

Diseño no-lineal en servicio y rotura de un muro cortafuegos en un túnel ferroviario bajo cargas aerodinámicas

Non-linear serviceability and failure design of a firewall inside a railway tunnel under aerodynamic load pressures

Magí Domingo^a, Oscar Ramos^b, Rosa Tijeras^c, Tomás Arranz^d, Víctor Torralba^e,
Gonzalo Ramos^f

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Investigador. magi.domingo@upc.edu

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Tunnel and Bridge Technologies. Ingeniero. oscar.ramos@tbtechno.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. EWE+. Directora de proyectos. rtijeras@ewe-engineering.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. SNC Lavalin. Director del proyecto. Tomas.Arranz@nouvl.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Tunnel and Bridge Technologies. Director de proyectos. victor.torralba@tbtechno.com

^fDoctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrático. gonzalo.ramos@upc.edu

RESUMEN

En el marco de la modernización de un túnel ferroviario se realiza la reevaluación de un muro cortafuegos en su interior bajo considerables cargas laterales debido a los efectos aeroelásticos del paso del tren. Se realiza un análisis no-lineal global en el que se observa un posible fallo por falta de equilibrio transversal y por la rotura de parte del muro. Se propone un refuerzo estructural con el propósito de eliminar la falta de equilibrio transversal e incrementar la capacidad del muro. La verificación de este se realiza siguiendo los modelos no-lineales globales antes utilizados para la verificación inicial.

ABSTRACT

As part of the modernization project of a railway tunnel, a re-assessment of a firewall is carried out, which presents significant lateral loads due to the aeroelastic effects of passing trains inside it. A global nonlinear analysis reveals a potential failure due to the lack of transverse equilibrium and the partial structural failure of the wall. An external reinforcement is proposed to address the transverse equilibrium and increase the wall's capacity. The verification of this reinforcement is conducted using the same global nonlinear models previously used for the initial assessment.

PALABRAS CLAVE: Diseño no-lineal, Elementos Finitos, Hormigón Reforzado con Fibras.

KEYWORDS: Nonlinear design, Finite Element Analysis, Fiber Reinforced Concrete.

1. Introducción y descripción de la estructura

En el marco de un proyecto de ampliación de ferrocarril urbano se define la renovación de

varias líneas existentes junto con la construcción de nuevos tramos, quedando todos ellos integrados en una única línea. La actualización de las líneas incluye las obras de modernización de un túnel, ejecutado mediante excavación en roca y el cual data de principios del siglo XX. Dicho túnel, actualmente en uso, incumpliría la

normativa vigente en materia de aislamiento frente a fuego en infraestructuras. Este desfase es debido a la rápida actualización de estas normas junto con la dificultad de realizar obras de envergadura y sin interrupciones en túneles ferroviarios con elevadas ocupaciones.

Aprovechando el corte completo de las líneas afectadas por la ampliación, el proyecto parcial que atañe las actuaciones en el túnel incluyó la ejecución de un muro cortafuegos, más allá de la sustitución de la plataforma, electrificación y señalización. Dicho muro permitiría la creación de dos galerías conectadas pero aisladas a efectos de incendio para la eventual evacuación de los usuarios.

La geometría del túnel presenta una sección pseudo-circular de tamaño reducido e irregular para los estándares actuales de túneles con doble vía, fruto de una excavación en roca por voladura con técnicas y métodos habituales a principio del siglo pasado. Lo anterior conduce a un gálibo vertical variable, entre 5 y 9 metros, y un gálibo horizontal de 8 - 9 m. Justamente éste es un aspecto que debe considerarse en el diseño, pues requiere de una estructura divisoria de esbeltez considerable.

El muro proyectado inicialmente consistía en un elemento prefabricado de hormigón reforzado con fibras (HRF) de 3 m de longitud, semejante a una New Jersey, y actuando a modo de soporte. Sobre éste, se disponía el muro divisorio ensamblando a partir de paneles del tipo “Durasteel®” (de Promat). Posterior al diseño inicial, y cuando los elementos prefabricados ya estaban contruidos, la propiedad decidió substituir los paneles metálicos ensamblados por un muro de hormigón armado ejecutado in-situ sobre el elemento prefabricado. La longitud del muro entre juntas de retracción es de 20 m. Para materializar la nueva conexión entre las partes prefabricada e in-situ, una de las ingenierías responsable de la asistencia técnica (AT) diseñó unas conexiones metálicas puntuales (longitudinalmente discretas) utilizando los

anclajes originales para el muro metálico y que enlazaban con la armadura principal del muro superior. El resto del contacto es “a hueso” entre hormigones, transfiriendo únicamente carga vertical. El elemento prefabricado descansa sobre un elemento en “U” que proporcionaría la transición entre la superficie rocosa, actuando también como cimentación. Dicho elemento se realiza también con HRF. En la Figura 1 se muestra una sección tipo con los elementos en su configuración final.

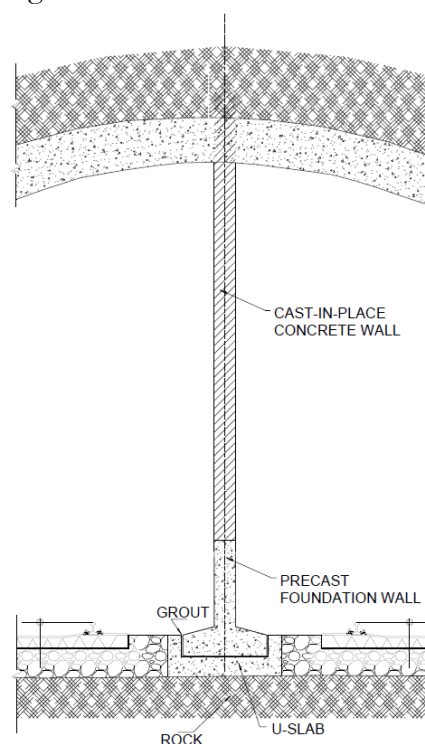


Figura 1. Representación de la sección tipo del muro cortafuegos.

A efectos de diseño, el principal elemento a dimensionar es el propio muro divisor, el cual está sujeto a importantes esfuerzos laterales fruto de los efectos aeroelásticos y las presiones generadas, condicionadas por la velocidad de proyecto – de 90 km/h –, la longitud del túnel y el reducido gálibo.

El cambio en la parte superior del muro, de paneles metálicos ligeros a hormigón in-situ, justificó una revisión del efecto de la presión debido al paso del tren (pues éste tenía en cuenta los efectos inerciales del muro) y, consecuentemente, una revisión del diseño de los elementos estructurales que lo componen. La

presión de diseño, incluyendo la amplificación dinámica, resulta en 5.67 kPa uniformemente distribuida en un tramo suficientemente extenso a efectos de verificación.

En esta comunicación se recoge la revisión del elemento prefabricado (“Precast Foundation Wall” a partir de la Figura 1) hecha por parte de los autores bajo los efectos de cargas laterales, cuya verificación requirió de un análisis global no-lineal fruto de las definiciones materiales y condiciones geométricas.

Debe notarse que se ha prescindido de aquella información que no aporta ningún aspecto diferencial en la exposición del caso y de los problemas encontrados con el objetivo de mantener la confidencialidad del proyecto.

1.1 Metodología

La reevaluación inicial del muro se realizó mediante modelos elásticos convencionales, los cuales incluían no-linealidades geométricas, debido a los contactos “a hueso” entre los distintos elementos (permitiendo así el despegue). Estos modelos y verificaciones se prepararon con el programa de análisis estructural SAP2000. Las verificaciones seccionales que acompañan el análisis estructural se realizan con un programa de desarrollo propio, capaz de verificar múltiples configuraciones de HRF, enmarcado en [1]. Para dichas verificaciones se consideraron los factores parciales de carga y de materiales habituales propuestos en la previa generación de Eurocódigos [2], [3], [4], los cuales se hará referencia como EC0, EC1, EC2, etc. respectivamente.

Sin embargo, tras los primeros resultados y habida cuenta de las peculiaridades del HRF – cuya resistencia es susceptible a la orientación de las fibras– fue necesario realizar un análisis pormenorizado de las propiedades materiales y del comportamiento global del muro a partir de modelos no-lineales. Para el desarrollo de las verificaciones no-lineales se recurrió al programa de cálculo por elementos finitos no-lineal

ABAQUS, el cual incorpora de manera generalizada cualquier no-linealidad, sea a nivel constitutivo como geométrico.

Algunos de los detalles específicos de las estrategias de modelización se describen en los respectivos apartados donde se recogen las verificaciones lineales y no-lineales.

2. Verificación de la estructura inicial

La revisión del diseño inicial bajo la nueva configuración de cargas se centra en la capacidad del muro a nivel seccional, especialmente la parte prefabricada, y el equilibrio de la estructura, pues esta no se encuentra anclada en ningún momento. Tal y como se ha introducido antes, ambas se realizan inicialmente con métodos convencionales, y se recurre a modelos no-lineales más avanzados tras los primeros resultados obtenidos.

Todas las verificaciones consideran muros con una altura de muro in-situ de 5.4 m (altura total de 6.9 m), que sería la cota superior del rango de alturas más representativas a lo largo del túnel. El muro se encuentra fijo frente a desplazamientos en la clave del túnel, y simplemente apoyado con el muro prefabricado con forma de “T” invertida (aportando resistencia al giro) sobre la base en “U”.

2.1 Análisis estructural del muro y resultados seccionales

En la Figura 3 se muestran los esfuerzos flectores que generan tracciones en la dirección vertical (negativos aquellos que generan tracciones en la cara vista). La figura muestra una longitud de muro correspondiente al panel prefabricado, el cual tiene un comportamiento independiente de elemento a elemento.

Como era de esperar, dado el anclaje discreto, y existiendo únicamente uno por elemento prefabricado, se desarrollan distintos comportamientos entre el elemento

prefabricado e in-situ, con una flexión unidireccional solamente en el último caso.

La Figura 4 muestra el equilibrio seccional en ELU, considerando la banda vertical más solicitada y el axil concomitante. Para el cálculo

se ha considerado la ley constitutiva plástico-lineal definida en el Model Code 2010 [5], siendo la disponible en el momento de la verificación.

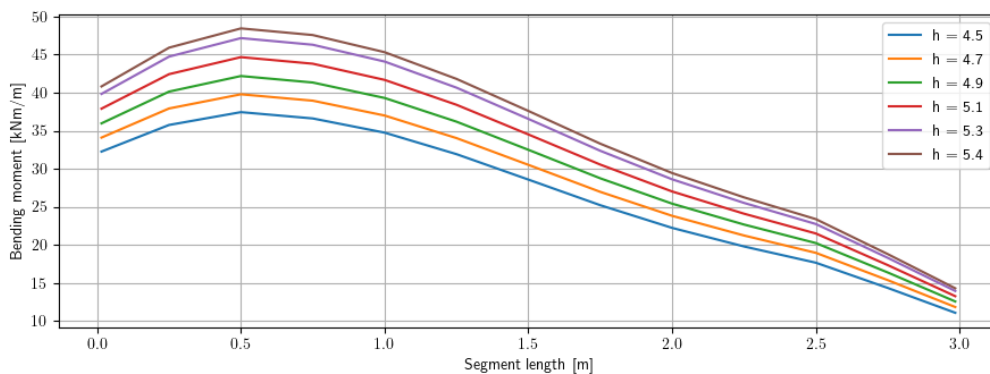


Figura 2. Momento flector vertical en el arranque del elemento prefabricado para distintas alturas de muros in-situ.

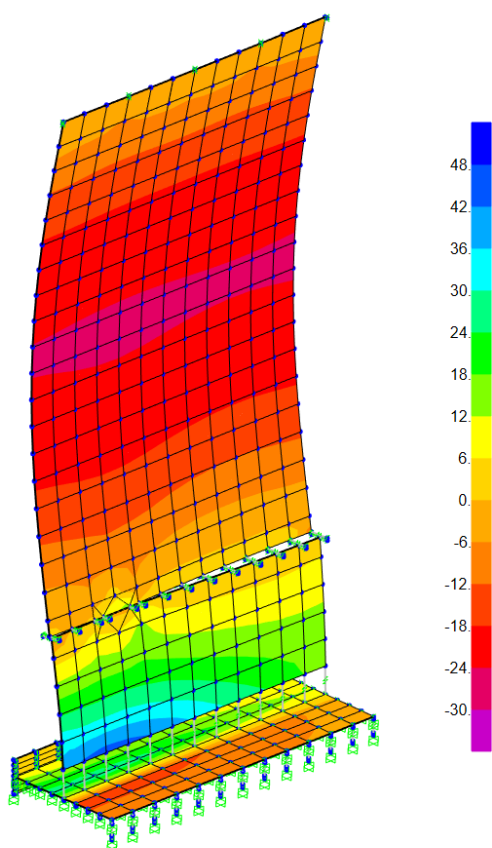


Figura 3. Momento flector en dirección vertical.
Unidades en kNm/m.

De la verificación anterior, se observa un factor de seguridad añadido (incluye todos los factores parciales) menor de la unidad, no alcanzando la seguridad mínima.

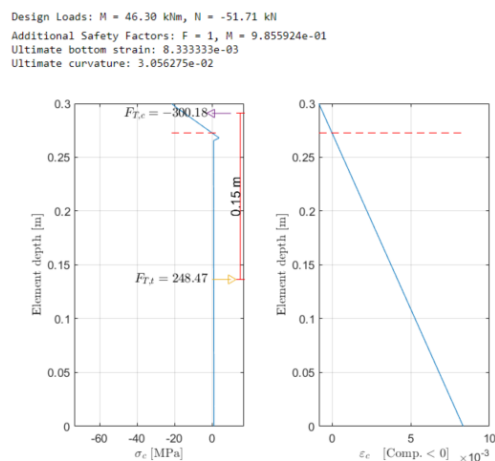


Figura 4. Verificación seccional por metro. Incluye el efecto de la orientación de las fibras.

Es fundamental señalar que la verificación previa incluye un factor de orientación de las fibras de valor 0.5, tal y como sugiere la norma alemana específica para HRF [6], lo que reduce a la mitad la capacidad asumiendo una orientación de las fibras adecuada. Por otro lado, la distribución de momentos en el arranque, tal y como muestra la Figura 2, dista de uniforme debido al anclaje, como antes se apuntaba. Ello invitaría a una potencial redistribución de esfuerzos dentro del mismo elemento.

Sobre el factor de orientación, experiencias experimentales previas en estructuras semejantes han demostrado la sensibilidad de la capacidad del HRF a la orientación de las fibras [7]. Un análisis detallado del efecto de la orientación se encuentra en [1]. En la Figura 5 se muestra la comparación entre los resultados esperados mediante las campañas para la definición de los materiales, y una campaña específica para el análisis de las orientaciones durante la reevaluación de los muros. A partir de los resultados obtenidos se debería adoptar un factor reductor de la orientación de 0.15.

A partir de las observaciones previas, se consideró necesario analizar la capacidad del elemento prefabricado mediante un modelo no-lineal capaz de capturar la redistribución de tensiones en el interior del mismo elemento y simultáneamente permitir definiciones constitutivas para el HRF.

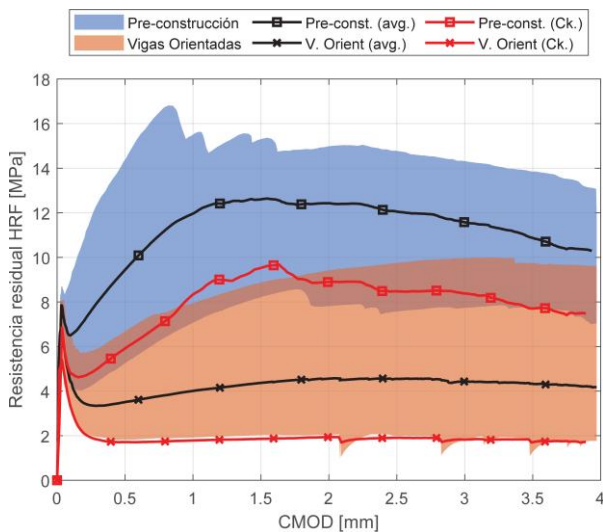


Figura 5. Comparativa de resistencias residuales para el cálculo del HRF.

2.2 Equilibrio de la estructura

La verificación frente a la pérdida del equilibrio es necesaria al no estar el muro adecuadamente anclado a la roca subyacente, sino disponer de una junta entre hormigones encofrados. A partir de los resultados de la sección anterior, y para distintas alturas de muro in-situ, es posible verificar el coeficiente de fricción mínimo tal que

se evitara el desplazamiento, tal que $\mu_{min} = R_{H,Ed}/R_{V,Ed}$. Debe notarse que, al no tratarse de una cimentación, se consideran los factores de mayoración de la EC-2 [4] para el equilibrio. En la Tabla 1 se muestran los coeficientes mínimos.

Tabla 1. Coeficiente de fricción mínimo para cumplir el equilibrio frente a deslizamiento en tres alturas de muro in-situ características del túnel.

Altura muro [m]	R_V [kN]	R_H [kN]	μ_{min}
4.5	133.30	85.98	0.644
4.9	140.80	91.88	0.652
5.4	149.89	99.20	0.662

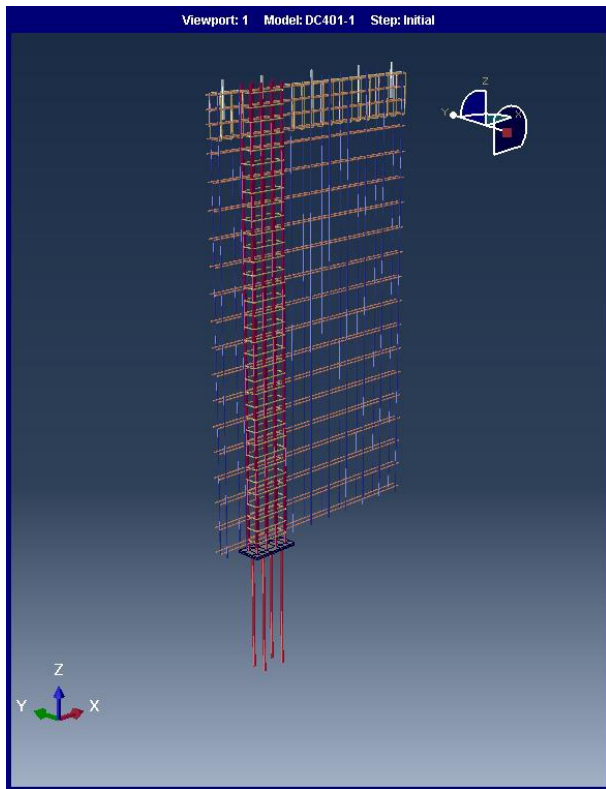
Al presentar coeficientes mayores a 0.60, que se considera un valor convencional para la fricción entre hormigones con superficie de baja rugosidad, el equilibrio al deslizamiento podría quedar comprometido. El análisis global no-lineal permitiría un contraste de los resultados obtenidos frente al desplazamiento.

2.3 Análisis global con modelos no-lineales

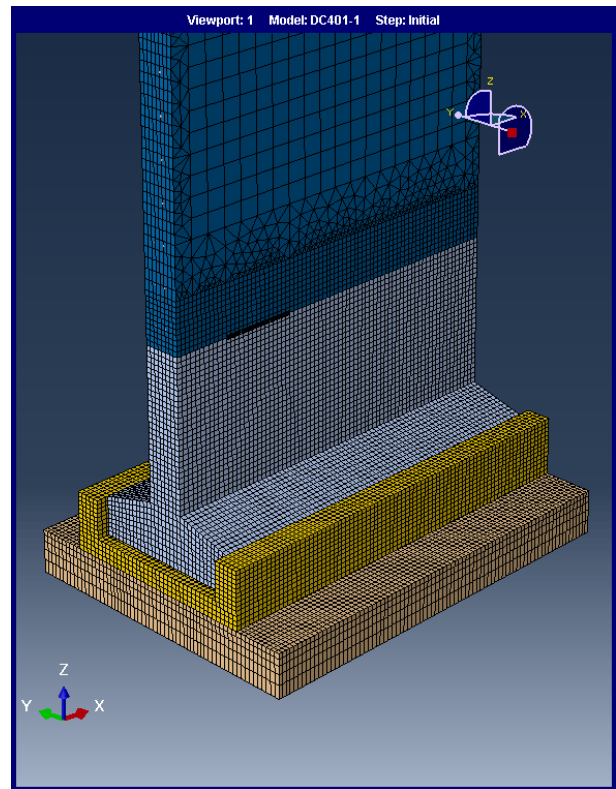
Tal y como se ha introducido anteriormente, se considera necesario un modelo global no-lineal de un paño de muro tipo con el objetivo de contrastar los resultados iniciales, basados en métodos convencionales de cálculo.

El modelo se define en base a elementos sólidos de integración reducida (C3D8R), siendo los más indicados para análisis no-lineales que incluyan pérdidas de rigidez considerables [8], como es el caso. Ello requiere de una discretización relativamente fina, resultando en elementos del orden de 35 mm. Las partes que contienen armadura o pernos embebidos se modelizan mediante elementos tipo biela ("Truss", T3D2). Los refuerzos se modelizan como embebidos en los elementos sólidos asumiendo adherencia perfecta. Ello modifica la rigidez del elemento huésped. Los contactos entre superficies se definen de manera que se restringe el desplazamiento de nodos hacia el

interior de los cuerpos, pero se permite su separación.



(a)



(b)

Figura 6. Detalles de la geometría modelizada para el análisis global no-lineal. (a) Todos los refuerzos y pernos de acero, y (b) mallado de los elementos sólidos,

La aplicación de la carga debe ser secuencial, al no ser posible la superposición de estas. Tras aplicar los efectos gravitatorios (cuyo multiplicador se mantiene por 1.0, al ser favorable) se aplica la presión de aire de manera incremental hasta el fallo. Este procedimiento es equivalente al considerado en el Anejo PP de la EN1992-2:2004 [9], donde se incrementan las cargas externas hasta el fallo.

En la Figura 6a y Figura 6b se muestra la geometría considerada para el armado, reproduciendo lo proyectado por la AT, y el detalle del mallado de los elementos sólidos.

2.3.1 Verificación del equilibrio

La primera comprobación que se considera en el análisis del modelo global es el equilibrio frente al deslizamiento, pues previsiblemente el fallo por pérdida de equilibrio sucedería antes que la

rotura del elemento. En la Figura 7 se muestra el desplazamiento de los nodos de referencia indicados en la Figura 8.

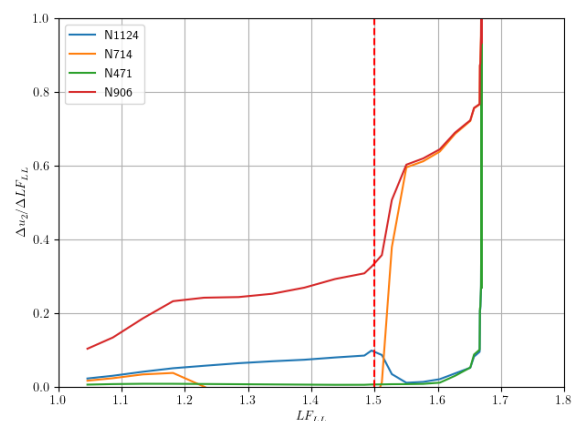


Figura 7. Desplazamiento de los nodos referenciados en la Figura 8.

Así mismo, la Figura 9 muestra la predicción de los desplazamientos para los multiplicadores de sobrecarga de 1.5 y 1.67.

Puesto que se trata de un análisis global no-lineal, la seguridad se alcanzaría cuando $E_{Ed}/\gamma_o\gamma_{Rd} > R_{Rd}$, siendo R_{Rd} la carga mayorada en ELU, y $\gamma_o\gamma_{Rd}$ igual a 1.27. Ello implicaría una carga cuyo factor es mayor que 1.67, resultado de la Figura 7.

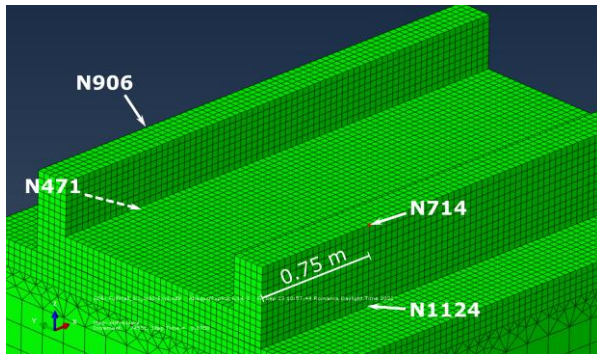
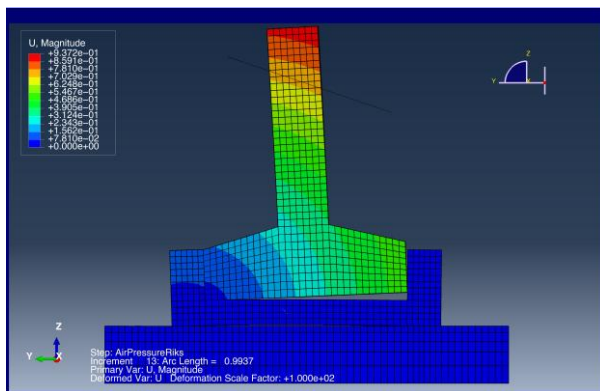
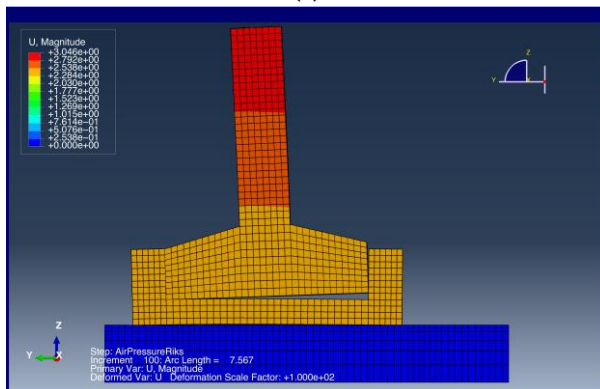


Figura 8. Nodos de referencia para la medida del equilibrio.



(a)



(b)

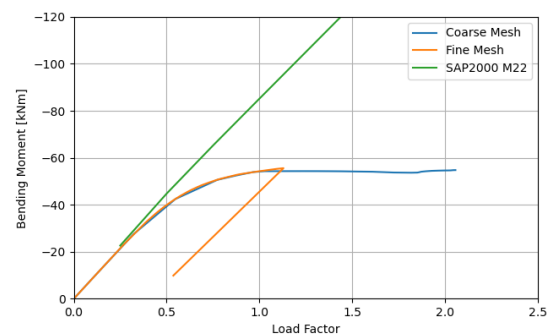
Figura 9. Desplazamiento en milímetros bajo carga transversal y factores de carga de 1.5 y 1.67.

2.3.2 Verificación de la resistencia

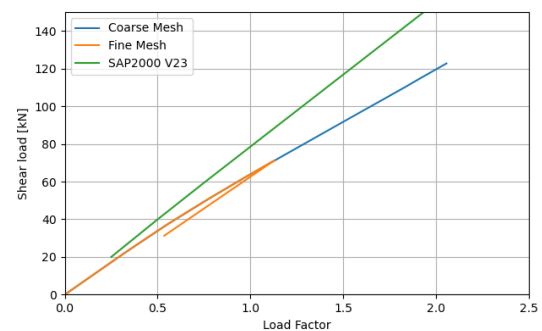
Asumiendo que se actúa restringiendo el desplazamiento transversal del muro, es posible verificar globalmente la resistencia de este. En la

Figura 10 se muestra la evolución del momento y cortante en el arranque del muro prefabricado frente al multiplicador de la sobrecarga. Al refinar el mallado en la zona de el arranque, se observa como el fallo sucede antes de alcanzar un multiplicador de carga suficiente para garantizar la seguridad.

La resistencia a flexión sería consistente con los cálculos seccionales previos, pues el momento último para un factor de orientación igual a 0.15 es de 19.35 kNm/m (58.1 kNm en 3 m de longitud).



(a)



(b)

Figura 10. Momento flector y esfuerzo cortante en el arranque del muro prefabricado en los modelos lineal elástico y no-lineal (permitiendo la redistribución).

Un razonamiento que justificaría dicho fenómeno no reside en la capacidad frente a flexión, sino la reducción de la resistencia a cortante que presentaría el arranque al tener una sección completamente fisurada, alcanzando la capacidad a flexión, pero sin alcanzar la deformación última. Como se observa en la Figura 11, la cabeza de compresión presentaría un tamaño considerablemente reducido (del

orden de 30 mm) resistiendo prácticamente todo el cortante.

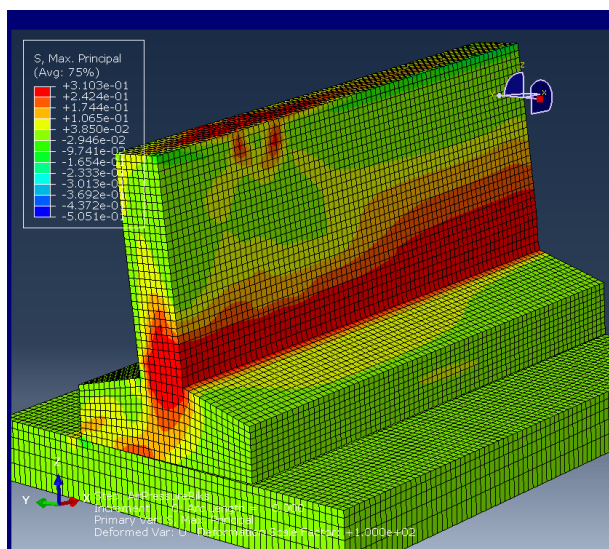


Figura 11. Distribución de tensiones principales de tracción en el muro prefabricado. Unidades en MPa. Tensión máxima de 0.31 MPa.

Una verificación manual de la resistencia a cortante de la cabeza de compresión asumiendo que las fibras ya no actúan (véase la cl.12.6.3 de la EN1992-1-1:2004), conduciría a una resistencia de 70 kN. Este valor correspondería al cortante máximo observado en la Figura 10b.

A partir de los resultados numéricos y análisis estructural, se consideró la necesidad de un refuerzo estructural, así como el anclaje del muro al terreno, debido a las nuevas condiciones de carga derivadas del muro in-situ.

3. Solución Adoptada

Considerando las necesidades de los puntos anteriores, se persiguió una solución que pudiera reforzar en las zonas de máximos esfuerzos y simultáneamente generar un punto de anclaje sobre el terreno. Para ello, se definió el refuerzo metálico mostrado en la Figura 12, el cual se ancla al terreno mediante barras postesas inyectadas ancladas a la roca y se une al hastial del muro prefabricado mediante resina epoxy y barras postesas. Otros condicionantes que definieron las características del refuerzo fueron

la existencia de otros trabajos simultáneos durante la obra y la inmediatez, lo que condujeron a un refuerzo externo.

El refuerzo metálico tiene el objetivo de controlar la flexión en el arranque del muro prefabricado activando un mecanismo de adherencia con el hormigón. Se incluyen cuatro pernos postesos pasantes que conectan refuerzos simétricos para reducir al máximo el riesgo de delaminación e incrementar la resistencia del contacto.

El mismo refuerzo actúa como placa de anclaje para el tesado de las barras verticales ancladas al terreno e inyectadas.

3.1 Verificación de la solución

El refuerzo y solución propuestos se verificaron siguiendo los mismos procedimientos definidos para la verificación global no-lineal del muro prefabricado, basado en el incremento de la sobrecarga (presión de aire) hasta alcanzar la rotura (incluyendo la pérdida de equilibrio).

Se definió un modelo numérico con el programa ABAQUS, de manera semejante al modelo definido para las verificaciones iniciales, añadiendo los nuevos elementos, que deben ser verificados.

Sobre la definición del modelo numérico, no existen cambios sustanciales sobre la inicial, a excepción de la modelización de las barras y pernos postesos. El elemento de refuerzo se modeliza a partir de elementos sólidos. Pese a unos primeros tanteos con elementos tipo placa, la necesidad de capturar adecuadamente las eventuales tensiones perpendiculares al plano del elemento sugirió el uso de elementos sólidos.

La modelización de los pernos transversales requirió de una selección cuidada de los elementos. Debido al carácter posteso, era necesario modelizar un elemento que fuera capaz de deformarse en su dirección axial, pero seguir condicionado por la vaina. Ello se resolvió

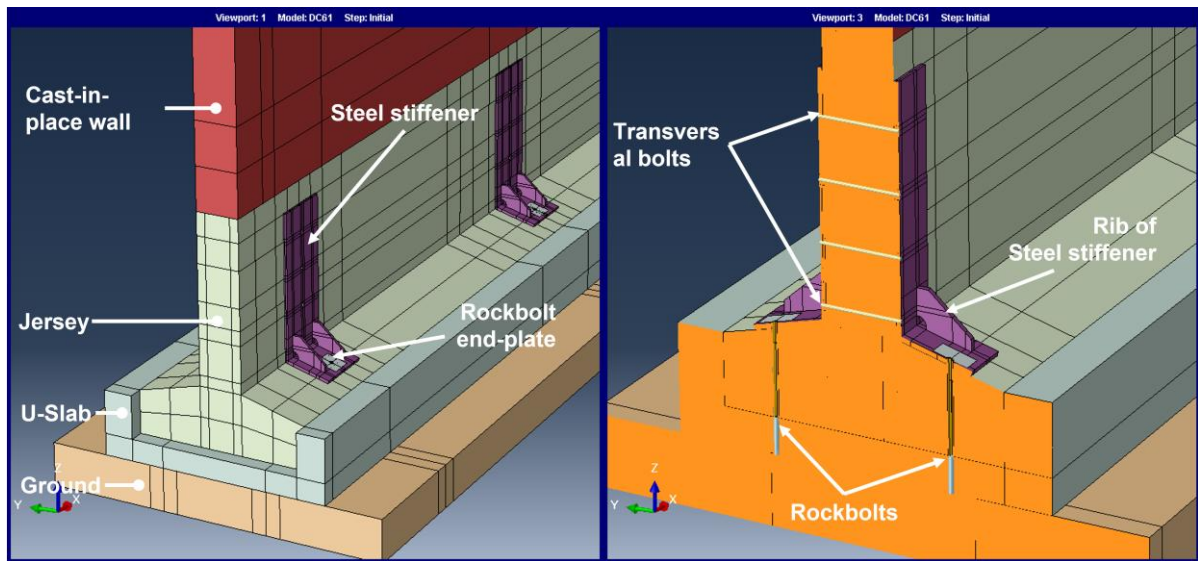


Figura 12. Geometría del muro prefabricado ("Jersey") junto con el resto de los elementos y el refuerzo considerado.

con elementos del tipo "tube-to-tube" (ITT31) [8].

En la Figura 13 y la Figura 14 se muestran los resultados frente a desplazamientos en el conjunto del muro y las tensiones desarrolladas en el refuerzo, ambas para un multiplicador de sobrecarga de 2.1, ambos resultando en valores por debajo de los límites de diseño.

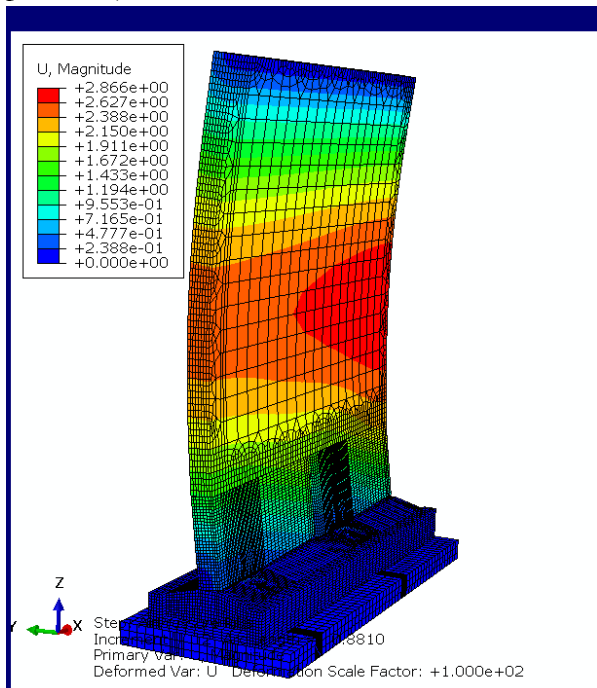


Figura 13. Resultados del análisis no-lineal global. Desplazamientos transversales (en mm).

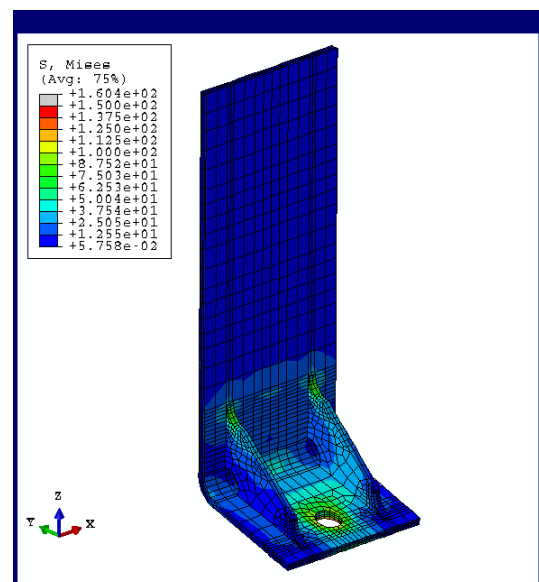


Figura 14. Resultados del análisis no-lineal global. Tensiones en el acero (en MPa).

En la Figura 15 se muestra la verificación de la precarga existente en los pernos transversales tras alcanzar el factor de carga de 2.1. Se observa como el valor resultante es de 63.9 kN, quedando muy cerca de los 65 kN de tesado inicial y pudiendo ser la diferencia fruto de desviaciones puramente numéricas.

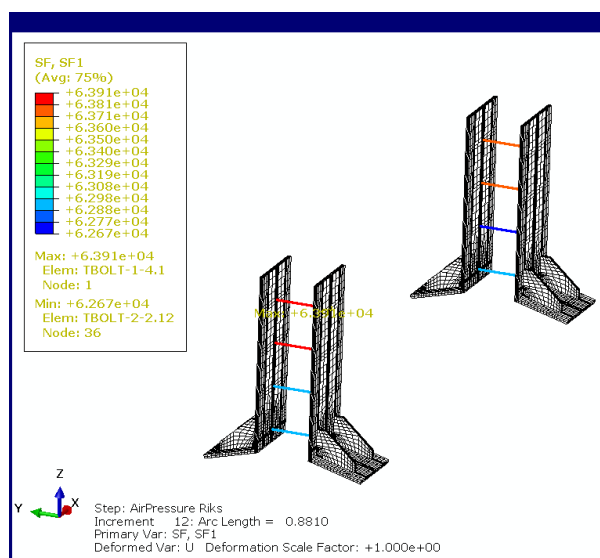


Figura 15. Carga (en N) de los pernos postesos tras alcanzar un multiplicador de sobrecarga de 2.1.

4. Conclusiones

En esta comunicación se presenta la modelización y reevaluación de un muro cortafuegos ejecutado en el marco de la modernización de un túnel de ferrocarril urbano.

Tras un cambio en parte de los elementos estructurales por parte de la propiedad, se consideró pertinente la reevaluación de parte del muro, ejecutada con hormigón reforzado con fibras, pues el resultado de las cargas y del comportamiento podían diferir considerablemente respecto al diseño inicial.

Una primera verificación elástica con comportamiento geométrico no-lineal (fruto de contactos con despegue) levantó sospechas sobre la seguridad del elemento prefabricado sobre el que apoyaba parte del muro.

Tras un análisis pormenorizado de las propiedades mecánicas del material, se constató que la capacidad del muro, más allá de cambios en las cargas externas sobre la estructura, era susceptible a la orientación de las fibras.

Un análisis detallado con modelos global no-lineal, incluyendo las observaciones previas en relación al material, confirmó las sospechas sobre la posible falta de seguridad frente al equilibrio transversal y de la resistencia de parte

del muro, derivado de la actualización de este y las cargas derivadas.

Con el objetivo de incrementar la seguridad del muro se define un refuerzo externo, condicionado por los ritmos y calendario de la obra, capaz de evitar la pérdida de equilibrio, a la par que se mejora la capacidad estructural del muro prefabricado. Dicha solución se verifica siguiendo las definiciones previas de los modelos no-lineales globales, resultando en multiplicadores de cargas suficientes para indicar una mejora en la seguridad del elemento.

Referencias

- [1] M. Domingo, «Structural Behavior of Fiber Reinforced Concrete Bridges», Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2025.
- [2] CEN, EN1990:2002 - *Eurocode: Basis of structural design*, 2002.
- [3] CEN, EN1991-2:2003 - *Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges*, 2003.
- [4] CEN, EN1992-1-1:2004 - *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, 2004.
- [5] fib, *Model Code 2010*. 1. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2012.
- [6] DAfStb, *DAfStb Guideline - Steel fibre reinforced concrete*, 2012.
- [7] G. Žirgulis, O. Švec, E. Vidal Sarmiento, M. R. Geiker, A. Cwirzen, y T. Kanstad, «Importance of quantification of steel fibre orientation for residual flexural tensile strength in FRC», *Mater. Struct.*, vol. 49, n.º 9, pp. 3861-3877, sep. 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0759-3.
- [8] Simulia, *ABAQUS/Analysis Users's Manual, Version 2020*. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp, 2020.
- [9] CEN, EN1992-2:2005 - *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 2: Concrete bridges - Design and detailing rules*, 2005.