

Estructura de Reacción del Metro de Vancouver

Thrust-Frame Metro Vancouver

Pablo Álvaro Gutiérrez 1^a, Manuel Biedma García 2^b

^a Ingeniero Industrial Superior. ACCIONA Ingeniería. Ingeniero Estructural Senior. paalvarog@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. ACCIONA Ingeniería. Jefe del Departamento de Estructuras Metálicas y Procedimientos Constructivos. manuel.biedma.garcia@acciona.com

RESUMEN

Se presentan en este artículo los aspectos más significativos que rodean al proyecto y diseño de una estructura de reacción (thrust frame) haciendo especial hincapié en el diseño llevado a cabo para el proyecto Broadway Millenium Line en Vancouver (Canadá) y las innovaciones de dicho diseño. Estas estructuras son imprescindibles en la ejecución de túneles ya que permiten a la tuneladora transmitir su carga de empuje a la losa de hormigón y tener una plataforma a partir de la cual poder avanzar durante el proceso de perforación del túnel. Se incluyen en el artículo tanto aspectos relativos al proyecto y fases del proceso de diseño, como inherentes al cálculo y al dimensionado de estas estructuras.

ABSTRACT

This article describes the key aspects that refer to the project and design of a steel thrust frame focusing on the design carried out for the Broadway Millenium Line project in Vancouver (Canada) and the innovation introduced on the aforementioned design. These sorts of structures are required for the execution and construction of tunnels since they allow the tunnel boring machine (TBM) transmitting their thrust force to the concrete substrate and provide a platform from which they can advance through the process of digging the tunnel. The article summarizes not only aspects related to the project and design process stages, but also to the calculations and dimensioning of these sort of structures.

PALABRAS CLAVE: Estructura de reacción, estructura auxiliar, tuneladora, túnel, metro.

KEYWORDS: Thrust frame, temporary works, tunnel boring machine, TBM, tunnel, subway.

1. Operativa y estado del arte de las estructuras de reacción (Thrust Frames)

Las estructuras de reacción (thrust frames) son una parte imprescindible en la ejecución de túneles ya que son un componente crítico para la operativa de las tuneladoras.

Esencialmente, la estructura de reacción es el elemento que permite transmitir las reacciones que ejerce la tuneladora en su proceso de avance y excavado del túnel. En este sentido, con el fin de entender la necesidad de la

estructura, es necesario conocer el funcionamiento de la tuneladora que, de forma simplificada se describe a continuación.

La tuneladora consta en su parte frontal de la cabeza de corte, que se sustenta en el escudo. La primera tiene un movimiento rotatorio y esta provista de ruedas dentadas, que permiten llevar a cabo la perforación del túnel. El segundo es una estructura cilíndrica en la que

se insertan numerosos componentes entre los que se pueden destacar el erector de dovelas y los cilindros encargados de generar el movimiento de avance de la máquina y que se sitúan en la parte posterior de éste.

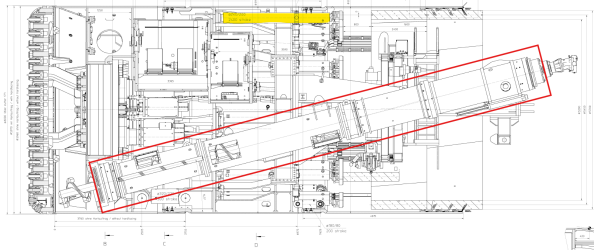


Figura 1. Esquema típico del escudo de una tuneladora (cilindros en amarillo y erector de dovelas en rojo).

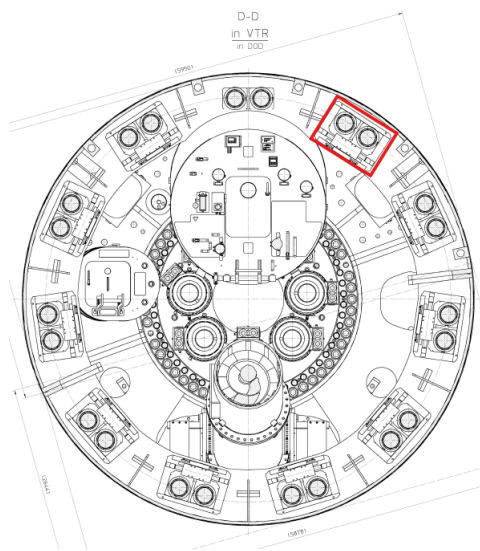


Figura 2. Posicionamiento de los cilindros en el escudo de la tuneladora.

Por tanto, el proceso de avance de la tuneladora no es un proceso continuo, sino que es intermitente y se hace posible gracias al movimiento de contracción/expansión de los cilindros y al erector de dovelas, que se ocupa de instalar las secciones de hormigón (dovelas) que conforman el túnel. Los cilindros se apoyan inicialmente sobre la estructura de reacción y, posteriormente, en las dovelas que serán a su vez necesarias para permitir el avance de la tuneladora dando soporte a dichos cilindros. Las dovelas se soportarán, además, horizontalmente en la estructura de reacción. En la siguiente imagen se puede apreciar este proceso.

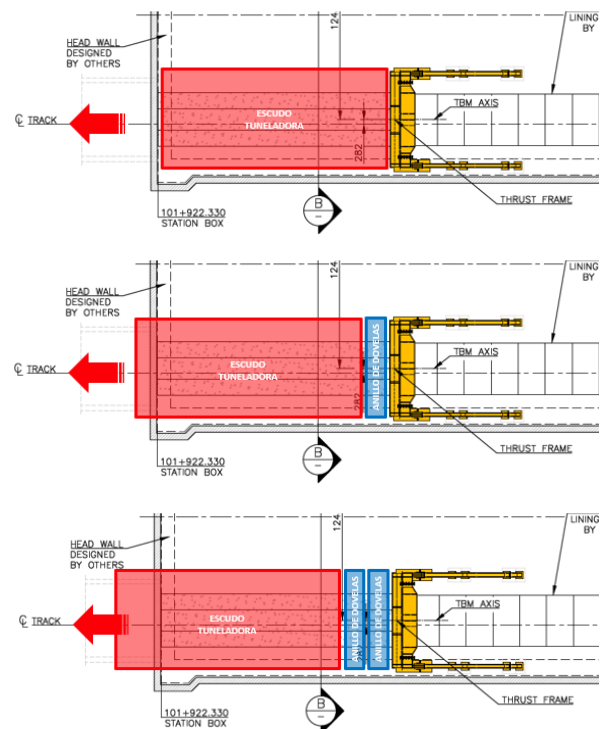


Figura 3. Proceso de avance típico de una tuneladora.

Con el fin de permitir este proceso, la estructura de reacción es una estructura temporal que, esencialmente consisten en un marco metálico que se ocupa de transmitir y repartir eficientemente sobre la losa de hormigón el empuje que ejerce la tuneladora. Además, no debe deformarse en exceso ya que esto podría impactar en la ejecución del túnel.

Existen diferentes tipologías de estructuras de reacción, pero para llevar a cabo su función, de forma general, estas estructura están provistas de un anillo que replica el diámetro del túnel, un pórtico que da soporte a dicho anillo y unos puntales que evitan que dicho pórtico trabaje en ménsula ya que esto resultaría en un diseño antieconómico debido a las altas cargas que debe soportar la estructura. El anillo puede o no ir embebido en el propio pórtico. Tanto los pilares principales del pórtico, como la base de los puntales se anclan la losa de hormigón.

El diseño de una estructura de reacción depende de numerosos factores, incluyendo el tamaño de la tuneladora, las características del terreno a excavar, y la longitud y diámetro del túnel entre otros.

2. Diseño de la Estructura de Reacción para Broadway Millenium Line (Metro Vancouver)

Una vez expuestos los fundamentos de operación de las estructuras de reacción, se analizan a continuación los aspectos más significativos y peculiaridades de la estructura utilizada en el Metro de Vancouver para la línea Broadway Millenium.

2.1 Proyecto Broadway Millenium Line

La Broadway Millenium Line es la segunda línea del sistema de transporte rápido SkyTrain en la región metropolitana de Vancouver en Columbia Británica, Canadá. La línea fue inaugurada en 2002 y une las ciudades de Vancouver, Burnaby, Coquitlam y Port Moody.

El 16 de marzo de 2018, el gobierno provincial aprobó la construcción del Proyecto Broadway Millenium Line, una iniciativa que extenderá la Millenium Line hacia el oeste desde la estación de VCC-Clark hasta la calle Arbutus y agregará seis nuevas estaciones. Tendrá una extensión de 5,7 kilómetros de largo, siendo todos subterráneos con la excepción de 700 metros y costará un estimado de 2.830 millones de dólares canadienses. Una vez en operación, el desplazamiento desde VCC-Clark hasta Arbutus se realizará en 11 minutos ahorrando de media unos 30 minutos por trayecto. Aunque está prevista su inauguración para finales del 2027, la fase de perforación de los túneles se completó en abril de 2024.

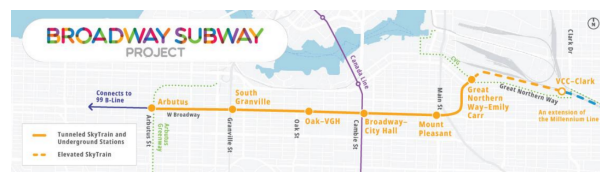


Figura 4. Nuevas estaciones a construir durante el Broadway Millenium Line Project.

2.2 Inputs y requerimientos específicos del diseño de acuerdo con el proyecto

De cara al diseño de la estructura de reacción, y previo al inicio del proyecto se deben conocer una serie de parámetros que, como se ha descrito anteriormente incluyen las cargas transmitidas por la tuneladora, la geometría de ésta, la de la losa sobre la que se anclará la estructura y la calidad del hormigón utilizado, diámetros del anillo de dovelas y su geometría, espacio disponible para la instalación de la estructura ya que, generalmente suele ser reducido, deformaciones admisibles de la estructura, así como cualquier otro aspecto orientado a facilitar su instalación, posible reutilización y optimización del peso de la misma.

En este caso la rueda de corte de las tuneladoras usadas tenía un diámetro de 6 metros, mientras que el diámetro exterior del anillo de dovelas era de 5,7 metros (5,2 metros de circunferencia interior).

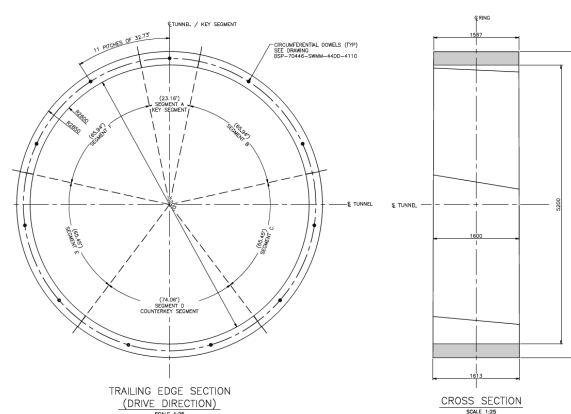


Figura 5. Geometría del anillo de dovelas.

Por otro lado, la carga de empuje ejercida por la tuneladora ascendía a 17.000 kilonewton repartidos en 11 cilindros. Cabe resaltar que el

empuje no se distribuye de forma equitativa entre todos los cilindros. Es común, que los situados en la parte inferior ejerzan más fuerza para compensar la tendencia de la tuneladora a desviarse hacia abajo debido a su peso. En este caso, los 5 cilindros superiores ejercían 5.000 kilonewton, mientras que los 6 inferiores reaccionaban con 12.000 kilonewton. Por otro lado, como es usual, se diseñaría la estructura para que la zona inferior del anillo apoyara directamente sobre la losa de hormigón garantizando así una correcta transferencia de la alta carga inferior a la losa.

Dado que la estructura de reacción tiene carácter temporal y debe facilitar al máximo la operativa de la tuneladora, se verá más adelante como estos parámetros fueron cambiando durante la vida del proyecto. Es crucial que este tipo de estructuras se adapten lo más posible a la operativa y necesidades de ejecución del túnel para reducir los altos costes de estos proyectos, en comparación al coste residual de la estructura de reacción.

2.3 Funcionalidad y problemática a solucionar

En el caso del Proyecto Broadway Millenium Line, la estructura de reacción, además de soportar el empuje de la tuneladora, debía de cumplir una serie de requisitos adicionales derivados de la operativa de la máquina, así como de lo restringido del espacio disponible.

En este sentido los requisitos más relevantes eran los siguientes:

- La estructura debía de ser transportable e izable en secciones de un peso máximo de 5 toneladas dado que la grúa de mayor tamaño que se podía utilizar tenía esa capacidad. Esto obligó a dividir el marco en módulos de pequeño tamaño ya que estas estructuras suelen ser pesadas.
- Las secciones del anillo debían de ser de iguales dimensiones que las dovelas de hormigón, de forma que se pudieran

instalar mediante el mismo erector de dovelas de la tuneladora.

- Las uniones debían de ser rápidas de instalación para optimizar los tiempos de montaje y desmontaje de la estructura ya que esta debía de ser utilizada en seis estaciones. De esta forma era imprescindible minimizar el número de tornillos y utilizar uniones bulonadas donde fuera posible.
- Generalmente las placas de anclaje del pórtico principal de las estructuras de reacción requieren de la instalación de una llave de cortante embebida en el sustrato de hormigón dadas las grandes cargas horizontales que aparecen en estos puntos. Sin embargo, esto genera un problema en los casos en el que las estructuras deben ser reusadas y, en mayor medida si consideramos que, en este caso, ese proceso debía de repetirse seis veces.
- Lo congestionado y reducido del pozo de acceso obligaba a que el espacio disponible entre el pilar del pórtico principal de la estructura y el muro lateral fuera de sólo 1 metro aproximadamente. En este espacio se debían poder instalar tanto los pilares como las placas de anclaje principales.
- Por último, es común soportar las dovelas mediante sistemas externos o simples cuñas de madera. Sin embargo, se solicitó, en este caso, la inclusión de un sistema que permitiera fijar las dovelas de hormigón al anillo de la estructura de reacción directamente a medida que se fuera construyendo el túnel, de forma que estas se mantuvieran en posición de forma rápida y sencilla para dar apoyo a la tuneladora en su avance.

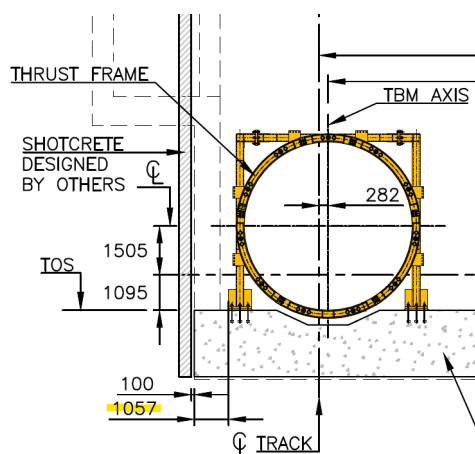


Figura 6. Espacio disponible para las placas de anclaje.

2.4 Cambios y adaptaciones del diseño

Como se ha indicado previamente, las estructuras de reacción son estructuras temporales que se usan en la ejecución del túnel. Es por esto por lo que es usual que su diseño se requiera en las fases tempranas del proyecto. Lógicamente en estas fases existe una alta indefinición en cuanto a las estructuras permanentes como son la losa y los muros de hormigón, la información geotécnica o las características de la propia tuneladora. El resultado es que su diseño suele estar sujeto a numerosos cambios o incluso, puede ser requerido comenzar con el mismo, sin tener toda la información necesaria disponible. En concreto la estructura del Proyecto Broadway Millenium Line sufrió numerosas modificaciones a lo largo del proyecto que obligaron a acometer varios diseños y rediseños. Se describen a continuación los más significativos.

En una primera fase se diseñó la estructura para una carga de empuje de 12.000 kilonewton, con el anillo integrado en el pórtico principal. Se definieron todas las uniones atornilladas y se apoyó longitudinalmente la parte inferior del anillo en la losa de hormigón.

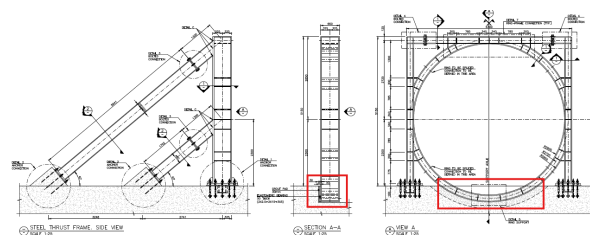


Figura 7. Diseño inicial de la estructura de empuje.

En una segunda fase, con la mejora de la información geotécnica y de la tuneladora, se observa que el empuje de esta ha aumentado hasta los 17.000 kilonewton. Además, se reduce el área de apoyo longitudinal sobre la losa de hormigón. Debido al incremento de carga y para optimizar la cantidad de acero, se decide utilizar un perfil de inercia variable para la viga superior del pórtico principal y puntales de mayor sección y con menor ángulo para reducir su componente vertical.

Según avanza el proyecto, en una tercera fase, se confirma que la carga máxima a izar por las grúas disponibles será de 5 toneladas, lo que obliga a dividir la estructura en secciones pequeñas mediante uniones atornilladas. Por otro lado, se propone eliminar por completo el apoyo longitudinal del anillo en la losa inferior, de forma que se simplifique el diseño de dicha losa. En su lugar se estudia la solución con una viga bypass en la zona inferior que transfiera directamente el empuje a las placas de anclaje del pórtico, y se incluyen en estas placas unos topes de cortante que reaccionan contra la losa. Como ya se ha indicado previamente, las cargas de empuje en estas estructuras son altas y se concentran en la parte inferior del anillo, esto hace que sea necesario el apoyo directo en dirección horizontal del anillo contra la losa. Así lo demuestra el cálculo, incrementándose significativamente el peso de la estructura con la solución de viga bypass, así como el número de tornillos en uniones y pernos de anclaje. Por tanto, esta solución se descarta por ser antieconómica.

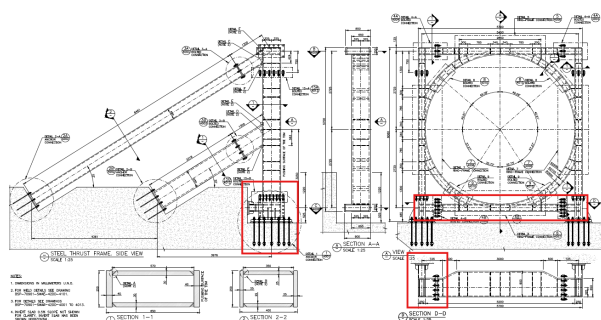


Figura 8. Diseño con viga bypass de la estructura de empuje (Fase 3).

Tras esta solución se analizan en detalle las alternativas y mejoras para facilitar la reutilización de la estructura simplificando el proceso de montaje y desmontaje de la misma. Para ello, se vuelve a la solución con apoyo en la parte inferior del anillo y se solicita que el anillo sea independiente del pórtico principal y vaya dividido en secciones de igual dimensión a la de las dovelas, ya que, como se ha comentado anteriormente, esto permite que se pueda instalar mediante el uso del erector de dovelas de la propia tuneladora, lo que simplifica el montaje, reduciendo significativamente los tiempos de instalación y, además, siendo una solución más segura que evita el uso de grúas para el montaje del anillo.

Finalmente, el diseño sigue evolucionando en el sentido de facilitar su instalación y reutilización y se llega a la geometría final en la que, además de todas las mejoras incluidas en la fase previa, se incluyen uniones bulonadas en los puntales, se independiza la llave de cortante de las placas base del pórtico principal y se introducen uniones rápidas para conectar las dovelas de hormigón al anillo de la estructura.

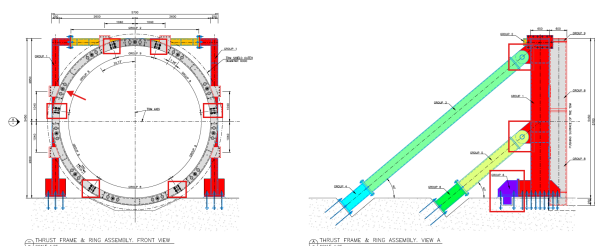


Figura 9. Diseño final de la estructura de empuje.

2.5 Descripción del diseño final y su cálculo

Para el diseño final, la tipología de perfiles elegida es la de perfiles cerrados armados ya que estos se comportan mejor frente a la torsión y, en general, son perfiles más robustos y que permiten alojar las uniones del anillo en su interior, evitando interferencias con la propia tuneladora o los vagones que deben circular por el interior del anillo. Se utiliza, además, como ya se ha mencionado, un perfil de inercia variable para la viga superior del pórtico ya que debe soportar grandes cargas con una deformación reducida. En este caso, se limita a 12 milímetros por cuestiones operativas de la tuneladora. Todos los perfiles se adaptan al canto del anillo, que a su vez viene fijado por el de las dovelas, para permitir su montaje con el erector de la tuneladora. En este caso 250 milímetros, por lo que se definen los espesores para alcanzar las capacidades requeridas y evitar a su vez, problemas de pandeo. La estructura, además, se rigidiza en todos los puntos de carga del anillo y en las zonas de las uniones.

Entre las uniones cabe resaltar la conexión articulada de los puntales que tiene una doble función, la de eliminar los momentos sobre el puntal de forma que estos trabajen a compresión pura y, por otro lado, la de facilitar y hacer más rápida la instalación de dichas uniones.

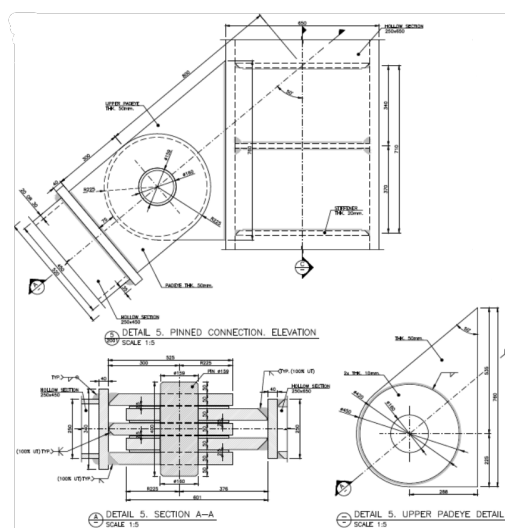


Figura 10. Unión bulonada de los puntales.

En cuanto a las placas de anclaje, es de especial relevancia la del pórtico principal, que como ya se ha comentado está dotada de una llave de cortante embebida en el hormigón que es imprescindible en este tipo de estructuras debido a la magnitud de los esfuerzos que deben transmitir, pero que, a su vez, se ha diseñado para que sea independiente del resto de la estructura. En la siguiente sección se describen en más detalle sus ventajas.

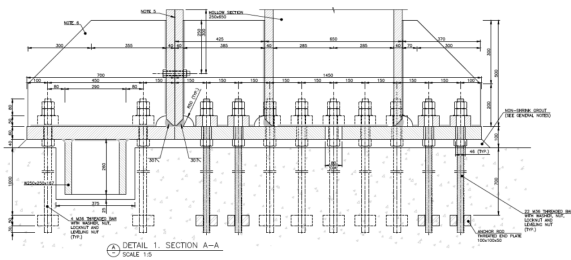


Figura 11. Placa de anclaje del pórtico principal.

En cuanto al modelado se refiere, para el diseño y cálculo de la estructura de reacción se ha utilizado el software de elementos finitos SAP2000 para el dimensionado de los perfiles e IDEA StatiCa para la verificación de las uniones.

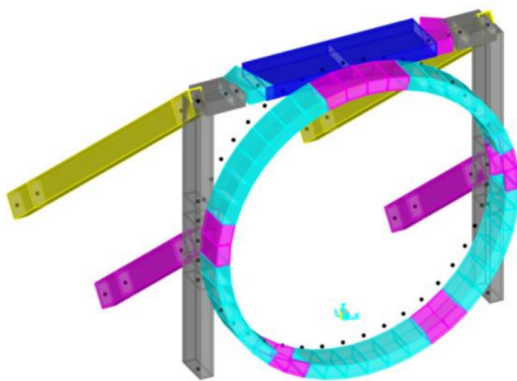


Figura 12. Modelo FEM de la estructura de reacción.

En el modelo, se debe considerar no sólo la carga de empuje sino la de todos los componentes de la tuneladora que deben transitar por el interior del anillo como son los vagones de esta, así como los vehículos multiservicio (MSV). Por tanto, en este caso, a la carga horizontal de 17.000 kilonewton se añaden dos cargas adicionales verticales de 200 y 120 kilonewton respectivamente. La carga del MSV no se debe combinar con las anteriores ya que

estos vehículos no se pueden utilizar con la tuneladora en operación, por lo que será el caso de carga en el que se combina el peso de los vagones con el empuje de la tuneladora, el que gobierne el diseño.

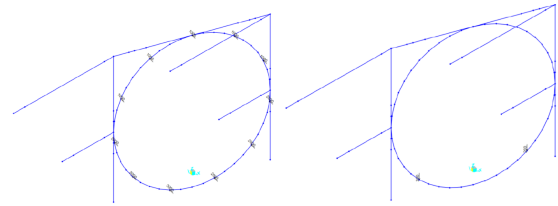


Figura 13. Cargas de empuje (izquierda) y de los vagones (derecha) que actúan sobre la estructura de reacción.

De los resultados se extrae que, como era de esperar, la zona que sufre mayores deformaciones es la viga superior del pórtico principal (recordemos que la parte inferior del anillo carga directamente sobre la losa de hormigón).

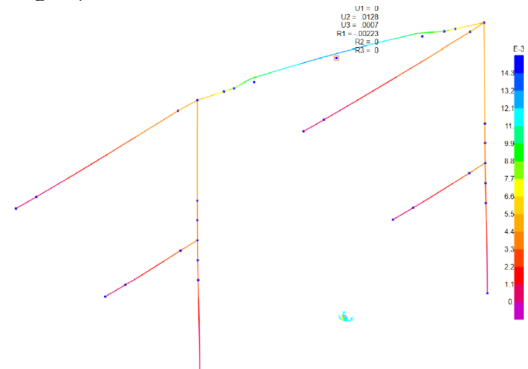


Figura 14. Deformada del pórtico de la estructura de reacción

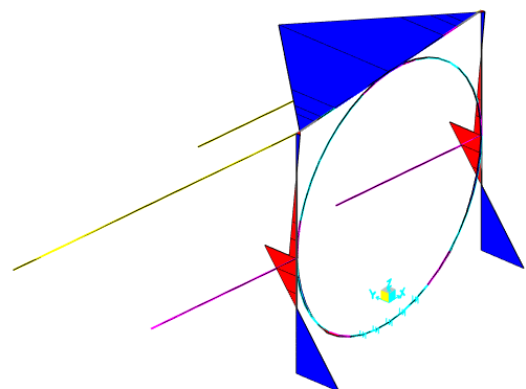


Figura 15. Diagrama de momentos flectores de la estructura de reacción.

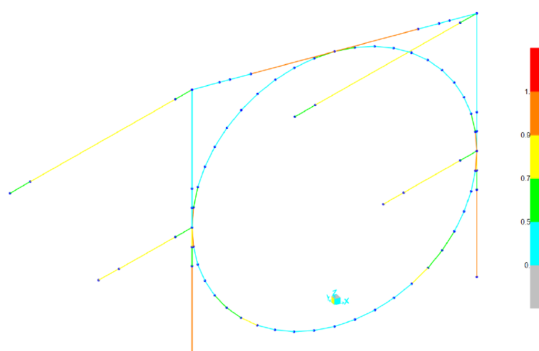


Figura 16. Ratios de uso de la estructura de reacción.

Por otro lado, se observa que las zonas más cargadas de la estructura coinciden con los puntos del pórtico donde los momentos son mayores. Esto es en el centro de la viga superior que se comporta como biapoyada y en la parte inferior de los pilares. Además, se observan puntos en el anillo con ratios de uso superiores a las zonas colindantes de este. Estos coinciden con las zonas de las uniones donde se ha eliminado una de las chapas para dar acceso a la unión y, por tanto, la sección resistente es la de una “C” en lugar de un cajón cerrado rectangular.

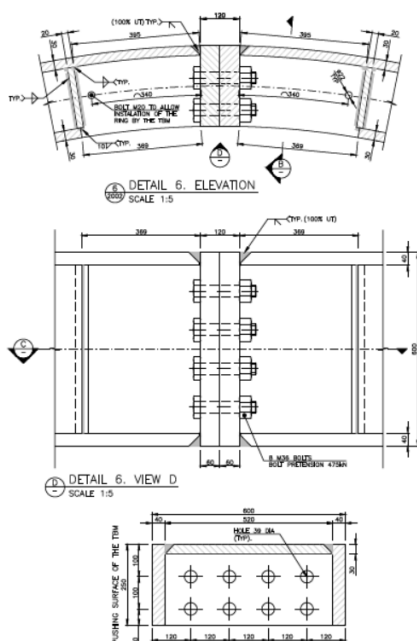


Figura 17. Unión típica del anillo de reacción.

Además de lo anterior, cabe resaltar la complejidad de diseño de las placas de anclaje del pórtico principal debido a los altos esfuerzos que

aparecen. En este caso, se alcanzaron tracciones cercanas a los 6.000 kilonewton combinadas con cortantes de 1.400 kilonewton y momentos de 2.000 kilonewton por metro. Las altas tracciones en combinación con el momento actuante obligan a disponer un armado significativo contra la rotura por cono de hormigón, por lo que estas áreas de la losa son críticas debido a la gran congestión de armadura existente. Los cortantes obligan al uso de llaves de cortante como ya se ha indicado.

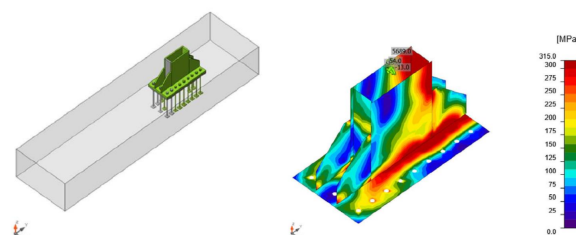


Figura 18. Modelo FEM de la placa de anclaje del pórtico principal.

Para finalizar, es importante resaltar que la estructura se ha utilizado de forma satisfactoria para la ejecución del túnel y sin incidentes conocidos. Se incluyen a continuación una serie de fotografías de la estructura en operación.



Figura 19. Vista frontal de la estructura de reacción.



Figura 20. Vista lateral de la estructura de reacción.

2.6 Innovación y mejoras

Se resumen a continuación los aspectos más significativos en cuanto a innovación se refiere de la estructura de reacción diseñada para el proyecto Broadway Millenium Line en Canadá.

Debido al paso de la tuneladora por varias estaciones, se hacía necesario disponer de una estructura que fuera reusable y, por tanto, fácilmente desmontable y reensamblable. Como se ha comentado, la transmisión de cargas inherente a los anillos de reacción se hace en gran medida mediante importantes reacciones de cortante en las uniones de los pilares del pórtico principal de la estructura (ver Figura 11), lo cual hace indispensable la utilización de llaves de cortante. Sin embargo, al estar la llave de cortante embebida en el sustrato de hormigón, se hace muy difícil su extracción una vez a finalizado el uso del anillo. Así, la solución innovadora que en esta estructura se propuso, fue la de hacer una llave de cortante independiente de forma que se pudiera dejar perdida en el hormigón. Esta iba unida a una placa base con un sistema de rigidizadores y

chapas que permitía la transmisión por presión del cortante entre la estructura principal y la placa de anclaje con la llave de cortante.

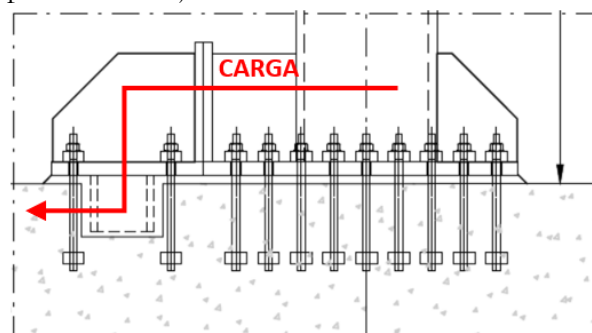
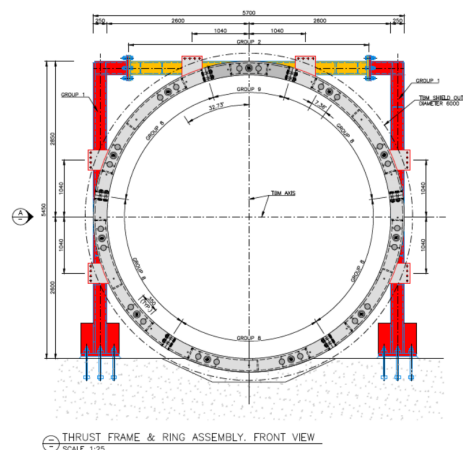


Figura 21. Placa de anclaje con llave de cortante independiente y esquema de transmisión de carga.

Dado lo reducido y congestionado del espacio en el que se debía instalar la Estructura de Empuje y teniendo en cuenta la gran capacidad de carga del erector de dovelas del que iba provista la propia tuneladora, se diseñó el anillo como una estructura independiente y en secciones de dimensiones y peso equivalentes a las dovelas del túnel de forma que, una vez instalado el pórtico, se pudiera armar el anillo de forma sencilla utilizando la misma metodología que se lleva a cabo para instalar las dovelas.



TEMPORARY THRUST FRAME WEIGHTS

GROUP OF ELEMENTS	UNITS	ESTIMATED WEIGHT (Kg)
GROUP 1 (COLUMN)	2	4000
GROUP 2 (UPPER BEAM)	1	2900
GROUP 3 (LONG STRUT)	2	2200
GROUP 4 (LONG STRUT SMALL)	2	350
GROUP 5 (SHORT STRUT)	2	1100
GROUP 6 (SHORT STRUT SMALL)	2	450
GROUP 7 (SHEAR BLOCK)	2	550
GROUP 8 (STEEL RING 65")	5	1650
GROUP 9 (STEEL RING 33")	1	900
TOTAL WEIGHT		29350

Figura 22. Secciones del anillo de reacción y pesos.

De cara a continuar con la filosofía de simplificar al máximo el montaje y desmontaje de la estructura, se diseña una unión bulonada en la parte superior de los puntales (ver Figura 10). Esto permite instalar y desinstalar los mismos de forma rápida y sencilla simplemente enhebrando o desenhebrando un único elemento (el bulón), en lugar de tener que instalar un número significativamente mayor de tornillos.

Una vez la tuneladora ha instalado el primer anillo de dovelas de hormigón, estas deben estar aseguradas en contacto directo con el anillo metálico de la estructura de reacción, de forma que transmitan el empuje de la máquina a la estructura. Tradicionalmente, esta unión entre dovela de hormigón y anillo metálico se ha realizado con un tornillo al uso, que se embebe en la dovela y se asegura en el anillo metálico mediante una tuerca. Este es un sistema que permite una instalación sencilla en el anillo metálico, ya que el anillo simplemente debe ir dotado de un taladro que pueda alojar el tornillo. Sin embargo, en las dovelas del proyecto de Broadway se utilizaban dowels de conexión (ver a continuación), los cuales no están pensados para ser instalados en acero. Para salvar este problema, se diseñó un alojamiento (hembra) que permitiera asegurar el dowel (macho) en el acero. Este alojamiento se rellenaba con resina de alta resistencia la cual permitía asegurar el dowel en su posición.

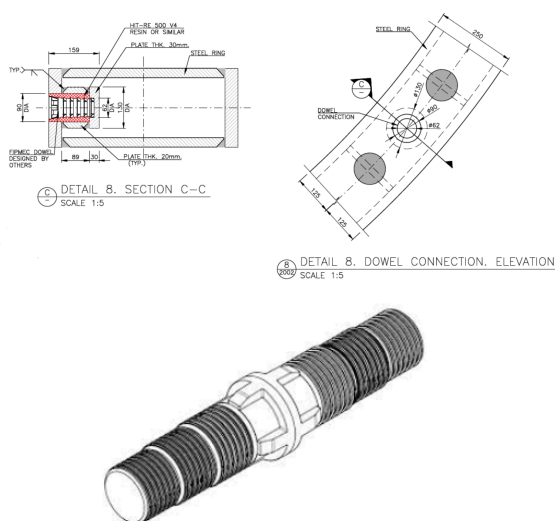


Figura 23. Conectores entre dovelas de hormigón y anillo de reacción (dowels).

3. Conclusiones

A lo largo del artículo se ha mostrado tanto el diseño como los aspectos que rodean al proyecto de una estructura temporal como son las estructuras de reacción, haciendo énfasis en las particularidades del proyecto Broadway Millenium Line ubicado en Vancouver (Canadá).

Se observa que en el caso de este tipo de estructuras es crítica la flexibilidad en el diseño y adaptabilidad a los procesos de ejecución del túnel y requisitos de la tuneladora. De esta forma es típico que la estructura pase por numerosas fases de diseño y modificaciones sobre el mismo, que demanda el proyecto según se van definiendo con más exactitud las estructuras permanentes y las especificaciones de la tuneladora.

Otro aspecto fundamental es la simplificación en cuanto al montaje y desmontaje de la estructura ya que redunda directamente en una reducción de tiempos y costes en un punto tan crítico de la obra como es la perforación del túnel. Los costes de las estructuras de reacción son residuales si se comparan con los costes derivados de personal, maquinaria, etc. en los que están inmersos estos proyectos. Por otro lado, esta simplificación y facilidad de instalación redunda directamente en una mejora en la seguridad de los operarios.

Gracias a todas las mejoras introducidas en el diseño que nos ocupa y a una estrecha interacción con los departamentos de obra, la estructura de reacción utilizada en el proyecto Broadway Millenium Line fue usada con éxito y sin incidentes conocidos.

Referencias

- [1] L. M. Pinillos Lorenzana, N. Rubiralta Moyà, Launching structures for TBM tunnelling. design and purpose, World Tunnel Congress 2017.
- [2] Canadian Standards Association, Limit States Design of Steel Structures, CAN/CSA-S16-01.