

Túneles con dovelas armadas únicamente con fibras metálicas en Perú

Tunnels in Peru with segments of steel fiber reinforced concrete

Víctor TORRALBA MENDIOLA

Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Bridge Technologies SL

Director de Proyectos

victor.torralba@btechno.es

Gonzalo RAMOS SCHNEIDER

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Universidad Politécnica de Cataluña

Catedrático de Universidad

gonzalo.ramos@upc.edu

Antonio ROMERO BALLESTEROS

Ing. de Caminos, Canales y Puertos

FHECOR

Jefe de Equipo

arb@fhedor.es

RESUMEN

El proyecto Majes-Siguas Etapa II, gran proyecto hidráulico de irrigación en Perú, incluye la ejecución de diversos túneles, entre ellos los de Pucará y Transandino. Estos túneles, de gran longitud, 6.330 m el de Pucará y 9.674 m el Transandino, se han proyectado con ejecución mediante TBM y dovelas prefabricadas armadas únicamente con hormigón con fibras. Suponen un gran reto por la altura a la que están situados los túneles, por encima de 4000 m, y por los esfuerzos tanto geostáticos como sísmicos que tienen que soportar en la cordillera de los Andes. En la comunicación se explica el diseño de las dovelas.

ABSTRACT

The Majes-Siguas Stage II project, a large hydraulic irrigation project in Peru, includes the execution of several tunnels, including those of Pucará and Transandino. These long tunnels, 6,330 m the Pucará and 9,674 m the Transandino, have been designed to be bored with TBM and with a precast concrete segmental lining reinforced only with fibers. They represent a great challenge because of the height where the tunnels are located, above 4000 m, and because of the geostatic and seismic forces that they have to resist in the Andes mountain range. The paper deals with the design of the precast segments.

PALABRAS CLAVE: túnel, tuneladora, dovelas, hormigón con fibras

KEYWORDS: tunnel, TBM, segments, fiber reinforced concrete

1. Introducción

El Proyecto Majes-Siguas Etapa II, en Perú, fue adjudicado a la Concesionaria Angostura Siguas, formada por la empresa española Cobra y la peruana Cosapi. Dentro de este gran proyecto hidráulico, que incluye una presa, azudes, sifones, múltiples canales y canalizaciones, se

encuentran diversos túneles de gran longitud. En concreto, están los túneles de Pucará (6.330 m), Transandino (9.674 m) y el de Lluçla-Siguas (12.820 m).

Esta comunicación se centra en los túneles Pucará y Transandino. Estos túneles tienen un diámetro interior de 5,0 m y se van a ejecutar mediante un escudo abierto para roca (TBM). Las dovelas son de 235 mm de espesor, lo que representa una esbeltez de 21,3 (Diámetro interior/espesor de dovela). Los esfuerzos son considerables en algunas secciones dadas las grandes monteras y presiones de agua esperadas.

La característica más sobresaliente de estos sostenimientos es que las dovelas están armadas únicamente con fibras prácticamente en su totalidad. Sólo en algunas zonas donde se esperan posibles empujes excepcionales de la tuneladora se prevé disponer dovelas híbridas, con armadura convencional únicamente en el contorno.

En la comunicación se presentan los criterios de diseño seguidos y los resultados obtenidos. No se entra en los modelos geomecánicos que han sido desarrollados por la empresa ICYFSA.

2. Revisión bibliográfica

El hormigón con fibras es un material que actualmente tiene un uso estructural ya extendido, más allá de los pavimentos donde inicialmente fue incorporado. A ello ha contribuido de forma importante su inclusión en algunas normas, como la EHE con su Anejo 14 [1], o en el reciente Código Modelo [2].

El comportamiento estructural del material, pues el hormigón reforzado con fibras (HRF) debe considerarse como tal, no como un hormigón armado, hace que sea especialmente adecuado para estructuras sometidas a compresiones compuestas, a flexiones compuestas con axil de compresión. También tienen un campo de aplicación en el comportamiento de almas a cortante [3,4].

La tendencia actual a “enterrar” infraestructuras en las ciudades explica el auge en la construcción de túneles, especialmente con tuneladora. Estas tuneladoras consiguen reducir considerablemente los asientos en superficie, minimizando los riesgos, y aportando gran velocidad de ejecución. Un elemento común a todas ellas, sean abiertas o presurizadas, es la utilización como revestimiento de anillos prefabricados de dovelas. Dichos anillos tienen unas sollicitaciones que les hace muy adecuados para ser fabricados mediante HRF. Así, ya en 2004 iniciamos estudios para la utilización de estos hormigones en la línea 9 del metro de Barcelona [5,6].

A partir de entonces, y con la generalización de metodologías de cálculo ampliamente aceptadas [7], el número de realizaciones de túneles con HRF o con dovelas híbridas (combinación de HRF con zonas con barras convencionales de armadura), ha crecido considerablemente [8], existiendo actualmente amplia bibliografía tanto de cálculo [9] como de ensayos [10, 11]. Sin embargo, de casos reales [12] hay una mucho menos extensa relación de publicaciones. Esta comunicación presenta un caso real actualmente en ejecución.

3. Parámetros básicos de diseño

Los túneles de Pucará y Transandino son túneles hidráulicos con un diámetro interior de 5 m. Inicialmente pensados para construirse mediante voladura, sus importantes longitudes son muy adecuadas para una ejecución mediante una TBM abierta.

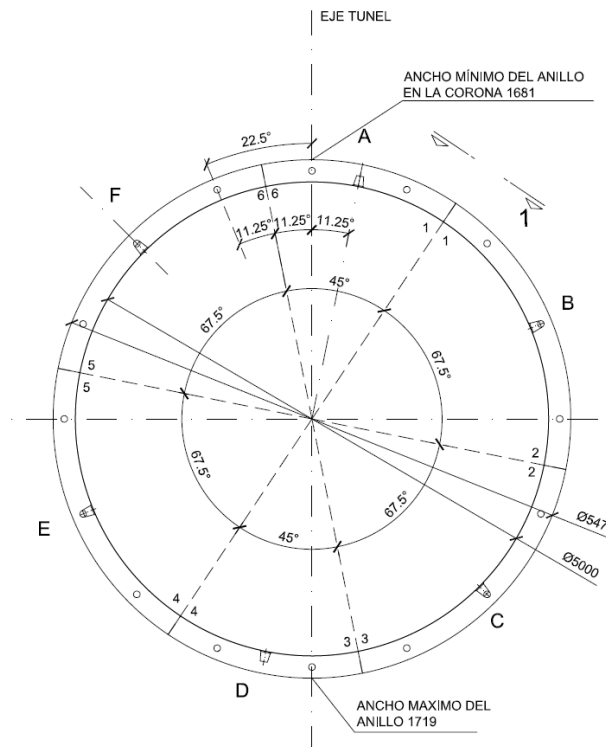


Figura 1. Geometría del anillo de dovelas

En la fig. 1 se puede observar la geometría básica del anillo. Se trata de un anillo tipo universal, de 6 dovelas, con dovela de clave y contraclave, con las juntas longitudinales paralelas a éstas y, por tanto, con dovelas trapezoidales. El espesor del anillo es de 235 mm lo que hace una ratio de esbeltez, respecto al diámetro interior, de 21,27; siendo éste un valor bastante habitual. Debe tenerse en cuenta que este túnel tiene monteras importantes, así como acciones sísmicas.

Como breve resumen geológico indicar que las dos litologías claramente diferentes que aparecen son Andesitas y Tobas, con monteras de hasta 310 m. También existen zonas de fallas.

4. Filosofía de diseño

La idea principal es reducir al máximo la presencia de barras de armado, intentando que las dovelas se fabriquen únicamente con HRF en su mayor número.

Como es habitual, los esfuerzos de servicio de las dovelas son de flexocompresión, no alcanzándose ni en ELS ni en ELU tensiones de tracción en las secciones centrales de las dovelas. Por tanto, el dimensionamiento de las dovelas va a venir condicionado, como suele ser habitual en estos casos, por las situaciones transitorias y por los esfuerzos locales en servicio.

En cuanto a las situaciones transitorias cabe resaltar:

- Esfuerzos de desmoldeo. Son los esfuerzos debidos a la extracción de las dovelas de los moldes y se producen a muy pocas horas después de vertido el hormigón, generalmente entre 5 y 6.
- Primer acopio en planta. Hay que verificar un primer acopio, justo después del desmoldeo. A veces este primer acopio no existe, dependiendo en gran parte del espacio disponible y de si las juntas de estanqueidad de los bordes se pegan en esta fase o se incorporan directamente en el molde.

- Esfuerzos de volteo. Las dovelas se hormigonan con el trasdós en cara superior pero se acopian, para que sean estables, con el intradós en cara superior. Este volteo puede ser justo tras el desmoldeo o tras el primer acopio en planta. Puede ser entre 5 y 6 horas y un día.
- Transporte a campa de acopio. En la campa se acopian las dovelas antes de su transporte a obra por anillos completos. Este acopio es de larga duración y en él, además de las acciones gravitatorias, las dovelas se ven sometidas a acciones de tipo termohigrométrico, que pueden ser importantes si la planta se encuentra en climas extremos. Puede ser entre 5 y 6 horas y un días desde hormigonado
- Transporte a obra. Normalmente se realiza en camión, con edades por encima de los 28 días, y transportando un par de dovelas. En general no es condicionantes, excepto si las condiciones de transporte son complejas.
- Nuevo acopio en obra en paquetes ya dispuestos a introducir mediante el tren de suministros en el túnel.
- Manipulación de las dovelas por la tuneladora desde el tren y en el interior de la TBM.
- Erector de dovelas para formación de anillo
- Empuje de los gatos de avance de la TBM
- Inyección del gap del trasdós

En todas estas fases intermedias se tienen esquemas estáticos distintos, acciones en general de peso propio pero también otras localizadas como empujes de gatos, edades diferentes del hormigón y, en consecuencia, resistencias evolutivas y ausencia de axiles de compresión.

En cuanto a los aspectos locales en servicio se tienen principalmente las juntas radiales, también llamadas longitudinales, donde existen concentraciones importantes de tensiones. Ese efecto también aparece en las juntas circunferenciales durante el empuje de los gatos de la TBM.

El diagrama de tensión – deformación en tracción adoptado es el rectangular de la EHE [1], que es el mismo que en el Modelo Code [2], y que se muestra en la siguiente figura.

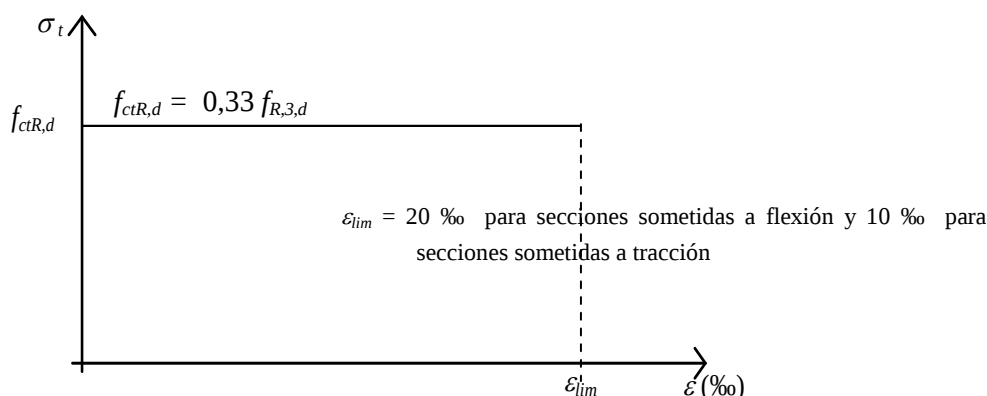


Figura 2. Diagrama de cálculo rectangular de la EHE [1]

$f_{R,3,k}$ es la resistencia residual a flexotracción característica, obtenida para un CMOD (Crack Mouth Opening Displacement: abertura de entalla) de 2.5 mm, según el ensayo de flexión de la EN 14651. A partir del ensayo se obtiene la fuerza correspondiente a esa abertura (ver fig. 3) y la tensión que corresponde a dicha fuerza.

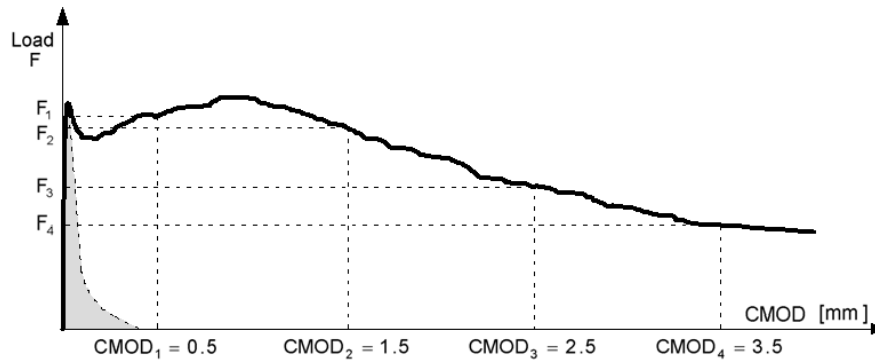


Figura 3. Típica curva fuerza-CMOD para un hormigón en masa (gris) y un HRF [2]

Para obtener el valor de diseño, $f_{R,3,d}$, debe dividirse el valor característico $f_{R,3,k}$ por el coeficiente de seguridad parcial de 1,5.

En cuanto al esquema estático, en estas fases iniciales es siempre isostático, no existiendo axil de compresión. Esto tiene importantes consecuencias en cuanto al concepto de ductilidad que introduce el Model Code [2]. Así, en su artículo 7.7.2 indica que la carga última (P_u) de la estructura siempre tiene que ser mayor que su carga de fisuración (P_{cr}) y mayor que la máxima carga en servicio (P_{SLs}). Además añade dos criterios de flecha, que son que la flecha última debe ser mayor que 20 veces la flecha en servicio y que la flecha en la carga máxima debe ser mayor que la flecha de servicio. Estas condiciones no están presentes en la EHE.

La condición de la carga última superior a la de fisuración es normalmente mucho más restrictiva que el ELU en sí. En un comportamiento con softening, por ejemplo como el reflejado en la figura 3, es evidente que si la estructura es isostática, o sea sin redistribución de esfuerzos en rotura, no es posible que la carga última sea superior a la de fisuración. Si nos encontrásemos con una estructura hiperestática, sí que con un comportamiento softening, redistribuyendo esfuerzos, se puede cumplir dicha condición, pero no en el caso de las dovelas.

Por ello, la condición para cumplir el Model Code en una estructura isostática es que $f_{R3k} \geq f_{ctk,fl}$ [13]. En el caso de las dovelas que se presentan aquí, y para asegurar el cumplimiento del requerimiento de ductilidad, al tratarse de un hormigón C40/50, $f_{R3k} \geq 2.5$ MPa.

5. Verificación en Fases Transitorias

El diseño de dovelas está totalmente condicionado por las fases transitorias, las cuales sólo se pueden definir de forma conjunta con el equipo de construcción, pues es el que determina la forma de desmoldeo (pinzas, ventosa) y su geometría, el equipo de volteo, si existen acopios intermedios y el número de anillos que se quieren acopiar (medio, completo o doble), las cargas de los gatos de avance de la tuneladora y su geometría (especialmente su excentricidad),...

5.1. Desmoldeo

En las fases iniciales es imprescindible tener en cuenta la evolución de la resistencia del hormigón. Por ejemplo, para el desmoldeo que se produce al cabo de 5 o 6 horas desde el vertido, tras un curado al vacío, se ha previsto una resistencia a compresión, en valor característico de 10 MPa, que es un valor conservador. También es imprescindible considerar una cierta adherencia de la dovela con el molde, que ha sido de 10 kPa. En cuanto al coeficiente de seguridad, se ha adoptado 1,5 pues, de forma también bastante convencional, aunque debería ser 1,35 por ser la

acción predominante el peso propio, se incrementa para tener en cuenta de forma aproximada el efecto dinámico del despegue.

En general no se disponen de leyes de variación de la resistencia a flexotracción residual en el tiempo, por lo que se ha asumido que dicha resistencia es directamente proporcional a la de compresión y que, en consecuencia, un hormigón con resistencia de 10 MPa tiene una f_{R3k} de una cuarta parte respecto a la de un hormigón de 40 MPa.

En este caso de desmoldeo, y en ELU, la dovela no llega a fisurar, pero para asegurar ductilidad $f_{R3k} \geq f_{ctk,fl} = 0.974$ MPa. Dado que este f_{R3k} es para 10 MPa el equivalente para 40 MPa es $4 * 0.974 = 3.89$ MPa.

Para obtener un valor tal de f_{R3k} existen dos estrategias, la primera es mediante softening, y la segunda mediante hardening. Mediante softening, se trataría de conseguir un hormigón con una f_{R1k} (que es la tensión para un CMOD de 0,5) elevado, claramente por encima de 4,5, para que después la curva fuera descendente. La opción de hardening es al revés, partir de un hormigón con un f_{R1k} del orden de 3 y después conseguir una curva ascendente. La primera opción exige mayor cuantía de fibra y la segunda opción requiere una fibra de mejor comportamiento (módulo y anclaje). Por tanto, se optó por un hormigón tipo C40/50 3e, con lo que se tiene que

$$f_{R1k} \geq 3 \text{ MPa}$$

$$f_{R3k} / f_{R1k} \geq 1.3 = 3.9 \text{ MPa}$$

Podría argüirse que la condición del Model Code es discutible, y que lleva a diseños conservadores. Sin embargo, es indudable que es del lado seguro y que en aplicaciones novedosas es importante, de cara a la administración, asegurar el cumplimiento de las normativas pues ayuda a que ésta acepte diseños menos convencionales.

5.2. Empuje de gatos

Esta es otra de las operaciones críticas en las que las dovelas suelen sufrir desperfectos. La acción de los gatos durante el avance de la máquina introduce cargas que aunque intentan ser repartidas generan tracciones de compatibilidad. Existen diversos métodos aproximados, pero en este caso se ha recurrido a una modelización mediante elementos finitos sólidos, obteniéndose tensiones e integrándolas para verificar la capacidad de las fibras o la necesidad de incorporar armadura pasiva.

La figura 4 muestra la geometría y la presión de los gatos (incluida su excentricidad) y la figura 5

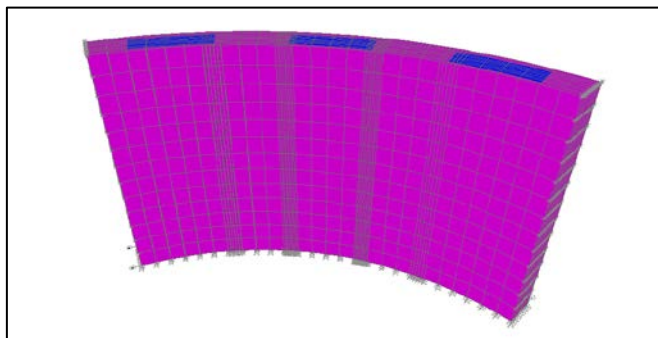


Figura 4. Modelo de elementos finitos sólidos para dovela tipo

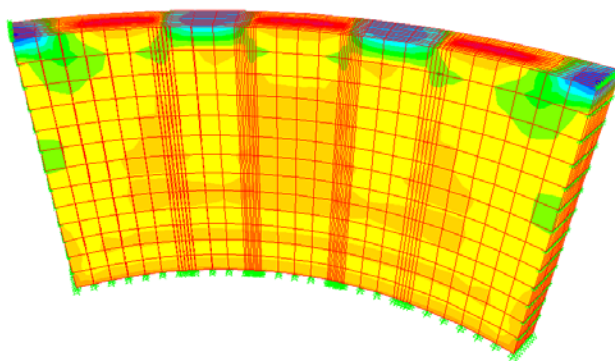


Figura 5. Tensiones en dirección circunferencial

De estos modelos, que se han contrastado con bielas y tirantes, se ha obtenido que para un empuje de 24700 kN, que es el previsto en operación normal de la TBM, se podían resistir las tracciones únicamente con armadura. Para el caso de cruces con fallas, en los que se prevé que la máquina pueda necesitar alcanzar su empuje operacional máximo de 47000 kN se han diseñado unos zunchos de borde para absorber dichas tracciones. Por tanto, en esas zonas las dovelas son híbridas, de hormigón con zuncho de armado en el borde circunferencial.

6. Verificación en Servicio

En las verificaciones en servicio se puede diferenciar la verificación de las secciones de las dovelas y las de borde de las juntas radiales. Como se ha indicado anteriormente, todas las secciones están en compresión compuesta en servicio, por lo que no presentan ningún problema especial. En cambio, en las zonas de juntas radiales vuelven a aparecer efectos locales al reducirse el área de contacto entre dovelas por la presencia de juntas, y barra de guiado. En estas zonas es preciso realizar un análisis local para el que se ha utilizado el apartado 6.5.3 del EuroCódigo 2 para determinar las tracciones y el 6.7 para determinar la compresión máxima.

La casi totalidad de las dovelas es capaz de resistir las tracciones locales debidas al axil generado por el empuje del terreno en las juntas radiales sólo con la presencia de fibra. Sin embargo, en zonas de falla con gran montera, el axil es demasiado elevado. Sólo existían dos alternativas, o incrementar el espesor de dovela, lo que incrementa el volumen de excavación y el volumen de hormigón en la totalidad del túnel, o la de diseñar unas dovelas especiales para dichas zonas en las que se disponen zunchos de armadura en las juntas radiales. Obviamente, la solución adoptada es la segunda.

7. Conclusiones

La comunicación presenta el diseño estructural de las dovelas de sendos túneles hidráulicos en Perú. Dichas dovelas se han diseñado con un hormigón reforzado con fibras de acero y casi nula presencia de armadura convencional. Sólo en casos de presencia de falla, donde se esperan empujes excepcionales de la tuneladora y donde se prevén axiles importantes en los anillos por la acción del terreno, se han diseñado dovelas especiales con presencia de zunchos de armaduras

en juntas circunferenciales y/o radiales. En el momento de redacción de esta comunicación se están ensayando diversos tipos de fibras con diferentes dosificaciones en busca de la fibra y cuantía óptima para alcanzar el nivel 3e del Model Code en comportamiento en flexotracción.

Referencias

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [2] CEB-FIB, Model Code 2010, bulletin 65, International Federation of Structural Concrete, 2012.
- [3] J. Turmo, G. Ramos, A.C. Aparicio, Shear Strength of Dry Joints of Concrete Panels with and without Steel Fibres. Application to Precast Segmental Bridges, Engineering Structures, vol. 28, Elsevier Science (2006) 23-33.
- [4] S. Llopart, T. Polo, G. Ramos, R. Gettu, A.C. Aparicio, Ensayos sobre paneles de juntas de dovelas a cortante. Hormigón convencional frente a hormigón con fibras de acero. II Congreso de Puentes y Estructuras de ACHE, 14 – 17 Noviembre 2002, Madrid
- [5] R. Gettu, G. Ramos, T. García, B. Barragan, C. Fernández, R. Oliver, Estudio experimental del hormigón reforzado con fibras para uno de los tramos del túnel de la línea 9 del metro de Barcelona, Cemento y Hormigón, nº 866, Septiembre 2004, pp 52-69
- [6] J. Ainchil, J. Torrents, G. Ramos, B. Barragán, Utilización de hormigón armado con fibras resistentes en dovelas de tuneladora, III Congreso de puentes y Estructuras de ACHE, 14 – 17 Noviembre 2005, Zaragoza
- [7] F. Capilla, R. Gettu, G. Ramos, Prestressed Bridge Elements. Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete – Background and Experiences. RILEM TC 162-TDF Workshop. Bochum, Germany, 20-21 March 2003.
- [8] A. de la Fuente, A. Blanco, P. Pujadas, A. Aguado, Diseño óptimo de dovelas de hormigón reforzado con fibras para el revestimiento de túneles, Hormigón y Acero 65 (2014) 267-279.
- [9] Liao L., A. de la Fuente, S. Cavalaro, A. Aguado, A, Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010, Tunnelling and Underground Space Technology 47 (2015) 200-210.
- [10] R. Gettu, G. Ramos, T. García, M. Barragán, C. Fernández, M. Cordero, Estudio experimental del hormigón reforzado con fibras para uno de los tramos de la línea 9 del metro de Barcelona, XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural Mendoza, Argentina, 17 –21 Mayo 2004
- [11] C. Molins, O. Arnau, 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 26 (6) (2011) 764-777.
- [12] T. Kasper, C. Edvardsen, G. Wittneben, D. Neumann, Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with steel fibre reinforced concrete segments, Tunnelling and Underground Space Technology 23 (5) (2008) 574-587.
- [13] L. Liao, A. de la Fuente, S. Cavalaro, A. Aguado, Design procedure and experimental study on fibre reinforced concrete segmental rings for vertical shafts, Materials and Design 92 (2016) 590-601.