

Pozo de contención temporal en forma de cacahuete para la desaladora Alkimos en Perth, Australia

Temporary peanut-shaped shaft for the Alkimos desalination plant in Perth, Australia

Pedro Antonio de Dios Barrau^a, David Solera Piña^b, Alberto Gabarrón Durán^c, José Ramón Bombín Saiz^d, Sergio Jimenez Pérez^e, Carla María Sancho Pérez^f,

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Ingeniería. Jefe del departamento de estructuras.

pedroantonio.dios.barrau@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Ingeniería. Jefe del departamento de estructuras de edificación.

david.solera.pina@acciona.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Ingeniería. Ingeniero senior de estructuras.

algabarron@acciona.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Ingeniería. Ingeniero senior de geotecnia.

jbombin@acciona.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Ingeniería. Ingeniero senior de estructuras.

sejimenezp@acciona.com

^f Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Arquitecta superior. ACCIONA Ingeniería. Ingeniero senior de estructuras.

cmsanchop@acciona.com

RESUMEN

El presente documento tiene como objeto mostrar las particularidades en cuanto a diseño de la estructura temporal de contención del edificio del Intake en la desaladora Alkimos, ubicada en Perth, Australia. Dicha estructura presenta una geometría en forma de cacahuete que permite aprovechar el ‘efecto forma’ propio de las estructuras cilíndricas para reducir el número de anclajes o apuntalamientos intermedios. De este modo, se consigue liberar el espacio central de obstáculos que dificulten la ejecución de los trabajos en el interior de la propia estructura de contención.

ABSTRACT

The purpose of this document is to present the design specifics of the temporary containment structure for the Intake building at the Alkimos desalination plant, located in Perth, Australia. This structure features a peanut-shaped geometry that takes advantage of the 'shape effect' inherent in cylindrical structures to reduce the number of intermediate anchors or supports. Thus, the central space is cleared from obstacles that could interfere with the works inside the containment structure itself.

PALABRAS CLAVE: contención, pantalla, compresión, bóveda, forma, desaladora, Australia

KEYWORDS: retaining wall, shaft, compression, vault, shape, desalination plant, Australia

1. Introducción al proyecto

Para la ejecución del edificio del *Intake* (dentro del complejo de la desaladora en Alkimos, Perth Australia) se precisa una estructura de contención temporal que permita alcanzar la cota de apoyo de la cimentación del edificio, y donde se ejecutará el emboquille de los túneles.

Para facilitar estos trabajos esta contención no debe incluir puntales ni pilares interiores, dejando el mayor espacio diáfano, libre de obstáculos que dificulten la programación, ejecución de las actividades del túnel e interferencias con el futuro edificio *Intake*.

Para ello se desarrolla un pozo de contención con forma de cacahuete. Se trata de dos cilindros secantes de 43.30m y 47.80m que se ajustan lo máximo posible a la geometría del edificio del *Intake*. La contención, se realiza mediante una pantalla de pilotes secantes (de 1200 mm de diámetro separados 750 mm y 35 m de longitud) debido a la presencia de nivel freático, permitiendo además el funcionamiento de la contención como un cilindro.

Se disponen tres niveles de apuntalamiento para la pantalla de pilotes y otro adicional exclusivo en la zona de intersección de los cilindros. Los niveles se componen de una viga o *waler beam* de sección 0.8x1.0m y puntales o *props* de dimensiones importantes: longitud de 27 metros con secciones de 2x2m y 2x2.5m. El apuntalamiento adicional es una losa apoyada en el terreno de sección 6x1.5m.

El edificio del *Intake* situado en su interior recibe los túneles de captación y descarga provenientes del mar, que se ejecutan mediante tuneladora TBM (Tunnel Boring Machine). Por tanto, una vez ejecutado, el pozo debe quedar libre de cualquier obstrucción que dificulte las labores de excavación, acopio y retirada de material, así como las derivadas de la

ejecución del propio edificio del *Intake* en una segunda fase, facilitando la logística.

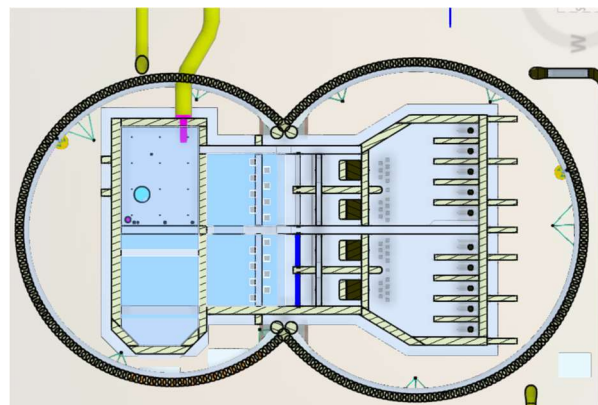


Figura 1. Pozo de contención (cacahuete) y edificio del *Intake* (en el interior)

2. Descripción geológica

En la investigación geológica realizada para el diseño del pozo se detectaron principalmente niveles granulares, que en algunos tramos se encuentran cementados. Se trata de arenas calizas, que entre las cotas +8m y -5m que se han testificado como calizas (Tamala limestone).

El pozo se sitúa a una distancia de un kilómetro del mar y la cota de excavación se inicia a +10m. con un nivel freático situado a la cota +1m. Estas condiciones hidrogeológicas, principalmente la posición del nivel freático a 9 m de profundidad, dan como resultado que la solución adoptada (pozo circular con pilotes secantes) sea adecuada.

La presencia en toda la profundidad de niveles granulares muy permeables ($k=1-100$ m/día) hacen necesario un empotramiento de los pilotes 10 metros por debajo de la cota de excavación y, además, la necesidad del diseño de una metodología de rebaje del nivel freático de gran capacidad ($Q>100$ l/seg).

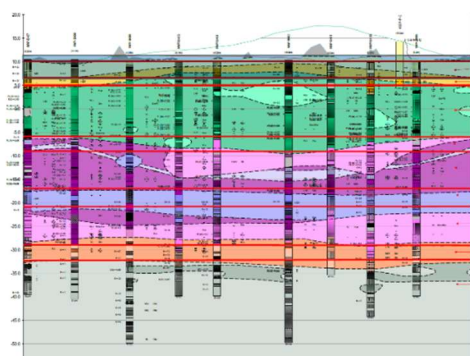


Figura 2. Perfil geológico longitudinal del pozo de contención



Figura 5. Excavación hasta el primer nivel

3. Proceso constructivo

El proceso constructivo es el de una excavación habitual, pero con ciertas particularidades. En primer lugar, se ejecutan la pantalla de pilotes con la ayuda de murete guía o negativo.



Figura 3. Ejecución murete guía o negativo y de la pantalla de pilotes

A continuación, se ejecuta la viga de atado superior o *capping beam* y la instalación de los dispositivos de instrumentación y monitorización. A medida que se va retirando la tierra, la excavación debe interrumpirse para poder ejecutar las vigas anulares (*waler beams*) y puntales (*props*).



Figura 4. Ejecución de la *capping beam*



Figura 6. Ejecución de la pantalla de pilotes

Se continúa la excavación hasta llegar a la losa final de fondo donde se hace una excavación local o parcial para no tener que excavar toda la huella.

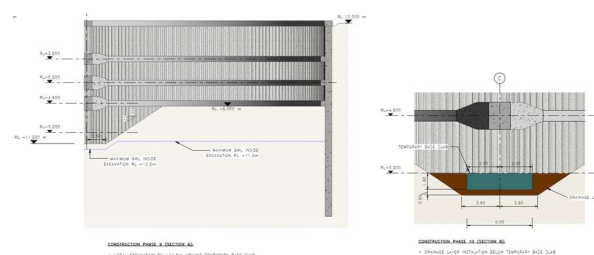


Figura 7. Excavación para la ejecución del apuntalamiento inferior en la zona de intersección de los cilindros

Para poder continuar con la excavación es necesario que el nivel de contención ejecutado alcance al menos una resistencia del 80% de la resistencia característica del hormigón dado que el pozo presenta una alta sensibilidad a la rigidez del conjunto.

Todos los cálculos siguen las normativas australianas vigentes [1]. También nos hemos apoyado en normativas internacionales de referencia para la ejecución, cálculo y configuración del pozo [2 - 7].

4. Fundamento y particularidades de la solución adoptada

La estructura de contención en forma de cacahuete permite aprovechar el ‘efecto forma’ intrínseco a la propia geometría del sistema. Al funcionar a compresión, se reduce considerablemente la necesidad de emplear anclajes o apuntalamientos intermedios, liberando el espacio de trabajo para la ejecución del túnel e *Intake* interiores. Además, se reducen los esfuerzos en los pilotes.

En este sentido, se ha previsto disponer 4 apuntalamientos en la sección de intersección entre cilindros para resolver la discontinuidad.

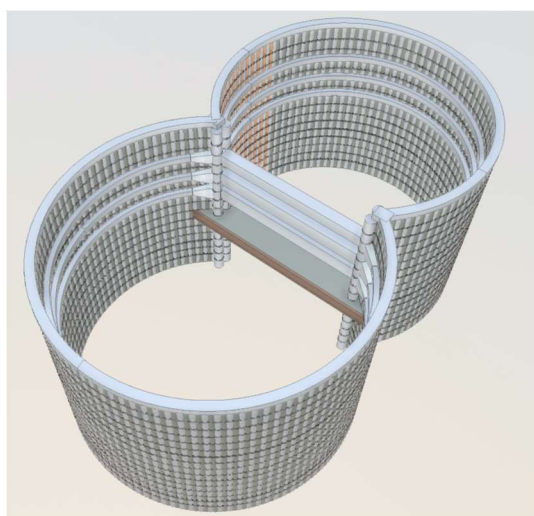


Figura 8. Pozo de contención y puntales en zona de intersección entre cilindros

A continuación, se describen las particularidades y puntos singulares del pozo de contención a nivel de diseño.

4.1 Vulnerabilidad a la ejecución del ‘efecto forma’

La estructura del cacahuete está altamente supeditada a la calidad de ejecución. Al trabajar como una bóveda, cualquier imperfección en su forma puede alterar significativamente su comportamiento como estructura a compresión.

Por ello, es imprescindible cumplir unas tolerancias admisibles de ejecución de acuerdo con la normativa vigente y, en caso necesario, incluir elementos de ‘redundancia’ adicionales que garanticen la seguridad y doten de una mayor ductilidad al sistema. En este sentido, el pozo planteado en Alkimos presenta unos anillos rigidizadores que completan el sistema ofreciendo un coeficiente de seguridad adicional. Estos anillos, llamados *waler beams*, se ubican estratégicamente según demanda a lo largo del alzado de la pantalla. Estos anillos también permiten reducir los esfuerzos transversales en los pilotes.

Debido al gran diámetro de cada uno de los pozos que constituyen el “cacahuete” ha sido necesario que los pilotes no armados se realicen con un hormigón de una resistencia muy superior a la habitual (20 MPa en este proyecto, frente a 3 MPa para pantallas de pilotes en otros proyectos) para poder resistir los esfuerzos circunferenciales a los que está sometida la pantalla.

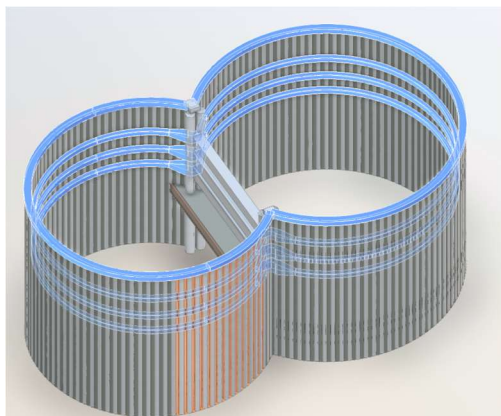


Figura 9. Waler beams (o elementos de 'redundancia')

El modelo de cálculo se realiza mediante el software PLAXIS 3D.

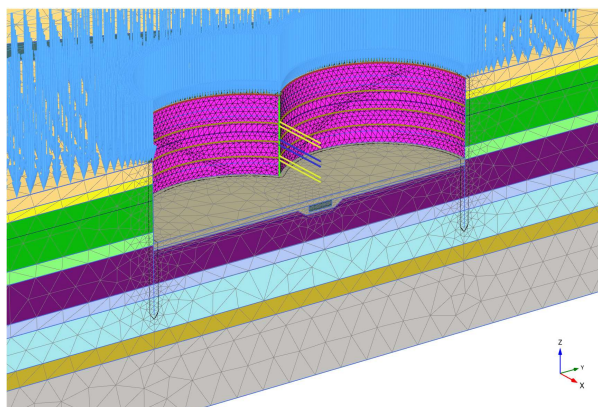


Figura 10. Modelo de PLAXIS3D. Pantalla de pilotes secantes, apuntalamientos y waler beams

La pantalla de pilotes secantes se modeliza mediante elementos finitos tipo *Plate*, a los que se dota de la anisotropía propia de este tipo de pantallas ajustando el módulo de elasticidad vertical (dirección de los pilotes) de $E_V=29,815$ Mpa, y horizontal (dirección transversal a los pilotes) de $E_H=21,848$ Mpa.

Adicionalmente, se ha analizado un segmento de pantalla teórico para estimar el efecto que se produce en la rigidez del conjunto teniendo en cuenta la posición relativa entre pilotes, dentro de las tolerancias admisibles durante la ejecución.

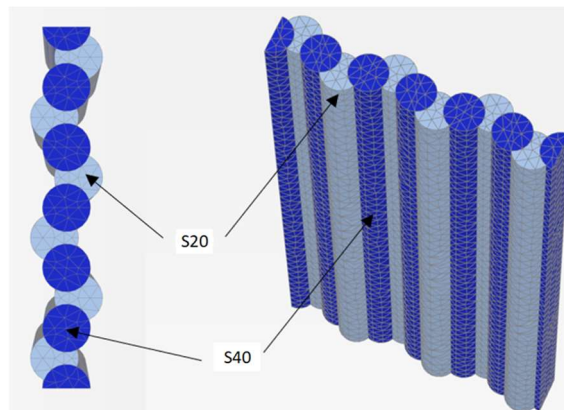


Figura 11. Modelo de análisis de sensibilidad (tolerancia) de la pantalla de pilotes secantes

Del análisis se concluye que la sensibilidad del modelo es mínima en sentido vertical, como era de esperar dado que la rigidez es proporcionada por los pilotes armados. Sin embargo, la rigidez horizontal/circunferencial (que es la base del comportamiento por forma del sistema) se puede reducir hasta 60% considerando las máximas tolerancias de ejecución.

Derivado de este análisis, se procede a plantear 3 tipos de modelo de pantalla que recojan la horquilla de esfuerzos que puedan producirse:

- Tipo 1: pantalla con los valores de rigidez vertical (E_1A) y horizontal (E_2A) teóricos.
- Tipo 2: pantalla con una rigidez horizontal igual a un 10% de la rigidez teórica ($0.10 \cdot E_2A$)
- Tipo 3: pantalla con una rigidez horizontal igual a un 10% de la rigidez teórica ($0.10 \cdot E_2A$) y con una rigidez a flexión vertical igual a $1/3$ de la teórica ($1/3 \cdot E_1 \cdot I$) para evaluar la sección fisurada y deformaciones máximas.

Tabla 1. Modelos de sensibilidad - Rigideces

Modelo	E_1A kN/m	E_2A kN/m	E_1I kNm ² /m
Tipo - 1	32.89×10^6	27.3×10^6	2.22×10^6
Tipo - 2	32.89×10^6	2.73×10^6	2.22×10^6
Tipo - 3	32.89×10^6	2.73×10^6	766.6×10^3

Los anillos de rigidización o *waler beams*, se modelan en PLAXIS como elementos tipo viga. En un comportamiento teórico de la pantalla, estos elementos no serían necesarios ya que las cargas viajarían por compresión a través de los pilotes. Sin embargo, debido a las tolerancias de ejecución, así como la singularidad en el punto de intersección entre cilindros y a la posible excentricidad de la carga, es necesaria su incorporación. Además, como ya se ha comentado anteriormente, estos elementos reducen los momentos transversales en los pilotes armados al ser apoyos para la pantalla en el caso de que el sistema presente una rigidez circunferencial baja (Modelo Tipo 2 y 3).

Para el modelo Tipo 1, con una pantalla de rigidez circunferencial teórica, las *waler beams* apenas reciben carga. Por tanto, este modelo es el dimensionante para los esfuerzos circunferenciales en los pilotes que conforman la pantalla. Además, al ser el conjunto del modelo de mayor rigidez, también es el modelo que dimensionará los puntales.

En contraposición, en el modelo Tipo 2 y 3, con una rigidez circunferencial reducida, la pantalla presenta un menor efecto forma e implica que por flexión se transfieran parte de las cargas del terreno a los anillos, siendo esta hipótesis la determinante para el dimensionamiento de las *waler beams*. El esfuerzo que reciben estos elementos es proporcional a la rigidez circunferencial del conjunto.

En este sentido, uno de los aspectos importantes es entender cómo el esfuerzo viaja de la pantalla al conjunto *waler beams* - *puntales*. La carga circunferencial no puede desviarse hacia

los puntales mediante un rasante vertical en el contacto pilote armado y no armado, no presenta una resistencia suficiente para poder tomarse en cuenta. Por tanto, el único mecanismo factible es por flexión vertical de los pilotes armados. Este efecto se recogió en el modelo de PLAXIS ajustando a cero la rigidez a cortante contenida en el plano de la pantalla.

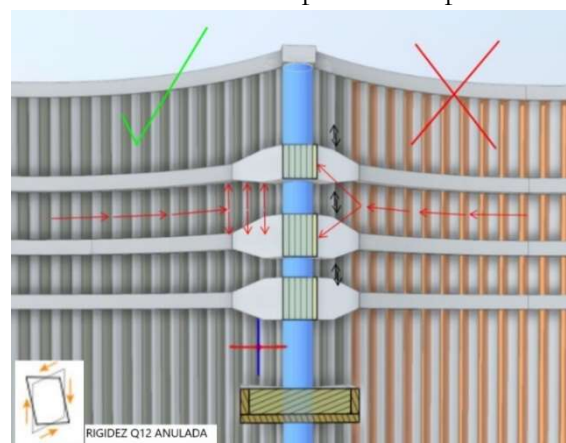


Figura 12. Transferencia de carga pantalla-*waler beam*. Sin esfuerzo rasante.

El mismo razonamiento sirve para explicar la transferencia de carga de la pantalla a los puntales en el punto de intersección entre cilindros. En esa zona de discontinuidad, la pantalla pierde el efecto forma. En la zona de aproximación a los puntales, la pantalla transfiere la carga a las *waler beams* y, estas, a los puntales. Por ello, los anillos incrementan su sección en la zona adyacente a los puntales.

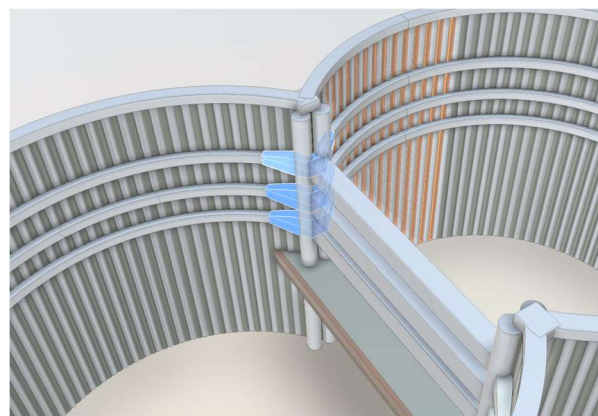


Figura 13. Sección variable en *waler beam*. Zona de intersección entre cilindros

Además, por la propia naturaleza de este punto singular, el pilote en el punto de intersección, llamado *King-pile*, se modela como un elemento viga (a diferencia del resto de la pantalla) y su cálculo se desarrolla específicamente en un apartado posterior de este documento.

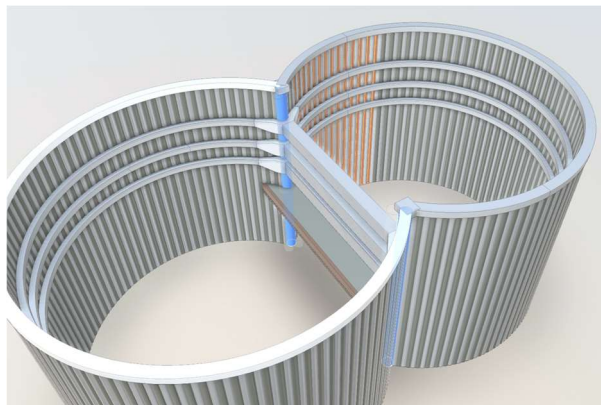


Figura 14. *King-pile*

Por último, no solo se restringe la capacidad de transferencia de rasante vertical entre pilotes en el elemento *Plate*; sino que también se anula la capacidad a flexión horizontal ya que los pilotes no armados no pueden resistirlos. En efecto, un estado de cargas asimétrico puede provocar flexiones horizontales que solo pueden ser absorbidas por los anillos de rigidización; y no por la pantalla.

4.2 Singularidad en el punto de intersección entre cilindros

La solución en forma de cacahuete genera un punto singular en la zona de intersección que se resuelve mediante pilotes de mayor diámetro (1800 mm), llamados *King-piles*, y que son analizados de forma específica al perder el 'efecto forma' del resto de la pantalla.

Aunque este pilote se comprueba para los tres los modelos de sensibilidad, el modelo dimensionante es el tipo 1, es decir, el de la rigidez teórica.

El comportamiento del pozo cuando la pantalla tiene su rigidez teórica es similar al de una bóveda cañón que se ve en muchas construcciones

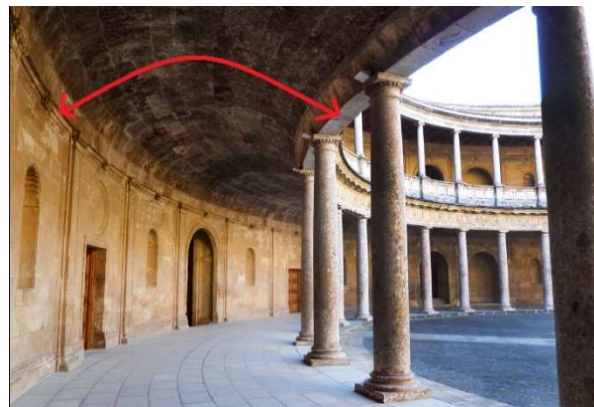


Figura 15. La bóveda anular del Palacio de Carlos V en Granada

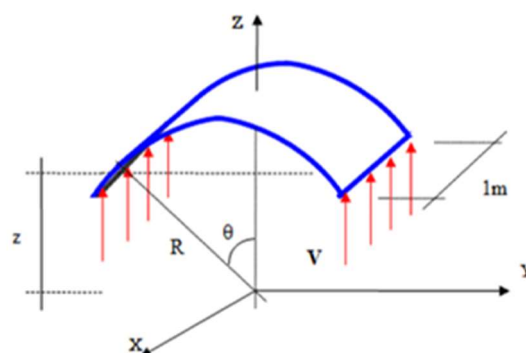


Figura 16. Comportamiento estructural. reacciones

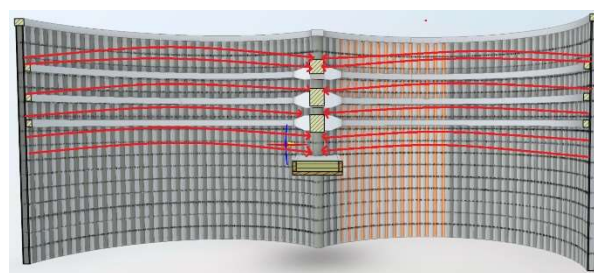


Figura 17. Circulación de cargas

La nula rigidez a corte en plano de la pantalla (explicada en el apartado anterior) y la alta rigidez circunferencial del modelo Tipo 1 hace que toda la carga llegue al *King Pile* y este por flexión transmita los esfuerzos a los puntales.

Por lo tanto, aun siendo un pilote su comportamiento estructural es el de una viga. Teniendo que ser capaz de llevar estas cargas por metro lineal que le llegan y que aumentan con la

profundidad con su capacidad a flexión y cortante hasta los puntales que es donde se produce el equilibrio de esfuerzos entre las dos partes de la pantalla después de que se rompiese en el punto de intersección de estas.

Para poder provocar este comportamiento donde los puntales solo colaboran trabajando principalmente a compresión se han conectado los puntales a los King Pile simulando una articulación dejando de manera independiente la pantalla y las vigas tipo anillo.

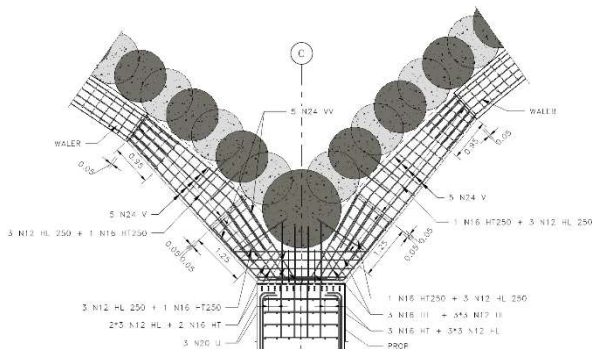


Figura 18. Armado de la conexión

En el análisis de tipo 2 y 3 en los King Pile se reducen los esfuerzos circunferenciales en la pantalla y se cargan los anillos viajando parte de las cargas directamente a los puntales.

4.3 Singularidad en TBM

Otro punto singular dentro de la pantalla de contención es el correspondiente a los huecos que deja la tuneladora (TBM).

El ajuste de la posición en elevación de los anillos por requerimientos geotécnicos propició la necesidad de tener que banquear la *waler beam* inferior para dar paso al hueco.

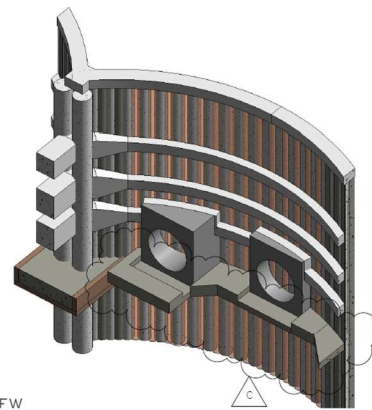


Figura 19. Banqueo de la *waler beam* inferior

El análisis de este banqueo se realizó mediante SAP2000 un modelo de *shells* en el que, mediante *section cuts*, se obtenían los valores de las bielas comprimidas y de los tirantes. Este modelo se contrastó con un modelo teórico de barras para más seguridad.

Como se observa, se aplica una carga de compresión proveniente de la *waler beam* al inicio de la región banqueada. Adicionalmente también se considera una carga vertical correspondiente a la presión del líquido de la tuneladora.

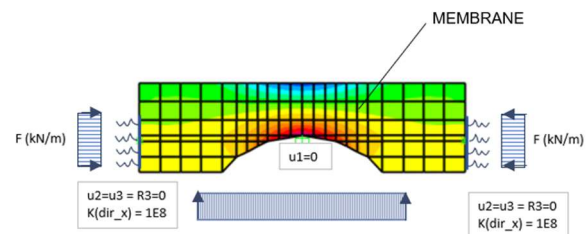


Figura 20. Modelo de *shells*. Bielas y tirantes.

Resultado de este modelo se obtienen unos esfuerzos F11 (Fuerza axial en dirección horizontal kN/m, para la biela comprimida inferior y el tirante superior) y F22 (Fuerza axial en dirección vertical kN/m, para el cortante vertical).

- [5] ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars.
- [6] ACI 318.19 Building code requirements for structural concrete.
- [7] MC20 – Fib Model Code for Concrete Structures 2020.

Agradecimientos

A todo el equipo de Acciona Ingeniería que ha participado en el proyecto.

A David Crespo Olazabal, Brad Allpike y John O'Donovan, de Acciona Agua y Jacobs.

A Michael Murray, Paolo Poggio y Marc Riera de Acciona Construcción por su ayuda y apoyo en la realización del proyecto.