

Diseño frente a fuego en las dovelas del Metro de Sídney

Fire design on the Sydney Metro segmental lining

Itziar Fernández Ortega^a, Xavier Torelló Ciriano^b, Emiliano Gómez García^c

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. ifernandez@typsa.es

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. xtorello@typsa.es

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de estructuras TYPSA. egomez@typsa.es

RESUMEN

El proyecto de construcción del túnel del metro de Sídney, con una longitud de 11km de doble túnel construidos mediante tuneladoras (TBM), ha considerado la seguridad contra incendios en su diseño. El revestimiento de hormigón de los túneles ha sido especialmente diseñado para resistir un incendio intenso durante al menos 170 minutos, según los estándares más exigentes para ferrocarriles. Se han realizado cálculos detallados utilizando modelos no lineales para evaluar el comportamiento del hormigón armado con fibras de acero a altas temperaturas. Además, se han llevado a cabo ensayos para validar el comportamiento del hormigón y garantizar que cumple con los requisitos de resistencia al fuego.

ABSTRACT

The Sydney Metro tunnel construction project, an 11km-long twin tunnel constructed by tunnel boring machines (TBMs), has considered fire safety arrangement in its design. The concrete lining of the tunnels has been specially designed to withstand an intense fire for at least 170 minutes, in accordance with the most stringent standards for railroads. Detailed calculations using nonlinear models have been carried out to evaluate the behaviour of concrete reinforced with steel fibres at high temperatures. In addition, tests have been carried out to validate the behaviour of the concrete and ensure that it meets fire resistance requirements.

PALABRAS CLAVE: dovelas, método avanzado de diseño frente a fuego, EN 1992-1-2, RABT-ZTV

KEYWORDS: segments, advanced method of fire design, EN 1992-1-2, RABT-ZTV

1. Introducción

1.1 Descripción de la estructura

El Metro Oeste de Sídney - *Central Tunnelling Package (CTP)* consiste en la construcción de 11km de túneles gemelos desde *The Bays Precinct* hasta el *Sydney Olympic Park*, que conectarán con la línea *Sydney Metro City & Southwest* y duplicará la capacidad ferroviaria desde y hacia el centro

de Sídney. El objetivo con esta nueva extensión es ofrecer un servicio integrado de metro que sea elegido cada día por los usuarios.

El túnel construido mediante tuneladoras TBM comprende un túnel de doble calado, con 10.249,6m para la línea descendente (*Westbound Tunnel-RT01*) y 10.238,5m para la línea ascendente (*Eastbound Tunnel-RT02*). Los túneles se realizarán con una tuneladora de doble escudo que permite la instalación segura de un anillo de revestimiento segmentado universal

El diámetro interior viene definido por los 6.000mm de diámetro mínimo de explotación y los 85mm de tolerancia total, resultando 6.170mm. El diámetro de excavación de 7.010mm viene definido por el espesor del revestimiento (260mm) más el espacio que se proyecta de mortero bicomponente(160mm) entre el revestimiento y el diámetro de excavación de la tuneladora.

Garantizar la seguridad de los usuarios, de los empleados y de los servicios de extinción de incendios mediante la resistencia al fuego es una de las consideraciones de diseño más importantes de este proyecto. Las estructuras y revestimientos de hormigón del túnel se han diseñado y se construirán para garantizar la integridad funcional y estructural en caso de incendio. Esta integridad se garantizará tanto durante el incendio como después del mismo, lo que permitirá volver a poner en servicio la

La metodología de diseño frente a fuego sigue el método avanzado descrito en el Eurocódigo EN 1992-1-2 (2004) [1], Anexo B.2 proporcionando un diseño ajustado que responde al reto de resistir los casos de incendio más demandantes que puedan presentarse. Además, se aplica una curva tiempo-temperatura RABT-ZTV (ferrocarril) tal y como se explica en los siguientes apartados del documento.

2. Diseño frente a fuego

El efecto más directo de un incendio en una estructura es que la temperatura en la estructura aumentará, en una primera fase, y luego disminuirá progresivamente a medida que el fuego decaiga hasta su extinción. Durante la fase de calentamiento, el calor se transfiere dentro de la estructura mediante una combinación de convección del gas circundante y radiación.

Itziar Fernández, Xavier Torelló, Emiliano Gómez / IX CONGRESO ACHE – GRANADA 2025 2

en la sección transversal cambiarán transitoriamente tanto en términos de deformabilidad como de resistencia. Esto influye en el comportamiento de la sección transversal y provoca fuerzas internas de restricción, tensiones internas y deformaciones, tal como se explicará de manera más detallada en los párrafos siguientes.

La situación de incendio es una situación accidental que solo requiere verificaciones contra el estado límite último en situación accidental (a diferencia del estado límite de servicio). Los estados límites últimos son aquellos estados asociados con el colapso estructural u otras formas similares de fallo por deformación excesiva, la formación de un mecanismo cinemático, la rotura o la pérdida de estabilidad.

En el enfoque semiprobabilístico, el diseño contra el estado límite último se basa en la comparación entre la resistencia de la estructura calculada con los valores de diseño de las propiedades del material, por un lado, y los efectos de los valores de diseño de las acciones por otro lado, como en la siguiente ecuación:

$$R_{d,fi}(X_{d,fi}) \geq E_{d,fi}(F_{d,fi}) \quad (1)$$

Donde:

$R_{d,fi}$ es el valor de diseño de la resistencia en caso de fuego

$X_{d,fi}$ es el valor de diseño de las propiedades del material en caso de fuego

$E_{d,fi}$ es el valor de diseño de los efectos de las acciones en caso de fuego

$F_{d,fi}$ es el valor de diseño de las acciones en caso de fuego

En situaciones accidentales, como un incendio, las acciones que actúan sobre una estructura deben combinarse considerando:

- Valores de diseño de las acciones permanentes G_k, P_k

- Valor de diseño de la acción accidental, la carga debida al fuego $G_{d,fi}, P_{d,fi}$
- Valor frecuente o cuasi permanente de la acción variable dominante $\varphi_i Q_{k,i}$
- Valores cuasi permanentes de otras acciones variables

En caso del fuego, y si la variabilidad de la acción permanente es pequeña, es decir, en la mayoría de los casos, se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \varphi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \varphi_{2,i} Q_{k,i} \quad (2)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \varphi_{2,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \varphi_{2,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Los valores de diseño de las propiedades de los materiales $X_{d,fi}$ se describen mediante la ecuación general:

$$X_{d,fi} = \frac{X_k(\theta)}{\gamma_{M,fi}} \quad (4)$$

Donde:

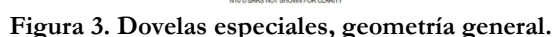
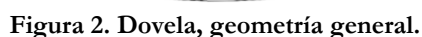
$\gamma_{M,fi}$ es el factor de seguridad parcial de la propiedad del material en el diseño de fuego. El valor recomendado es 1.

θ es la temperatura

2.1 Materiales

La mezcla de hormigón reforzado con fibras de acero que se ha utilizado para las dovelas tiene una resistencia a la compresión característica a los 28 días especificada mínima de 66MPa. Además, el tipo de árido utilizado en la mezcla es esencialmente silíceo, lo que se ha tenido en cuenta para el comportamiento térmico del hormigón a fin de simular las acciones del fuego. La dosificación de fibras de acero se determinó mediante ensayos para cumplir los requisitos de resistencia y proveer cierta ductilidad al hormigón con fibras.

Las fibras de polipropileno se utilizarán para controlar el desprendimiento en caso de incendio. La dosificación considerada se determinó mediante los ensayos de fuego abarcando varias dosificaciones de entre 1,0 y 2,0kg/m³, seleccionando finalmente 1.5 kg/m³.

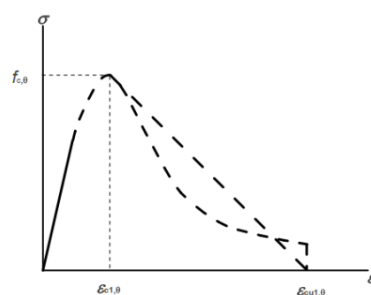


La resistencia y la rigidez del acero y del hormigón se reducen con el aumento de la

Las modificaciones de las propiedades del material comprenden lo siguiente:

- Resistencia a compresión del hormigón
- Módulo de elasticidad del hormigón
- Relación tensión-deformación del hormigón a compresión
- Propiedades térmicas del hormigón
- Resistencia a tracción de las fibras
- Resistencia a compresión/tracción del acero de refuerzo (para secciones híbridas)
- Módulo de elasticidad del acero de refuerzo (para secciones híbridas)

Las propiedades de resistencia y deformación del hormigón a temperaturas elevadas deben obtenerse a partir de las relaciones tensión-deformación presentadas en la siguiente figura.



Range	Stress $\sigma(\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1\theta}$	$\frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1\theta}$	For numerical purposes a descending branch should be adopted. Linear or non-linear models are permitted.

Figura 4. Modelo matemático de las relaciones tensión-deformación del hormigón sometido a compresión a elevadas temperaturas. [1]

Las relaciones tensión-deformación dadas están definidas por dos parámetros:

- La resistencia a la compresión
- La deformación correspondiente a la resistencia a compresión

En la tabla siguiente se indican los valores de cada uno de estos parámetros en

función de las temperaturas del hormigón. Para valores intermedios de la temperatura, puede utilizarse la interpolación lineal.

Concrete temp. θ [°C]	Siliceous aggregates		
	$f_{c,s}/f_{c,k}$	$E_{c,s}/E_s$	$\alpha_{c,s}/\alpha_s$
1	2	3	4
20	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425
1000	0,04	0,0250	0,0450
1100	0,01	0,0250	0,0475
1200	0,00	-	-

Figura 5. Valores de las relaciones tensión-deformación del hormigón con áridos silíceos para temperaturas elevadas. [1]

En cuanto a la degradación de las fibras de acero sometidas al fuego, la norma EN 1992-1-2 (2004) no proporciona información al respecto. Sin embargo, el Boletín 83 [2] de la FIB proporciona una relación adecuada a partir de la directriz italiana CNR DT 204, 2006. Esta directriz proporciona un coeficiente K_{Ft} para diferentes temperaturas (véase la línea continua en la figura siguiente), de modo que:

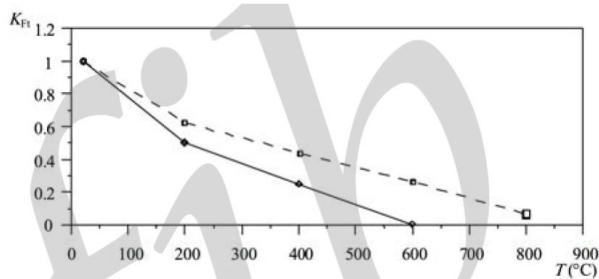


Figura 6. Coeficiente K_{Ft} . [2]

Por último, en lo que respecta a las dovelas híbridas, la ley de degradación del material de la armadura se ha tomado de la norma EN 1992-1-2 (2004), como se indica a continuación. Estas tablas, incluyen la resistencia a tracción, así como el módulo de elasticidad para temperaturas elevadas.

Steel Temperature θ [°C]	$f_{yk,s}/f_{yk}$		$f_{yk,s}/f_{yk}$		$E_{k,s}/E_s$	
	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 7. Valores de los parámetros de la relación tensión deformación del acero en temperaturas elevadas. [1]

2.2 Curva de tiempo-temperatura

Para el proyecto del Metro de Sídney, como ya se ha comentado en este documento, los casos de fuego se diseñarán de acuerdo con El Eurocódigo 2: EN 1993-1-3 Diseño de estructuras de hormigón – Parte 1-2: Reglas generales – Diseño frente al fuego y de acuerdo con la experiencia del diseñador en otros túneles de metro y de carreteras, llevándose a cabo un diseño robusto frente al fuego.

Además, en este caso particular, la curva de fuego viene definida en las Especificaciones Particulares del proyecto, la curva de fuego RABT-ZTV (ferrocarril).

El perfil de temperatura asociado a la aplicación de la curva tiempo-temperatura RABT-ZTV (ferrocarril) durante 170 minutos, se ha calculado utilizando análisis térmicos 1D y 2D para proporcionar el perfil tiempo-temperatura en las dovelas de hormigón, con las siguientes hipótesis:

- Temperatura inicial de 20°C.
- No se considera pérdida de calor en el lado no expuesto al fuego del anillo.
- Conductividad térmica promediada en el rango del Eurocódigo 2 para hormigón de peso normal y para árido silíceo

El desarrollo de la temperatura de la curva de fuego RABT-ZTV se describe mediante los siguientes valores:

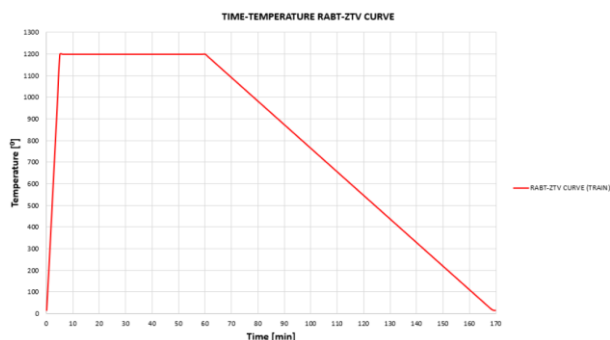


Figura 8. Curva tiempo-temperatura RABT-ZTV (ferrocarril).

La propagación de la temperatura en el elemento de hormigón se muestra a continuación como una correlación de la curva para diferentes profundidades del elemento de hormigón:

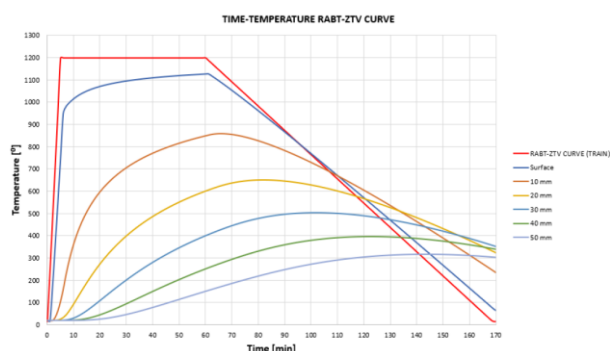


Figura 9. Curva tiempo-temperatura RABT-ZTV (ferrocarril) para diferentes profundidades.

2.3 Difusión de temperaturas y degradación del material

Para realizar el análisis seccional del túnel, se ha realizado la difusión de temperatura para 60, 120, 140 y 170 minutos, con el fin de obtener cuándo está el revestimiento más cerca del fallo estructural.

El análisis seccional es un planteamiento común para verificar la resistencia al fuego, que suele llevarse a cabo mediante diferentes enfoques. En este caso particular, se ha aplicado el Método Zonal que se describe en el Eurocódigo [1]. El Método Zonal va más allá de la simplificación conservadora del Método de Isoterma 500°C, considerando una sección efectiva más compleja y realista cuyo tamaño depende de la distribución de temperatura. Para realizar el cálculo, la sección se divide en un

número finito de zonas y se determina la temperatura en el centroide de cada zona, basándose en el análisis térmico.

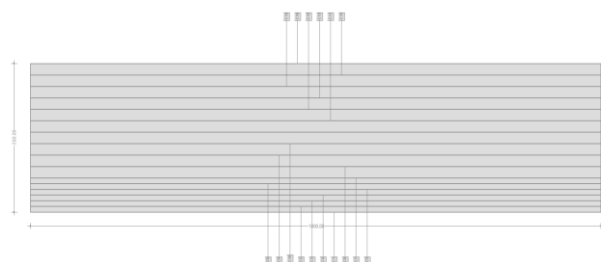


Figura 10. Método zonal aplicado a la dovela del Metro de Sídney de 260 mm de espesor.

Este método, permite tener en cuenta los efectos de redistribución tensional interna, introduciendo coeficientes de corrección adecuados a las temperaturas alcanzadas.

Según las tablas de los apartados anteriores, las características del hormigón deben degradarse con la temperatura con respecto a la resistencia a la compresión y su correspondiente deformación y módulo elástico. Cabe indicar que en el hormigón no hay recuperación de las propiedades tras la afección del calor. Esto significa que la degradación de las propiedades del hormigón son acumulativas con la temperatura por lo que el análisis de las propiedades del hormigón se tendrá en cuenta como enfoque conservador, una envolvente de la máximas temperaturas alcanzadas para los diferentes instantes del escenario de fuego a evaluar.

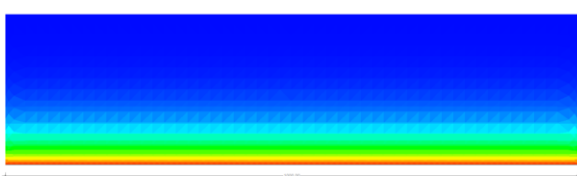
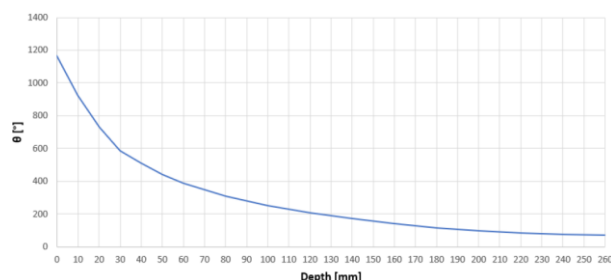


Figura 11. Propagación de la temperatura en las dovelas de hormigón.

En cuanto a la degradación de las fibras de acero sometidas a fuego, se considera el coeficiente K_{Ft} [2] para las diferentes temperaturas.

Mediante el perfil térmico mostrado arriba, se obtiene la caracterización del material, es decir las propiedades reducidas del hormigón con fibras para cada profundidad:

D [mm]	T envelope [°C]	T envelope average [°C]	Aggreg. type	$f_{c,0}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,0}$	$f_{c,0}$ [MPa]	$E_{c1,0}$ [GPa]	K_{Ft}	$F_{tu,0}$ [MPa]	$E_{s,0}$ [MPa]	α
0	1168							0.000	0.00		
10	925	1047	Siliceous	0.03	0.0250	1.72	0.0687	0.000	0.00	103.12	1.06E-05
20	733	829	Siliceous	0.13	0.0250	8.57	0.3428	0.000	0.00	347.55	1.1E-05
30	585	659	Siliceous	0.36	0.0250	23.86	0.9542	0.065	0.06	1431.37	1.15E-05
40	511	548	Siliceous	0.53	0.0198	34.81	1.7552	0.154	0.15	2907.00	1.17E-05
50	441	476	Siliceous	0.64	0.0138	41.93	3.0340	0.231	0.23	4776.59	1.18E-05
60	389	415	Siliceous	0.73	0.0107	48.02	4.4666	0.314	0.31	6904.95	1.17E-05
80	308	349	Siliceous	0.80	0.0085	52.90	6.2577	0.400	0.40	9792.60	1.14E-05
100	252	280	Siliceous	0.87	0.0067	57.42	8.5710	0.462	0.46	13035.68	1.08E-05
120	209	230	Siliceous	0.92	0.0060	60.69	10.1877	0.526	0.53	15547.35	1.03E-05
140	172	190	Siliceous	0.95	0.0054	63.01	11.7607	0.622	0.62	17816.65	9.93E-06
160	140	156	Siliceous	0.97	0.0048	64.15	13.2523	0.700	0.70	20448.23	9.64E-06
180	116	128	Siliceous	0.99	0.0044	65.08	14.7223	0.761	0.76	22587.82	9.45E-06
200	97	106	Siliceous	1.00	0.0041	65.80	16.0779	0.805	0.81	24255.85	9.32E-06
220	84	90	Siliceous	1.00	0.0038	66.00	17.2964	0.834	0.83	26532.78	9.24E-06
240	76	80	Siliceous	1.00	0.0036	66.00	18.2169	0.849	0.85	28424.55	9.20E-06
260	73	75	Siliceous	1.00	0.0035	66.00	18.7402	0.860	0.86	29416.99	9.17E-06

Figura 12. Propiedades del hormigón reforzado con fibras degradadas debido a la envolvente de temperaturas.

Por lo tanto, en caso de fuego, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Reducción de la resistencia del hormigón
- Pérdida de la capacidad de la sección (en caso de desprendimiento) debido a la temperatura máxima en el hormigón. En particular, en este proyecto, se especifica una tolerancia de “*spalling*” medio de la sección de 20mm de valor máximo.
- Generación de fuerzas adicionales debido a la expansión térmica

Una vez realizados los análisis numéricos para comprobar la degradación de hormigón en función de la difusión de temperatura en las dovelas, se obtiene el diagrama de interacción Momento-Axial que define la resistencia reducida de la sección tras el escenario de fuego. Estos diagramas, se pueden obtener para varios valores de “*spalling*” que sea compatible con el diseño y definir así el máximo admisible. En este caso particular, el nivel de “*spalling*” desprendimiento máximo medio ya estaba definido en las Especificaciones Particulares del proyecto.

También se analizan las secciones híbridas, secciones de hormigón reforzado con fibras y acero convencional. Para la propagación térmica en esta sección, como enfoque

convencional, no se considera la presencia de las barras de acero ya que las propiedades térmicas están gobernadas por la matriz de hormigón. (El porcentaje de armado convencional es de 0.6%-0.7% para las direcciones longitudinal y transversal). Por lo tanto, para la comprobación de la degradación del acero, se comprueba la temperatura a la que está el hormigón en la posición del armado convencional y se supone esa misma temperatura para el acero.

2.4 Análisis estructural y resultados

El objetivo final del diseño de fuego es proporcionar un valor de desprendimiento medio admisible que sea compatible con los esfuerzos existentes en el anillo bajo esta hipótesis accidental de cálculo. A efectos prácticos, esto se consigue mediante la dosificación de fibra de polipropileno incluida en la mezcla de hormigón que proporcionará una profundidad homogénea de desprendimiento a ser testada en ensayo a fuego.

El análisis estructural realizado para obtener los esfuerzos en el anillo en condiciones de fuego se ha desarrollado con el módulo Ultimate del Software SAP2000. El modelo del anillo se ha dividido en varias capas, tal y como se ha explicado en el apartado anterior, para discretizar las temperaturas y las propiedades de los materiales en el anillo. Las juntas radiales se han dispuesto según la peor posición. El espesor del anillo en este modelo es directamente el espesor final, considerando un desprendimiento de 20mm, es decir, anillo de 240mm.

Cada segmento se ha modelado utilizando elementos lineales tipo *shell* (cada uno de ellos con sus correspondientes propiedades térmicas y leyes constitutivas). Las juntas radiales se han modelizado mediante *links* plásticos multi-lineales con la misma rigidez a compresión del hormigón al que sustituyen y sin capacidad a tracción. Además, se ha refinado la malla en la zona de juntas para mejorar el comportamiento del modelo en las discontinuidades.

Las condiciones de contorno que simulan el contacto entre el anillo y el suelo se han modelizado mediante *links* de tracción/compresión que proporcionan diferentes rigideces para representar los distintos desplazamientos relativos producidos en el terreno. Estas propiedades se han fijado al valor del módulo de reacción radial del terreno en compresión considerando la rigidez de la lechada, y a un valor de rigidez nulo en tracción, estableciendo un coeficiente de rozamiento limitado para simular el contacto transversal entre el anillo/lechada y el terreno.

Además de las cargas ya existentes (peso propio, presión de agua existente en el terreno, presión del terreno), se ha incluido la acción del fuego mediante incrementos de temperatura en cada capa, de acuerdo con el análisis térmico seccional y teniendo en cuenta que la sección inferior del anillo está protegida contra el fuego por la plataforma de hormigón del tren.



Figura 13. Modelo completo del revestimiento según el Método Zonal. Incrementos de temperatura debidos al fuego.

El modelo realizado, es un modelo evolutivo definido según diferentes etapas a lo largo del tiempo. Para cada una de las etapas que se han analizado, se ha considerado la temperatura correspondiente en cada una de las capas. Dado que el coeficiente térmico del material no se ha reducido con el desarrollo de la curva tiempo-temperatura, la temperatura

considerada para cada capa se ha corregido para simular el coeficiente térmico adecuado. En los siguientes párrafos se explica la evolución de cada etapa calculada.

Toda la superficie expuesta al fuego se considera uniforme para conseguir las máximas dilataciones debidas a efectos térmicos durante el escenario de fuego. Todas las superficies expuestas al fuego se consideran con la temperatura máxima para cada momento (según la temperatura de cada etapa de cálculo), excepto la parte protegida por la plataforma de hormigón del tren y la losa invertida que se considera una superficie sin incremento térmico relevante durante el incendio debido a la presencia de una segunda etapa de hormigonado (en la que se ejecuta la plataforma de hormigón del tren) que actúa como protección de la dovela inferior.

Este análisis se ha desarrollado para dos secciones tipo. Una de ellas es la sección con mayor recubrimiento rocoso y la otra sección, que es la sección con menor recubrimiento rocoso, ya que se consideran las más desfavorables para este caso de carga de todas las secciones analizadas.

Se ha desarrollado un modelo de construcción por etapas:

- Etapa 0: se define como la etapa en la que el túnel tiene carga de peso propio, carga de presión de tierras y carga de agua.
- Etapa 1: se define como la etapa en la que la curva tiempo temperatura está en $t=60\text{min}$.
- Etapa 2: Se define como la etapa en la que la curva tiempo-temperatura está en $t=120\text{min}$.
- Etapa 3: Se define como la etapa en la que la curva tiempo-temperatura está en $t=140\text{min}$.
- Etapa 4: Se define como la etapa en la que la curva tiempo-temperatura está en $t=170\text{min}$.
- Etapa 5: Se define como la etapa posterior al incendio con todas las

propiedades del hormigón reducidas debido al fuego.

Como resultado del análisis, se muestra un campo de tensiones en el anillo a lo largo de la dirección circunferencial. Como se puede ver en la siguiente figura, los segmentos afectados por el fuego están comprimidos en las capas más afectadas por el incremento de temperatura durante el proceso simulado de incendio.

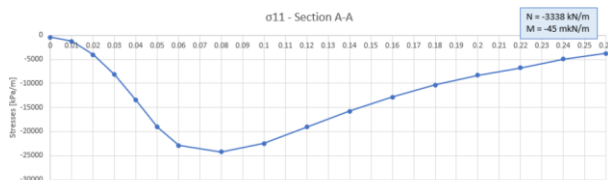


Figura 14. Tensiones a lo largo de la sección A-A.

Finalmente, se ha realizado una integración numérica de las tensiones a lo largo del anillo en 120 secciones distribuidas uniformemente, para evaluar las fuerzas axiales y los momentos flectores en el anillo de dovelas para el Análisis de Fuego. Los resultados, se muestran en un diagrama de interacción con todas las secciones de hormigón para la zona expuesta al fuego con un diagrama de capacidad seccional reducido (por efecto de spalling y la mayor degradación de propiedades en los materiales alcanzadas en todas las etapas de fuego consideradas):

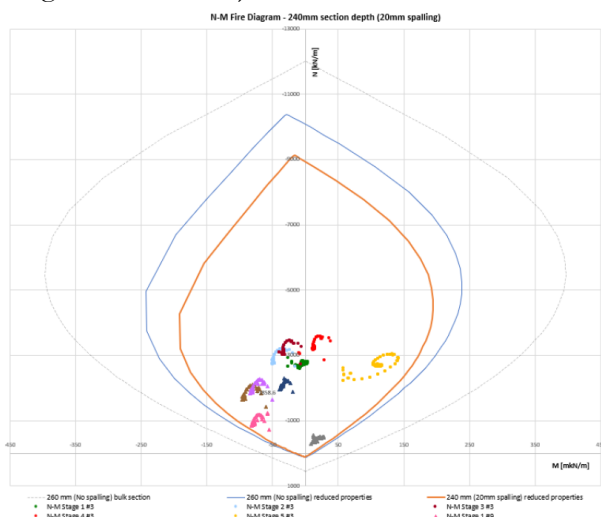


Figura 15. Tensiones a lo largo de la sección A-A.

Las conclusiones a las que se llega en este punto son que un valor objetivo promedio

máximo de desprendimiento de 20mm (“saplling”) es compatible.

Por otro lado, se han analizado los efectos locales en las juntas radiales con la finalidad de analizar los efectos de desprendimiento producidos bajo cargas concentradas en las juntas radiales del anillo. El modelo simula el comportamiento de la junta, transmitiendo las fuerzas circunferenciales a través del área de contacto de la junta.

En la figura siguiente, este efecto se puede apreciar en el modelo con una concentración de las tensiones de compresión en la superficie de contacto de la junta en su proximidad al intradós afectado por el incendio.

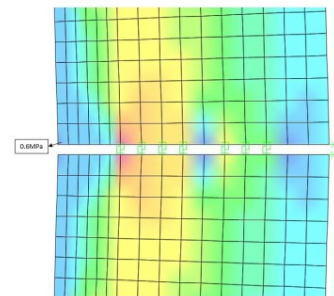


Figura 16. Tensiones circunferenciales [MPa] cerca de la junta radial.

También se analizan en otro modelo las secciones híbridas, secciones de hormigón reforzado con fibras y acero convencional siguiendo el mismo criterio y procedimiento explicado en las secciones de hormigón con fibras.

El modelado de la condición posterior al fuego es similar al realizado para el caso durante el fuego. A medida que disminuyen las cargas térmicas debidas a las temperaturas de fuego de diseño, las cargas que actúan sobre las dovelas son similares a las consideradas para el caso durante el fuego sin los efectos superpuestos debidos a las cargas térmicas del incendio, pero con la sección afectada por la degradación por la temperatura en el caso del hormigón. Las principales diferencias, con respecto a los modelos durante el fuego, se relacionan tanto con el espesor de la sección como con la rigidez de las dovelas de la siguiente manera:

- Una sección post fuego para fines de análisis es la sección original menos el espesor dañado medido desde el intradós considerando las zonas en donde el hormigón superó los 500°C
- La rigidez del revestimiento queda reducida también durante el fuego debido a la fisuración durante las fases de fuego.

Por lo tanto, la fuerza axial máxima de compresión resultante y el momento flector de citado modelo corregido luego se verifican con la capacidad del espesor de revestimiento reducido descontando la zona de hormigón que alcanzó los 500°C y la zona desprendida de spalling.

3. Ensayo frente a fuego

Los ensayos de fuego son un componente crítico del proceso de aprobación. La metodología de pruebas se basa en las Especificaciones y Directrices de la Federación Europea de Asociaciones Nacionales que Representan al Hormigón (EFNARC), adaptadas a las Normas Australianas.

Se propuso utilizar un laboratorio, con una instalación de ensayos acreditado por la National Association of Testing Authorities, Australia (NATA) con una experiencia significativa en pruebas de fuego para curvas de incendio de alta temperatura.

Entre otras disposiciones, la especificación requirió que se pruebe cada mezcla de proyecto. Los principales resultados incluirán el gradiente térmico a través de la sección de hormigón y la profundidad promedio y máxima de desprendimiento al final de la prueba, y la resistencia posterior al incendio de las muestras tomadas de los especímenes de prueba.

Se espera que los parámetros clave de la prueba incluyan:

- Las losas no se cargarán durante la prueba

- Las losas tendrán un mínimo de 250mm de espesor
- Las muestras se probaron horizontalmente y se apoyaron sobre las paredes del horno

De los resultados del ensayo a fuego se selecciona una mezcla de hormigón particular de las ensayadas y que tenía un contenido de fibras de polipropileno de 1.5kg/m³. El spalling medio medido en los ensayos para aquella mezcla fueron inferiores a la hipótesis de diseño empleada (20 mm).

4. Conclusiones

Los resultados de los análisis numéricos realizados muestran que las dovelas de hormigón reforzado con fibras de acero y las dovelas híbridas tienen una resistencia adecuada a las cargas de fuego, analizado con método zonal para el mejor aprovechamiento de los materiales y modelo completo 3D en donde se obtienen los esfuerzos hiperestáticos de la estructura de revestimiento de dovelas por interacción con el terreno. Además, estos análisis se ven apoyados por los resultados obtenidos en los ensayos, siendo más restrictivos los resultados obtenidos en el análisis numérico que en los ensayos.

Agradecimientos

Los autores de la presente comunicación quieren agradecer su esfuerzo y apoyo a los diferentes participantes en el proyecto. El equipo de diseño del departamento de estructuras de TYP SA, el contratista UTE formada por Acciona-Ferrovial, el cliente final Metro Sídney, y a los demás intervinientes de un proyecto tan completo y excepcional como este.

Referencias

- [1] Eurocódigo (2004), *EN 1992-1-2:2004*, Norma Europea.
- [2] Boletín 83 del Código Modelo (2010), *Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete*.