadas al acuífero natural de la zona. Las dovelas tipo II eran de hormigón armado convencional con hormigón de 55.2 MPa, abarcando los restantes 4640 m del túnel.

Dragados y Sener, en colaboración con LACSD analizaron el proyecto referencial para ajustar la solución tanto desde el punto de vista del diseño como de la viabilidad constructiva con tuneladora. Entre los retos encontrados, los condicionantes claves resultaron:

- Optimizar el sistema de pretensado para facilitar su ejecución de forma simultánea a la excavación con TBM, puesto que dicho pretensado era necesario en casi 6600 m de túnel.
- Asegurar que la ejecución se realiza de forma segura con presiones que podrían alcanzar 900 kPa, siendo necesaria la estabilidad del anillo de revestimiento, minimizando el riesgo de descompresión y de movimientos diferenciales en las dovelas que pusiera en riesgo la resistencia estructural del anillo.
- Conseguir que las dovelas postesadas pudieran ser diseñadas únicamente con fibras de acero (sin ferralla) y que soportaran las cargas de compresión del sistema de postesado y del terreno.
- Adicionalmente, para la segunda mitad del trazado (dovelas tipo II), manejar altas fuerzas de empuje de los cilindros de la TBM en un revestimiento delgado, con dovelas que deben soportar cargas significativamente mayores que las típicas para sus dimensiones.

3. Elección de la solución

Para el diseño de esta dovela tipo I a usar en las partes más someras del túnel se procedió a revisar el diseño referencial del sistema de postesado propuesto. El objetivo era mantener la compresión del anillo de dovelas en todas las condiciones de servicio previsibles y las juntas de estanqueidad suficientemente comprimidas para mantener la estanqueidad del conjunto.

En el diseño de referencia se planteaba el uso de vainas circulares de pretensado dispuestos en un trazado con curvas horizontales y verticales. Revisando esta propuesta se observó que esta configuración no era óptima dado que el uso de este tipo de vainas requiere que los cables a postesar tengan que ser tesados simultáneamente. Este hecho conlleva un problema logístico dentro de un espacio reducido como es un túnel al requerir de sistemas de tesado grandes y pesados. Además, la trayectoria de la vaina con curvas conllevaría un aumento de las pérdidas de carga en el postesado que reduciría substancialmente la efectividad del sistema.

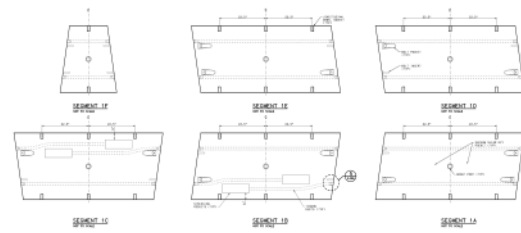


Figura 4. Geometría anillo y sistema de postesado definida en el proyecto de referencia.

El sistema finalmente propuesto consta de vainas planas con tendones no adherentes, cada uno con cordones de acero de baja relajación, con 7 alambres envueltos en fundas de plástico engrasadas. Para minimizar las pérdidas de tesado, se reorientó la alineación del pretensado, eliminando las curvas horizontales y se seleccionó un radio vertical mínimo de 1.35 m, aconsejado por el proveedor del sistema de postesado.

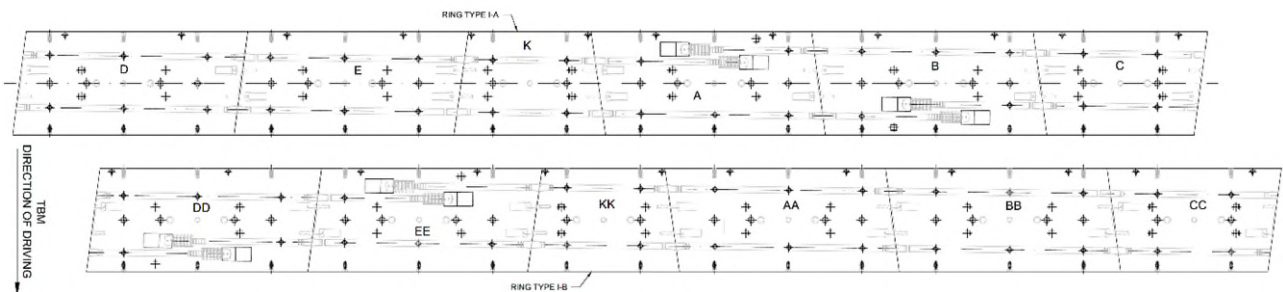


Figura 5. Dovelas tipo I – Vista en desarrollo del anillo y del sistema de postesado.

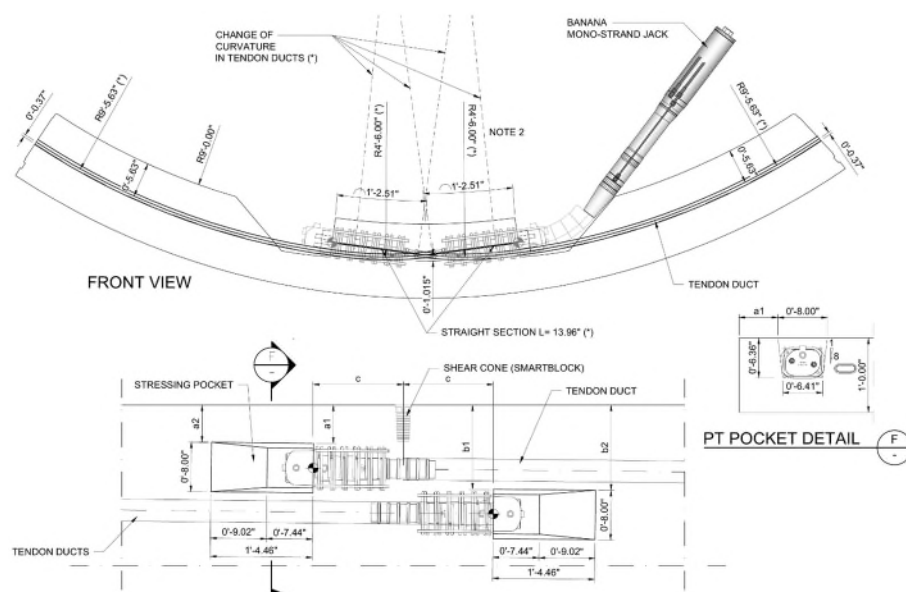


Figura 6. Sistema de postesado. Detalles de bloques de anclaje y uso de gato mono cordón para el tesado

3.1 Optimizaciones de diseño

Como se puede observar en la Fig. 5, se diseñaron 2 juegos de dovelas distintos del tipo-I, en uno los puntos de inserción y anclaje estaban en las dovelas A y B y en el otro tipo estaban en las dovelas simétricas EE y DD. Esto permitió facilitar la instalación del sistema de cables ya que se aseguraba que en todos los anillos del túnel los extremos y puntos desde donde insertar y tesar los cables quedaran en la parte superior del túnel, facilitando así su ejecución de manera simultánea a la excavación.

En cuanto al sistema de postesado propuesto, constaba de dos bloques en cada extremo con el objetivo de poder tesar los tendones desde ambos extremos y así reducir las pérdidas de tesado.

Una de las partes más sensibles era cómo sellar y asegurar las juntas radiales entre las dovelas del mismo anillo y proporcionar una continuidad a la vaina (compuesto de 6 tramos distintos a lo largo de cada dovela del mismo anillo) para permitir la instalación del cable y su posterior inyección. Para ello se diseñó un sistema de sellado mediante la instalación de

placas de acero recubiertas de teflón y junta tórica que debían ser instaladas en los moldes de fabricación de las dovelas para que éstas quedaran embebidas.

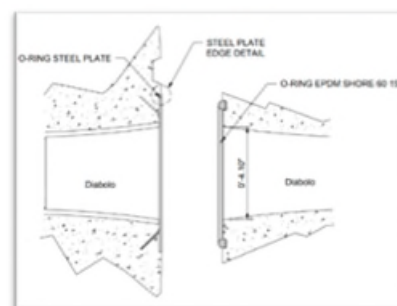


Figura 7. Detalle de conexión en juntas para instalación y sellado del sistema de postesado.

La sección de vaina en esta zona de junta era sustituida por una pieza prefabricada troncocónica denominada “diábolo” para ayudar en el guiado de los cables durante su instalación.

Otro de los aspectos optimizados fue la optimización del número de cables en los tendones a lo largo del trazado del túnel. Inicialmente el diseño de referencia especificada que se debían instalar 2 tendones por anillo y en cada tendón se debía instalar 4 cables. Dado que cada zona del túnel que requería de postesado

tenía unas necesidades diferentes ya que la geología no era la misma, el nivel freático variaba y la presión interna de servicio en el interior del túnel no era constante a lo largo del trazado, se evaluaron 4 posibles configuraciones para el diseño del postesado definitivo.

En el proceso de optimización, se mantuvo el número de tendones para asegurar que la compresión del anillo era equilibrada. Se calcularon las presiones a resistir y teniendo en cuenta las diferentes pérdidas instantáneas y a largo plazo de los cables, se consiguió reducir más de un 20% el número de cables a instalar en el túnel. A continuación, se muestra una tabla resumen

Tabla 1. Configuración de postesado.

Desde (ft)	Hasta (ft)	Configuración de Postesado	Mínima fuerza Postesado (kN)
0+00	75+00	2 tendones x 3 cables	936,8
75+00	125+50	2 tendones x 4 cables	1234,4
125+50	137+50	2 tendones x 3 cables	936
137+50	193+00	2 tendones x 2 cables	632,5
193+00	363+00	NO PT	
363+00	367+41	2 tendones x 2 cables	

3.2 Optimizaciones en construcción

Como se ha comentado anteriormente, dadas las limitaciones para la colocación de los cables dentro del sistema de postesado del túnel, se diseñaron dos dovelas tipo I que permitía que al instalar los anillos siembre cayeran las dovelas con los cajeados de pretensado en la mitad superior del anillo, maximizando las opciones de evitar su interferencia con las redes de suministro a la tuneladora y permitir así la ejecución del postesado de forma simultánea a la excavación.

La introducción del pretensado en el intradós de las dovelas prefabricadas fue un factor

determinante que influyó en el diseño de la TBM (especialmente en el sistema de erección de las dovelas y en la configuración de los remolques que lleva arrastrando con sus equipos auxiliares, también llamados *back up*), así como en la propia prefabricación de las dovelas que debían incluir los accesorios e insertos del sistema de pretensado (vainas, conectores continuidad, diábolos, etc.).

3.2.1. Remolques para pretensado.

Dado que la mayoría del intradós de las dovelas prefabricadas era inaccesible debido al escaso espacio en la tuneladora donde se van instalando los anillos, la única forma de ejecutar dicho pretensado consistía en generar un espacio adecuado en remolques arrastrados por la máquina, específicamente diseñados al efecto. Se diseñaron 3 remolques específicos (los números 12, 13 y 14 de los 18 totales del sistema completo para hacer funcionar la TBM). Cada uno estaba dimensionado para cada una de las etapas del proceso de postesado: enfilado, tesado, e inyección. Colocando dichos remolques cerca del final del conjunto se consiguió minimizar el impacto en sistemas sensibles para la excavación como son los equipos hidráulicos, eléctricos y otros sistemas que van más cerca del frente de excavación.

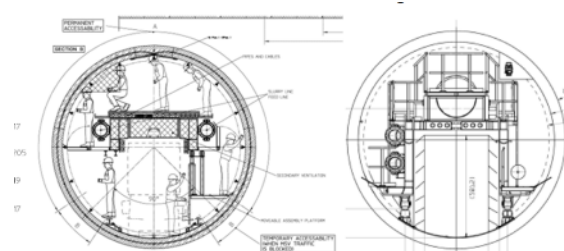


Figura 8. Secciones de los pórticos para labores de postesado.

3.2.2. Configuración especial de las placas de vacío del erector de dovelas

La TBM instala las dovelas mediante un sistema, denominado erector de dovelas, diseñado para coger las dovelas a nivel de solera y colocarlas en su posición definitiva, empleando un sistema de vacío para sujetar las dovelas en el proceso. Para asegurar la suficiente fuerza de succión y poder instalar las dovelas de forma segura, fue necesario implementar unas modificaciones en las placas de vacío del erector para evitar que los recesos (no habituales) del pretensado impidiesen la acción del vacío. Los bordes de las almohadillas de la placa de vacío se configuraron para tener una amplia tolerancia con los distintos recesos, incluidos los generados para el pretensado. Además, unas piezas de gomaespuma se añadieron a la configuración de la placa de vacío, encima de los huecos se encontraban las vainas de pretensado. Estas piezas de gomaespuma requirieron reemplazo regular y pruebas semanales para garantizar su funcionalidad.

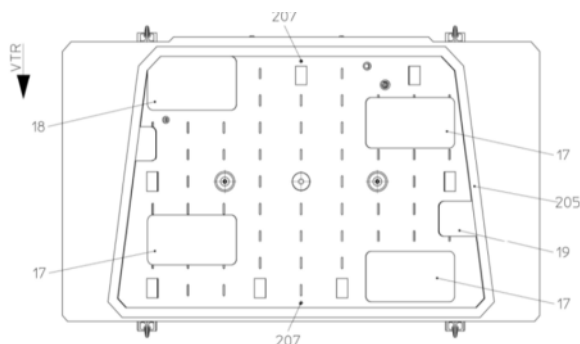


Figura 9. Placa de vacío del erector con gomaespuma para tapar los cajeados del pretensado.

3.2.3. Mejoras en la prefabricación

Uno de los primeros retos a superar en la prefabricación era el sellado de las juntas radiales entre dovelas que conformaban un anillo, concretamente asegurar la continuidad y estanqueidad de las vainas de pretensado a lo largo de cada anillo. El proyecto indicaba una junta mediante una placa de acero recubierta de teflón, pero el diseño presentó retos tanto en la durabilidad, fabricación y montaje. Respecto a la durabilidad se consiguió encontrar un material

con recubrimiento mediante aplicación proyectada en polvo con un 5% de PTFE que garantizaba el rozamiento necesario y era resistente a arañazos y otros deterioros. Para asegurar la calidad del del sellado sin desplazar los sellos de estanqueidad durante el montaje de las dovelas se desarrollaron sellos compresibles compatibles con las placas de acero.

Además, las vainas y trompetas de transición eran suministrados por el especialista de pretensado, sin embargo, incorporar estos elementos en el encofrado y evitar que se desplazaran añadía dificultad a la prefabricación. Para resolver estos problemas, se idearon unos dispositivos a modo de “lenguas” que se incorporaban en las trompetas. [2]



Figura 10. “Lengua” instalada

Una vez que se desencofraban las dovelas, se revisaba que las vainas no estuvieran obstruidas. Inicialmente se realizaba con cinta flexible, sin embargo, no era suficiente para detectar pequeñas inclusiones de lechada, por lo que se desarrolló un útil llamado “*puck*” (pieza de plástico plana y ovalada) unido a una vara flexible y empujado a través de las vainas que resultó eficaz para esta función.



Figura 11. Revisión de no obstrucción de vainas mediante pieza de plástico unida a varilla flexible

4. Fabricación de las dovelas y ejecución en obra.

Los retos de prefabricación fueron testados con diferentes pruebas en la factoría para asegurar la puesta correcta de las distintas fases del pretensado (enfilado, tesado e inyección) antes de enviar las dovelas a obra. Se solían prefabricar del orden de 7 a 8 anillos por turno, trabajando dos turnos diarios, por lo que se podrían llegar a fabricar 14-16 anillos al día.



Figura 12. Útil para enfilar

Debido al cronograma de obra, especialmente la logística del movimiento de los materiales a través del túnel, incluidos los tiempos de conducción de los vehículos de suministro y a las estrictas limitaciones de tiempo impuestas por la producción de la tuneladora, para la ejecución del pretensado se adoptó la estrategia de almacenamiento de materiales en la TBM, mediante la cual se mantenía disponible una reserva equivalente de hasta dos días de programa de obra para enfilar de cordones, así como material de inyección y otros. Además, para evitar posibles interrupciones en el proceso de postensado, se mantuvieron dentro de la

tuneladora 2 o 3 gatos unifilares en todo momento. Era primordial cumplir con las especificaciones de inyectar las vainas dentro de los 10 días posteriores al tesado de los tendones, aunque las circunstancias prácticas del proyecto a menudo requirieron un cronograma aún más comprimido.



Figura 13. Enfilado de las dovelas con cabestrante

Para el enfilar se emplearon cabrestantes para facilitar la inserción de los cables en las vainas. Para mantener un espacio libre adecuado y optimizar el ángulo del cordón se colocaron poleas estratégicamente dentro de los orificios de los pernos existentes en las dovelas.

Para el tesado de los tendones, se emplearon gatos unifilares. Puesto que dicho gato no encajaba en los cajeados de las dovelas, se utilizaron un conjunto de placas de tesado denominado “banana”. Estas placas proporcionaban el ángulo adecuado de los cordones para poder ser tesados.

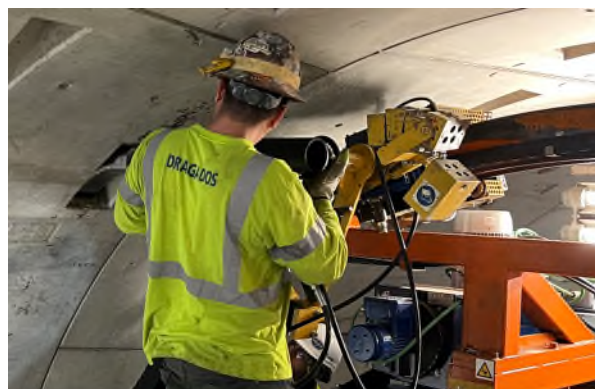


Figura 14: Tesado de dovelas



Figura 15: Detalle “banana”

Inicialmente se diseñó el tesado desde los dos extremos (ambos activos), pero en los primeros tesados se comprobó que el tesado desde el segundo anclaje sólo servía como “prueba de despegue” y los alargamientos adecuados se conseguían con el primer tesado, por lo que se consiguió optimizar los tiempos de ejecución

El sistema de inyección propuesto por el especialista mediante bomba de vacío ejercía una presión negativa constante en todo el tendón, seguida de la inyección de lechada desde el extremo opuesto hasta que se observaba el retorno en la cámara de vacío. De esta manera se evitó tener que perforar más de 7000 orificios de ventilación en el prefabricado para realizar la inyección de las vainas

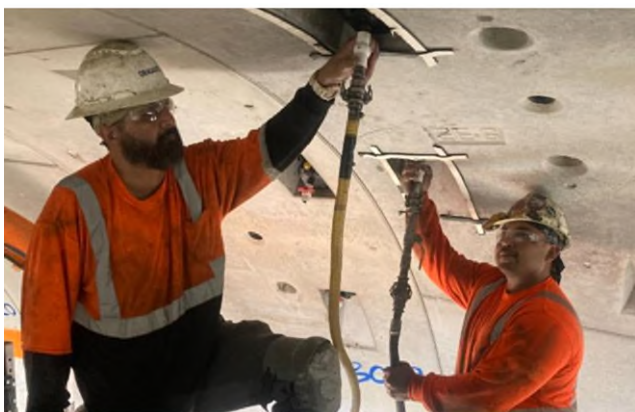


Figura 16: Inyección del pretensado

El proyecto consta de unos 7344 anillos en total, de los cuales 4064 anillos tienen pretensado. A fecha de redacción del artículo la TBM ha excavado 5190 anillos, realizado el 88% del enfilado y el 72% del tesado e inyección de

pretensado. Se llegaron a alcanzar rendimientos de 5 tendones por turno (enfilado, tesado e inyección), es decir en torno a 2.5 anillos por turno. Puesto que se trabajaban 3 turnos al día, eso arrojaba del orden de la ejecución de 7-8 anillos al día con pretensado.

Agradecimientos

Se hace un agradecimiento especial al Distrito Sanitario de los Ángeles y todo el equipo de Dragados USA del proyecto que está realizando la construcción de este túnel único en EE. UU., así como a la colaboración de SENER como diseñador del revestimiento de dovelas.

Referencias

- [1] Proyecto Constructivo JWPCP
- [2] M. Mello, N. Karlin, B. Scofield, M. Low, Fabrication and Installation of Americas First Post Tensioned Pre-cast segmental tunnel liner. NAT 2024
- [3] C. Cimiotti, A. Navarro, E. Velasco, A. Sanz & P. Navarro; Segment Design for Exceptional Circumstances: Post Tensioning & Squeezing Ground, Congreso USA - RETC 2021.