

Desarrollo de una nueva metodología para asegurar la convergencia compatible entre terreno excavado y dovela en la construcción de túneles mediante tecnología TBM de Escudo.*

*Development of a new methodology to ensure compatible convergence between excavated land and voussoir in tunnel construction using TBM Shield technology.***

Ernesto Colomer Rosell^a, Julia Real Herraiz^b, Fran Ribes Llarío^c, Carlos Canales Guerola^d, Miriam Labrado Palomo^e, Ana Sancho Bru^f

^a Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Investigador en el IMM de la UPV, ercoro1@upv.es

^b Dra. Ing. de Caminos Canales y Puertos y Directora del IMM de la UPV, jureaher@tra.upv.es

^c Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Investigador en el IMM de la UPV, frarilla@upv.es

^d MBA en Dirección Financiera y Fiscal, Responsable económico de proyectos en el IMM de la UPV, ryekel88@gmail.com

^e Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Investigadora en el IMM de la UPV, milabpa@upv.es

^f Ing. De Obras Públicas, Investigadora en el IMM de la UPV, ansanbru@upv.es

RESUMEN

El mortero usado en el sostenimiento mediante dovelas prefabricadas en excavaciones con tuneladora no permite la convergencia del terreno excavado en terrenos con cierta inestabilidad, lo que produce una concentración de altas tensiones en el sostenimiento, comprometiendo su estabilidad. En este artículo se expone el desarrollo de un nuevo mortero, que aporta flexibilidad al sistema permitiendo un mejor reparto de tensiones, cuyas propiedades mecánicas son validadas mediante ensayos de laboratorio y cuyo comportamiento en excavaciones es validado mediante simulaciones numéricas de elementos finitos.

ABSTRACT

Grout used in precast concrete tunnel structural support in tunnel boring machine (TBM) excavations doesn't allow convergence in unstable soils; this leads to high stress concentration in the structural support and jeopardies structural support stability. In this paper a new grout is developed, which provides flexibility to the structural system, allowing a better tension distribution, whose mechanical properties are validated through lab tests and in place behaviour is validated through finite element numerical simulations.

PALABRAS CLAVE: mortero flexible, tuneladora., convergencia del terreno, MEF, simulación.

KEYWORDS: flexible grout, tunnel boring machine, squeezing ground, FEM, simulation.

1. Introducción

La tecnología más eficiente, segura y económica para la construcción de túneles es el método en

auge con tuneladora (TBM) que tiene una gran proyección, pues se espera que se emplee en el 40% de los más de 16 000 km de túneles que se prevén construir en los próximos 15 años. Entre los diferentes tipos de tuneladoras, destacan las que son capaces de colocar el

sostenimiento definitivo del túnel mediante dovelas de hormigón prefabricadas a medida que avanza la excavación, lo que supone un importante ahorro de dinero y tiempo respecto a otras tecnologías.

La rigidez de las dovelas prefabricadas de hormigón impide que se produzca convergencia suficiente del terreno excavado, lo que se traduce en altas tensiones en excavaciones a grandes profundidades o a través de rocas de cierta inestabilidad (“squeezing ground”). Estas tensiones pueden comprometer la estabilidad del sostenimiento, lo que imposibilita la aplicación de este método en dichas circunstancias [1] [2].

Frente a esta problemática, se ha desarrollado y validado una tecnología basada en empleo de un mortero compresible inyectado en el espacio anular entre el terreno y las dovelas prefabricadas.

Sus características físico-mecánicas han sido verificadas mediante ensayos de laboratorio, y su comportamiento en túneles a corto y largo plazo mediante una simulación numérica usando el método de los elementos finitos.

2. Mortero de relleno C-COM

2.1. Características requeridas

Se ha buscado desarrollar un mortero que confiera capacidades flexibles al sostenimiento con dovelas prefabricadas que permita una convergencia controlada del terreno y manteniendo unas deformaciones en el terreno mínimas.

El mortero C-COM está compuesto de cemento, áridos, aditivos, adiciones y partículas de caucho de neumático reciclado (NFU), siendo este último el que le conferirá al material la flexibilidad buscada.

Además, este mortero debe cumplir los requisitos necesarios para su inyección, como

una buena trabajabilidad, bombeabilidad y alta estabilidad.

2.2. Dosificaciones y ensayos realizados

Basadas en los requisitos del mortero deseado se plantean 9 dosificaciones diferentes combinando cuatro factores según el modelo factorial de Taguchi, cuyos factores, todos ellos a tres niveles, son:

- Tipo de cemento.
- Adición.
- Aditivo.
- Porcentaje de NFU.

Se han empleado cementos de dos resistencias características diferentes, 52.5 MPa y 42.5 MPa, el de mayor resistencia en dos variantes, de resistencias iniciales rápidas y resistente a sulfatos.

Las adiciones empleadas han sido cenizas volantes o humo de sílice, también se plantean combinaciones sin adiciones.

En cuanto a los aditivos, se ha empleado espumante, superplastificante y aditivo modificador del fraguado.

Las combinaciones de estos componentes dan lugar a las dosificaciones que se presentan en la Tabla 1.

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

	CEMENTO	AD.	ADITIVO	NFU(%)
1	CEM I 52,5 N/SR	CV ¹	Espumante	100
2	CEM I 52,5 N/SR	HS ²	Esp + SP ³	75
3	CEM I 52,5 N/SR	-	Esp + MF ⁴	50
4	CEM I 52,5 R	CV	Esp + SP	50
5	CEM I 52,5 R	HS	Esp + MF	100
6	CEM I 52,5 R	-	Espumante	75
7	CEM I 42,5 R	CV	Esp +MF	75
8	CEM I 42,5 R	HS	Espumante	50
9	CEM I 42,5 R	-	Esp + SP	100

¹Cenizas volantes
²Humo de sílice
³Superplastificante
⁴Modificador del fraguado.

Para la obtención de la dosificación óptima respecto a los requisitos mencionados, se realizaron una serie de ensayos físico mecánicos, según normativa, que caracterizaran

su comportamiento mecánico, consistencia, densidad, volumen de huecos, trabajabilidad, y módulo de elasticidad, entre otros, que se exponen a continuación:

- Determinación de la distribución granulométrica (UNE EN 1015-1)
- Resistencia a flexotracción (UNE EN 1015-11)
- Resistencia a compresión simple (UNE EN 1015-11)
- Determinación de la consistencia (UNE EN 1015-3).
- Densidad en estado fresco (UNE EN 1015-6).
- Periodo de trabajabilidad (UNE EN 1015-9).
- Contenido del aire del mortero fresco (UNE EN 1015-7).
- Fluidez, viscosidad y capacidad de relleno (UNE EN 12350-9).
- Exudación del mortero.
- Exudación bajo presión del mortero, sobre probeta cilíndrica de diámetro 150mm y altura 150mm.
- Permeabilidad. Determinada mediante sistema automático de 4 presiones con capacidad para la determinación de permeabilidad en suelos sobre probeta

cilíndrica de 50mm de diámetro y 100mm de altura a 28 días.

- Módulo secante de elasticidad (UNE EN 12390-13)
- Tiempo de fraguado (UNE EN 480-2).
- Cambio de longitud/relajación/contracción (UNE EN 13872).
- Prueba de inmersión o lavado de mortero sobre muestra en estado fresco.
- Determinación de la fricción interna. Determinación mediante prensa triaxial de la cohesión y el ángulo de rozamiento.

2.3. Resultado de los ensayos

Para comparar el comportamiento global entre las dosificaciones es necesario dar una escala y un peso a los resultados.

En cada ensayo se ha concedido 1 punto al registro más desfavorable y 9 puntos al más favorable, asimismo se ha dado un peso de 10 a los ensayos que miden características determinantes, un peso de 5 a aquellas características que afectan a las propiedades determinantes de una forma indirecta, y un peso de 3 a los resultados de los ensayos que miden propiedades con que tienen una influencia ocasional en las prestaciones del mortero.

En la *Tabla 2* se presentan los resultados.

Tabla 2. Resultado numérico de los ensayos para cada dosificación.

DOSIFICACIÓN	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 2 se observa que las dosificaciones 7 y 9 son las que mejores resultados proporcionan. La dosificación 7 destaca por sus resistencias e índice de huecos, cerca del óptimo, mientras que la dosificación 9 destaca por su consistencia fluida y capacidad de relleno.

3. Modelización del problema

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos que engloba el problema de la excavación con tuneladora a altas profundidades para comprobar el comportamiento del mortero C-COM, desarrollado en ANSYS MAPDL v.16.7.

3.1. Elementos intervinientes en la excavación con tuneladora.

Los elementos que intervienen en la excavación con tuneladora de escudo, relevantes en el desarrollo del modelo numérico, son:

- Terreno. Suelo o roca.
- Tuneladora y escudo.
- Nivel freático.
- Dovelas.
- Mortero de relleno.
- Elementos de estabilización y mejora del terreno.

El terreno se modeliza como un material visco elástico lineal, correspondiente al modelo de Maxwell, y se caracteriza por su módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, módulo de corte y coeficiente de viscosidad dinámica.

El mortero C-COM se introduce siguiendo los parámetros tenso-deformacionales obtenidos de los ensayos en laboratorio. El revestimiento se modeliza como

elástico lineal. Se han hecho las siguientes hipótesis y consideraciones generales:

- Los elementos son homogéneos, continuos e isótropos.
- La profundidad de la excavación es tal que la variación de presión entre la bóveda y la contra bóveda resulta despreciable.
- No se considera nivel freático en el cálculo.
- La sección del túnel será circular.
- No se considera el efecto de corte y avance de la tuneladora.
- La excavación se introduce como un efecto variable en el tiempo en el modelo. El efecto del TBM será la desactivación de los elementos que compongan el terreno que se encuentre en su avance, dejando tras de sí un cilindro hueco – túnel- en cuyo contorno se activarán, con un determinado desfase, los elementos del revestimiento y del mortero de relleno C-COM.

3.2. Geometría y condiciones de contorno

El criterio de dimensionamiento está basado en experiencias previas ampliamente aceptadas por la comunidad científica aplicable a suelos susceptibles de presentar “squeezing” [3] [4] [5], y establece una longitud de quince diámetros de excavación en la dirección longitudinal y diez diámetros en dirección transversal para evitar las influencias de borde.

Debido a la doble simetría del problema en geometría y carga, se trabaja con un modelo de la cuarta parte de la sección por cuestiones

prácticas, en un modelo cilíndrico tridimensional.

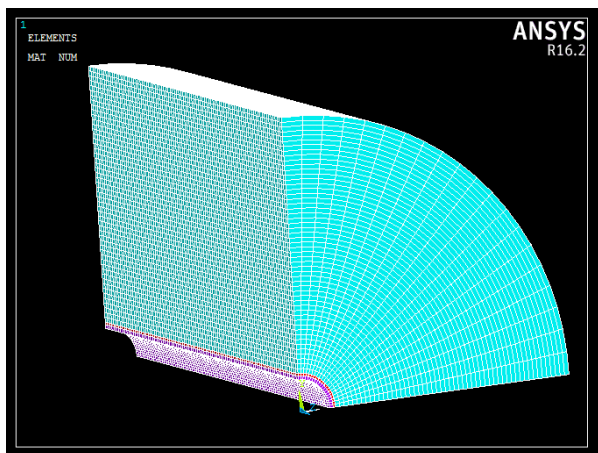


Ilustración 1. Vista del modelo de elementos finitos.
Fuente: elaboración propia.

Las condiciones de contorno adoptadas toman como referencia las de las investigaciones citadas previamente, que consisten en coacciones al desplazamiento en la dirección normal al plano que delimita en todos los nodos de dicho plano, y que permiten los desplazamientos en el propio plano y las tres rotaciones.

La acción gravitatoria y empujes del terreno se han modelizado como una presión uniforme en la dirección radial. Para no considerar por duplicado estas cargas, se ha obviado el valor del peso propio del terreno que obtiene automáticamente el programa, dándole un carácter genérico al proyecto.

El terreno se ha modelizado siguiendo el modelo visco elástico de Maxwell, de forma que al aplicar una presión sobre el terreno circundante, éste comenzará a deformarse reduciendo su volumen.

La acción de la tuneladora se introduce desactivando los elementos a su paso, lo que provoca un nuevo desequilibrio y adaptación del terreno que converge hacia el interior de la perforación, simulando el “squeezing”.

3.3. Simulación de escenarios

En el caso que nos ocupa, los escenarios dependen casi exclusivamente de las propiedades de los materiales que intervienen y

del tiempo, tanto del fraguado y endurecimiento del mortero como el que transcurre entre la excavación y la inyección del mortero.

Variando los parámetros del módulo de elasticidad, módulo de corte y viscosidad dinámica que caracterizan cada material y el factor tiempo se abarcan los escenarios buscados.

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
1	7,50	0,2
2	2,20	0,2
3	5,70	0,2
4	5,40	0,2
5	1,90	0,2
6	2,10	0,2
7	9,40	0,2
8	1,10	0,2
9	5,10	0,2
Convencional	5,00	0,2

3.4. Parámetros del modelo

Los parámetros que se han variado en el modelo son:

- **Diámetro** de la excavación (9 metros y 15 centímetros). Resultan de un diámetro interior del túnel D_1 de aproximadamente 8 metros y 50 centímetros, más una excavación adicional S_{e1} de 65 centímetros ($S_{e1} = e_1 + e_2$; siendo e_1 el espesor inicial de la capa de mortero con un valor de 25 centímetros, y e_2 el espesor de la capa de revestimiento con un valor de 40 centímetros)
- **Características mecánicas** de cada tipo de terreno, definiendo la resistencia a compresión (σ_{ci}) y el índice que evalúa la textura del material y su naturaleza (m_i): para R1, $\sigma_{ci} = 50$ MPa y $m_i = 17$; para R2, $\sigma_{ci} = 25$ MPa y

$m_i=25$; y para R3, $\sigma_{ci}= 10$ MPa y $m_i=7$

- **Índices de estado** del macizo rocoso (G85 corresponde con un GSI 85 e indica muy buen estado, G50 corresponde con un GSI 50 e indica degradación media y G25 corresponde con un GSI 25 e indica degradación elevada)
- **Velocidades de avance** dependientes del estado del macizo y de la litología y, por tanto, 5 tiempos de retardo –para la longitud aproximada de 11 metros entre frente de excavación e implantación del revestimiento–(V1: 6m/h y t1: 2h; V2:

4,5m/h y t2: 2,5h; V3: 3m/h y t3: 4h; V4: 1,5m/h y t4: 8h; V5: 0,5m/h y t5: 22h)

- **Presión actuante en el contorno** del modelo o carga. Se ha establecido que la presión será igual al peso de la columna de terreno que tenga por encima el túnel. Esto resulta en una presión diferente para cada escenario, cuyos valores fueron: P1= 50 mPa; P2=50 mPa; P3=18,75 mPa; P4= 25 mPa; P5=18,75 mPa; P6= 5 mPa; P7= 37,5 mPa; P8= 7,5 mPa, y P9= 2,5 mPa.

La combinación de parámetros a simular es la siguiente:

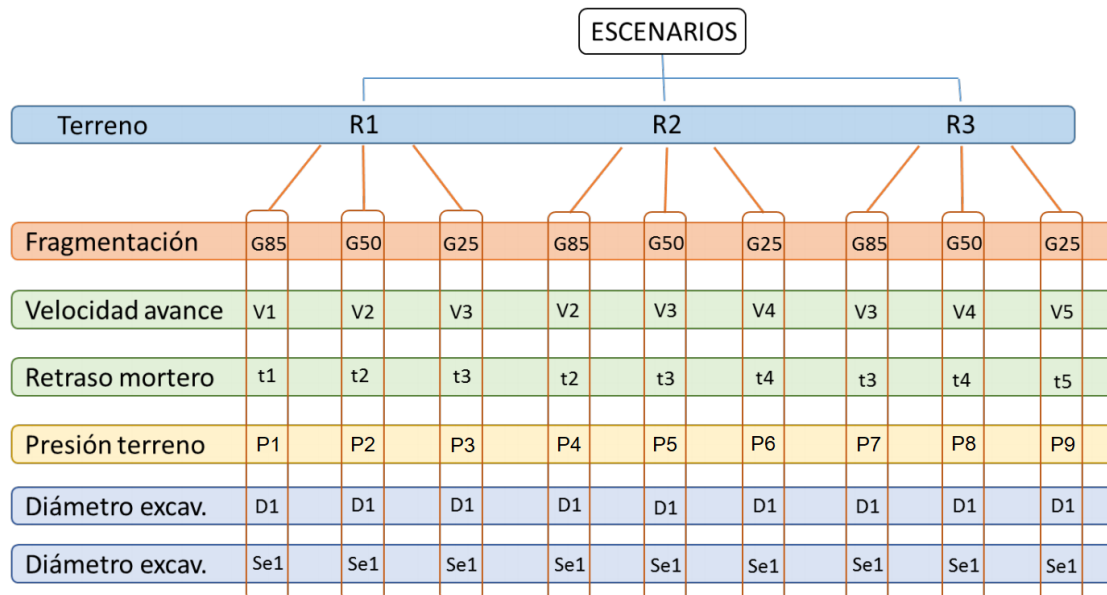


Ilustración 2. Casos simulados. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Resultados de la simulación

Los resultados obtenidos del alivio de tensiones en el revestimiento (Tabla 4) muestran un alivio máximo que oscila entre el 6 y el 7% respecto a un mortero convencional. De los resultados se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El modelo responde acorde a lo esperado en su concepción. Se ha conseguido una respuesta de tensión-convergencia sobre los

elementos de revestimiento y relleno de forma diferida en el tiempo gracias a la modelización del terreno como un material visco elástico.

- Los valores de convergencia radial en cada escenario han sido diferentes en el rango 0-25 cm, la introducción de diferentes mezclas no ha afectado a este valor.
- Todas las mezclas simuladas han mostrado mejoras de alivio de tensiones en al menos

un escenario de sollicitación respecto al mortero convencional.

- Las mezclas 7 y 8 son las que mejor respuesta han proporcionado, tanto a corto plazo (durante la excavación) como a largo plazo.
- Los escenarios E1, E4 y E7, donde la roca es más rígida y competente, la mezcla M8 produce una notable disminución de las tensiones en el revestimiento.
- En rigideces bajas del terreno, la dosificación 7 es la que mejores resultados presenta respecto a una solución de mortero convencional.
- Debido a los valores de viscosidad empleados, la convergencia y estabilización de tensiones se produce en las primeras horas tras la excavación, por lo que los resultados entre corto y largo plazo son muy similares.

Tabla 4. Alivio de tensiones respecto a mortero convencional en tanto por ciento. Fuente: Elaboración propia.

	E1	E4	E7	E2	E5	E8	E3	E6	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

4. Elección del mortero

La dosificación 7 presenta los mejores resultados en los ensayos con un criterio basado en la importancia de cada uno de ellos. Consigue los mejores valores de volumen de aire y la resistencia a compresión confinada y resultados muy buenos en las pruebas de

consistencia y trabajabilidad, situándose como la dosificación seleccionada.

5. Conclusiones

Ante la problemática de sobretensiones en el sostenimiento de dovelas prefabricadas de hormigón en excavaciones con tuneladora, se ha desarrollado un nuevo mortero con características flexibles que consigue un mejor reparto de las tensiones. Se han elaborado 9 dosificaciones distintas basadas en las características requeridas para el nuevo mortero. Estas dosificaciones han sido sometidas a ensayos físico mecánicos de laboratorio para validar sus propiedades y se ha realizado una simulación numérica mediante un modelo de elementos finitos para comparar su comportamiento en el sostenimiento de túneles. De este desarrollo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El fenómeno de “squeezing” es complejo por el alto grado de no linealidad que gobierna la respuesta del terreno, que se traduce en un coste computacional, y que empuja a adoptar simplificaciones en el modelo.
- El modelo ha reproducido el comportamiento esperado y sin anomalías.
- La modificación de las propiedades del modelo afecta a la rigidez del mortero, y esta a su vez a la interacción entre el terreno y el revestimiento.
- Para la mezcla 8, en todos los escenarios de roca competente, la reducción en la tensión media del revestimiento ha sido de al menos el 5%.
- A partir de cierta rigidez del terreno (sobre 12 MPa) la dosificación 7 resulta más favorable.
- La dosificación 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.

Agradecimientos

En agradecimiento a la Dra. Julia Irene Real Herráiz, por el tiempo dedicado y formación transmitida al presente equipo investigador.

Referencias

M. Ramoni and G. Anagnostou, "The
1] Interaction Between Shield, Ground and
Tunnel Support in TBM Tunneling
Through Squeezing Ground," *Rock Mechanics
and Rock Engineering*, pp. 37-61, 2011.

M. Ramoni, N. Lavdas, and G.
2] Anagnostou, "Squeezing loading of
segmental linings an the effect of
backfilling," *Tunnelling and Underground Space
Technology*, pp. 692-717, 2011.

K Zhao, G Barla, and M Janutolo, "A
3] completely 3D Model for the Simulation of
Mechanized Tunnel Excavation," *Rock
Mechanics Engineering*, pp. 475-494, 2012.

C Yoo, "Performance of multi-face
4] tunnelling - A 3D numerical investigation,"
2009.

G Barla, "Full-face excavation of large
5] tunnels in difficult conditions," 2016.