

02-011

NEW COMPRESSIBLE MORTAR FOR EXCAVATIONS EXECUTED WITH TUNNEL BORING MACHINE (TBM)

Colomer Rosell, Ernesto⁽¹⁾; *Alcañiz Martínez, Jesús Herminio*⁽²⁾; *Potti Guindal, Álvaro*⁽¹⁾; *Real Herraiz, Julia Irene*⁽¹⁾; *Terrádez Navarro, Jesús*⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Matemática Multidisciplinar, UPV, ⁽²⁾ Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM)

This paper describes a new compressible mortar for excavations executed using Tunnel Boring Machine (TBM). Previous studies by different researchers establish the importance of considering pre-existing deformations and efforts history in the analysis of excavations, which requires a numerical model. Therefore, the objective of this article is to develop a new compressible mortar for filling between land and supporting that minimizes solicitations and makes displacements compatible. For this, the materials were characterized and the dosages to be tested were considered, estimating the ranges with Taguchi. A new test of the confined material was designed, for then manufactured and tested it. On the other hand, a numerical model was developed considering: land, mortar, invert precast concrete, water table, hydrostatic overpressures and progress of the TBM. Subsequently, different scenarios were simulated for short and long term, varying types of rock and disintegration rates, among others. Finally, similarities were found between the results for both terms, obtaining a good response from practically all mixtures (especially M7 and M8), which achieved a lower transmission of tensions. For all these reasons, the conclusion is that the new mortar makes it possible to combine displacements in the system, reducing deadlines, increasing security, and optimizing material volumes.

Keywords: mortar; excavation; TBM; numerical model; displacements

NUEVO MORTERO COMPRESIBLE PARA EXCAVACIONES EJECUTADAS CON TUNELADORAS DE ESCUDO (TBM)

Este artículo describe un nuevo mortero compresible para excavaciones ejecutadas mediante tuneladoras de escudo (TBM). Estudios previos de diferentes investigadores establecen la importancia de considerar las deformaciones preexistentes y el historial de esfuerzos en el análisis de excavaciones, lo que requiere de un modelo numérico. Por tanto, el objetivo de este artículo es desarrollar un nuevo mortero compresible para el relleno entre terreno y sostenimiento que consiga minimizar solicitaciones y compatibilizar desplazamientos. Para ello, se caracterizaron los materiales y se plantearon las dosificaciones a ensayar, estimando los rangos mediante Taguchi. Se diseñó un nuevo ensayo del material confinado, para después fabricarlo y ensayarlo. Por otra parte, se desarrolló un modelo numérico considerando: terreno, mortero, dovelas de hormigón, nivel freático, sobrepresiones hidrostáticas y avance de la TBM. Posteriormente, se simuló diferentes escenarios para corto y largo plazo, variando tipos de roca e índices de disgregación, entre otros. Finalmente, se encontraron similitudes entre los resultados para ambos plazos, obteniendo buena respuesta de prácticamente todas las mezclas (especialmente M7 y M8), que consiguieron una menor transmisión de tensiones. Por todo ello, se concluye que el nuevo mortero permite compatibilizar desplazamientos en el sistema, disminuyendo plazos, aumentando la seguridad, y optimizando volúmenes de materiales.

Palabras clave: mortero; excavación; TBM; modelo numérico; desplazamientos

Correspondencia: Álvaro Potti Guindal alvaropotti@gmail.com



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

El desarrollo tecnológico aplicado a la excavación de túneles ha alcanzado uno de los métodos más eficientes, seguros y económicos: las máquinas tuneladoras TBM. Dentro de esta metodología, la TBM de Escudo es capaz de colocar el sostenimiento perimetral definitivo de dovelas de hormigón a medida que va avanzando en la perforación, lo que supone llevar a cabo el proceso constructivo con grandes garantías incluso con condiciones de trabajo desfavorables (Pialarissi 2009).

Sin embargo, es precisamente lo que le confiere su principal ventaja, el sostenimiento inmediato de dovelas rígidas de hormigón, lo que imposibilita su uso para túneles excavados a grandes profundidades o a través de rocas y/o suelos de cierta inestabilidad. Esto se debe a que, las dovelas de hormigón por su diseño, material y misión deben ser altamente rígidas, ya que son instaladas inmediatamente tras la excavación, soportando así los empujes del terreno y no permitiendo una suficiente convergencia del terreno perimetral inestable que se extrae. Consecuencia directa de esto, sería la aparición de grandes sobrepresiones del material no excavado aplicadas de manera irregular sobre las dovelas, lo que derivaría en grandes problemas estructurales en estas piezas. Es por ende que esta metodología se vuelve difícil de emplear en estas situaciones, obligando a confeccionar un sostenimiento muy costoso tanto técnica como económicamente. (Barla 2000, Ramoni 2011a y Ramoni 2011b).

En la actualidad, después de realizar una exhaustiva revisión del estado del arte, no se ha encontrado una solución definitiva a este problema. De ahí surge la motivación de este trabajo, que pretende resolver la limitación de tensiones que los revestimientos de escudo TBM puede soportar, permitiendo de esta forma el empleo de esta técnica en suelos inestables (*squeezing ground*). Las actuales líneas de investigación en las que se desarrollan posibles soluciones al problema giran en torno a la idea de dotar de flexibilidad a los sostenimientos con dovelas prefabricadas (Ramoni 2011 y Cantieni 2010).

En base a dicha necesidad detectada, se encuentra una importante oportunidad tecnológica basada en el diseño y desarrollo de un nuevo mortero compresible que, siendo inyectado en el hueco anular entre el sostenimiento y el terreno no excavado, permita convertir un sostenimiento totalmente rígido como son las dovelas prefabricadas de hormigón, en un sistema de sostenimiento de convergencia compatible.

2. Objetivos

Este estudio pretende dar solución al empleo de la tecnología TBM de escudo en cualquier tipo de terreno, incrementando la eficiencia y seguridad, y superando las limitaciones técnicas actuales. En concreto, el objetivo general del trabajo es la propuesta de un nuevo mortero compresible para el relleno del espacio anular entre terreno y sostenimiento, mediante el cual se consigan minimizar las sollicitaciones que llegan a las dovelas de hormigón gracias a la compatibilización de convergencias en el sistema anillo-relleno anular-terreno. Para alcanzar dicho objetivo general, resulta necesario cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Estudio preliminar que sirva para, por un lado, identificar los diferentes escenarios para los que el nuevo material servirá y que, por otro lado, permita conocer las características de los morteros compresibles como sistema de convergencia compatible.
- Definición y caracterización del nuevo mortero compresible a través de un proceso de trabajo en laboratorio donde se fabriquen y ensayen diferentes configuraciones, y se lleven a cabo pruebas a nivel prototipo para la definición de modos de bombeo e inyección.

- Comprobación y análisis del correcto comportamiento de las configuraciones ensayadas en laboratorio, con el objetivo de optimizar y validar el mortero compresible a partir de una modelización mediante el método de elementos finitos del sistema anillo-relleno-terreno.

3. Metodología del diseño del nuevo mortero de relleno compresible

Para alcanzar los objetivos anteriormente descritos, el estudio se dividió en dos bloques principales:

1. Caracterización física y mecánica del mortero compresible: formulación en laboratorio y definición de modos de bombeo e inyección.
2. Caracterización del funcionamiento mediante la modelización numérica del sistema anillo-relleno-terreno.

La metodología que se ha planteado para el diseño del mortero (primer bloque) se inicia con el estudio y definición de las características necesarias para que este material cumpla correctamente con los objetivos que se plantean en el estudio. Definidas estas características, se han propuesto posibles insumos a añadir a las dosificaciones que potencien estas particularidades. Después, se han confeccionado distintas configuraciones de mortero atendiendo a un análisis estadístico que seleccione, de entre la infinidad de configuraciones posibles, aquellas que presenten un mayor interés potencial. Por último, respecto a la caracterización física y mecánica del mortero mediante ensayos de laboratorio, se plantea un análisis multicriterio para definir las mejores soluciones. Cabe destacar que el objetivo de la obtención de estos resultados no fue concluir que dosificación era la más apropiada, sino pretendían apoyar las diferentes decisiones que, como se explica posteriormente, fueron necesario tomar para la realización del modelo de la segunda fase.

Entrando en detalle, en esta siguiente fase (segundo bloque) se buscó caracterizar, mediante un número finito de escenarios, la respuesta de las dosificaciones propuestas frente a la infinidad de situaciones que se podrían dar en una excavación real. Para ello, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos que es capaz de simular gran parte de los escenarios reales que se pueden producir en las perforaciones realizadas con tuneladora TBM a altas profundidades para comprobar el comportamiento del mortero compresible. La herramienta informática empleado para llevar a cabo este desarrollo ha sido ANSYS Mechanical APDL.

3.1 Caracterización física y mecánica del mortero compresible

3.1.1 Características requeridas

En primer lugar, se definieron las características que se precisaban del mortero: compresibilidad, trabajabilidad y bombeabilidad.

Se ha buscado desarrollar un mortero que proporcione cierta flexibilidad al sostenimiento perimetral permitiendo así una convergencia controlada y limitada del terreno, de tal forma que este material absorba las deformaciones del terreno y alivie de tensiones a las dovelas de hormigón. Por lo tanto, una de las características principales que debía tener el mortero era la de poseer una relativa capacidad de deformación para así, asimilar los esfuerzos introducidos por el terreno. Atendiendo al comportamiento tenso-deformacional ideal del mortero se observa que la compresibilidad de este material depende fundamentalmente de la compresibilidad de los agregados y del volumen de poros interno del mortero. Cuanto más compresibles son los áridos y más huecos hay en la estructura interior, más deformación elástica se alcanza.

El mortero se ha ideado para que se pueda proyectar mediante bombeo en el hueco anular, por lo tanto, como base principal para su diseño, se debía dotar al material de una correcta

trabajabilidad y bombeabilidad. La trabajabilidad o docilidad es la propiedad que mide la capacidad para ser colocado y consolidado adecuadamente, con el acabado correcto sin riesgo de segregación. Por tanto, la docilidad exigida al mortero debía ser muy elevada (Instrucción de hormigón estructural [EHE], 2008). La bombeabilidad se define como la capacidad que posee la mezcla para fluir a través de un conducto debido a la presión ejercida por la bomba. Es necesario que permanezca homogéneo, sin segregar, a lo largo del tiempo del bombeo y durante todo su recorrido. Esto quiere decir que los diferentes componentes que forman la mezcla no deben separarse de tal forma que no se produzcan bloqueos de aquellos materiales con mayor tamaño. Se ha tenido en consideración este problema y se ha estudiado detenidamente las fracciones granulométricas de los agregados para que no se produzca este problema.

3.1.2 Insumos planteados para alcanzar las características requeridas

Se propuso incorporar distintos insumos a las dosificaciones que mejorasen las características buscadas, como sustitutos parciales del cemento, de los agregados y aditivos.

Respecto a la compresibilidad, se ha considerado sustituir la totalidad o parte de los agregados por gránulos de caucho procedente de NFU (neumático fuera de uso), obteniendo así un comportamiento más dúctil gracias al mecanismo de pandeo elástico introducido por el elastómero. Con la adición de este material, se consigue que el mortero sea capaz de absorber una mayor cantidad de energía plástica frente a importantes cargas antes de alcanzar la rotura. Los gránulos de caucho son capaces de actuar a modo de muelle, causando de este modo un retardo en el ensanchamiento de las fisuras, y evitando así la habitual rotura brusca que se da en morteros convencionales muy rígidos. Por tanto, la sustitución de áridos de elevada resistencia y rigidez por materiales de gran elasticidad, como es el NFU, contribuye a disminuir cuantitativamente la resistencia del mortero, mientras aumenta la ductilidad de este. Actuando sobre la granulometría del NFU y su porcentaje de inclusión en la mezcla es posible alcanzar el comportamiento óptimo requerido, consiguiendo un equilibrio entre resistencia y ductilidad (Royano et al 2011).

Además, atendiendo a la misma premisa, la retracción del mortero debe estar limitada y controlada durante y después del endurecimiento, por lo tanto, se consideró la posibilidad de añadir cenizas volantes, una adición con capacidades hidráulicas o puzolanas de bajo calor de hidratación que benefician esta capacidad (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [CEDEX], 2008). Las cenizas volantes disminuyen la generación de calor dentro de la masa del mortero, procurando así gradientes de temperatura más pequeños que reducen el riesgo de fisuración superficial. Por contrapartida, uno de los inconvenientes principales que presentan los morteros que cuenta con cenizas volantes es un retardo en el tiempo de fraguado (CEDEX 2008).

Teniendo en cuenta la pérdida de resistencia del material en favor de la elasticidad requerida, se planteó disponer de humo de sílice, empleado como sustituto parcial del cemento, para proporcionar más resistencia y durabilidad a las dosificaciones, generando así morteros de mayores resistencias. Además, esta adición mejora las características de bombeabilidad mejorando la finura de la mezcla (CEDEX 2008).

Los tres aditivos que se han propuesto, atendiendo a las características buscadas en el mortero, han sido los plastificantes/superplastificantes, oclusores de aire y modificadores de fraguado. Los aditivos plastificantes/superplastificantes se caracterizan por garantizar una determinada trabajabilidad a partir de una menor cantidad de agua. Esta facultad garantiza una fluidez suficiente para proceder al bombeo de la mezcla sin comprometer necesariamente la cohesión del mortero en estado fresco, sin lo cual podría dar pie a fenómenos de segregación o exudación. Los aditivos oclusores de aire actúan sobre el mortero una vez endurecido. Su cometido principal es introducir en el mortero una serie de partículas de aire adecuadamente distribuidas de forma que se aumente la compresibilidad del mortero. Esta

facultad es importante en el marco de este estudio, donde el objetivo principal es disponer de un mortero compresible. Por último, los modificadores de fraguado se encargan de aumentar o disminuir los tiempos de fraguado de la mezcla. En este caso se ha apostado por un aditivo acelerador de fraguado, de manera que la mezcla de cemento pueda endurecer rápidamente y entrar en carga lo antes posible. Una vez realizadas las valoraciones anteriores, se ha propuesto realizar una combinación entre estos tres aditivos para llevar a cabo las dosificaciones que se ensayarán posteriormente.

3.1.3 Dosificaciones y ensayos realizados

Como punto de partida para decidir las cantidades y tipo de elementos del mortero: cemento, áridos, agua, adiciones y aditivos; se tomaron las recomendaciones de la EFNARC (Federación europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos), en su documento *Specification and Guide lines for the use of specialist products for Mechanised Tunneling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock* donde se hacen diferentes especificaciones sobre los materiales hormigonados que pueden servir de relleno en este espacio anular.

A partir de las recomendaciones anteriores y el análisis previo de los requisitos necesarios del mortero, surgieron multitud de combinaciones posibles que definirían una infinidad de dosificaciones. Para conseguir un número pequeño de dosificaciones que representasen adecuadamente la variabilidad existente de configuraciones posibles se empleó el método factorial Taguchi. Un diseño de Taguchi es un experimento que se diseña y permite elegir los niveles y/o variables que funcionan con más consistencia dentro de un entorno operativo. En los diseños de Taguchi se asume que no todos los factores que causan variabilidad se pueden controlar, siendo conocidos estos factores como ruido. De este modo, los diseños de Taguchi tratan de encontrar factores controlables que mitiguen los efectos de los factores de ruido (Medina & Restrepo 2007). En este caso, se han elegido como factores controlables el tipo de cemento, el tipo de adición, el tipo de aditivo y la cantidad de NFU incorporada. Como configuraciones se han elegido tres niveles de variabilidad por cada factor. Con ello, lo que supondría una combinación de 3⁴ posibilidades mediante el método Taguchi se reduce a tan solo 9 dosificaciones planteadas que representan adecuadamente las posibilidades totales.

Respecto a los materiales, se han empleado cementos de dos resistencias diferentes: 52.5 MPa y 42.5 MPa. A su vez, para 52.5 MPa se dan dos variantes: de resistencias iniciales rápidas y resistente a sulfatos. Las adiciones empleadas son las cenizas volantes y el humo de sílice. En cuanto a los aditivos, se ha empleado espumante, superplastificante y aditivo modificador del fraguado. Las combinaciones de estos insumos dan lugar a las dosificaciones que se presentan en la Tabla 1 y las proporciones de material de la Tabla 2.

Tabla 1: Dosificaciones de los morteros a ensayar. Fuente: Elaboración propia

	Cemento	Adición	Aditivo	NFU (%)
1	CEM I 52,5 N/SR	Cenizas volantes	Espumante	100
2	CEM I 52,5 N/SR	Humo de sílice	Espumante + Superplastificante	75
3	CEM I 52,5 N/SR	-	Espumante + Modificador del fraguado	50
4	CEM I 52,5 R	Cenizas volantes	Espumante + Superplastificante	50
5	CEM I 52,5 R	Humo de sílice	Espumante + Modificador del fraguado	100
6	CEM I 52,5 R	-	Espumante	75
7	CEM I 42,5 R	Cenizas volantes	Espumante + Modificador del fraguado	75
8	CEM I 42,5 R	Humo de sílice	Espumante	50
9	CEM I 42,5 R	-	Espumante + Superplastificante	100

Tabla 2: Cantidades de las dosificaciones de los morteros. Fuente: Elaboración propia

	Cemento (Kg/m3)	Adición (Kg/m3)	Aditivo (Kg/m3)	NFU (Kg/m3)	Agua (l/m3)
1	190	190	5	150	140
2	190	190	4 + 1	112,5	140
3	380	-	4 + 1	75	140
4	190	190	4 + 1	75	140
5	190	190	4 + 1	150	140
6	380	-	5	112,5	140
7	190	190	4 + 1	112,5	140
8	190	190	5	75	140
9	380	-	4 + 1	150	140

Para la comparación y estudio de las anteriores dosificaciones se realizaron una serie de ensayos de caracterizado física y mecánica. Estos ensayos se indican en la Tabla 3.

Tabla 3: Ensayos realizados a las dosificaciones propuestas. Fuente: Elaboración propia

1.- Determinación de la distribución granulométrica (UNE EN 1015-1)	9.- Exudación del mortero.
2.- Resistencia a flexotracción (UNE EN 1015-11)	10.- Exudación bajo presión del mortero. Probeta cilíndrica de diámetro 150 mm y altura 150mm.
3.- Resistencia a compresión simple (UNE EN 1015-11)	11.- Fluidez, viscosidad y capacidad de relleno (UNE EN 12350-9).
4.- Determinación de la consistencia (UNE EN 1015-3).	12.- Módulo secante de elasticidad (UNE EN 12390-13)
5.- Densidad en estado fresco (UNE EN 1015-6).	13.- Tiempo de fraguado (UNE EN 480-2).
6.- Periodo de trabajabilidad (UNE EN 1015-9).	14.- Cambio de longitud/relajación/contracción (UNE EN 13872).
7.- Contenido del aire del mortero fresco (UNE EN 1015-7).	15.- Prueba de inmersión o lavado de mortero sobre muestra en estado fresco.
8.- Permeabilidad. Sistema automático de 4 presiones de determinación de permeabilidad sobre probeta cilíndricas normalizadas a 28 días.	16.- Determinación de la fricción interna. Determinación mediante prensa triaxial de la cohesión y el ángulo de rozamiento.

3.1.4 Resultados de los ensayos físicos y mecánicos de los morteros

En el momento que se dispusieron de los resultados de los ensayos se elaboró un análisis multicriterio valorando todos los resultados según su grado de importancia. Se puntuó de 1 a 9 los resultados y se mayoraron aquellos ensayos que caracterizaban propiedades de mayor interés. Esta mayoración se realizó dividiendo los ensayos en 4 grupos:

- Ensayos sin ningún tipo de mayoración: aquellos necesarios, pero con poca influencia en las prestaciones del mortero.

- Ensayos mayorados mediante un coeficiente 3: aquellos que miden propiedades con una influencia ocasional en las prestaciones del mortero (deformación del anillo en el ensayo a compresión confinada y el cambio de volumen).
- Ensayos mayorados mediante un coeficiente 5: aquellos que evalúen propiedades que puedan afectar a las propiedades básicas demandadas en este trabajo de forma indirecta (trabajabilidad, fraguado y exudación bajo presión).
- Ensayos mayorados mediante un coeficiente 10: aquellos que miden las propiedades básicas que debe poseer el mortero del estudio (bombeable en estado fresco y compresible una vez haya fraguado).

Los resultados obtenidos tras el análisis multicriterio se han mostrado en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultado numérico de los ensayos para dosificación. Fuente: Elaboración propia

Ensayos/dosificaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flexotracción (MPa)	2	6	9	4	2	6	9	3	7
Compresión (MPa)	1	5	7	4	2	8	9	3	6
Confinada (MPa)	1	2	6	7	4	8	9	3	5
Anillo (mm)	15	18	27	21	24	3	6	9	12
Consistencia (mm)	70	30	40	30	10	60	80	50	90
Trabajabilidad (h)	25	5	10	35	35	15	25	45	20
Fraguado (h)	5	40	45	35	10	30	20	15	25
Huecos (%)	30	70	50	80	20	60	90	10	40
Embudo en "v"	10	20	50	60	40	30	80	70	90
Exudación normal	5	8	3	2	4	6	9	1	7
Exudación B. Presión	10	45	25	15	5	40	30	35	20
Permeabilidad	3	4	9	5	7	2	6	1	8
Módulo elasticidad	20	60	30	40	80	70	10	90	50
Cambio de longitud	9	6	18	15	12	3	24	21	27
Pérdida de masa (%)	4	9	2	7	3	5	6	1	8
Cohesión (N/mm2)	2	3	7	5	1	6	9	4	8
Total	212	331	338	365	259	352	422	361	423

En la tabla anterior se observa que las dosificaciones 7 y 9 son con diferencia aquellas que reúnen mayores propiedades para ser seleccionadas como la dosificación definitiva. La dosificación 7 es la que mejores resistencias tiene de todas las analizadas, además, consigue el volumen de huecos idóneo que se estaba buscando (en torno al 25 %). En cambio, la dosificación 9 es aquella que presenta una mayor fluidez, ya que obtiene los mejores resultados en los ensayos de consistencia y capacidad de relleno. Respecto al módulo de elasticidad, aunque ambas dosificaciones no presenten los valores más bajos, estos siguen estando muy por debajo de un mortero convencional. Conociendo las características de todas las distintas dosificaciones se han podido modelizar estas para introducirlas dentro del modelo numérico y estudiar su funcionamiento.

3.2 Caracterización del funcionamiento mediante modelización numérica

Los resultados anteriores junto con el análisis multicriterio realizado solo reflejan una valoración previa de las dosificaciones planteadas a nivel de laboratorio. Por si solos estos resultados no aportan la información necesaria para concluir que mezcla es la adecuada. Esta información se ha estudiado con la modelización realizada en este apartado. La simulación de los distintos escenarios de excavaciones de túneles empleando cada dosificación ha sido la prueba última que definió el mortero óptimo de este estudio. Además, para tener un dato clave de comparación se ha introducido en las simulaciones, a parte de las 9 dosificaciones anteriores, una dosificación de un mortero convencional (módulo de Young (E) = 5 GPa y coeficiente de Poisson (ν) = 0,2); de tal forma que los resultados ofrecidos del funcionamiento de cada dosificación puedan ser comparados con los de una convencional.

3.2.1 Hipótesis adoptadas para la modelización

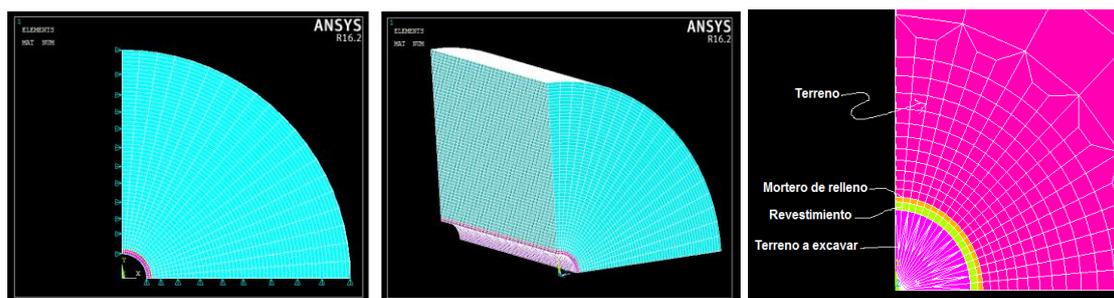
La reproducción de las condiciones que pueden darse en la excavación de un túnel bajo el riesgo de fluencia del terreno (*squeezing ground*) resulta un problema muy complejo.

Las dificultades principales son: la heterogeneidad del terreno, el elevado grado de no linealidad que induce la propia fluencia de la roca al problema, la necesidad de modelos de con un elevadísimo coste computacional debido a las grandes dimensiones que se les debe conceder para permitir una adecuada distribución tensional y el desconocimiento e incertidumbre que implica predecir el comportamiento del terreno. Para poder llevar a cabo una simulación que permita caracterizar la respuesta de los nuevos morteros ha sido necesario adoptar una serie de simplificaciones que faciliten la elaboración de un modelo apto para su procesado numérico en un tiempo razonable, las cuales se describen en los apartados siguientes.

3.2.2 Condiciones de contorno y geometría global del sistema

Para evitar un coste computacional excesivo se recurrió a una geometría cilíndrica-recta, donde, recurriendo a simetría radial de forma y carga se ha conseguido emplear únicamente una cuarta parte de cilindro para reproducir el comportamiento total. Para poder aplicar esta simplificación, es necesario que la carga también sea simétrica radialmente, lo que implica, necesariamente, que ésta sea uniforme. Otra simplificación en este sentido ha sido que solo se dispone de una única carga actuante en el problema: la presión sobre el contorno que simula tanto la presión de la roca exterior al modelo, como el peso propio de la misma dentro del modelo. Visto de otra forma, en el modelo se ha considerado que la presión actuante es uniforme y de igual valor vertical que horizontal. De este modo, se puede representar como una única presión radial dirigida hacia el eje longitudinal de la excavación, permitiendo así simplificar la geometría por simetría de forma y carga a un cuarto de cilindro en lugar de al cilindro completo o su mitad, y muy notablemente las dimensiones de este. Además, el no tener en cuenta la distinta respuesta del terreno en horizontal y vertical permite conocer la respuesta del sistema revestimiento-mortero frente a un valor de sollicitación del terreno sin importar dónde éste se produzca. Esta explicación se representa en la Figura 1.

Figura 1: Geometría del modelo y condiciones de vinculación. Fuente: Elaboración propia



Las condiciones geométricas que se han impuesto permiten que los puntos de control donde se va a analizar el estado tenso-deformacional estén suficientemente alejado de los contornos y, además, que se permita una correcta redistribución de tensiones tras el paso del TBM. Para ello, se ha empleado una longitud del terreno perimetral al túnel de 10 diámetros de este, es decir unos 90 metros. Por otro lado, se han impedido los siguientes desplazamientos atendiendo a la hipótesis de simetría de forma y carga:

- Desplazamiento longitudinal en las caras frontal y dorsal del modelo, correspondientes a las embocaduras de entrada y salida del TBM.
- Desplazamiento circunferencial de los planos de simetría horizontal y vertical del modelo, correspondientes a los planos ubicados a 0° y 90°.

Sólo se ha permitido la convergencia radial del modelo. Esto corresponde con un planteamiento en deformación plana de cada una de las secciones transversales del mismo, lo que sí induciría tensiones longitudinales reproduciendo así la respuesta del terreno a autoequilibrarse al paso de la tuneladora.

3.2.3 Modelización de materiales

Se ha asumido la simplificación de considerar todos los materiales homogéneos e isotrópos. Esta aproximación, en el caso de un proyecto real de construcción sería discutible pero el enfoque de ‘estudio comparativo’ de este estudio permite asumirlo sin mayor repercusión. Es por ello por lo que se ha considerado suficiente modelizar los materiales de la siguiente forma:

- Terreno: material viscoelástico lineal según el modelo de Maxwell. Caracterizado por módulo de Young (E), módulo de corte inicial (G), coeficiente de Poisson (ν) y coeficiente de viscosidad dinámica (μ). El terreno es el encargado, mediante el modelo de Maxwell, de aportar la respuesta diferida en el tiempo de la descompresión tras el paso del TBM.
- Hormigón de revestimiento: material elástico lineal. Se caracteriza a través del módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν).
- Mortero compresible: material elástico lineal. Se caracteriza a través del módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν). Puesto que por las dificultades planteadas anteriormente debidas a las limitaciones del ‘software’ no resulta recomendable modelizar el endurecimiento del mortero modificando el módulo de elasticidad entre pasos de carga, se ha recurrido a una técnica ampliamente extendida en otras investigaciones que consiste en sustituir el mortero en fase de endurecimiento por una presión equivalente ejercida contra las paredes de la excavación tras el paso del cabezal de corte. Este procedimiento resulta razonable si se tiene en cuenta el rápido endurecimiento que experimenta el mortero de relleno en sus primeras horas de vida. Se ha utilizado en el proyecto de importantes túneles en los Alpes y aparece detallado en Barla (2012). Cabe también mencionar que no se han tenido en cuenta posibles efectos de retracción y fluencia ni del hormigón ni del mortero. Las propiedades mecánicas de las mezclas ensayadas, a efectos de su introducción en el modelo numérico, se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Síntesis de dosificaciones para la simulación. Fuente: Elaboración propia

Dosificación	E (GPa)	ν	Dosificación	E (GPa)	ν
1	7,50	0,2	6	2,1	0,2
2	2,20	0,2	7	9,4	0,2
3	5,70	0,2	8	1,1	0,2
4	5,40	0,2	9	5,1	0,2
5	1,9	0,2	Convencional	5	0,2

3.2.4 Simulación de escenarios

Para la determinación de los escenarios de cálculo se han adoptado también hipótesis importantes, condicionadas principalmente por evitar que el número de casos a procesar se elevase a cifras inadmisibles. Teniendo en cuenta que para cada escenario de cálculo deben procesarse 10 mezclas, incluyendo la de comparación, puede intuirse que el tiempo de computación aumenta rápidamente con el número de escenarios. Es por ello por lo que se ha buscado minimizar el número de variables para agilizar los procesos sin perder representatividad. Se ha buscado basar los casos de estudio en aquellas variables independientes que necesariamente deben modelizarse para obtener resultados representativos de toda la casuística posible.

Siguiendo esta metodología se determinó que la litología de la roca se componía principalmente de dos variables: propiedades mecánicas de la roca y estado del macizo rocoso. Por otra parte, tanto la presión actuante, como la profundidad y la velocidad de avance podían correlacionarse con las anteriores. Se asignó a cada tipo litológico una profundidad con un riesgo de fluencia entre moderado y elevado, lo que conlleva inmediatamente a una presión exterior propia. Además, la velocidad del TBM también está relacionada con la litología, de modo que no resulta una alternativa de estudio ya que puede correlacionarse con lo anterior. La geometría debe ser cilíndrica en todos los casos y se ha escogido un diámetro común y constante para todos los escenarios, del entorno de los 9 metros, que es un valor común en este tipo de construcciones. De este modo, los escenarios se basan únicamente en las alternativas de tipo de roca, representado por las características mecánicas y estado de disgregación del macizo a través del índice GSI.

Con ello, los parámetros que se han elegido para definir los escenarios son los siguientes:

- Diámetro (D) de 9 metros y longitud (L) de 11 metros de la tuneladora.
- Tipologías de roca (R), atendiendo a la resistencia a compresión (σ_{ci}) y el índice que evalúa la textura del material y su naturaleza (m_i).
- Grados de daño para cada tipología (G), en función del estado del macizo.
- Velocidades de avance de la tuneladora (V) dependientes del estado del macizo y de la litología y, por tanto, 5 tiempos de retardo (T) para la longitud aproximada de 11 metros entre frente de excavación e implantación del revestimiento.
- Presión uniforme radial (P) y hacia el eje del túnel en el contorno del modelo. El valor de dicha presión se ha establecido en función de la profundidad para la cual, siguiendo el criterio de Hoek & Marinos (2000), se predice un grado de convergencia severa de entre el 5 y el 10% del diámetro de la excavación. Se ha establecido que la presión será igual al peso de la columna de terreno que tenga por encima el túnel siempre y cuando no se superen los 2.000 m (límite actual) o la resistencia a compresión simple del material.
- Sobreexcavación adicional (SE1) de 65 centímetros teniendo en cuenta el espesor inicial de la capa de mortero (25 centímetros) y el espesor de la capa de revestimiento (40 centímetros).

El resultado de combinar todos los factores anteriores resulta en los 9 escenarios plasmados en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultado numérico de los ensayos para dosificación. Fuente: Elaboración propia

ESCENARIOS PROPUESTOS	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
	R1	R1	R1	R2	R2	R2	R3	R3	R3

ESCENARIOS PROPUESTOS	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Características mecánicas del terreno (σ_{ci} en MPA y mi)	50	50	50	25	25	25	10	10	10
	17	17	17	25	5	25	7	7	7
Índice de estado del macizo rocoso	G85	G50	G25	G85	G50	G25	G85	G50	G25
	0,85	0,5	0,25	0,85	0,5	0,25	0,85	0,5	0,25
Velocidad de avance (m/h)	V1	V2	V3	V2	V3	V4	V3	V4	V5
	6	4,5	3	4,5	3	1,5	3	1,5	0,5
Tiempos de retardo (h)	T1	T2	T3	T2	T3	T4	T3	T4	T5
	2	2,5	4	2,5	4	8	4	8	22
Presión inicial del terreno (MPa)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
	50	50	18,8	25	18,8	50	37,5	7,5	2,5
Diámetro de excavación (m)	D1								
	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Sobreexcavación (m)	SE1								
	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65

4. Resultados

El dato más relevante que han mostrado las simulaciones ha sido la variación de tensiones en las dovelas de sostenimiento del túnel en función del escenario y de la mezcla de mortero empleada. En la Tabla 5 se muestran los resultados en tanto por ciento (%) de alivio de tensiones en el contorno comparando el empleo de cada una de las dosificaciones del nuevo mortero con el empleo de un mortero convencional (mortero de comparación). Es decir, cuanto más elevados sean los valores mejor respuesta ha tendido en comparación con el mortero convencional. Si los valores son negativos es que ha obtenido un resultado menos eficiente.

Tabla 5: Alivio de tensiones respecto a mortero convencional. Fuente: Elaboración propia

Dosificaciones	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
1	0.1	0.4	0.8	2.1	2.3	2.6	2.9	2.9	3.6
2	2.2	1.7	1.0	-1.4	-2.0	-2.6	-3.1	-3.3	-4.4
3	-0.1	0.0	0.2	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.0
4	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6
5	3.0	2.5	1.5	-1.3	-2.0	-2.7	-3.4	-3.6	-4.9
6	2.5	2.0	1.1	-1.3	-2.0	-2.6	-3.2	-3.4	-4.6
7	0.4	0.9	1.6	3.7	4.1	4.6	4.9	5.0	6.2
8	7.4	6.4	4.9	0.3	-1.0	-2.4	-3.7	-4.1	-6.3
9	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2

Los resultados muestran que algunos morteros tienen peores resultados frente al mortero convencional en algunos escenarios (véanse los valores negativos en la Tabla 5). Los valores de reducción de tensiones máximos los ofrecen los morteros 7 y 8, con unos valores en torno al 6% en algunos escenarios. Además, con estos datos, también se extraen los siguientes análisis:

- Debido a la modelización del terreno como un material visco elástico, se ha conseguido simular una respuesta de tensión-convergencia de forma diferida en el tiempo sobre el revestimiento y el relleno, consiguiendo así la respuesta esperada por parte del modelo.
- La introducción de las diferentes mezclas de relleno no ha influido en los valores de convergencia radial de cada escenario, siendo cada uno de estos valores diferentes entre sí en una horilla de 0 a 25 centímetros.
- La mezcla 8 ha conseguido una importante disminución de las tensiones en el revestimiento, en los escenarios donde la roca es más competente y rígida (escenarios del 1 al 4).
- Las mezclas que mejores datos han tenido en el análisis global de las simulaciones del modelo numérico ha sido la 7, mejorando en todos los escenarios al mortero convencional, y obteniendo los mejores resultados en las simulaciones más complejas (escenarios del 5 al 9).

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un mortero con características más dóciles e importante compresibilidad para ser inyectado en el hueco anular entre el sostenimiento y el terreno no excavado. De esta forma el mortero puede realizar un mejor reparto de tensiones sobre el contorno rígido de las dovelas de hormigón. Para ello se han elaborado 9 dosificaciones distintas de mortero atendiendo a las características requeridas para la función de este mortero: bombeabilidad, compresibilidad y trabajabilidad; todo ello sin descuidar una resistencia mínima estructural. Estas dosificaciones han sido sometidas a ensayos físico y mecánicos normalizados para estudiar y caracterizar sus propiedades. Con estos datos se han realizado diferentes simulaciones numéricas mediante un modelo de elementos finitos para corroborar su comportamiento en el sostenimiento de túneles. En estas simulaciones se ha contado con un gran número de escenarios posibles que atendían a los diferentes factores variables de la excavación: tipo y estado del terreno, geometrías, condiciones de la excavación, etc. De este desarrollo se han extraído las siguientes ideas principales:

- La dosificación 7 presenta los mejores resultados en los ensayos de laboratorio, consiguiendo un gran equilibrio entre volumen de aire interno y resistencia a compresión, además de tener muy buenos resultados en propiedades como la consistencia y la trabajabilidad.
- El fenómeno de *squeezing ground* es altamente complejo de simular por el alto grado de no linealidades que tiene el terreno, lo cual ha necesitado de la adopción de simplificaciones para no haber tenido un alto coste computacional.
- Se ha reproducido el comportamiento esperado del terreno y del fenómeno sin anomalías mediante el empleo del modelo desarrollado.
- Se ha comprobado como las propiedades de las distintas mezclas de mortero propuestas han afectado a la interacción entre el terreno y el revestimiento.
- La mezcla 8 es idónea para escenarios de roca competente, consiguiendo una reducción en la tensión media del revestimiento del 5%.

- La mezcla 7 se ha mostrado más favorable que una mezcla convencional en todos los escenarios y su respuesta mejora a medida que se reduce la rigidez del terreno. Sumado al hecho de que ha sido la que mejor valoración ha tenido en los análisis de laboratorio, se convierte en la mezcla idónea para el empleo en terrenos con fenómenos más notorios de *squeezing ground* y de esta forma, el mortero de referencia de este estudio.

6. Referencias

- Barla, G., & Pelizza, S. (2000, November). TBM tunnelling in difficult ground conditions. In ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Cantieni, L., & Anagnostou, G. (2009). The interaction between yielding supports and squeezing ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(3), 309-322.
- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). *Cenizas volantes. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*
- CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas). Humo de sílice. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
- Fomento, M. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. *Fomento, Madrid, España*
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and tunnelling international*, 32(11), 45-51.
- Medina, P. D., Cruz, E. A., & Restrepo, J. H. (2007). Aplicación del modelo de experimentación Taguchi en un ingenio azucarero del Valle del Cauca. *Scientia Et Technica*, 1(34).
- Pialarissi Cavalaro, S. H. (2009). *Aspectos tecnológicos de túneles construidos con tuneladora y dovelas prefabricadas de hormigón*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2010). Tunnel boring machines under squeezing conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 139-157.
- Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2011). The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(1), 37-61.
- Ramoni, M., Lavdas, N., & Anagnostou, G. (2011). Squeezing loading of segmental linings and the effect of backfilling. *Tunnelling and underground space technology*, 26(6), 692-717.
- Royano García, V., Valls del Barrio, S., Barra Bizinotto, M., & Vázquez Ramonich, E. (2011, November). Estudio de hormigones con adición de polvo de neumáticos fuera de uso (NFU). In *Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins*. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona.
- Zhao, K., Janutolo, M., & Barla, G. (2012). A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(4), 475-497.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

